

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALENCAR RIBEIRO CARVALHO**

**CONTRIBUIÇÕES PARA PROJETO DE**  
**GERADORES SÍNCRONOS DE**  
**GRANDE PORTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências  
em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

**ORIENTAÇÃO: DR JOSÉ POLICARPO GONÇALVES DE ABREU**

**CO-ORIENTAÇÃO: DR DÉLVIO FRANCO BERNARDES, DR. JOCÉLIO SOUZA**  
**DE SÁ**

Junho de 2011

Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALENCAR RIBEIRO CARVALHO**

**CONTRIBUIÇÕES PARA PROJETO DE**  
**GERADORES SÍNCRONOS DE**  
**GRANDE PORTE**

**ORIENTAÇÃO: DR JOSÉ POLICARPO GONÇALVES DE ABREU**

**CO-ORIENTAÇÃO: DR DÉLVIO FRANCO BERNARDES, DR. JOCÉLIO SOUZA**  
**DE SÁ**

Junho de 2011

Itajubá - MG

# DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado a Deus sempre em primeiro lugar em tudo que faço.*

## **AGRADECIMENTOS**

- ❖ À minha esposa e filhos que muito me incentivaram a concluir este trabalho após tanto tempo longe da universidade, embora tenha custado precioso convívio em muitas situações.
- ❖ Aos professores Jocélio Souza de Sá e Délvio Franco Bernardes que investiram seu tempo, ensinamentos, dedicação e orientação, sem a ajuda dos quais o trabalho não teria sido concluído.
- ❖ Ao professor José Policarpo Gonçalves de Abreu que abraçou a orientação desde o início do trabalho.
- ❖ À Alstom pela parceria, paciência, e incentivo para que o trabalho viesse a ser concluído.

## **RESUMO**

Na literatura atual pouca ênfase tem sido dada no estudo da teoria de máquinas elétricas propriamente ditas. Assim, a contribuição do trabalho se encaixa justamente nesta lacuna, alertando para as possibilidades de inovações.

Procura-se também dar uma visão materializada dos elementos de circuito representativos da máquina síncrona, para que a conjugação dos efeitos propicie alternativas inovadoras.

Os aquecimentos também foram contemplados, numa tentativa de abordar uma vertente de inovação para o aproveitamento dos mesmos.

Primordialmente, porém, o trabalho versa sobre as principais bases para a definição de uma máquina síncrona levando em consideração as limitações tanto no caráter materiais, como fabricação e montagem, de modo a abranger toda a parte ativa da máquina. Evidentemente há um sem número de definições de caráter mecânico que são necessários para o complemento do estudo da máquina propriamente dita, que não foram aqui abordadas.

A contribuição fundamental é o retorno às bases para a sedimentação do conhecimento e abertura do campo para inovações.

## **ABSTRACT**

The literature currently available has been paying less attention to studies concerning the theory of Electrical Machines c machines itself. Thus, the contribution of this MSc thesis takes account of this flaw, emphasizing the potential for innovation.

This work also gives a practical point of view concerning the circuitry elements that represents a synchronous machine, so that the combined effects looking for innovative alternatives.

Heating aspects have been also used as an attempt to achieve innovation features.

Initially, this work discusses the main principles for the understanding of a synchronous machine taking into account the limitations regarding materials, fabrication and assembly, in order to cover the whole active part of the machine. Obviously there are several definitions related to mechanical aspects that are needed to complement the studies, which were not addressed in this work.

The main contribution is the going back to the main principles at the solidification of its knowledge and openness to innovation.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- $a$  número de circuitos em paralelo por fase
- $A_1$  fator de densidade periférica de corrente do estator [A/m]
- $A_g$  fator de densidade periférica de corrente de reação da armadura [A/m]
- $A_l$  fator de densidade periférica de corrente correspondente aos ampères espiras do entreferro, isto é, proporcional à relação de curto circuito [A/m]
- $B_1$  amplitude da onda fundamental, indução no entreferro [T]
- $b_{r1}$  Largura do condutor parcial nu (direção largura da barra) [mm]
- $b_p$  largura da sapata polar [mm]
- $B_\delta$  indução máxima no entreferro [T]
- $b_{cp}$  largura do corpo do pólo [mm]
- $b_D$  largura do pescoço da ranhura de amortecimento [mm]
- $C$  calor específico do corpo [W.seg/(kg.°K)]
- $C$  fator de utilização do gerador  $\frac{VA}{m^3 / rpm}$
- $C_d$  fator de atenuação de eixo direto
- $C_q$  fator de atenuação de eixo em quadratura
- $C_i$  constante de integração

- $c\rho$  capacidade térmica volumétrica do fluido refrigerante que no caso do **ar** a 40°C vale aproximadamente  $1,14 \left[ \frac{kW \cdot seg}{m^3 \cdot K} \right]$
- $D_i$  diâmetro interno do estator [m]
- $f$  frequência da rede [Hz]
- $G$  massa do corpo [kg]
- $GD^2$  momento de inércia (efeito volante) do gerador  $\mathbf{kg} \cdot m^2$
- $H$  constante de inércia [kW.seg/kVA]
- $Hn$  diferença de nível entre montante e jusante no local [m]
- $h_D$  altura do pescoço da ranhura de amortecimento [mm]
- $I_r$  fator de corrente por ranhura [A]
- $I_N$  corrente nominal do estator [A]
- $I_{exc}$  corrente nominal de excitação [A]
- $isol$  Espessura da isolação do condutor parcial [mm]
- $I_{fase0}$  (teste) corrente do estator, no instante em que a tensão medida nos terminais da excitação for nula [A]
- $I_{faseM}$  (teste) corrente do estator, no instante em que a tensão medida nos terminais da excitação for máxima [A]
- $ke$  fator empírico adimensional (aproximadamente 2)

- $k_{deseq}$  fator de desequilíbrio de carga
- $k$  fator empírico do campo principal
- $k_{sw}$  fator de saturação para oscilações de potência ativa
- $k_{sb}$  fator de saturação para oscilações de potência não ativa
- $L$  comprimento total do pacote de chapas do estator [m]
- $l$  altura do núcleo do estator sem canais de ventilação [m]
- $L_c$  altura do canal de ventilação [mm]
- $L_{cu}$  largura do cobre da bobina de excitação [mm]
- $L_{polo}$  comprimento do núcleo polar [m]
- $l_{fc}$  distancia percorrida pelo fluxo de calor [m]
- $m$  número de fases
- $n_N$  rotação nominal da turbina [rpm]
- $N_c$  número de canais de ventilação.
- $N_r$  número de ranhuras do estator
- $n_d$  rotação de disparo da turbina [rpm]
- $n$  número de pólos em que as “Z” bobinas devem estar distribuídas.
- $N_{cond}$  número de condutores parciais por barra
- $N_{serie}$  número de espiras ou barras em série por fase

- $N_{exc}$  número de espiras do enrolamento de excitação
- $N_p$  numero de barras amortecedoras por pólo
- $p$  número de pares de pólos do gerador
- $P$  potência do aproveitamento [kW]
- $P_p$  potencia a ser dissipada (transformada em calor) [kW]
- $q$  número de ranhuras por pólo por fase
- $Q_{seg}$  secção transversal do segmento de curto entre as barras amortecedoras  $\text{mm}^2$  -
- $Q_{cd}$  quantidade de calor a ser transmitido por condução [W.seg]
- $Q_{cv}$  quantidade de calor a ser transmitido por convecção [W.seg]
- $Q_{rd}$  fluxo de calor irradiado de uma superfície  $\left[ \frac{\text{W} \cdot \text{seg}}{\text{m}^2} \right]$
- $r_a$  resistência da armadura [ohm].
- $R_{th_{cd}}$  resistência térmica de condução do meio no qual o calor está sendo transmitido [ $^{\circ}\text{C}/\text{W.seg}$ ]
- $r_{Dq}$  resistência do enrolamento amortecimento eixo em quadratura [ohm].
- $r_e$  resistência do enrolamento excitação [ohm].

- $r_{Dd}$  resistência do enrolamento amortecimento eixo direto [ohm].
- $R_{th_{cv}}$  resistência térmica de convecção entre a superfície e o meio refrigerante no qual o calor está sendo transmitido [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}\cdot\text{seg}$ ]
- $S_p$  potência por pólo do gerador [kVA]
- $S_N$  potência nominal do gerador [kVA]
- $S_{cond}$  seção do condutor parcial  $\text{mm}^2$  .
- $S_{barra}$  seção da barra, que inicialmente pode ser estimada pela densidade de corrente  $\text{mm}^2$  .
- $S_3$  densidade de corrente máxima admissível para as barras amortecedoras  $\text{mm}^2$  .
- $S$  área do corpo através da qual o calor é transferido  $\text{m}^2$  .
- $S_i$  área da superfície irradiadora  $\text{m}^2$  .
- $T_a$  constante de tempo da armadura [seg].
- $T$  temperatura termodinâmica da superfície irradiadora [ $^{\circ}\text{K}$ ]
- $t$  tempo no qual temperatura do corpo é  $\theta$  [seg]
- $U_N$  tensão nominal do estator [kV]
- $U_{Bi\text{ max}}$  tensão no estator na fase sem curto, em caso de curto bifásico no estator [V]

- $Vl$  vazão de água no local  $\left[ \frac{m^3}{seg} \right]$
- $Vol$  volume interno do estator  $m^3$
- $V_{espira}$  tensão por espira ou por barra [V]
- $V_{fase0}$  (teste) tensão do estator, no instante em que a tensão medida nos terminais da excitação for nula [V]
- $V_{faseM}$  (teste) tensão do estator, no instante em que a tensão medida nos terminais da excitação for máxima [V]
- $\dot{V}$  Vazão do fluido de refrigeração necessária dissipar o calor gerado na máquina  $\left[ \frac{m^3}{seg} \right]$
- $\omega$  velocidade angular do campo girante  $2 \cdot \pi \cdot f$  [rad/seg]
- $X_q''$  reatância sub-transitória de eixo em quadratura [ohm]
- $X_d''$  reatância sub-transitória de eixo direto [ohm]
- $X_{a\sigma}$  reatância de dispersão da armadura [ohm]
- $X_{n\sigma}$  reatância de dispersão das ranhuras do estator [ohm]
- $X_{s\sigma}$  reatância de dispersão das cabeças de bobina estator [ohm]
- $X_{medido}$  reatância medida do estator sem rotor. [ohm]
- $X_{B\sigma}$  reatância de dispersão do furo do estator, (do vazio

deixado no estator pela falta do rotor) [ohm]

- $X_d$  reatância síncrona de eixo direto [ohm]
- $X_q$  reatância síncrona de eixo em quadratura [ohm]
- $X_h$  reatância do campo principal [ohm]
- $X_{hd}$  reatância do campo principal com fator de atenuação no eixo direto  $X_{hd} = X_h \cdot C_d$  [ohm]
- $X_{hq}$  reatância do campo principal com fator de atenuação no eixo em quadratura  $X_{hq} = X_h \cdot C_q$  [ohm]
- $X_{ds}$  reatância síncrona de eixo direto saturada [ohm]
- $X'_d$  reatância transitória de eixo direto [ohm]
- $X'_q$  reatância transitória de eixo em quadratura [ohm]
- $X_{L\sigma}$  reatância auxiliar de dispersão dos enrolamentos de excitação e amortecedor [ohm]
- $X_{e\sigma}$  reatância de dispersão do enrolamento de excitação, referida ao estator [ohm]
- $X_{Dd\sigma}$  Reatância de dispersão do enrolamento amortecedor no eixo direto referida ao estator [ohm]

- $X_{Dq\sigma}$  Reatância de dispersão do enrolamento amortecedor no eixo em quadratura referida ao estator [ohm]
- $X_2$  reatância de seqüência negativa [ohm].
- $Z$  número mínimo de ranhuras (bobinas) que devem ficar em série por fase.
- $Z_{th1}$  Número total de condutores parciais por barra
- $\alpha_{transp}$  Ângulo total da transposição em graus
- $\alpha$  coeficiente de convecção da superfície para o fluido refrigerante  $\left[ \frac{W \cdot seg}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
- $\beta$  fator de campo
- $\delta_0$  entreferro nominal medido no centro do pólo [mm]
- $\Delta\theta_{cd}$  diferença de temperatura entre as superfícies que o calor será transmitido [°C]
- $\Delta\theta_{cv}$  diferença de temperatura entre a superfície e o fluido refrigerante onde o calor será transmitido [°C]
- $\varepsilon_1$  fator de enrolamento do estator para a onda fundamental
- $\varepsilon_{n\sigma}$  fator adimensional empírico que depende da geometria da ranhura do estator, normalmente varia de 1 a 2 para máquinas síncronas de pólos salientes.
- $\varepsilon_{s\sigma}$  fator adimensional empírico que depende da geometria da

cabeça de bobina do estator, normalmente varia de 1 a 2 para máquinas síncronas de pólos salientes.

- $\Lambda'$  fator empírico para condutividade da dispersão no enrolamento de excitação, depende da geometria do pólo e enrolamento de excitação. Para máquinas de grande numero de pólos costuma variar de 5 a 6. Para máquinas com menor numero de pólos corrigir o valor para

$$\Lambda' \cdot \left(1 + \frac{2}{p}\right) \text{ [V.seg/A]}$$

- $\Lambda_D$  fator empírico para condutividade da dispersão no enrolamento amortecedor, depende da geometria do pólo e das barras amortecedoras, sua posição e quantidade.

$$\text{Normalmente } \Lambda_D = L_{\text{polo}} \cdot \left(0,623 + \frac{h_D}{b_D}\right) \text{ [V.seg/A]}$$

- $\gamma$  fator que reflete a densidade periférica de corrente no rotor correspondente a A1 no estator, em função da relação de cobertura do pólo  $\frac{b}{\tau_p}$ . Varia normalmente entre 0,68 a 0,78 conforme geometria do pólo.

- $\lambda$  fator de emissão de calor do corpo  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}}$

- $\lambda_{\text{transp}}$  Passo da transposição [mm]

- $\lambda_{\text{cd}}$  capacidade de condução de calor do material [W.seg/(m.°C)]

- $\mu_0$  permeabilidade magnética do ar, que vale

aproximadamente  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

- $\sigma$  coeficiente de irradiação da superfície  $\left[ \frac{W \cdot \text{seg}}{m^2 \cdot K^4} \right]$
- $\sum Q_3$  somatória das secções transversais de todas as barras amortecedoras por pólo  $\text{mm}^2$ .
- $\tau_p$  passo polar [m]
- $\tau_n$  passo de ranhura do estator [mm]
- $\tau'_{d0}$  constante de tempo transitória de eixo direto em vazio [seg].
- $\tau'_d$  constante de tempo transitória de eixo direto em curto [seg].
- $\tau''_{d0}$  constante de tempo sub transitória de eixo direto em vazio [seg].
- $\tau''_d$  constante de tempo sub transitória de eixo direto em curto [seg].
- $\tau''_{q0}$  constante de tempo sub transitória de eixo em quadratura em vazio [seg].
- $\tau''_q$  constante de tempo sub transitória de eixo em quadratura em curto [seg].

- $\tau_{Dd0}$  constante de tempo enrolamento amortecedor de eixo direto em vazio [seg].
- $\tau_{Dd}$  constante de tempo enrolamento amortecedor de eixo direto em curto [seg].
- $\tau_A$  constante de tempo de partida [seg]
- $\Gamma$  constante de tempo de aquecimento do corpo [seg]
- $\theta$  temperatura do corpo [°K]
- $\theta_f$  temperatura final do corpo [°K]
- $\theta_{ref}$  aquecimento do fluido refrigerante [°C]. Temperatura final menos temperatura inicial  $\theta_{ref} = \theta_f - \theta_i$
- $v_d$  velocidade tangencial de disparo do rotor [m/seg]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Fator de utilização “C”.....	44
Figura 4.2 Corte de uma ranhura típica.....	53
Figura 4.3 Chapa do estator coroa e dentes.....	55
Figura 4.4 Adensamento de corrente.....	56
Figura 4.5 Transposição de uma barra Roebel 360°.....	57
Figura 4.6 Pólos Típicos de uma máquina síncrona de pólos salientes.....	63
Figura 4.7 Distribuição típica de campo na superfície polar.....	65
Figura 4.8 Trajetória do fluxo magnético em uma máquina síncrona de pólos salientes de 4 pólos.....	67
Figura 5.1 Reatância da máquina em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.....	76
Figura 5.2 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias: Síncrona de eixo direto e Síncrona de eixo em quadratura.....	77
Figura 5.3 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias; Transitória de eixo direto e Transitória de eixo em quadratura.....	81
Figura 5.4 Reatâncias Transitórias em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.....	82
Figura 5.5 Circuito equivalente da máquina em operação transitória....	84
Figura 5.6 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias, sub transitória de eixo direto e sub transitória de eixo em	

quadratura.....	86
Figura 5.7 Reatâncias Sub Transitórias em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.....	87
Figura 5.8 Circuito equivalente da máquina em operação sub transitória (eixo direto).....	89
Figura 5.9 Circuito equivalente da máquina em operação sub transitória (eixo quadratura).....	89
Figura 5.10 Representação das constantes de tempo para o amortecimento das correntes.....	91
Figura 5.11 Circuito equivalente na condição transitória em vazio.....	93
Figura 5.12 Circuito equivalente na condição transitória em curto.....	94
Figura 5.13 Circuito equivalente na condição sub transitória em vazio	95
Figura 5.14 Circuito equivalente na condição sub transitória em curto.....	96
Figura 5.15 Circuito equivalente na condição sub transitória em vazio (considerando valores em quadratura).....	97
Figura 5.16 Circuito equivalente na condição sub transitória em curto (considerando valores em quadratura).....	98
Figura 5.17 Circuito equivalente na condição em vazio (considerando o enrolamento amortecedor).....	99
Figura 5.18 Circuito equivalente na condição em curto (considerando o enrolamento amortecedor).....	100
Figura 6.1 Desenho de corte de um hidrogerador típico de pólos salientes com os caminhos da refrigeração.....	112

# SUMÁRIO

Dedicatória.....	3
Agradecimentos.....	4
Resumo.....	5
Abstract.....	6
Lista de abreviaturas e símbolos.....	7
Lista de figuras.....	18
Sumário.....	20
1) Introdução.....	24
1.1) Relevância do tema.....	24
1.2) Estrutura da dissertação.....	25
1.3) Nota importante.....	26
2) Evolução dos materiais e cálculo.....	27
2.1) História da eletricidade e magnetismo.....	27
2.2) Historia desenvolvimento de geradores.....	28
2.3) Materiais.....	34
3) Influencia das máquinas motrizes.....	36
3.1) Hidrogeradores.....	36
3.2) Turbogeneradores.....	38
4) Elementos básicos para o cálculo.....	40
4.1) Considerações iniciais.....	40

4.2) Grandezas a serem observadas.....	41
4.3) Volume da máquina.....	43
4.4) Definição do enrolamento.....	48
4.5) Ranhura e coroa do estator.....	52
4.5.1) Ranhura.....	52
4.5.2) Coroa do estator.....	54
4.6) Barra do estator.....	55
4.7) Isolação da barra e condutores.....	59
4.8) Entreferro e características dos pólos.....	62
4.9) Enrolamento de excitação.....	66
4.10) Enrolamento amortecedor.....	68
4.11) Solicitações mecânicas das partes ativas.....	71
4.12) Considerações finais.....	71
5) Reatâncias e constantes de tempo.....	73
5.1) Considerações iniciais.....	73
5.2) Reatância de dispersão da ranhura.....	74
5.3) Reatâncias síncronas.....	75
5.3.1) Método de medida.....	77
5.3.2) Método para cálculo.....	78
5.3.3) Efeito da saturação.....	79
5.4) Reatâncias transitórias.....	80
5.4.1) Método de medida.....	81

5.4.2) Método para cálculo.....	83
5.4.3) Efeito da saturação.....	84
5.5) Reatâncias sub transitórias.....	84
5.5.1) Método de medida.....	85
5.5.2) Método para cálculo.....	88
5.5.3) Efeito da saturação.....	90
5.6) Constantes de tempo em máquinas síncronas.....	91
5.7) Constante de tempo da armadura.....	92
5.8) Constante de tempo transitória eixo direto em vazio.....	92
5.9) Constante de tempo transitória eixo direto em curto.....	93
5.10) Constante de tempo sub transitória eixo direto em vazio.....	95
5.11) Constante de tempo sub transitória eixo direto em curto.....	96
5.12) Constante de tempo sub transitória eixo quadratura em vazio.....	94
5.13) Constante de tempo sub transitória eixo quadratura em curto.....	95
5.14) Constante de tempo enrolamento amortecedor eixo direto em vazio.....	99
5.15) Constante de tempo enrolamento amortecedor eixo direto em curto.....	100
5.16) Constante de tempo de partida.....	101

5.17) Valores típicos de reatâncias e constantes de tempo.....	102
5.18) Considerações finais.....	103
6) Aquecimento e refrigeração.....	104
6.1) Considerações iniciais.....	104
6.2) Fontes de calor.....	105
6.3) Elevação de temperatura.....	107
6.3.1) Condução .....	107
6.3.2) Convecção.....	108
6.3.3) Irradiação.....	109
6.3.4) Aquecimento de um corpo sólido.....	109
6.4) Tipos de refrigeração.....	111
6.4.1) Externa.....	111
6.4.2) Interna.....	111
6.5) Considerações sobre a ventilação necessária .....	112
6.6) Normas de representação de refrigeração.....	113
6.7) Considerações finais.....	114
7) Conclusões.....	115
7.1) Conclusões e contribuições.....	115
7.2) Sugestões para trabalhos futuros.....	116
8) Referências bibliográficas.....	118

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - RELEVÂNCIA DO TEMA

É comum principalmente no meio acadêmico, a afirmação de que a engenharia é uma ciência da “área de exatas”. Evidentemente que as leis básicas que regem os fundamentos da engenharia (lei de Faraday, lei de Newton, lei de Ampère, etc) são exatas. Por outro lado, um fator se intromete na aplicação destas leis básicas, é o fator econômico e de processo. Como exemplo cita-se a fabricação de equipamentos e máquinas elétricas. Onde é comum encontrar-se uma definição do tipo “a seção do condutor do enrolamento do estator para o projeto de uma dada máquina pode ser definido nos limites de certos valores, não se fixando em um valor exato”.

A consequência imediata desta proposta técnico-econômica é uma série de equações de cunho empírico, que evidentemente são fundamentadas nas leis básicas, mas que não são “puramente exatas”, o que ocorre principalmente no projeto e construção de geradores grande porte.

Com base em uma experiência adquirida ao longo de trinta anos no projeto de geradores hidrelétricos de grande porte, esta dissertação de mestrado tem por objetivo apresentar alguns dos principais tópicos a serem observados no projeto de grandes máquinas.

Esta experiência está calcada na participação do projeto de grandes máquinas no mercado nacional entre as quais algumas estão relacionadas a seguir:

Paulo Afonso IV 132,4 MVA

Tucuruí 390 MVA

---

Salto Caxias	345 MVA
Monte Claro	72,6 MVA
Castro Alves	48,5 MVA
14 de Julho	56 MVA
Barra Grande	245 MVA
Foz do Chapecó	225 MVA
Estreito	151,8 MVA

Desta forma este texto trata de determinadas condições operacionais das máquinas síncronas com base em informações adquiridas experimentalmente e não advindas de uma equação exata, porém que em momento algum confrontam-se com os fundamentos da engenharia elétrica.

## **1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação contém os seguintes itens:

### **Capítulo 1 - Introdução**

Apresenta os objetivos, motivações e contribuições do trabalho.

### **Capítulo 2 - Evolução dos materiais e Cálculo**

Apresenta o histórico da evolução e a influência dos materiais e dos métodos de cálculo.

### **Capítulo 3 - Influência das máquinas motrizes**

Foca a unidade geradora como um todo mostrando a influência da máquina motriz no cálculo do gerador.

**Capítulo 4 - Elementos básicos para cálculo**

Fornece os dados básicos a partir dos quais o gerador é projetado.

**Capítulo 5 - Reatâncias e constantes de tempo**

Analisa a máquina como elemento do sistema ao qual está interligada.

**Capítulo 6 - Aquecimento e refrigeração**

Discute os aspectos de como a máquina é mantida operando dentro dos limites de temperatura aceitáveis e convivendo com os aquecimentos.

**Capítulo 7 - Conclusões**

Apresenta a contribuição do estudo e as sugestões para novos trabalhos .

**Capítulo 8 – Referências bibliográficas****1.3 - NOTA IMPORTANTE**

Por fim, vale a pena informar que esta dissertação pela maneira como foi conduzida e sobretudo por seu objetivo, seria muito mais adequada a um programa de mestrado profissional, como o proposto pela CAPES em junho de 2009.

---

## 2 - EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS E CÁLCULO

### 2.1 - HISTÓRIA DA ELETRICIDADE E MAGNETISMO

O ser humano sempre procurou investigar o que o cerca e fazer experiências para cada vez mais satisfazer a si próprio e dominar a natureza na busca da perfeição.

Importante observar que sempre que alguém deixa um legado, independentemente do tempo, ele servirá para inspiração de outros.

Na história das máquinas elétricas não foi diferente.

A primeira manifestação neste sentido de que se tem notícia data de aproximadamente 600 AC na Grécia antiga. Um filósofo grego chamado Tales de Mileto, ouviu falar na pedra de Magnésia. A pedra atraía objetos de ferro e nada mais. Intrigava a Tales o fato de um pedaço de pedra atrair outras coisas. Queria saber por que atraía somente ferro. Teriam outros objetos aquela mesma estranha capacidade? Testou outras matérias e ao esfregar um âmbar a um pedaço de pele de carneiro, observou que pedaços de palhas, plumas e fragmentos de madeira começaram a ser atraídas pelo próprio âmbar. Do termo em grego para âmbar “elektron”, originou a designação “elétron” e toda a eletricidade.

Tales não tinha explicação para o fato, mas registrou o que havia feito. Outras pessoas leram e refletiram sobre suas experiências.

Aproximadamente 2000 anos depois dos registros de Tales, um médico inglês William Gilbert se interessou pelo mesmo fato. Por William Gilbert, foi desenvolvido um trabalho metódico (De Magnete) sobre as propriedades do magnetismo. Este mesmo trabalho também foi a primeira aplicação do método

---

científico.

O livro “De Magnete” (ano 1600) é considerado o primeiro livro com caráter científico tratando das matérias de eletricidade e magnetismo. Um aspecto fundamental dele é que diferencia eletricidade e magnetismo de forma clara e incisiva. Além disso, o livro de Willian Gilbert estabelece o magnetismo terrestre afirmando ser a terra um grande magneto. Willian Gilbert foi a primeira pessoa a usar a denominação "elétron", de onde se originou a palavra eletricidade para os fenômenos hoje por nós estudados.

A obra de Gilbert influenciou significativamente Galileu, que aproveitou a metodologia do trabalho e acrescentou, além da experimentação controlada, uma segunda ferramenta crucial para a física: as medidas matemáticas.

Antigamente não era feita uma ligação entre eletricidade e magnetismo; somente no século XIX desenvolveu-se uma relação entre os fenômenos.

## **2.2 - HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE GERADORES**

A partir do século XVI a eletricidade e o magnetismo são estudados com rigor científico.

### **1. Século XVI**

1550 - Gerolamo Cardano discute em seu livro “De Subtilitate” as diferenças entre forças elétricas e forças magnéticas.

1600 - Publicação do “De Magnete” por William Gilbert.

### **2. Século XVII**

1660 - Otto von Guericke inventa o primeiro gerador eletrostático,

---

chamado de “Elektrisiertmaschine”.

1675 - Robert Boyle observa que as forças elétricas podem atuar através do vácuo.

### **3. Século XVIII**

1770 - Luigi Aloisio Galvani realiza experimentos com eletricidade na dissecação de animais, fazendo com que uma rã movesse as pernas. Galvani seria o descobridor da bioeletricidade. Galvani também desenvolve um protótipo de bateria, mas o invento acaba sendo creditado a Volta.

1733 - C. F. du Fay publica sobre a existência de dois tipos de eletricidade, o que mais tarde seria identificado como "positivo" e "negativo". Também identifica a diferença entre isolantes e condutores.

1750 - Benjamin Franklin propõe o experimento de empinar uma pipa através de uma tempestade, provocando uma descarga atmosférica.

1752 - A partir de suas observações sobre descargas atmosféricas, Benjamin Franklin inventa o pára-raios.

1780 - Henry Cavendish realiza diversas descobertas na eletricidade, mas não publica seus resultados. Seus teoremas seriam descobertos mais tarde, tendo por exemplo a Lei de Ohm.

1800 - Alessandro Volta desenvolve a pilha voltaica, precursora das baterias modernas.

### **4. Século XIX**

1820 - Hans Christian Ørsted observa que uma corrente elétrica causa uma perturbação em uma bússola próxima, ilustrando a interação entre eletricidade e magnetismo. André-Marie Ampère consegue desenvolver e

---

explicar o fenômeno.

1827 - Georg Ohm publica “Die Galvanische Kette Mathematisch Bearbeitet” (O Circuito Galvânico, Investigado Matematicamente), trabalho no qual desenvolve a teoria de circuitos, incluindo a Lei de Ohm.

1831 - Michael Faraday determina experimentalmente o fenômeno da indução magnética entre duas bobinas, formulando o princípio do transformador. A indução também é observada com o uso de um ímã permanente, obtendo-se desta forma o princípio dos motores e geradores elétricos.

1864 - James Clerk Maxwell apresenta em “A Treatise on Electricity and Magnetism” as equações do eletromagnetismo, consolidando os experimentos de Faraday. Suas equações prevêm a existência das ondas eletromagnéticas, e anuncia que a própria luz é uma forma de eletromagnetismo.

1879 - Thomas Edison inventa a primeira lâmpada elétrica comercialmente viável.

1880 – Thomas Edison patenteia o sistema de distribuição elétrica.

1882 – Thomas Edison implementa o primeiro sistema de distribuição elétrica, em corrente contínua, 110 V, em Manhattan.

1888 - Heinrich Hertz comprova a existência de ondas eletromagnéticas, confirmando as teorias de Maxwell.

1890 (aprox.) - Disputa entre Nikola Tesla e Thomas Edison sobre a implementação dos sistemas de distribuição elétrica, a chamada Guerra das Correntes. Finalmente, vence Tesla, com a corrente alternada, essencialmente pelas características dos transformadores em elevar a tensão, diminuindo as

---

perdas na transmissão de energia.

1892 - Nikola Tesla publica a base dos sistemas de corrente alternada. George Westinghouse patrocina os projetos de Tesla.

1893 - Charles Proteus Steinmetz desenvolve uma formulação matemática para o estudo de circuitos em corrente alternada.

1893 - Nikola Tesla realiza a primeira transmissão de rádio, porém sua invenção seria creditada, com controvérsias, a Guglielmo Marconi em 1904.

### **5. Primeira metade do Século XX.**

A engenharia elétrica é consolidada como uma profissão reconhecida.

Enquanto os americanos Thomas Edison e Nikola Tesla disputavam na América a corrida pelos primórdios da produção e transmissão da energia elétrica no final do século XIX a Europa se fortalecia no desenvolvimento da produção industrial de equipamentos para geração e transmissão de energia elétrica com o surgimento das indústrias Siemens, Brown Boveri, Oerlikon, etc.

Ao mesmo tempo, muitos autores procuraram explorar o campo das máquinas elétricas girantes e do eletromagnetismo. Pode-se citar o caso de Werner Nurnberg, em 1940, com ensaios práticos em máquinas elétricas, e o de Rudolf Richter, em 1924, com um tratado completo sobre cálculo de transformadores, máquinas de corrente contínua, máquinas síncronas e máquinas de indução.

O primeiro tratado de que se tem notícia sobre enrolamento de máquinas elétricas foi publicado por E. Arnold, em 1891, sob título “Ankerwicklungen der Gleichstromdynamomaschinen” (enrolamento da armadura de máquinas de corrente contínua). Sobre o tema enrolamentos

---

somente trinta anos mais tarde surgiria outro trabalho que viria a apresentar e acomodar novas técnicas: o de Rudolf Richter “Ankerwicklung für Gleich- und Wechselstrommaschinen” (enrolamento de armadura para máquinas de corrente contínua e de corrente alternada), em 1920. Então passados mais trinta anos, em 1950, surgiu o trabalho de Heinrich Sequenz “Die Wicklungen elektrischer Maschinen” (os enrolamentos de máquinas elétricas) que finaliza o trabalho sobre enrolamentos por mais de meio século que engloba em quase sua totalidade as opções de enrolamentos de máquinas que temos até hoje nas máquinas elétricas girantes.

Na década de 1940, o Dr. Charles Concórdia foi o pioneiro da idéia de que as características do regulador de tensão das máquinas síncronas afetam a sua estabilidade. Seu livro “Máquinas Síncronas -Teoria e Desempenho” (1951) é ainda freqüentemente citado.

### **6. Segunda metade do século XX.**

É difícil citar tudo que de mais importante se escreveu sobre máquinas elétricas girantes, pois houve uma profusão de publicações tanto na Europa como na América. As máquinas elétricas evoluíram bastante neste período especialmente devido ao desenvolvimento de materiais e variedades de tipos de acionamentos. A teoria e essência, porém se mantiveram até hoje.

O que se pretende neste trabalho é resgatar um pouco essa teoria que, devido à euforia da evolução dos materiais, dos acionamentos e da computação, foi deixada de lado e até um tanto esquecida, mas que, no entanto continua sendo a base para os geradores.

É importante observar que no final do século XX, tornou-se viável abordar o cálculo das máquinas elétricas, com o advento do cálculo

---

eletromagnético por elementos finitos. Na verdade esta abordagem é simplesmente a aplicação dos conceitos de Maxwell desenvolvidos um século antes, porém, agora com a ajuda de computadores que, cada vez mais rápidos e com maior capacidade de processamento, tornaram possível aplicar a teoria desenvolvida.

Ainda hoje esta abordagem ainda continua a ter aplicação mais acadêmica. Reconhecidamente esta ferramenta ajuda e muito na evolução do produto pela análise dos detalhes onde cada dia se exige maior competitividade dos produtos. Em principio qualquer programa em F.E.M. (Elementos finitos) pode ser aplicado ao cálculo de máquinas, porém, a interpretação dos resultados é muito trabalhosa se não há um aplicativo específico. Assim, alguns programas foram desenvolvidos sendo que os mais conhecidos específicos para máquinas elétricas são: “Flux 2&3D”, desenvolvido na França, “Ansys Emag” desenvolvido na América e “Lmag”, desenvolvido no Brasil. Durante os últimos anos este tipo de cálculo evoluiu muito, o que sem dúvida leva à inegável contribuição no que concerne à análise localizada de parâmetros, mas que deixa um pouco a desejar no quesito definição geral da máquina, uma vez que os modelos teriam que ser gerados a cada versão, o que torna o processo muito travado se comparado com os programas dedicados.

De forma geral no meio industrial o que foi desenvolvido foram programas específicos privados e patenteados, usados em sigilo industrial para se efetuar o cálculo de máquinas. Por motivos óbvios não terão aqui seus nomes citados.

Normalmente estes são atrelados a programas de cálculo mecânico, ventilação e outros de custos para viabilização das propostas. Neste sentido é

---

que o desenvolvimento e inovação são tolhidos, pois toda a energia é dispendida nesta forma.

### **7. Cálculo de máquinas nas últimas décadas.**

Desde os anos 70 já se usava o computador no auxílio do cálculo elétrico de máquina, especialmente pelo fato do mesmo ser muito recursivo. Nos primórdios da computação havia os famosos programas rodados em cartões perfurados, o que consumia um tempo razoável, além da disponibilidade para execução, uma vez que os operadores dos computadores não eram os mesmos calculistas de máquinas, etc. Dessa forma, desde o início de um cálculo até se ter a definição completa da máquina, incluindo as várias seções de rodadas de cálculo, se passavam semanas. Esse retardo por outro lado tinha um fator benéfico no que diz respeito ao assentamento dos conceitos e adaptação da máquina à aplicação. Uma boa dose de cálculo manual ainda fazia parte da definição, dessa forma, obrigatoriamente os conceitos eram verificados com mais detalhes.

Com a massificação do uso do computador, a evolução tecnológica dos programas e a unificação de programas acoplados ao cálculo elétrico, é possível hoje obter num único dia uma infinidade de versões de máquinas para uma aplicação, bem como seus respectivos custos. Evidentemente do ponto de vista comercial a missão está atualmente cumprida, mas do ponto de vista da evolução do produto “Gerador”, há que se pensar!

### **2.3 - MATERIAIS**

Não só pelo aspecto custo, mas também pelos aspectos ambientais, legais de saúde e segurança, os materiais empregados em máquinas elétricas se desenvolveram enormemente ao longo do tempo e continuam evoluindo. A

---

própria competição entre fabricantes estimulou essa evolução.

A potência por volume das máquinas aumentou muito fortemente durante o século XX até a década de 70. Desde então, apesar da evolução dos materiais a potência por volume não teve aumentos tão expressivos. Este fenômeno pode ser sentido ao se avaliar o fator de utilização “C” conforme será visto posteriormente. Explicações para o fato podem ser atribuídas a uma estabilização dos materiais isolantes na classe “F”, a partir daquela década. Além disso, muito se deve a viabilidade de fabricação e custo, no caso de máquinas grandes, embora outros materiais como classe “H”, por exemplo, já estejam desenvolvidos há muito tempo e ainda não foram comercialmente aplicados (geradores de grande porte). No quesito potência por volume, o material isolante é dos que possui maior peso. Outro aspecto a ser observado nesta análise é o fato de que a evolução dos materiais nestes últimos anos foi mais direcionada no sentido de redução dos custos produtivos e nos processos de fabricação, além de não poluírem o meio ambiente e não causarem danos à saúde humana, o que não necessariamente contribuiu para a redução de volume.

Além disso, alguns fatores solicitados nas propostas atuam no sentido de diminuir o fator de utilização “C”, a saber: rendimentos cada vez maiores e temperaturas absolutas dos materiais isolantes cada vez menores.

---

## 3 - INFLUÊNCIA DAS MÁQUINAS MOTRIZES

### 3.1 - HIDROGERADORES

O tema maior do estudo atual se refere aos hidrogeradores, cuja máquina motriz é uma “turbina hidráulica”. A concentração do estudo neste ramo é óbvia uma vez que no Brasil este é o recurso natural mais explorado na produção de energia elétrica. Cerca de 80% da nossa energia elétrica gerada é de origem hidráulica e há muitos destes recursos ainda inexplorados.

Como a exploração desta característica na natureza depende fundamentalmente do local, a vinculação da máquina com o mesmo é muito forte e única. Uma forma de agredir o mínimo possível à natureza é adaptar a máquina exatamente à condição local, o que faz com que cada empreendimento tenha uma característica própria, exigindo um conjunto máquina motriz - gerador específico em cada aproveitamento.

Conforme será visto posteriormente as grandezas fundamentais para os aproveitamentos hidráulicos são vazão e queda. Daí cada local exigir uma máquina diferente.

Para grandes quedas, são mais adequadas as máquinas de maior rotação e as turbinas do tipo “Pelton”. Porém no Brasil, dificilmente existem locais com características que proporcionem rotações maiores que 720 [rpm]. Nestes casos os geradores adequados são normalmente de pequeno diâmetro e grande comprimento. As máquinas podem ser tanto de pólos lisos como de pólos salientes, dependendo da adaptação que o fabricante tenha para a aplicação em questão.

Para quedas muito pequenas as máquinas utilizadas são as de baixas

---

rotações, e as turbinas mais adequadas do tipo “Kaplan” com rotações que chegam a 70 [rpm]. Nestes casos os geradores são de grande diâmetro e pequeno comprimento. Nestas circunstâncias as máquinas são sempre de pólos salientes.

No intervalo entre as aplicações citadas, existe toda uma gama de variedades de máquinas com as mais variadas rotações, dentre elas o tipo Turbina “Francis” que tem uma ampla faixa de rotações em sua aplicação. Outros tipos de turbinas como: turbinas “poço”, turbinas “S”, turbinas “bulbo”, etc, também são usadas.

Com exceção de alguns poucos casos de máquinas rápidas a grande maioria dos geradores para hidrelétricas são de pólos salientes, devido à geografia brasileira possuir mais aproveitamentos com maior volume e menor altura da queda d’água.

Fica assim muito claro que o gerador deve se adaptar a uma gama muito grande de quedas d’água que determinam as rotações e, portanto o tipo construtivo do mesmo, que ainda dependendo da construção da turbina poderá ser vertical ou horizontal, o que sem dúvida modifica em muito o arranjo mecânico. Há que se contar ainda com as variações da vazão, que determinam fundamentalmente a potência ativa influenciando especialmente nos comprimentos dos geradores, para se adaptar aos aproveitamentos.

O hidrogerador é, portanto, um produto artesanal, produzido sob encomenda para se adaptar à máquina motriz, que por sua vez é artesanal para se adaptar às condições de projeto, norteadas pela topologia local.

Desta forma, se consegue uma melhor harmonia entre a geografia local e a exploração.

---

**3.2 - TURBOGERADORES**

Para aproveitamentos em usinas, nas quais algum tipo de combustível ou acionamento é responsável por produzir de forma direta ou indireta a rotação de um eixo, ao qual é acoplado um gerador elétrico, normalmente são usados os turbogeradores.

Pelas características, especialmente aquelas que se referem à otimização do gerador, as máquinas motrizes geralmente são bastante rápidas (1800 ou 3600 [rpm]). Estas características trazem o benefício de se conseguir colocar o máximo de potência possível em um menor volume, devido à alta rotação.

É de se esperar que para máquina com essa característica, tenha-se um diâmetro pequeno e um comprimento grande. Nestes casos as máquinas são sempre de pólos lisos e em quase totalidade dos casos horizontais.

Normalmente nestes tipos de usinas a localização não é necessariamente próxima da fonte primária de energia, ao contrário é normalmente próxima ao centro consumidor. Assim, o transporte da matéria prima, gera mais um impacto à natureza, muitas vezes não computado.

Outro fator atrelado a esta construção é que, como se pode manipular a natureza na força motriz, pode-se padronizar também o gerador. Desta forma pode-se prever um padrão de rotação, potência, tensão, frequência e fator de potência para se produzir usinas inteiras pré-fabricadas, pois as máquinas motrizes igualmente também podem ser padronizadas e pré-fabricadas, usando o mínimo de espaço possível no empreendimento.

Do ponto de vista de produção de máquinas, este tipo de construção é bom uma vez que se consegue padronizar até mesmo usinas inteiras e com isso baratear o custo produtivo. É evidente que a desvantagem do negócio é

---

que essa solução que manipula a natureza na força motriz é normalmente muito agressiva

Enquadram-se neste grupo as usinas termelétricas a carvão e gás, nucleares, entre outras, que usam meios indiretos para acionar o eixo do gerador. Há casos, no entanto, em que a usina é subproduto de resíduos de outra exploração da natureza. Neste caso, a usina reduz o impacto ao meio ambiente como, por exemplo, processamento de lixo, resíduos de usinas de açúcar e outros.

---

## 4 - ELEMENTOS BÁSICOS PARA CÁLCULO

### 4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão tratados os desafios que se apresentam quando se dispõe a calcular um gerador síncrono. São enumeradas as condições iniciais mínimas necessárias para o cálculo bem como a iteração entre as grandezas. O objetivo é conscientizar o leitor dos caminhos a seguir a partir dos dados impostos pela natureza, quando se pretende obter energia elétrica de forma confiável e contínua com melhor aproveitamento e agredindo o mínimo possível o meio ambiente. Alerta-se também para as condições exequíveis de produção normalmente conhecidas.

A definição dos parâmetros do conjunto para geração de energia elétrica é feita a partir de fatores determinados pelo local de sua instalação (vazão e queda d'água). Neste aspecto a máquina motriz é a primeira a ser definida.

É sabido que todas as formas de produção de energia interferem no meio ambiente, porém, todas as interferências dizem respeito à forma com que a máquina motriz atua. As formas comuns menos agressivas de se obter energia da natureza são: solar, eólica e maré-motriz. As fontes hidráulicas são também consideradas limpas, embora haja controvérsias com relação ao impacto dos lagos. As nucleares e térmicas em geral são as de maior nível de agressividade e poluição. Porém, no que se refere à máquina elétrica em si; que é o objetivo deste estudo, não há aspectos ambientais significativos, quanto à agressão à natureza; exceto pelo ruído e o aquecimento do ar e da água, cujos impactos são relativamente pequenos.

Evidentemente todo processo produtivo que envolva transformação de materiais causa impactos no meio ambiente, porém, são itens a serem abordados pela legislação com relação à poluição e tratamento de efluentes.

Ainda com relação aos impactos ambientais, cabe aos fabricantes das máquinas elétricas a escolha adequada dos materiais cuja origem não seja agressiva e ainda cujo manuseio e aplicação não sejam nocivos à saúde e ao meio ambiente.

Dentro do mesmo tema, agrega-se o estudo do rendimento e refrigeração das máquinas, pois o uso econômico de materiais com maior rendimento colabora na proteção ambiental, pois todo recurso usado na construção do gerador tem um custo de produção para a natureza.

#### **4.2 - GRANDEZAS A SEREM OBSERVADAS**

Este estudo versa sobre máquinas síncronas de pólos salientes de médio e grande porte onde, as máquinas motrizes são na sua quase totalidade turbinas hidráulicas que, considerando-se o Brasil são responsáveis pela maioria da geração de energia elétrica.

A definição da potência do aproveitamento é obtida a partir de estudos históricos hidrológicos e levantamentos topográficos das bacias, juntamente com os estudos e geológicos e as análises de impactos ambientais.

A potência de um aproveitamento pode ser “estimada” por:

$$P = 10 \cdot Hn \cdot VI \quad (4.1)$$

A partir daí podem ser definidas a potência e a quantidade de grupos geradores.

---

Após estudos hidráulicos da máquina motriz, resultam as primeiras definições para a máquina elétrica:

- 1. Potência ativa nominal**
- 2. Potência ativa máxima**
- 3. Rotação nominal**
- 4. Rotação de disparo**
- 5. Momento de inércia (efeito volante)**

O equilíbrio do conjunto máquina motriz e máquina elétrica, também é fundamental, para que a geração de energia elétrica aconteça de forma harmoniosa e duradoura. Dessa forma, as grandezas a seguir devem ser definidas:

- 6. Ruídos**
- 7. Vibrações**
- 8. Estabilidade da linha de eixo e rotações críticas**

Da mesma forma, o equilíbrio do conjunto da rede elétrica e máquina elétrica também é fundamental. De maneira que as grandezas a seguir devem ser definidas:

- 9. Potência não ativa nominal**
- 10. Potência não ativa máxima**
- 11. Freqüência**
- 12. Tensão nominal e faixa de variação**
- 13. Reatâncias**
- 14. Constantes de tempo**

### 15. Classe de isolamento

Com relação à própria máquina elétrica isoladamente, as grandezas a seguir também estão sujeitas à definição:

### 16. Limites de temperatura

### 17. Rendimento

Evidentemente uma série de requisitos adicionais estão em jogo em contratos e especificações técnicas para exploração de aproveitamentos hidrelétricos, as quais não são objetos desse estudo, mas que interferem na definição final da máquina elétrica (por exemplo, solicitações mecânicas admissíveis).

O foco deste estudo ficará por conta da definição básica da máquina levando em conta as condições mencionadas anteriormente.

## 4.3 - VOLUME DA MÁQUINA

Estimar o volume da máquina é fazer as primeiras aproximações do diâmetro e do comprimento.

Apesar de ser apenas o primeiro passo, neste item está em questão a experiência de cada fabricante, bem como sua evolução ao longo do tempo no desenvolvimento de materiais e tecnologia.

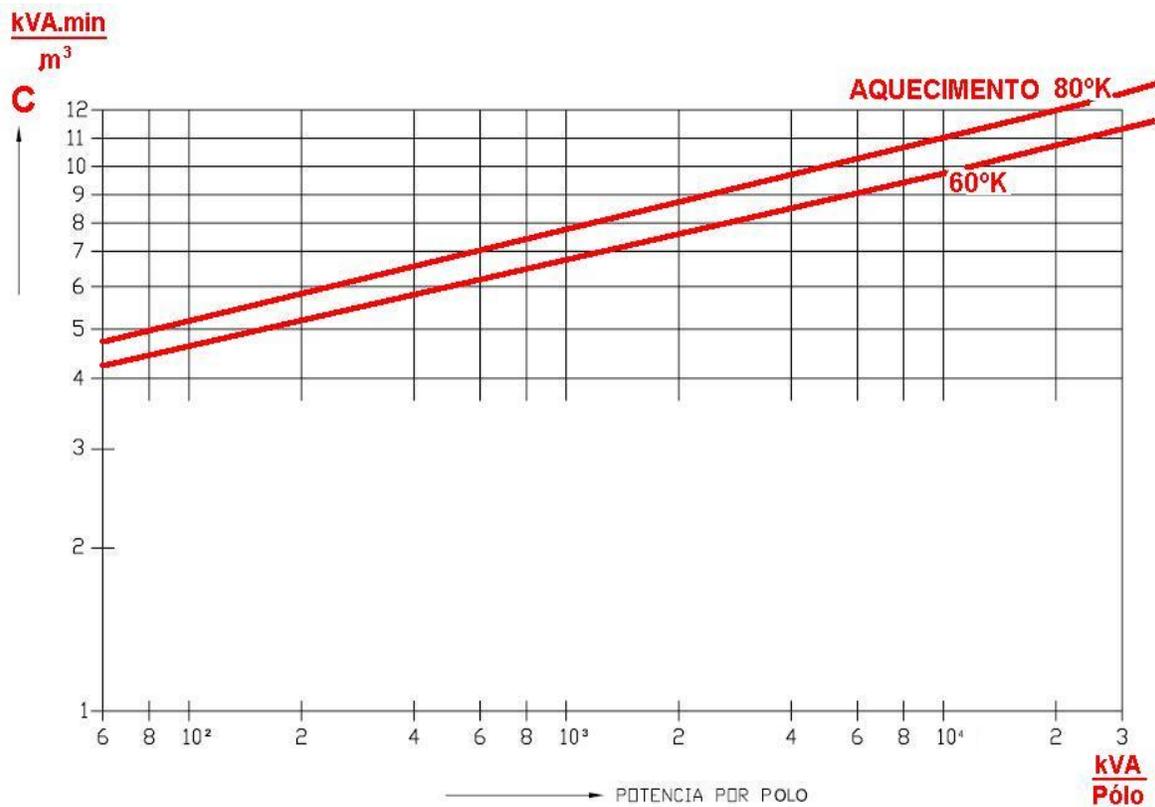
O número de pares de pólos é definido e calculado pela equação (4.2):

$$p = \frac{f \cdot 60}{n_N} \quad (4.2)$$

A determinação do volume do gerador é iniciada pela definição da potência por pólo conforme equação (4.3):

$$S_p = \frac{S_N}{2p} \tag{4.3}$$

A potência “aparente” nominal  $s_N$  é definida a partir das potências ativa e não ativa definidas anteriormente. Com base nestas premissas estima-se o fator de utilização da máquina “C” usando a potência por pólo e o aquecimento previsto, através da curva mostrada na figura 4.1.



**Figura 4.1 Fator de Utilização “C”.**

A curva típica é uma tendência para valores de “C” em função da potência por pólo e do aquecimento solicitado para os enrolamentos, para máquinas síncronas de pólos salientes, obtida de experiência acumulada por fabricantes ao longo do tempo. É uma grandeza que varia de fabricante para fabricante e muda com a evolução tecnológica da máquina. Assim, não se

pode precisar valores para “C” num cálculo aritmético simples, mas um valor aproximado que servirá para início da definição da máquina.

O fator “C” permite uma definição inicial do volume da máquina a partir da equação empírica (4.4).

$$C = \frac{S_N}{D_i^2 \cdot L \cdot n_N} \quad (4.4)$$

Nota-se claramente a influência marcante do desenvolvimento de materiais isolantes e as respectivas temperaturas máximas suportadas.

Então, uma vez estimado o fator C, defini-se o “volume da máquina”, isto é, a proporção  $D_i^2 \cdot L$

$$Vol = D_i^2 \cdot L \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{S_N}{C \cdot n_N} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (4.5)$$

OBS: “Alguns projetistas consideram o valor de L como o comprimento útil desprezando-se os canais de ventilação e não o comprimento total do estator”.

A partir da equação (4.5) devem ser determinados os valores “Di”, “L”.

A partir daí há muito que se atribuir à experiência do projetista, uma vez que as experiências passadas de cada empresa chegam sempre a uma faixa relativamente grande de valores para  $D_i$  e L para máquinas já fabricadas.

De qualquer forma alguns critérios devem ser observados:

Em máquinas de grande porte ( $S_n > 70$  MVA) é comum que o passo polar  $\tau_p$  varie de 0,5 a 0,9 [m] e a relação  $L/\tau_p$  varie de 2 a 3.

O passo polar é:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} \quad (4.6)$$

Dessa forma, arbitrando-se valor para o passo polar conforme a faixa acima indicada ocorrerá uma primeira aproximação para  $D_i$  a qual é usualmente arredondada inicialmente para valores inteiros a cada 100 [mm].

Da mesma forma, arbitrando-se inicialmente o valor de  $L/\tau_p$  pode ser definido “L” que também é usualmente arredondado inicialmente a cada 50 [mm].

A partir destes valores, obtém-se o volume e um novo valor para “C”.

É bom se ter em mente neste momento que os valores iniciais definidos  $D_i$  e L são uma primeira estimativa, pois a verificação das grandezas da máquina e limites físicos ou de imposição podem levar à redefinição destes parâmetros. Evidentemente que o valor inicial calculado para “C” deverá ser resguardada sob pena de se ter uma máquina inviável. Por isso o cálculo da máquina elétrica é um cálculo recorrente.

A verificação dos valores de “ $D_i$ ” e “L” é feita a partir de certos limites operacionais da máquina que não devem ser ultrapassados.

### **1. Verificação quanto à velocidade tangencial máxima.**

Para operação com a rotação de disparo a velocidade tangencial do rotor é dada por:

$$v_d = \pi \cdot D_i \cdot \frac{n_d}{60} \quad (4.7)$$

Neste ponto novamente a experiência de fabricação é fundamental, pois a utilização de materiais de alta resistência mecânica no rotor vem permitindo valores cada vez mais elevados para a velocidade tangencial. Porém, o limite sempre existirá diferindo apenas em função dos materiais utilizados. Normalmente abaixo de 180 [m/s] é possível a fabricação. Há que se prestar atenção ainda em exigências especiais quanto a restrições nas solicitações mecânicas em relação a escoamento e ruptura, que podem eventualmente vir a reduzir ainda mais esta condição.

### **2. Verificação do valor inicial do momento de inércia.**

O momento de inércia (efeito volante) pode ser aproximado inicialmente por;

$$GD^2 = k_e \cdot D_i^4 \cdot L \quad (4.8)$$

Diferenças em relação à inércia exigida de até 30% podem ser compensadas (por exemplo, crescendo-se o anel magnético). Para diferenças maiores é recomendável reconsiderar os valores adotados de  $D_i$  e  $L$ , para evitar dificuldades construtivas (superdimensionamento de anel magnético pode ser um desses exemplos de dificuldade construtiva). Normalmente, nas máquinas síncronas de pólos salientes não é comum o uso de volantes externos para se compor a inércia exigida.

### **3. Considerações adicionais sobre o comprimento $L$**

O tamanho e o número dos canais de ventilação do estator dependem basicamente do cálculo de ventilação da máquina. Os perfis comerciais tipo “T” comumente encontrados tem altura 5 ou 6 [mm]. Por isso estes são os valores mais usados para altura do canal. Quanto ao número de canais, o

mesmo depende basicamente da altura que se adotar para os pacotes de chapas parciais. Costuma-se intercalar os canais a cada 30 ou 50 [mm] de altura de pacote. Dessa forma é definido o arranjo mais conveniente de canais de ventilação, a ser confirmado posteriormente pelo calculo de ventilação da máquina.

Assim:

$$l = L - N_c \cdot \frac{L_c}{1000} \quad (4.9)$$

Estes são os valores que dão uma idéia inicial do tamanho da máquina (volume). Como o cálculo é iterativo e recursivo, muito provavelmente os números finais não serão estes, porém próximos.

Embora a otimização e análise sejam feitas com ajuda de programas, não se deve perder de vista aspecto físico e os dados construtivos obtidos das experiências, sob pena de causar problemas difíceis de serem resolvidos.

Como a iteratividade das grandezas é muito grande, é preciso ter bom conhecimento do funcionamento da máquina para que se consiga avaliar as iterações.

#### 4.4 - DEFINIÇÃO DO ENROLAMENTO

No Brasil e na maior parte do mundo é usado “Sistema Aterrado”. Logo a ligação do enrolamento dos geradores é “Estrela” sendo que o aterramento da estrela poderá ser direto ou através de impedância conforme o sistema.

##### 1. Corrente nominal do estator $I_N$

$$I_N = \frac{S_N * 1000}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (4.10)$$

## 2. Fator de corrente por ranhura $I_r$

Nas máquinas de médio e grande porte, os enrolamentos são normalmente de duas camadas, isto é, duas barras ou duas semi-bobinas por ranhura. Então é definido o fator de corrente por ranhura cuja finalidade é auxiliar no dimensionamento do enrolamento.

$$I_r = 2 \cdot \frac{I_N}{a} \quad (4.11)$$

Com base nesta grandeza tomam-se algumas relações úteis para a definição do enrolamento. Novamente aqui vale a experiência construtiva e a evolução dos materiais empregados, que cada vez contribuem para a compactação das máquinas. Porém nesta abordagem de máquinas de médio e grande porte se a máquina tem refrigeração a ar, a faixa usual destes valores normalmente se situa de 2000 a 5000 [A]. Caso a máquina tenha refrigeração à água nas barras do estator, esta faixa pode ficar de 7000 a 11000 [A].

Em casos extremos de difícil refrigeração, como no caso de geradores tipo “bulbo” estes limites devem ficar na faixa de 1000 a 3000 [A]. Assim a experiência na fabricação é fundamental nesta definição.

## 3. Número de circuitos paralelos $a$

A definição do número de circuitos em paralelo por fase deve ser feita a partir da fatoração do número de pólos da máquina e a escolha deverá ser conforme experiência. A estimativa inicial é feita usando-se cada fator do número de pólos e verificando-se o fator de corrente por ranhura

correspondente.

#### 4. Número de ranhuras da máquina $N_r$

A escolha do número de ranhuras  $N_r$  interfere diretamente nos valores de indução e no fator de densidade periférica de corrente no estator que são parâmetros básicos na avaliação da máquina. Logo esta definição deve ser bastante iterativa.

Como primeira aproximação se observa a dimensão do passo de ranhura " $\tau_n$ ", definidas pela equação:

$$\tau_n = \pi \cdot \frac{D_i \cdot 1000}{N_r} \quad (4.12)$$

- para máquinas refrigeradas a ar,  $\tau_n$  deve estar na faixa definida pelos limites:

$$\log_{10} \tau_n \geq 1,08 \cdot 10^{-4} \cdot I_r + 1,30 \quad (4.13)$$

até

$$\log_{10} \tau_n \leq 1,08 \cdot 10^{-4} \cdot I_r + 1,44 \quad (4.14)$$

Assim se limita uma faixa de valores prováveis para o passo de ranhura " $\tau_n$ " e escolhe-se a faixa ideal para o número de ranhuras " $N_r$ " através da equação (4.12);

Nesta situação há uma série de alternativas e algumas restrições / recomendações para a definição das ranhuras. Por exemplo, para geradores trifásicos (grande maioria dos geradores comerciais) o número de ranhuras deve ser múltiplo de "3".

### 5. Número de ranhuras por pólo por fase $q$

O número de ranhuras por pólo por fase  $q$  é bastante significativo no enrolamento e por si só pode dar alguns indicativos da formação do enrolamento. Representa uma faixa de  $60^\circ$  elétricos coberta pelas ranhuras da mesma fase sob um pólo. Por exemplo, se for um número inteiro representa exatamente o número de ranhuras do estator de uma mesma fase que cabem à frente de um pólo. No caso de “ $q$ ” fracionário, este valor sempre poderá ser reduzido a uma fração irredutível do tipo:

$$q = \frac{Z}{n} \quad (4.15)$$

$$q = \frac{N_r}{2p \cdot m} \quad (4.16)$$

Como o número de pólos “ $2p$ ” é conhecido assim como também o número de fases “ $m$ ”, e o valor de “ $n$ ” obedece às mesmas restrições de “ $a$ ” mas não pode ser igual a “ $a$ ”, resta ainda o valor inteiro “ $Z$ ” com total liberdade para ser determinado.

### 6. Amplitude da onda fundamental de indução no entreferro, $B_1$

Os fatores definidos anteriormente interferem na amplitude da onda fundamental de indução no entreferro  $B_1$ , conforme mostra a equação (4.17).

$$B_1 = \frac{U_N \cdot a \cdot 10^{11}}{2,04 \cdot 2 \cdot N_r \cdot \varepsilon_1 \cdot D_i \cdot L \cdot n_N} \quad (4.17)$$

O valor da fundamental  $B_1$  representa a sollicitação térmica do rotor e serve de base para o calculo de indução em qualquer parte da máquina, e devem situar-se entre 1,0 e 1,3 [T].

---

**7. Fator de densidade periférica de corrente no estator,  $A_1$** 

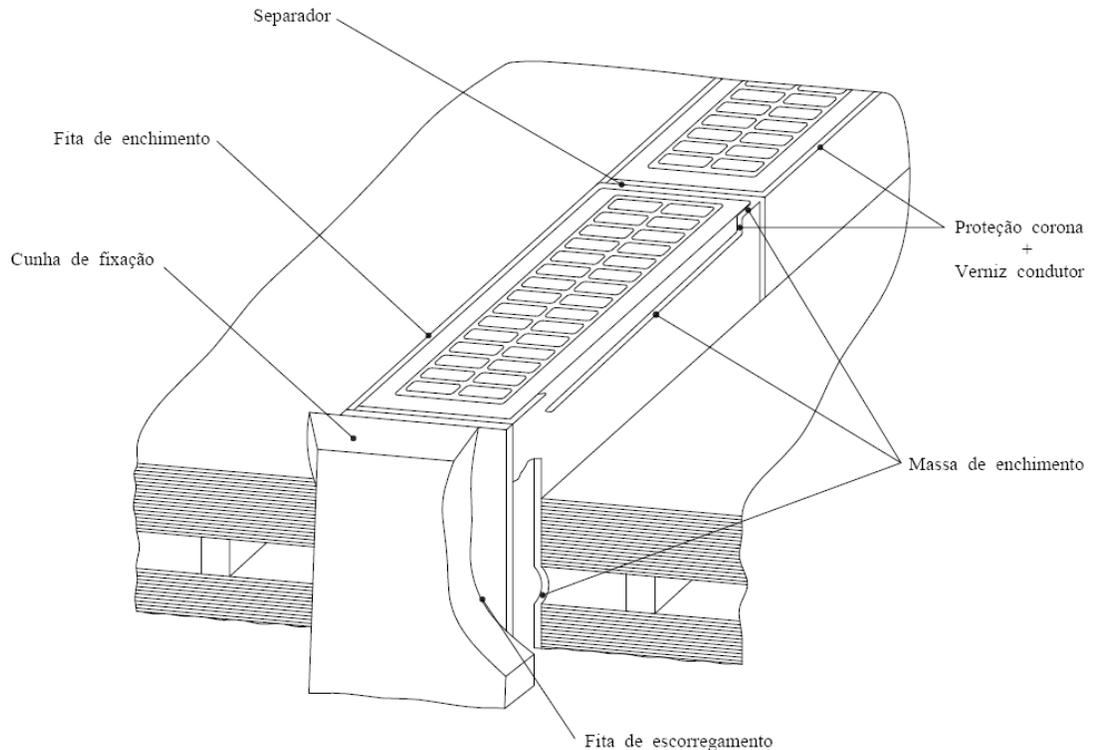
$$A_1 = \frac{N_r \cdot I_r}{\pi \cdot D_i} \quad (4.18)$$

O valor de  $A_1$  representa a solicitação térmica do estator e seu valor serve de parâmetro para várias características de funcionamento da máquina, Seu valor é calculado através da equação (4.18). Seu valor convencional se situa na faixa de 50 a 70 [A/mm], para máquinas refrigeradas a ar é de 80 a 110 [A/mm], para máquinas refrigeradas a água no enrolamento do estator.

Estes são os primeiros elementos para a definição do enrolamento do estator. A experiência será fundamental na escolha dos valores para adequação à fabricação. Claro que a iteratividade do cálculo levará à otimização dos dados. Não se deve perder de vista as questões físicas envolvidas, pois, a negligência das mesmas poderá levar a divergência dos resultados se mal conduzidos.

**4.5 - RANHURA E COROA DO ESTATOR****4.5.1 RANHURA**

Na figura 4.2 são mostrados os preenchimentos típicos da ranhura de um gerador. A definição da largura e profundidade da ranhura envolvem algumas variáveis.



**Figura 4.2 Corte de uma ranhura típica**

A seguir são estabelecidas algumas condições a serem observadas.

1. É usual nas máquinas de médio e grande porte uma relação (largura da ranhura) / (passo da ranhura) em torno de 40%.
2. A densidade de corrente na barra do estator sem dúvida é uma condição a ser observada e não deve ficar muito acima dos 4,0 [A/mm<sup>2</sup>] em máquinas com refrigeração a ar. Para refrigeração a água o valor pode ir a 10,0 [A/mm<sup>2</sup>].
3. A relação altura / largura das barras do estator não deve ser muito grande devido às dificuldades de fabricação e manuseio. A relação 4/1 não deve ser ultrapassada.
4. Fator fundamental para definição da largura e altura da barra e/ou ranhura é a espessura da isolamento. Trata de item muito ligado a

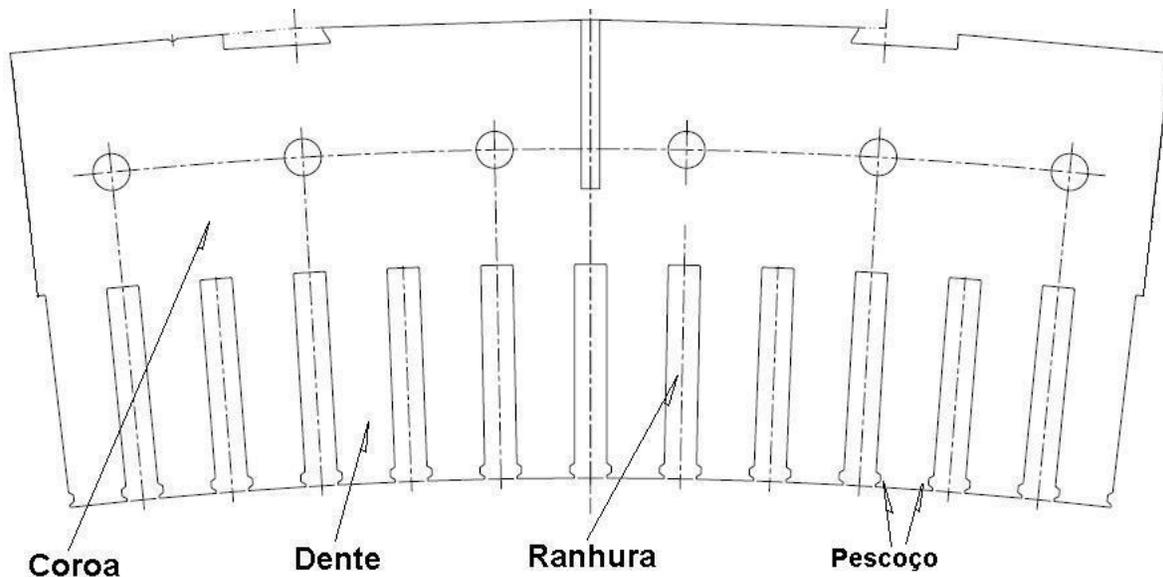
---

desenvolvimento de materiais.

5. A largura da ranhura e sua relação com o tamanho do entreferro é fator fundamental na atenuação de harmônicos gerados na onda da tensão. Assim a dimensão final da ranhura terá que atender às solicitações de harmônicos.
6. A largura da ranhura também interfere na reatância  $x_d$  (reatância síncrona de eixo direto) resultante.
7. A altura do pescoço da ranhura que depende basicamente da espessura da cunha de fechamento, tem grande influência na dispersão do estator. A definição da cunha é “mecânica” devido aos esforços da barra sobre o material da mesma, e a dispersão será conseqüência. Novamente se observa que a evolução dos materiais tem influência fundamental nas características elétricas da máquina.

#### 4.5.2 COROA DO ESTATOR

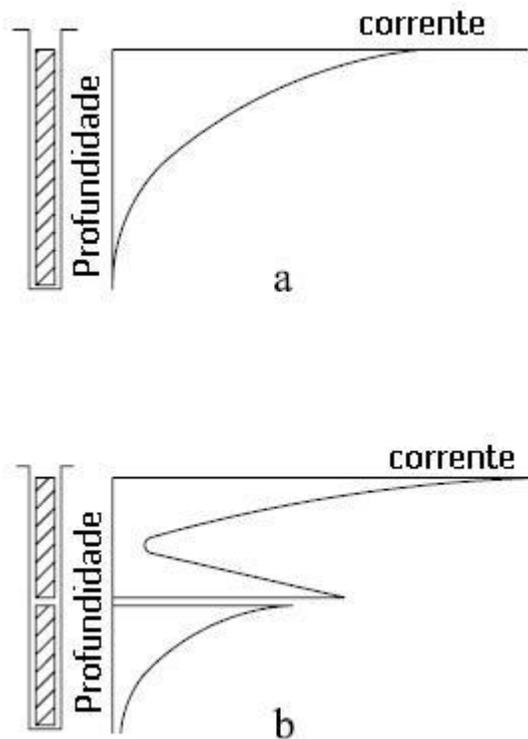
Seu dimensionamento depende da indução. Como primeira aproximação pode-se estabelecer algo em torno de 3% do diâmetro interno do estator, porém a definição final é feita em função da indução que deve ficar em torno de 1,1 a 1,3 [T]. Outro fator que deve ser observado na definição da coroa do estator é o CG (centro de gravidade) do núcleo, especialmente nos casos em que o núcleo é apertado por tirantes passantes pela coroa, pois, o local de passagem dos tirantes não deve ficar a mais de 30% da altura da coroa atrás do CG do núcleo. Caso isso não seja observado, a distribuição do aperto do núcleo transmitido pelos dedos de pressão fica prejudicada.



**Figura 4.3 Chapa do estator ilustrando a coroa e dentes.**

#### **4.6 - BARRA DO ESTATOR**

É comum em máquinas elétricas de médio e grande porte o uso de condutores parciais para compor a barra do estator. O objetivo é permitir uma melhor distribuição de corrente ao longo da barra, amenizando o efeito de adensamento de corrente ilustrado nas Figura 4.4. Este efeito ocorre sempre que um condutor é percorrido por corrente alternada, resultando em uma concentração de corrente na parte externa do condutor. Entenda-se como parte externa às partes dos condutores mais próximas dos pólos.

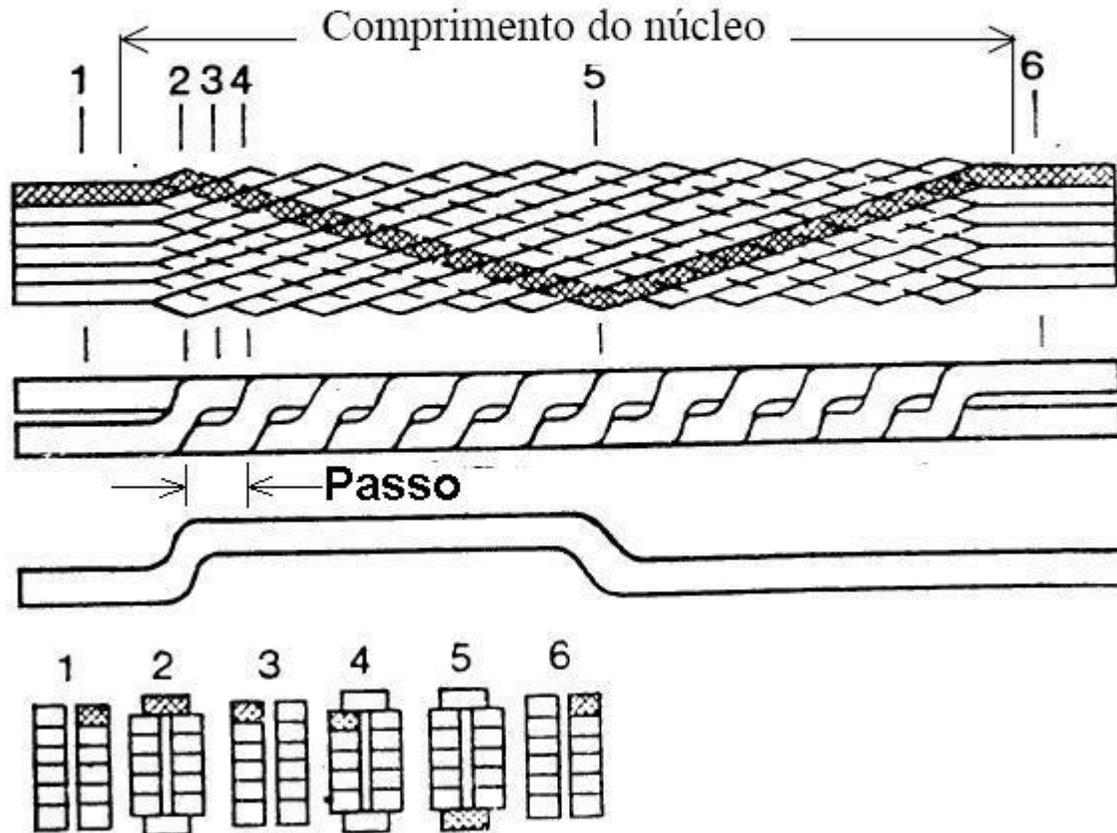


**Figura 4.4 Efeito do adensamento de corrente, a) barra inteira b) barra subdividida.**

O uso de condutores parciais isolados e transpostos ameniza o efeito, pois a transposição conhecida como “ROEBEL” (patente expirada) obriga cada condutor parcial a ocupar várias posições relativas ao longo do comprimento da barra.

Na transposição mais usual cada condutor parcial ocupa todas as posições possíveis dentro da barra, esta é chamada de transposição  $360^\circ$ . Exatamente porque cada condutor dá um giro de  $360^\circ$  ao longo da barra e sai do outro lado exatamente na mesma posição em que entrou. Este ângulo de giro do condutor é chamado de ângulo da transposição. Porém poderemos ter transposições de  $180^\circ$  em situações onde a altura do pacote de chapas é muito pequena e eventualmente até  $720^\circ$  nos casos máquinas muito compridas. O caso mais comum é mostrado na Figura 4.5.

## Barra Roebel com transposição interna 360°



**Figura 4.5 Detalhe da transposição de uma barra Roebel 360°.**

Em qualquer circunstância o passo da transposição pode ser calculado conforme a equação (4.19), levando-se em consideração a exequibilidade da transposição de modo a não se ter danos de curto entre condutores durante a execução:

$$\lambda_{transp} = \frac{L \cdot 360 \cdot 1000}{\alpha_{transp} \cdot Z_{th1}} \quad (4.19)$$

$$\lambda_{transp} \geq 3,6 \left( \frac{l}{e} + isol \right) \quad (4.20)$$

A definição do número de condutores e sua dimensão depende de várias relações:

1. O compromisso largura  $l$  versus espessura  $e$  do condutor parcial é importante para facilidade de manuseio e fabricação. É normal que esta relação situe-se entre  $2 < l/e < 4$ ; porém variações são encontradas em função de exigências especiais, o que significa que cuidados de fabricação também devem ser especiais.
2. Outro fator limitante é o ângulo de transposição. O ideal é ter  $360^\circ$  ou múltiplos, pois assim se garante que todos os condutores parciais ocupem todas as posições relativas ao longo da barra pelo mesmo espaço. Os fatores limitantes são a relação entre largura e espessura dos condutores parciais e também o comprimento do pacote de chapas, como visto anteriormente.
3. A escala produtiva é também fator que pode ser determinante na escolha das bitolas. Assim, conforme a fabricação, determinadas bitolas podem ser preferenciais se há um acordo para fornecimento com fornecedores para compatibilizar a produção.
4. Dessa forma, define-se a secção transversal de cada condutor parcial, o número de condutores por barra e o passo da transposição.

$$S_{cond} = \frac{S_{barra}}{N_{cond}} \quad (4.21)$$

---

#### 4.7 - ISOLAÇÃO DA BARRA E CONDUTORES

Propositalmente não foi mencionada a isolação no item anterior, pois trata-se de um destaque em separado. A isolação é fundamental na definição da ranhura e de toda máquina. A espessura da isolação principal é item fundamental na definição das máquinas desde que elas foram criadas. A necessidade de se isolar eletricamente o potencial dos condutores em relação ao potencial de terra, bem como do potencial de outras fases, e a necessidade de se refrigerar os enrolamentos; sempre foram itens antagônicos e que têm como protagonista principal o material isolante. Numa análise histórica se observa uma contínua redução de espessuras dos materiais para uma mesma tensão, isso afeta diretamente a refrigeração, pois o material isolante é péssimo condutor térmico também e sua redução traz um grande benefício na capacidade de retirada de calor gerado na barra, quando a refrigeração é a ar, o que representa a maioria das máquinas de pólos salientes em operação no mundo.

É indiscutível a evolução dos materiais isolantes com o tempo. Essa evolução tem proporcionado uma substancial redução nos tamanhos das máquinas. Apesar de serem reduções relativamente pequenas afetam e muito o dimensionamento total da máquina porque além da maior capacidade de condução de corrente, aumentam o espaço para o circuito magnético. Estas características otimizam muito a parte ativa da máquina.

Atualmente a maioria das tecnologias usa como isolação principal das barras, basicamente fitas de mica impregnadas a vácuo com resina epóxi em classe F. O que normalmente difere entre tecnologias é o modo como as fitas são impregnadas e como os aceleradores são aplicados durante a impregnação da resina. Invariavelmente, os processos aplicam vácuo para eliminação de

---

vazios nos processos e também pressão durante a impregnação. No estágio atual de desenvolvimento é comum se trabalhar com espessuras de isolamento que resultem em 3,0 [kV/mm] de “*stress*” embora muitos clientes exijam valores menores em suas encomendas.

Além da barra isolada também preenchem o espaço da ranhura os enchimentos, materiais anticorona e aterramento e materiais de amortecimento / embutimento.

Os materiais para enchimento são necessários devido às tolerâncias.

É usual que todos os materiais como cobre, isolantes e chapas siliciosas tenham tolerâncias de fornecimento, fabricação e montagem tanto nas ranhuras como nas barras. Isso resulta em diferenças que devem ser compensadas para que seja possível a montagem e de modo que não fiquem espaços vazios dentro das ranhuras.

Os materiais de enchimento são normalmente colocados no fundo e no topo das ranhuras, pois as maiores divergências de dimensões encontradas nas barras e ranhuras normalmente se encontram na maior dimensão que é a profundidade, embora existam também calços laterais pelos mesmos motivos porém numa escala menor. Os enchimentos são normalmente materiais isolantes laminados de fibra de vidro com espessuras variadas de 0,2 a 0,9 [mm] para colocação conforme necessidade, nos casos de calços de fundo de ranhura, necessariamente devem ser condutivos podendo ser pintados com pintura grafitada ou conter grafite na composição. Da mesma forma devem ser feitos os separadores entre barras inferiores e superiores.

Os materiais de embutimento e amortecimento são colocados nas laterais e em alguns casos também na profundidade com o objetivo de permitir

uma perfeita acomodação das barras nas ranhuras de modo a não deixar espaços vazios. Como normalmente são feitos de material flexível permitem o embutimento da barra (às vezes sob pressão) e servem como enchimento lateral. A característica flexível destes materiais permite o amortecimento de vibrações das barras nas ranhuras.

Há que se ressaltar que todos estes materiais externos à barra, inclusive a própria superfície externa da barra, levam uma camada ou são totalmente impregnados com material anticorona. Pode ser uma pintura grafitada ou conter grafite na composição de modo a ter característica semicondutiva.

O objetivo é que não haja entre o material isolante da barra e a superfície do núcleo do estator, nenhuma possibilidade de termos espaço no qual tenhamos o potencial de terra de um lado e o potencial do enrolamento transferido pela isolação para sua superfície de outro lado, pois, esta condição poderia fazer surgir efeito corona localizado (descargas) o que ao longo do tempo deteriora a isolação da barra.

A isolação dos condutores parciais é necessária para permitir que se separem as correntes que fluem em cada condutor. Avaliando a geração da tensão, se percebe que a tensão gerada em cada barra é pequena, mesmo em máquinas de tensões relativamente elevadas como por ex. 18 [kV]. O valor desta tensão gerada por barra depende da tensão da máquina e do número de barras em série por circuito e por fase;

$$V_{\text{espira}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot N_{\text{serie}}} \quad (4.22)$$

Para qualquer máquina com mais de 14 espiras em série há sempre baixa tensão por espira isto é, abaixo de 750 [V], isto é, a máxima tensão entre

um ponto no início da barra e outro no final da barra. Nas máquinas de médio e grande porte de pólos salientes, há sempre muito mais que 14 espiras em série e quando existem poucas espiras em série normalmente as tensões são menores que 18 [kV]. Assim é correto pensar que normalmente haverá uma tensão baixa por barra para quase qualquer caso de máquina, pois, entre condutores justapostos a tensão será proporcional aos teóricos  $v_{\text{espira}}$  [V] distribuídos ao longo de todo o comprimento da espira, o que resulta em valores realmente muito baixos. Logo a isolação entre condutores parciais, necessária para garantir a separação das correntes não é muito grande, usa-se testar esta isolação com 127 ou 220 [V] eficazes a frequência industrial. A isolação em si pode ser bem delgada com relação à tensão porem, os condutores parciais sofrem um manuseio muito severo durante a confecção das barras, especialmente nas manobras para transposição dos condutores, que requer operações de dobras com raios muito pequenos onde a isolação fica muito sujeita ao rompimento. Esta isolação é feita normalmente com esmalte aplicado diretamente sobre o cobre e um reforço externo de fitas de fibra de vidro impregnadas ambos com grande resistência mecânica ao dobramento.

#### 4.8 - ENTREFERRO E CARACTERÍSTICAS DOS PÓLOS

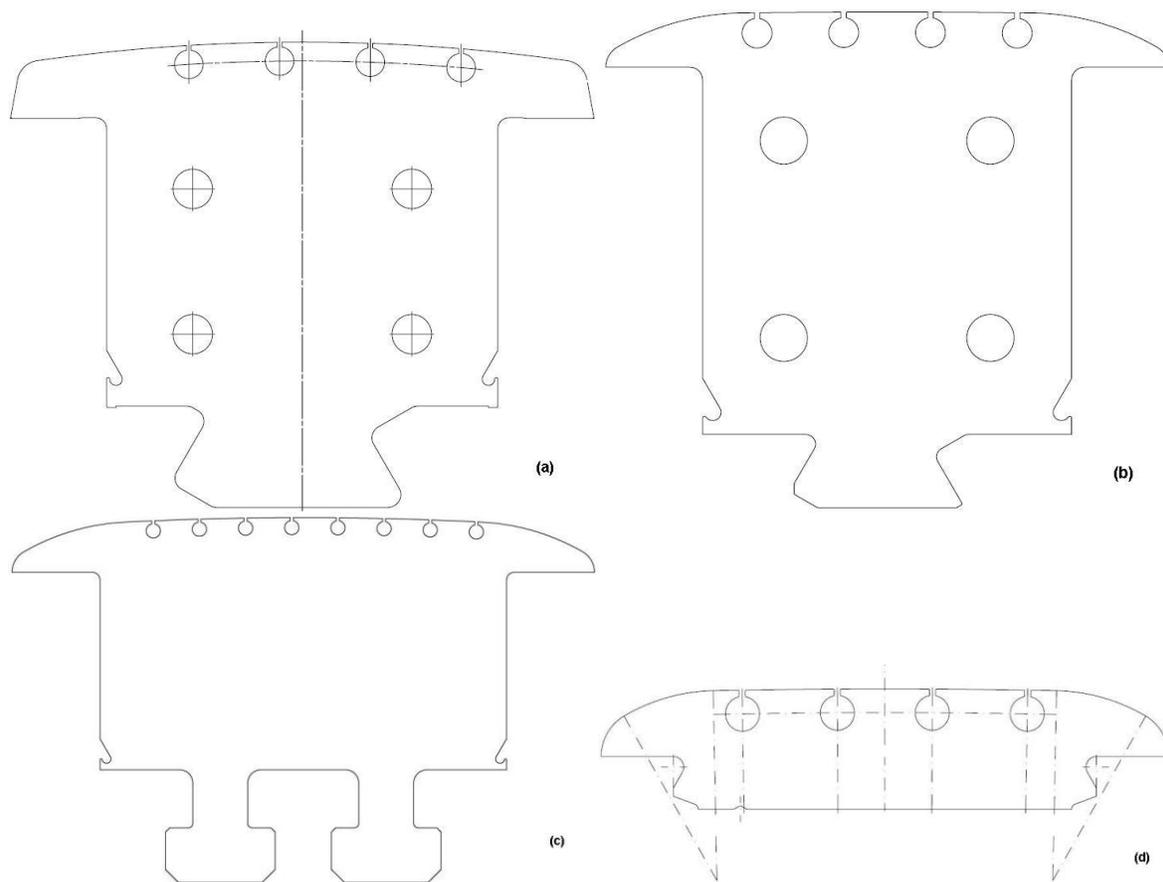
Nas curvas de fluxo por pólo figura 4.7 podem ser vistas as características típicas de fluxo por pólo em vazio e a componente fundamental correspondente.

A forma de onda do fluxo resultante no entreferro, responsável direta pela transmissão da potência eletromagnética do rotor para o estator, é função da geometria do pólo e da fmm (força magneto motriz) nele gerada.

Na figura 4.6 existem ainda varias formas usuais de pólos (ou sapatas

polares), por exemplo: entreferro constante, entreferro parcialmente constante e entreferro para campo senoidal. A escolha de um ou outro tipo depende da experiência que se tenha com cada um deles.

Uma vez definida a curvatura da sapata polar, devem ser definidos a largura da mesma e o entreferro no centro do pólo (chamado de entreferro nominal).



**Figura 4.6 Formatos de pólos típicos de uma máquina síncrona de pólos salientes (a) um raio, (b) (c) dois raios (d) três raios e corpo maciço.**

Algumas relações usuais ajudam na primeira aproximação de cálculo das dimensões do pólo:

### 1) relação de cobertura do pólo

Definida como a área que a superfície da sapata polar ocupa dentro da área destinada ao pólo, isto é, relação da largura da sapata polar para o passo polar.

$$0,7 \leq \frac{b_p}{\tau_p * 1000} \leq 0,75 \quad (4.23)$$

### 2) relação do entreferro

Definida como a relação de tamanho do entreferro para passo polar.

$$0,01 \leq \frac{\delta_0}{\tau_p * 1000} \leq 0,04 \quad (4.24)$$

### 3) entreferro

Estabelecimento de relação entre o entreferro propriamente dito para o diâmetro interno da máquina.

$$\delta_0 > D_i \quad (4.25)$$

Também convém chamar atenção que o valor do entreferro deve ser, por razões construtivas e de montagem, compatível com as dimensões da máquina. Naturalmente, o valor do entreferro nominal é fundamental para quase todas as grandezas elétricas da máquina. Dessa forma é muito difícil que seu valor possa ser previamente definido. Assim, as relações citadas anteriormente são aproximadas, sendo que seu valor final somente poderá ser determinado após iterações de cálculo completo para delimitar todas as exigências elétricas da máquina.

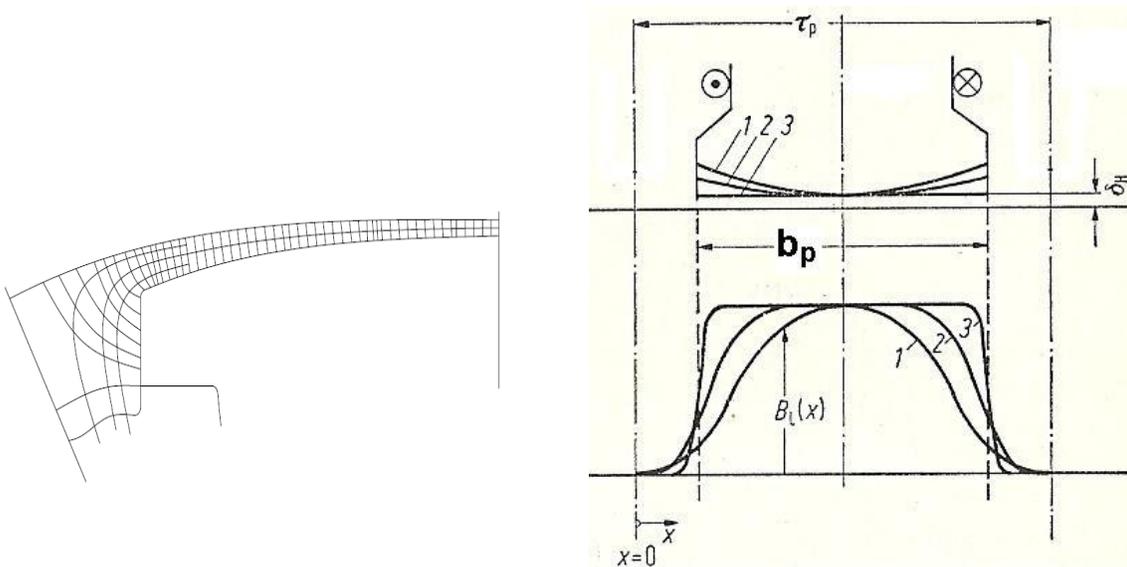
4) Fator de campo

Definido como a relação do valor da indução máxima no entreferro pela amplitude da componente fundamental da indução por pólo, calculado pela equação (4.26).

$$\beta = \frac{B_{\delta}}{B_1} \tag{4.26}$$

Desde que se guardem as relações  $b_p/\tau_p$  e  $\delta_0/\tau_p$ . É de se esperar que o fator de campo fique nos limites;

$$0,80 \leq \beta \leq 0,94 \tag{4.27}$$



**Figura 4.7** Detalhes de distribuição típica de campo na superfície polar

Para completa definição do pólo, a indução no corpo polar pode ser usada como parâmetro. Este valor normalmente varia de 1,4 até 1,6 [T]. Como a altura do pólo está limitada pela altura do estator  $L$ , a largura do corpo do

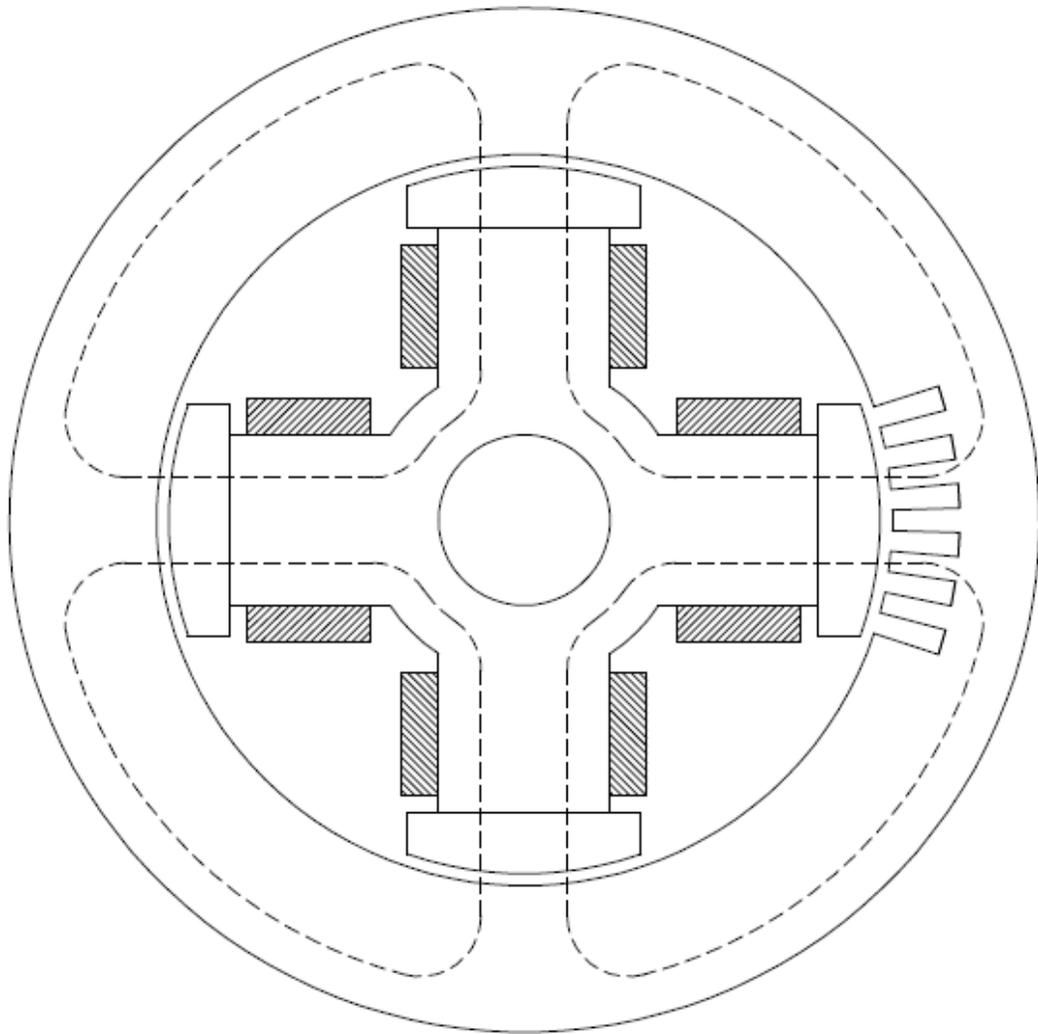
---

pólo dependerá de fatores físicos como alojamento do total de espiras de excitação e canal de passagem de ar para ventilação entre pólos, além dos esforços mecânicos sobre a sapata polar.

#### **4.9 - ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO**

Uma vez que o enrolamento de excitação é o responsável pela geração de toda fmm da máquina necessária para impor os valores de indução em todos pontos, o mesmo depende da definição de todas as dimensões do circuito magnético da máquina.

O circuito magnético é um caminho fechado para a circulação do fluxo gerado.



**Figura4.8 Trajetória do fluxo magnético em uma máquina síncrona de pólos salientes de 4 pólos.**

Aproximadamente 90% da fmm gerada é usada para vencer somente o entreferro. Logo em uma primeira aproximação;

$$N_{exc} \cdot I_{exc} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad (4.28)$$

Este é o ponto de partida para definição do enrolamento de excitação e altura do corpo do pólo. Inicialmente adota-se uma densidade de corrente para o enrolamento de excitação entre 2 e 3,5 [A/mm<sup>2</sup>].

A partir do valor adotado, devem ser verificados:

- Se a corrente de excitação resultar muito alta torna-se necessário um equipamento de excitação muito sofisticado e caro.
- Se o número de espiras for muito elevado, será exigida uma altura muito grande do corpo polar.

A dimensão do cobre da espira também tem limitações de relação entre largura e espessura encontradas no mercado. Como primeira aproximação define-se a largura do condutor, calculando-se a largura do espaço disponível sob a sapata polar de acordo com a equação (4.29):

$$L_{cu} = \frac{b_p - b_{cp}}{2} \quad (4.29)$$

Com essa largura, está configurado um espaço disponível entre pólos, sem que haja algum prejuízo para a ventilação. Isso significa que indiretamente fica estabelecida uma altura do corpo polar  $H_{cp}$ .

Como há uma limitação de relação entre espessura e largura para condutores comerciais, resulta uma espessura mínima para aquela largura do condutor. A partir daí define-se o número de espiras.

Conseqüentemente, a corrente de excitação será conhecida através da fmm definida na equação (4.28).

Com estas premissas, a primeira aproximação está estabelecida.

#### 4.10 - ENROLAMENTO AMORTECEDOR

O enrolamento amortecedor é constituído de barras instaladas sobre as

sapatas polares e curto-circuitadas em ambas as extremidades. Isso significa que cada pólo possui um enrolamento amortecedor, que pode ser interligado ao do pólo vizinho ou não.

O enrolamento amortecedor tem por finalidade reduzir as oscilações na rotação provocadas pela máquina motriz, por variações de carga e frequência da rede e por desequilíbrios de carga.

Em funcionamento normal com carga equilibrada, frequência e rotação constantes, a corrente circulante pelo enrolamento amortecedor não é significativa.

O dimensionamento do enrolamento amortecedor dependerá do desequilíbrio de cargas admissível pela máquina e da geometria do pólo.

O fator de desequilíbrio de cargas admissível é a relação básica de corrente desequilibrada para corrente do estator;

Adota-se como fator de desequilíbrio fator requisitado nas especificações, normalmente para máquinas de pólos salientes costuma variar de 12 a 20%.

Assim, se determina a secção total das barras de amortecimento por pólo também conhecido como amortecimento transversal:

$$\sum Q_3 = k_{deseq} \cdot \frac{A1}{1000} \cdot \frac{\tau_p}{S_3} \quad (4.30)$$

Dessa forma resta a definição do número de barras e sua geometria, de modo a adequá-las à geometria do pólo. Importante observar que a relação entre o passo das ranhuras do estator e passo das ranhuras de amortecimento deve diferir em até aproximadamente 15%. Do ponto de vista do

amortecimento interessa basicamente a secção e não a forma. Assim, normalmente se usa para geradores barras de cobre redondas por questões de custo e facilidade de fabricação. Caso o gerador deva ser usado como motor, como no caso de turbina-bomba, a forma e o material das barras é fator decisivo, mas este estudo não faz parte deste trabalho.

Para definição completa falta ainda especificar a altura e largura do pescoço das ranhuras de amortecimento. Essa relação importa para o efeito de dispersão do fluxo em torno das barras. Dessa forma afetando grandezas como reatâncias e constantes de tempo, especialmente sub-transitórias conforme será visto posteriormente.

O segmento de fechamento em curto das barras amortecedoras deve ter uma secção transversal compatível com a das barras, pode ser aproximado por:

$$Q_{seg} = 0,8 \cdot \sum Q_3 \quad (4.31)$$

Outro fato a considerar é a conexão dos enrolamentos amortecedores de pólos vizinhos. Essa necessidade pode ser expressa textualmente nas especificações ou indiretamente se solicitada a redução da corrente de curto circuito bifásico, que depende diretamente da relação:

$$\frac{X_q''}{X_d''} \quad (4.32)$$

Neste caso uma conexão entre os enrolamentos amortecedores de cada pólo pode alterar significativamente o amortecimento no eixo em quadratura e consequentemente aumentar a reatância  $X_q''$ .

#### 4.11 - SOLICITAÇÕES MECÂNICAS DAS PARTES ATIVAS

As solicitações mecânicas e suas respectivas compensações estão resumidas na tabela a seguir.

<b>Parte ativa da máquina</b>	<b>Solicitação</b>	<b>Compensação</b>
Núcleo do Estator	Esforços e torques nas barras do estator e magnéticos	Cunhas na parte traseira do núcleo e dedos de aperto nas extremidades.
Pólo	Esforços centrífugos e magnéticos	Cunhas nos pés de pólos e abas nas sapatas polares.
Anel magnético	Esforços centrífugos	Tirantes passantes através da altura, chavetas internas.
Enrolamento amortecedor	Esforços de expansão térmica, torques e vibrações.	Travamento das barras no centro e em vários pontos ao longo do comprimento.
Enrolamento de excitação	Esforços centrífugos	Travamento nas abas das sapatas polares e suportes laterais entre pólos
Enrolamento da armadura	Esforços de torques e atração e repulsão nas ranhuras e nas conexões.	Cunhas de ranhuras, amarrações de cabeças de bobina, anéis de surto e braçadeiras isolantes.

#### 4.12 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo privilegiou o cálculo elétrico dos componentes da parte ativa

---

dos geradores mostrando as dificuldades principais e as limitações normais enfrentadas. A abordagem corresponde às preocupações principais e os cuidados na definição das máquinas. No próximo capítulo serão abordadas características elétricas da máquina.

---

## 5 - REATÂNCIAS E CONSTANTES DE TEMPO

### 5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A definição da geometria da máquina é o ponto de partida para todas as relações de operação da mesma. As reatâncias e constantes de tempo dependem basicamente da geometria da máquina.

Assim, estas grandezas se tornam o que se pode chamar de “gene” ou “assinatura” ou “DNA” da máquina.

Tanto as reatâncias (através de circuitos equivalentes) como as constantes de tempo, permitem a análise quantitativa da máquina para as diferentes condições operativas do sistema ao qual está conectada. Assim, são fundamentais para se interpretar o funcionamento da máquina.

As reatâncias e constantes de tempo não devem ser reguladas por normas, mas por requisitos típicos editados conforme especificações técnicas dos empreendimentos, que indicam a expectativa com relação ao comportamento da máquina, em função do sistema onde a mesma funcionará e atendendo ainda a uma expectativa de crescimento futuro da rede.

Para justificar as simplificações e ordenar os conceitos, cabe observar que as reatâncias representam as fem (Força Eletromotriz) induzidas por fluxos de dispersão e/ou concatenados, sendo em última análise definida pela equação do tipo  $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ .

A idéia do capítulo é abranger um significado físico para cada grandeza bem como, abordar métodos de determinação e uma análise de valores recomendados para cada tipo de máquina.

**5.2 - REATÂNCIA DE DISPERSÃO DA ARMADURA.  $X_{a\sigma}$** 

É definida e calculada pela equação (5.1):

$$X_{a\sigma} = X_{n\sigma} + X_{s\sigma} \quad (5.1)$$

Calcula-se a componente reatância de dispersão nas ranhuras pela equação (5.2):

$$X_{n\sigma} = \varepsilon_{n\sigma} \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.2)$$

Calcula-se a componente reatância de dispersão nas cabeças de bobina pela equação (5.3):

$$X_{s\sigma} = \varepsilon_{s\sigma} \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.3)$$

A reatância de dispersão da armadura pode ser medida com o rotor da máquina fora do estator. Entretanto o valor obtido será acrescido da reatância de dispersão do vazio no estator deixado pelo rotor, chamado de (furo do estator), seja:

$$X_{medido} = X_{a\sigma} + X_{B\sigma} \quad (5.4)$$

OBS. “O valor assim medido é conhecido como Reatância de Potier  $X_p$ , usado na construção das curvas características em carga a partir das curvas de saturação em vazio e curto.

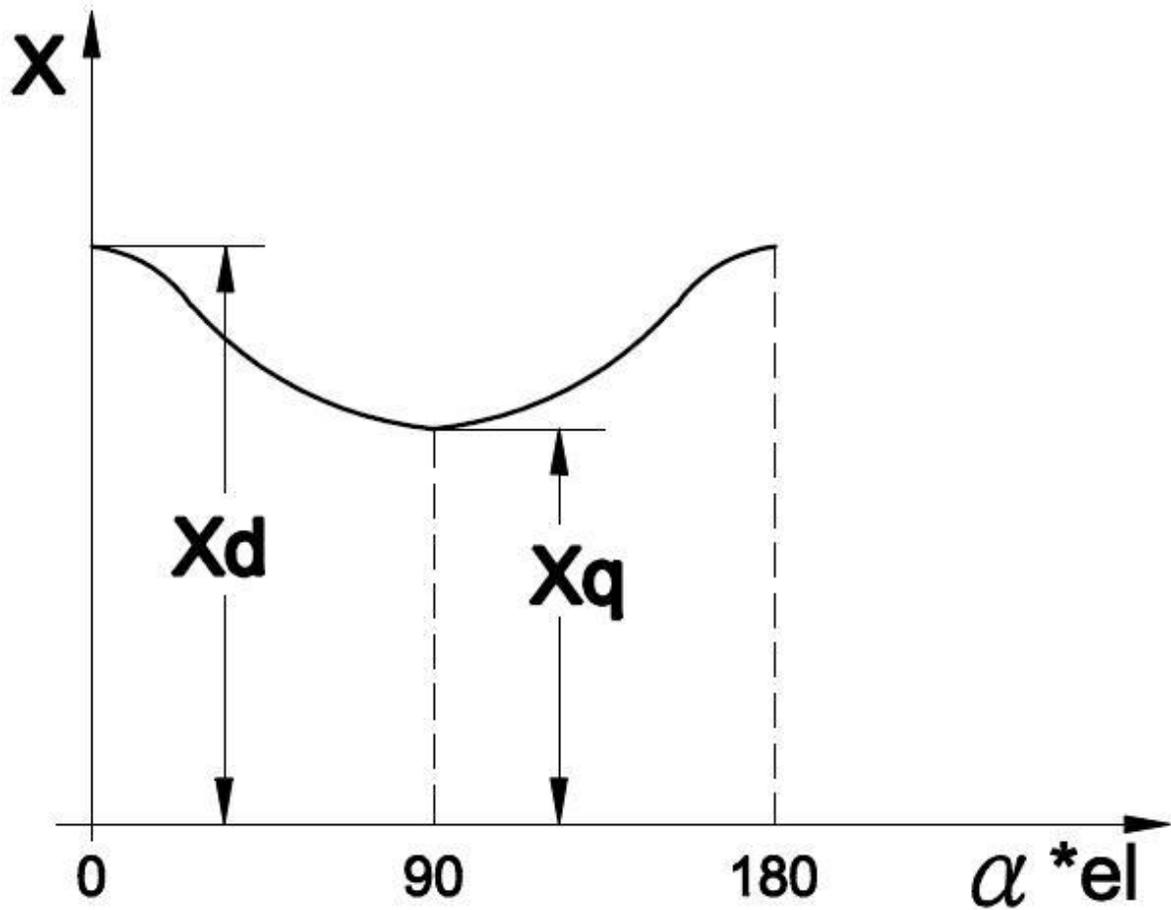
Para que a dispersão do estator possa ser determinada pela equação (5.4) usa-se determinar a reatância de dispersão do furo do estator pela

equação (5.5).

$$X_{B\sigma} = 1,76 \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.5)$$

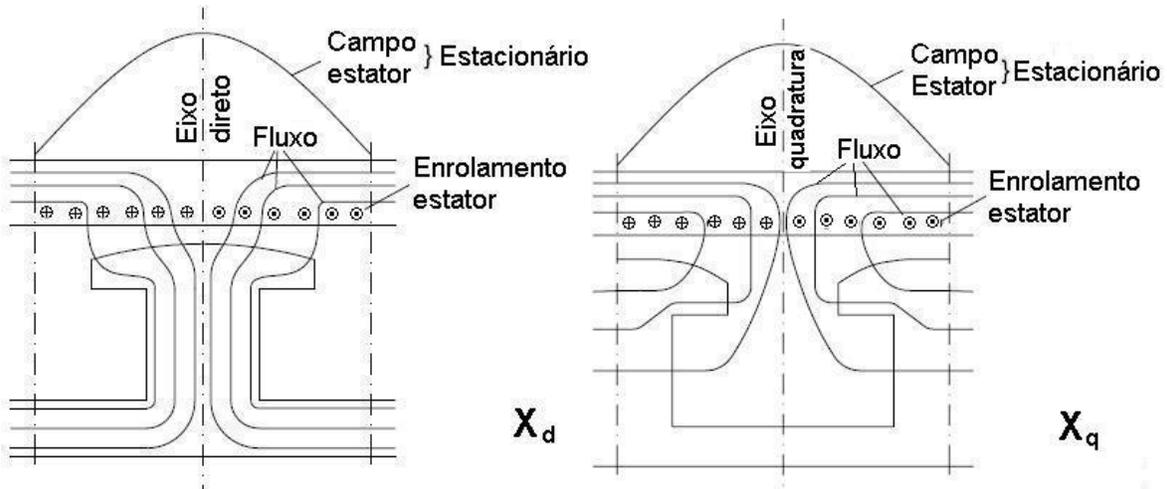
### 5.3 - REATÂNCIAS SÍNCRONAS. $X_d$ E $X_q$

De acordo com a teoria das duas reações eixo direto e eixo em quadratura, a indutância da máquina vista pela armadura é variável conforme a posição relativa entre, o campo girante de reação da armadura e o eixo do pólo. O valor máximo é obtido quando o campo girante tem seu eixo coincidente com o eixo do pólo, isto é, **eixo direto**. Esse valor de reatância indutiva é chamado de *reatância síncrona de eixo direto*  $X_d$  da mesma forma quando o campo girante tem seu eixo coincidente com o eixo do centro entre pólos, isto é, **eixo em quadratura** esse valor de reatância indutiva é chamado de *reatância síncrona de eixo em quadratura*  $X_q$ , as figuras (5.1) e (5.2) ilustram a situação descrita. Especialmente a figura (5.2) mostra a clara relação do efeito das diferentes relutâncias nas respectivas reatâncias.



**Figura 5.1** Reatância da máquina em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.

Varição da reatância síncrona com a posição relativa entre campo girante e rotor.



**Figura 5.2 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias: Síncrona de eixo direto e Síncrona de eixo em quadratura**

**5.3.1 – MÉTODO DE MEDIDA PARA  $X_d$  E  $X_q$**

Um método para a medida destes valores (restrito pelas dificuldades de execução) seria girar a máquina forçando um escorregamento muito pequeno, alimentar o estator com uma tensão parcial em torno de 15 a 20% da nominal e manter o enrolamento de excitação aberto. Oscilografar a tensão e corrente do estator assim como a tensão nos terminais abertos do enrolamento de excitação.

A reatância síncrona de eixo direto será dada por;

$$X_d = \frac{V_{fase 0}}{I_{fase 0}} \tag{5.6}$$

A reatância síncrona de eixo em quadratura seria obtida por

$$X_q = \frac{V_{faseM}}{I_{faseM}} \quad (5.7)$$

### 5.3.2 – MÉTODO PARA CÁLCULO DE $X_d$ E $X_q$ .

Também se pode determinar estas reatâncias por cálculo usando a reatância do campo principal e reatância de dispersão da armadura, de acordo com a equação (5.8):

$$X_d = X_h \cdot C_d + X_{a\sigma} \quad (5.8)$$

Calcula-se também a reatância síncrona de eixo em quadratura pela equação (5.9):

$$X_q = X_h \cdot C_q + X_{a\sigma} \quad (5.9)$$

Os fatores  $C_d$  e  $C_q$  chamados fatores de atenuação dependem é claro da geometria da máquina especialmente da forma da sapata polar, por exemplo, para máquinas de pólos lisos  $C_d = C_q = 1,0$ . Para máquinas de pólos salientes:

1) com superfície de pólo para campo retangular  $C_d = 0,95$  e  $C_q = 0,6$

2) com superfície de pólo para campo senoidal  $C_d = 0,82$  e  $C_q = 0,4$

A reatância do campo principal, no entanto depende das grandezas

básicas para definição das reatâncias e pode ser determinada por dois caminhos distintos conforme as equações (5.10) ou (5.12);

$$X_h = k \cdot \frac{\tau_p}{\delta_0} \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.10)$$

$$k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon_1 \quad (5.11)$$

Conforme esclarecido anteriormente a reatância do campo principal poderá ser determinada pela equação (5.12);

$$X_h = \frac{A_g}{A_l} = \frac{\gamma \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot A1}{A_l} \quad (5.12)$$

### 5.3.3 – EFEITO DA SATURAÇÃO EM $X_d$ E $X_q$ .

O efeito da saturação em  $X_d$  e  $X_q$  pode ser uma exigência de projeto;

#### 1) Efeito em $X_d$ .

A determinação teórica da reatância saturada pode ser mais aproximada pela equação (5.13):

$$X_{ds} = X_{a\sigma} + X_h \cdot C_d \cdot \frac{2}{k_{sw} + k_{sb}} \quad (5.13)$$

Na verdade os fatores aplicados à reatância principal são fatores de

saturação obtidos da característica em vazio e reta do entreferro.

$$k_{sw} = \frac{\text{Inclinação Re taEntrefer ro}}{\text{TensãoPoti er}} \text{ fator de saturação para oscilações de}$$

potência ativa, varia na faixa de 1,2 a 1,4.

$$k_{sb} = \frac{\text{Inclinação Re taEntrefer ro}}{\text{Inclinação CurvaVazio}} \text{ fator de saturação para oscilações de}$$

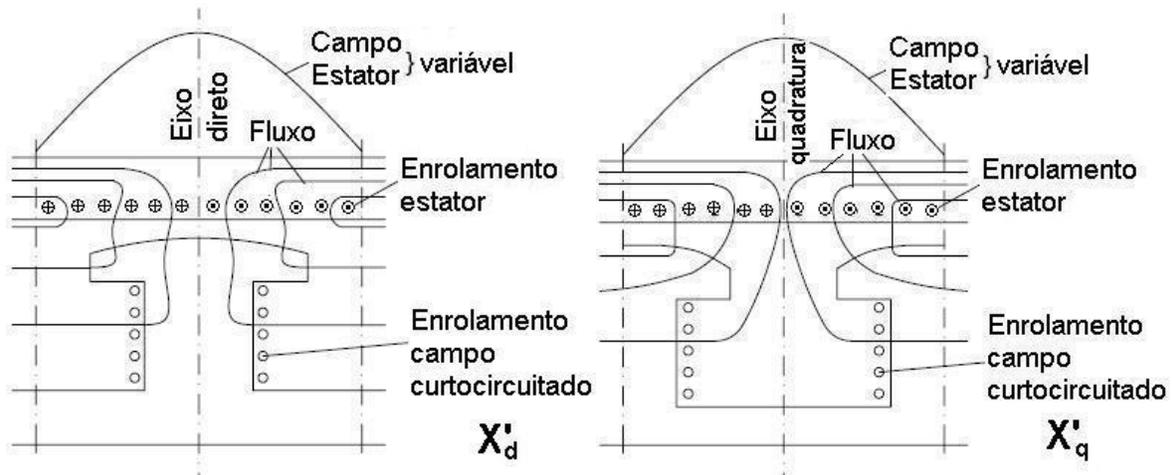
potência reativa, varia na faixa de 2,5 a 3,0.

2) Efeito em  $X_q$ .

Quanto às considerações de redução dos valores, valem igualmente as feitas anteriormente, já no que se refere à saturação, o efeito pode ser desprezado nas utilizações normais; fato previsível uma vez que o entreferro relativo no eixo em quadratura é muito grande em relação ao entreferro nominal, para máquinas síncronas de pólos salientes.

#### 5.4 - REATÂNCIAS TRANSITÓRIAS $X'_d$ E $X'_q$

Esses valores são utilizados no circuito equivalente da máquina no caso de curto circuito nos terminais do estator, sem considerar o efeito do enrolamento amortecedor ou qualquer outro amortecimento. No instante do curto os fluxos seriam mantidos em intensidade, porém ao invés de se fecharem pelos caminhos normais se fechariam pelos caminhos de dispersão (isto porque as correntes elevadas de curto aumentam e muito a reação da armadura podendo ou não saturar o circuito magnético principal). Nestas condições, a reatância oferecida pela máquina seria uma reatância total de dispersão, que é a reatância transitória.

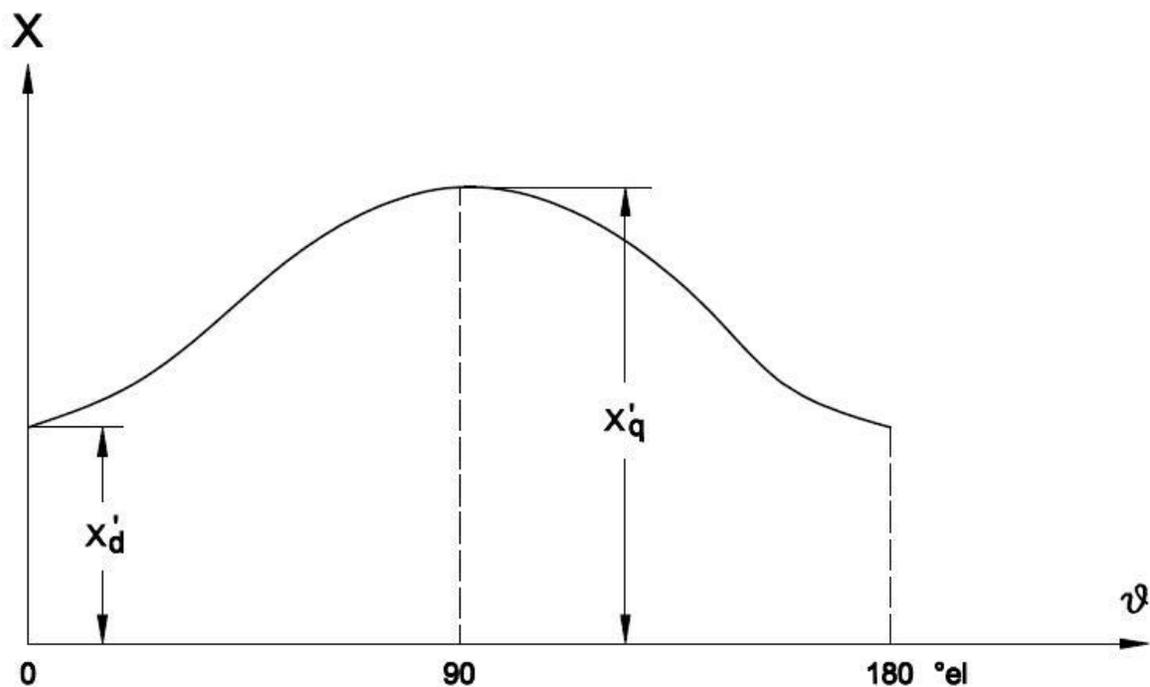


**Figura 5.3 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias; Transitória de eixo direto e Transitória de eixo em quadratura**

#### 5.4.1 – MÉTODO DE MEDIDA PARA $X'_d$ E $X'_q$

Experimentalmente pode se determinar as reatâncias transitórias pelo ensaio de curto circuito brusco. Do ponto de vista teórico, da mesma forma como considerado para as reatâncias síncronas. Como o rotor gira na mesma velocidade do campo girante, podemos então supor o rotor parado com o enrolamento de excitação curto-circuitado e sem amortecimento. Nestas condições se o estator for alimentado com uma tensão alternada, o campo passará por todas as posições do rotor sendo que as mais significativas são as mostradas na Figura 5.3 . Assim, quando o campo passar pela direção do eixo em quadratura, a reatância vista no estator é a transitória  $X'_q$  que é a mesma do caso anterior então  $X'_q = X_q$  pois nada mudou neste caminho, quando comparada com a simulação feita para o caso da Figura 5.2 item  $X_q$  . Ao se

observar o eixo direto, a situação é diferente porque o caminho percorrido pelo fluxo é alterado pela reação do fluxo imposta através do circuito de excitação curtocircuitado, neste momento a reatância vista no estator é a reatância transitória  $X'_d$ . A Figura 5.4 ilustra a variação da reatância do estator em função da posição do campo girante em relação ao rotor.



**Figura 5.4 Reatâncias Transitórias em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.**

OBS.: Esta experiência é imaginária, pois para se poder visualizar o significado das reatâncias, não se tem como fazer este ensaio porque há amortecimentos que não podem ser desfeitos para o teste.

A importância da reatância transitória especialmente  $X'_d$  aparece no estudo do funcionamento não estacionário de máquinas, lembrando que, a estabilidade dinâmica da máquina melhora a medida que a reatância transitória

$X'_d$  diminui conforme visto anteriormente.

### 5.4.2 – MÉTODO PARA CÁLCULO DE $X'_d$ E $X'_q$

Usando o circuito equivalente mostrado na Figura 5.5 para determinar a reatância transitória, calcula-se por (5.14):

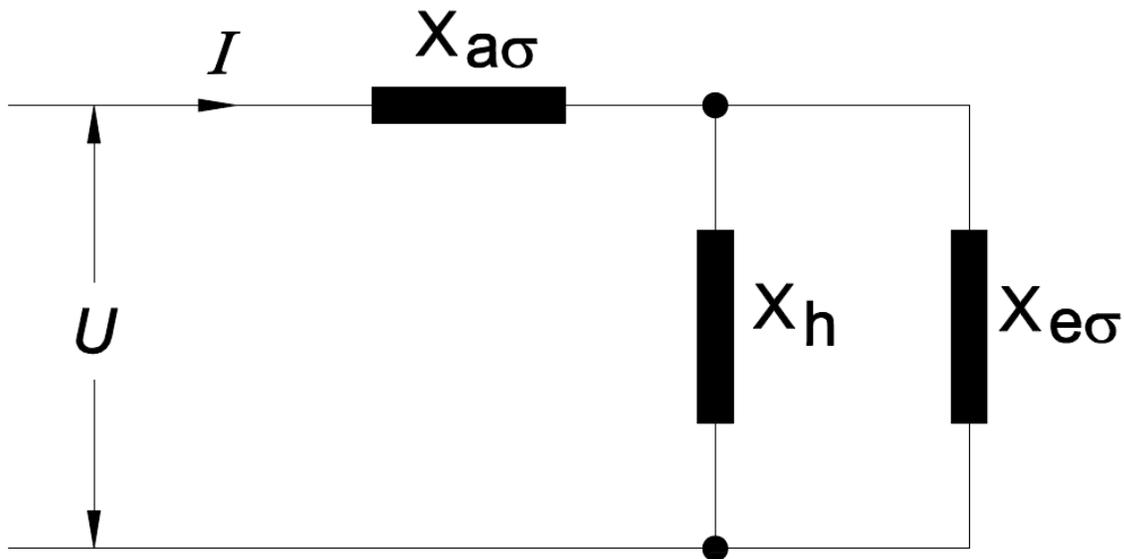
$$X'_d = X_{a\sigma} + \frac{(X_h \cdot C_d) \cdot X_{e\sigma}}{(X_h \cdot C_d) + X_{e\sigma}} \quad (5.14)$$

Calcula-se também a reatância transitória de eixo em quadratura pela equação (5.15):

$$X'_q = X_{a\sigma} + X_h \cdot C_q \approx X_q \quad (5.15)$$

Calcula-se ainda a reatância transitória de eixo em quadratura pela equação (5.16):

$$X_{e\sigma} = 1,65 \cdot \frac{\Lambda'}{l \cdot 100} \cdot \gamma \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.16)$$



**Figura 5.5 Circuito equivalente da máquina em operação transitória.**

### 5.4.3 – EFEITO DA SATURAÇÃO EM $X'_d$ E $X'_q$

Se usado o valor saturado de  $X_h, C_d$  com os fatores de saturação conforme as considerações idênticas as feitas na determinação de  $X_{ds}$  no item anterior, obtém-se boa aproximação da reatância transitória de eixo direto saturada  $X'_{ds}$ . Da mesma forma, no eixo em quadratura o efeito da saturação quase não é sentido em máquinas de pólos salientes  $X'_{qs} = X'_q$ .

### 5.5 - REATÂNCIAS SUB TRANSITÓRIAS $X''_d$ E $X''_q$

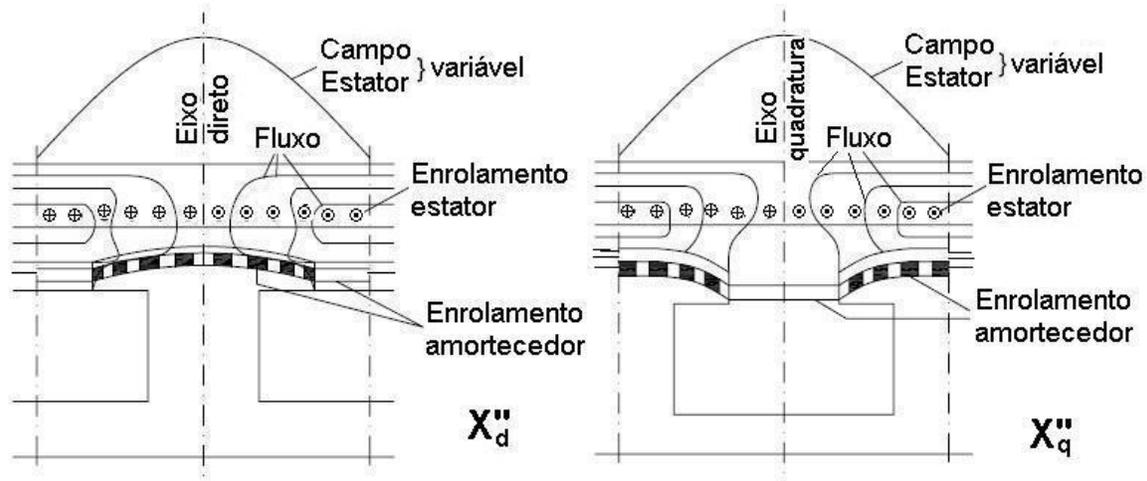
Esses valores são utilizados no circuito equivalente da máquina no caso de curto circuito nos terminais do estator, considerando todos os efeitos de amortecimento. No instante do curto os fluxos são mantidos em intensidade,

porém ao invés de se fecharem pelos caminhos normais se fecham pelos caminhos de dispersão (devido às correntes elevadas de curto aumentam e muito a reação da armadura podendo ou não saturar o circuito magnético principal). Nestas condições, a reatância oferecida pela máquina é uma reatância total de dispersão, majorada e muito pelo efeito do enrolamento amortecedor que está muito próximo da armadura, que é a reatância sub-transitória.

### 5.5.1 – MÉTODO DE MEDIDA PARA $X_d''$ E $X_q''$

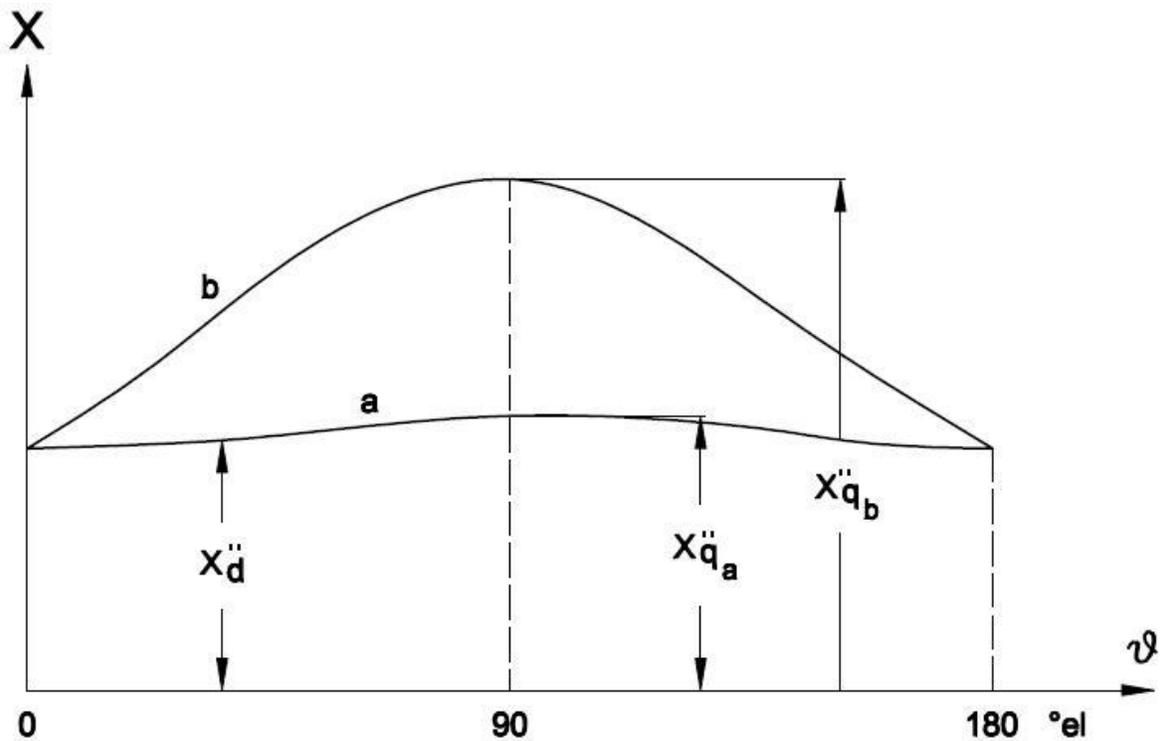
Com o rotor parado e com o enrolamento de excitação curtocircuitado e incluindo todos os amortecimentos, alimenta-se o estator por duas fases com uma tensão alternada, numa primeira vez com o eixo das bobinas coincidente com os eixos dos pólos e numa segunda vez coincidente com o eixo quadratura dos pólos situações mostradas na Figura 5.6 .

Assim, para a posição do rotor (parado) com o eixo do pólo coincidente com o eixo da fase alimentada, obtém-se uma reatância medida  $X_d''$ , situação em que tem-se a corrente máxima induzida no enrolamento de excitação em curto. Da mesma forma para o eixo da fase coincidente com o eixo em quadratura entre os pólos obtém-se  $X_q''$ , situação em que se tem a corrente mínima (quase zero) induzida no enrolamento de excitação em curto.



**Figura 5.6 Distribuição de fluxos (de reação da armadura) para as reatâncias, sub transitória de eixo direto e sub transitória de eixo em quadratura.**

A variação dos valores pode ser vista na Figura 5.7 onde, a diferença entre enrolamento amortecedor contínuo com  $X''_q$  muito pequeno (curva “a”) e enrolamento amortecedor com gaiolas isoladas onde  $X''_q$  bem maior (curva “b”) é mostrada.



**Figura 5.7 Reatâncias Sub Transitórias em função do ângulo entre campo girante e eixo polar.**

Nos casos de enrolamento amortecedor contínuo pode acontecer até mesmo casos em que  $X_q'' = X_d''$ .

OBS: Nos casos de pólos maciços  $X_q''$  tem valores intermediários devido a correntes parasitas que se formam nas extremidades das sapatas polares.

Os valores absolutos de  $X_d''$  e de  $X_q''$  são menores do que as reatâncias transitórias porque os enrolamentos de amortecimento estão mais próximos do estator que o enrolamento de excitação, tornando seu efeito mais sensível.

Observa-se ainda que a reatância sub transitória pode ser determinada

pela oscilografagem das tensões e correntes num ensaio de curto circuito brusco.

### 5.5.2 – MÉTODO PARA CÁLCULO DE $X_d''$ E $X_q''$

Pode-se também determinar os valores destas reatâncias sub transitórias por cálculo usando o circuito equivalente das Figuras 5.8 e 5.9 donde se obtém as seguintes relações:

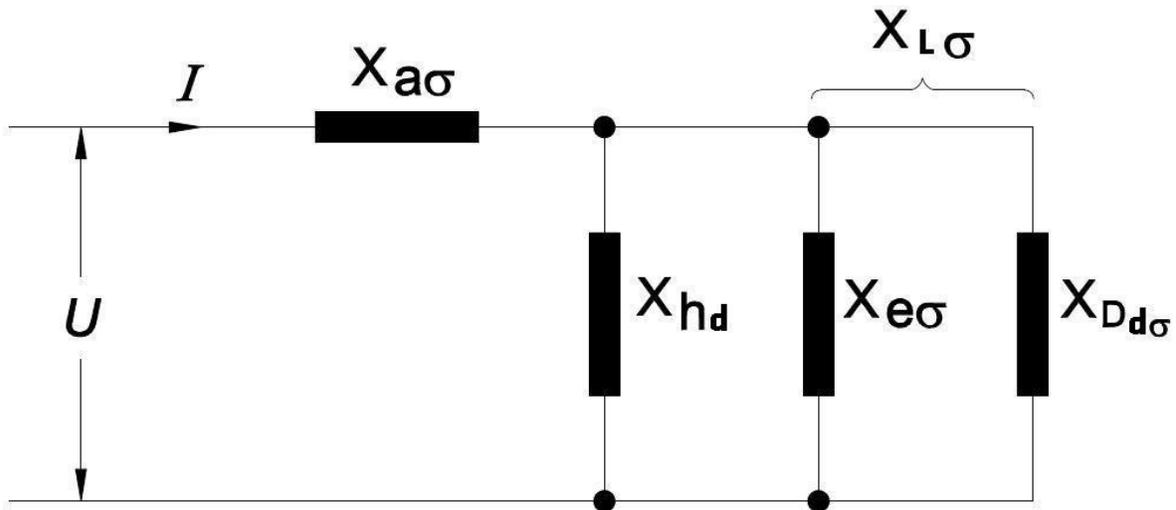
$$X_d'' = X_{a\sigma} + \frac{(X_h \cdot C_d) \cdot X_{L\sigma}}{(X_h \cdot C_d) + X_{L\sigma}} \quad (5.17)$$

Calcula-se então a reatância auxiliar de dispersão da excitação e amortecimento pela equação (5.18):

$$X_{L\sigma} = \frac{X_{e\sigma} \cdot X_{Dd\sigma}}{X_{e\sigma} + X_{Dd\sigma}} \quad (5.18)$$

Calcula-se ainda a reatância de dispersão do enrolamento amortecedor no eixo direto referida ao estator pela equação (5.19):

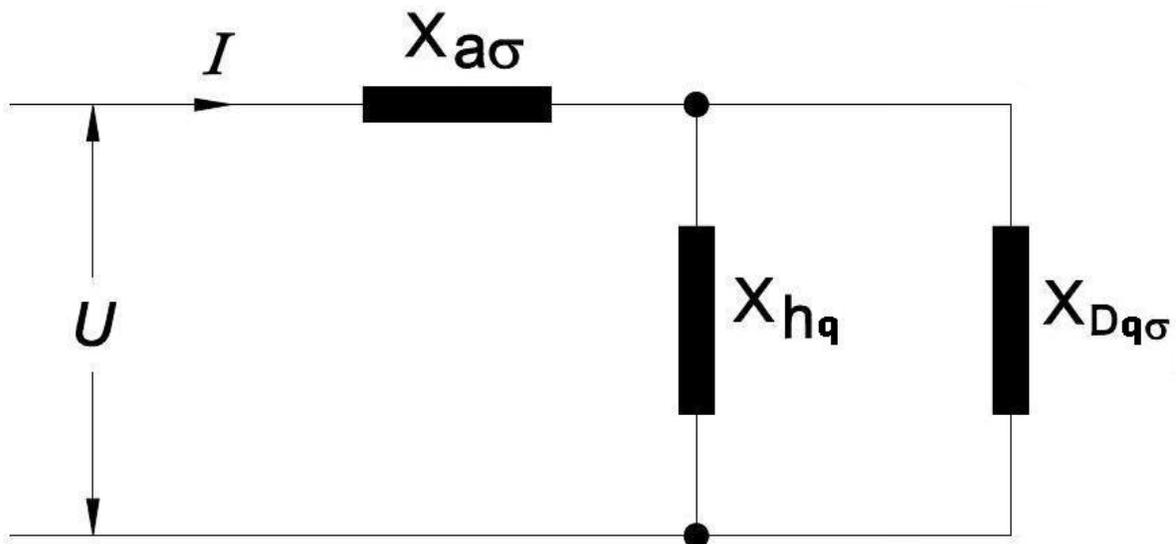
$$X_{Dd\sigma} = 5,6 \cdot \frac{\Lambda_D}{N_p} \cdot \frac{1}{l} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{A1}{B1} \quad (5.19)$$



**Figura 5.8** Circuito equivalente da máquina em operação subtransitória (eixo direto).

No eixo em quadratura:

$$X_q'' = X_{a\sigma} + \frac{(X_h \cdot C_q) \cdot X_{Dq\sigma}}{(X_h \cdot C_q) + X_{Dq\sigma}} \quad (5.20)$$



**Figura 5.9** Circuito equivalente da máquina em operação subtransitória (eixo quadratura).

Há situações nas quais o amortecimento é bastante efetivo no eixo “q” e podemos considerar  $X_{Dq\sigma} = X_{Dd\sigma}$ , casos do enrolamento amortecedor completamente conectado.

NOTA:

A relação  $\frac{X_q''}{X_d''}$  deve ser sempre observada no projeto da máquina, pois

nos casos de curto circuito bifásico a tensão na fase aberta é dada por:

$$U_{Bi \max} = \left( 2 \cdot \frac{X_q''}{X_d''} - 1 \right) \cdot U_N \quad (5.21)$$

Dessa forma o risco de sobretensões é limitado pela relação  $\frac{X_q''}{X_d''}$ .

### 5.5.3 – EFEITO DA SATURAÇÃO EM $X_d''$ E $X_q''$

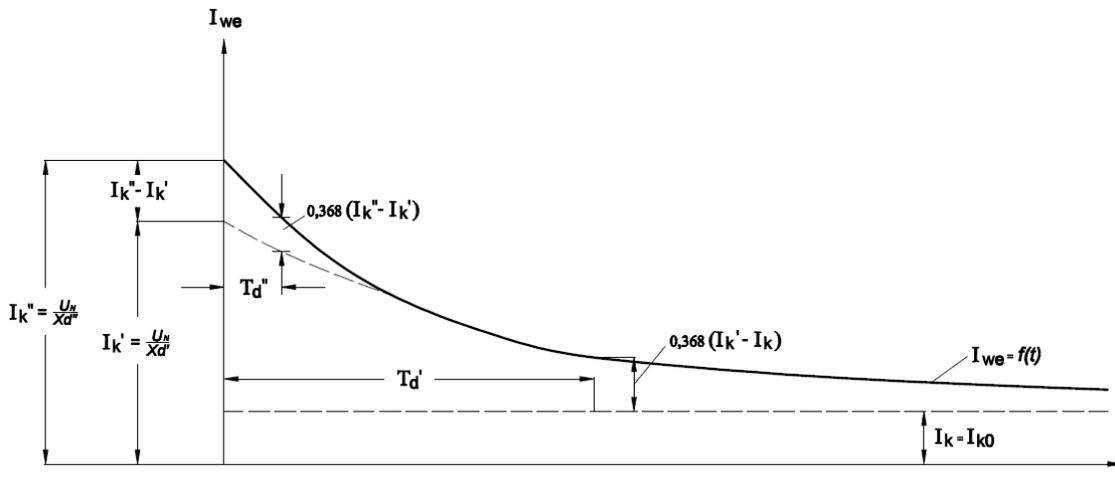
Para máquinas síncronas de pólos salientes com enrolamento de amortecimento, o efeito da saturação em  $X_d''$  e  $X_q''$  é muito pequeno e pode ser desprezado nos casos em que os valores em [pu] sejam  $\geq 0,12$  e em que a faixa de variação da tensão estiver dentro de +-10%, o que corresponde a esmagadora maioria dos geradores existentes.

Quando o efeito da saturação começar a ser significativo sobre  $X_{a\sigma}$  então poderemos ter seu efeito sentido nas reatâncias sub transitórias estes casos, porém são especiais e mais difíceis de determinação. Não serão abordados aqui.

5.6 - CONSTANTES DE TEMPO EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

Constante de tempo é matematicamente definida a partir de função exponencial no tempo, do tipo  $y = k \cdot e^{-t/\tau}$ , onde a constante de tempo

$\tau$  representa o tempo necessário para que a função atinja 63,2% do valor final, conforme ilustra o gráfico da figura (5.10).



**Figura 5.10 Representação das constantes de tempo para o amortecimento das correntes.**

De uma forma genérica, após um tempo  $t = 4$  ou  $5$  vezes o valor de  $\tau$  a função praticamente já atingiu o valor final.

Para um circuito “RL” típico, composto de resistências e indutâncias puras, a constante de tempo característica é dada por equações do tipo:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

No caso das máquinas elétricas girantes, existem efeitos capacitivos formados pela justaposição dos condutores e suas isolações com o circuito magnético aterrado. Estes efeitos são relativamente pequenos, quando comparados com os efeitos de reatância indutiva  $X_L$  e da resistência  $R$  que são predominantes (na frequência industrial).

Na seqüência são avaliadas as definições de cada constante de tempo, obtidas de pesquisas sobre as condições em vazio e curto circuito da máquina.

### 5.7 - CONSTANTE DE TEMPO DA ARMADURA

Indica a taxa de decréscimo da componente contínua da corrente de curto circuito trifásico na armadura.

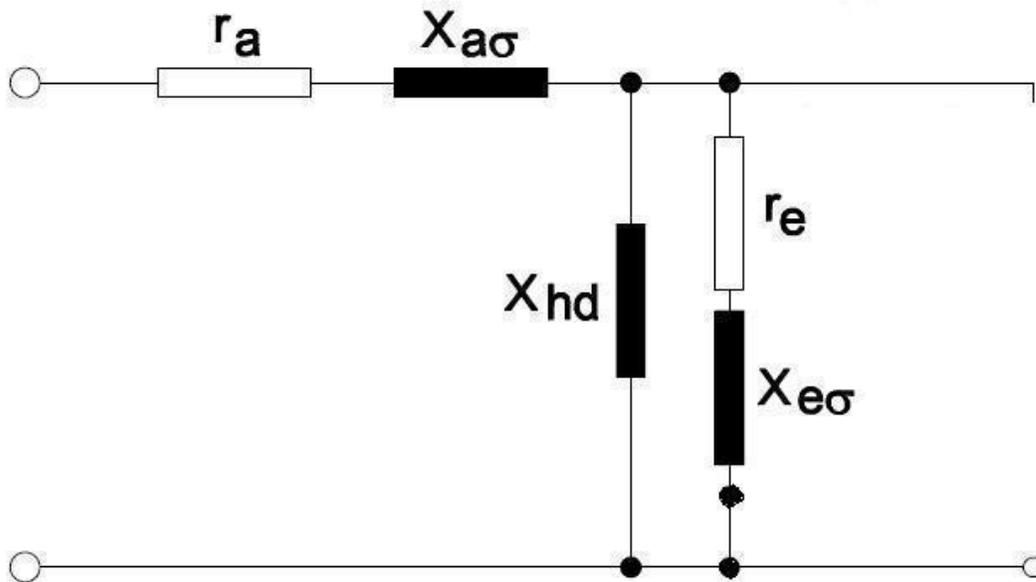
$$T_a = \frac{2 \cdot X_d'' \cdot X_q''}{r_a \cdot w \cdot (X_d'' + X_q'')} \approx \frac{X_2}{r_a \cdot w} \quad (5.22)$$

A constante de tempo  $T_a$  varia geralmente na faixa de 0,04 a 0,25 [seg].

### 5.8 - CONSTANTE DE TEMPO TRANSITÓRIA DE EIXO DIRETO EM VAZIO

É também chamada de constante de tempo em vazio do enrolamento de excitação ou ainda constante de tempo transitória em vazio; A figura 5.11 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é

determinada.



**Figura 5.11 Circuito equivalente na condição transitória em vazio.**

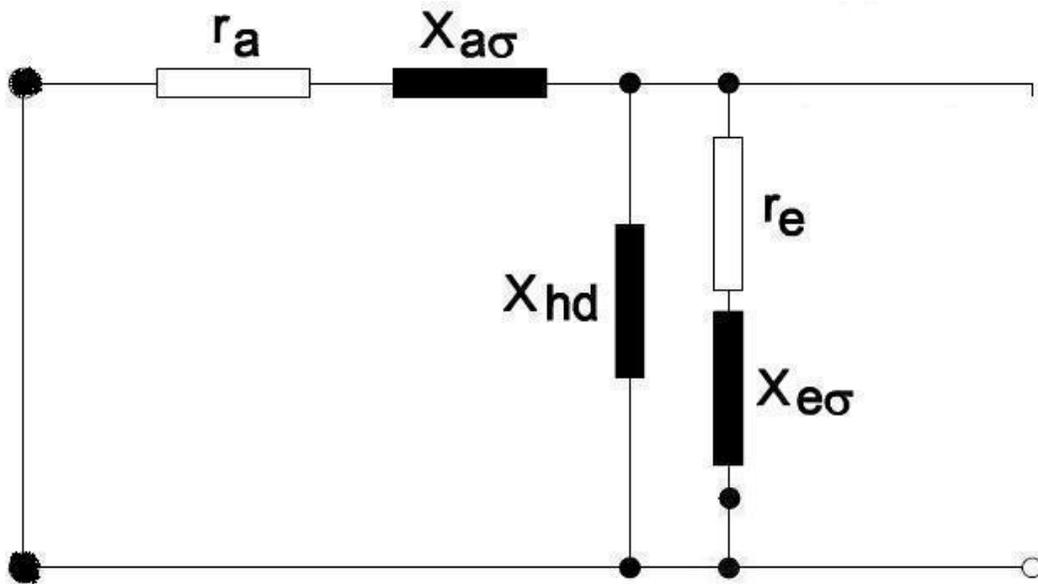
A constante de tempo é definida por:

$$\tau'_{d0} = \frac{X_{hd} + X_{e\sigma}}{\omega \cdot r_e} \tag{5.26}$$

Esta constante de tempo pode ser determinada oscilografando a tensão da armadura após o fechamento em curto circuito do enrolamento de excitação conforme o circuito equivalente mostrado.

### 5.9 - CONSTANTE DE TEMPO TRANSITÓRIA DE EIXO DIRETO EM CURTO CIRCUITO

É a constante de tempo em curto circuito do enrolamento de excitação ou ainda constante de tempo transitória de curto circuito. A figura 5.12 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.



**Figura 5.12 Circuito equivalente na condição transitória em curto.**

A constante de tempo é definida por:

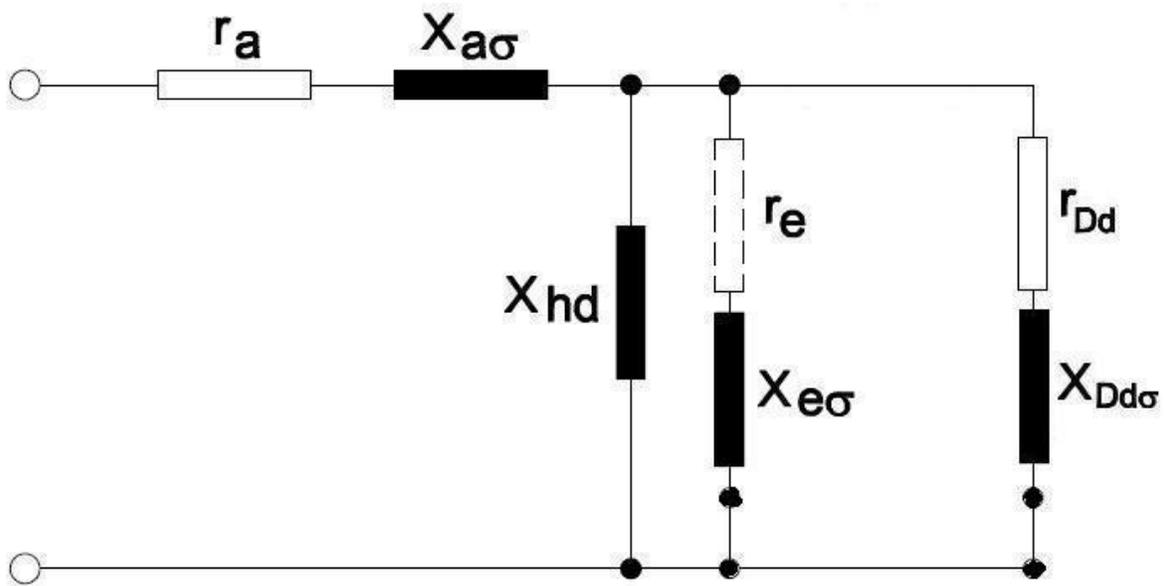
$$\tau'_d = \frac{1}{\omega \cdot r_e} \left( X_{e\sigma} + \frac{X_{hd} \cdot X_{a\sigma}}{X_{hd} + X_{a\sigma}} \right) \quad (5.27)$$

Da mesma forma, ela pode ser determinada oscilografando a corrente de curto circuito da armadura após o fechamento em curto circuito do enrolamento de excitação.

$\tau'_d$  representa a taxa de decréscimo da corrente de campo e enfim do próprio fluxo após um curto circuito brusco no estator. Ao mesmo tempo representa a taxa de decréscimo da componente alternada da corrente de armadura (em curto) em sua fase transitória, conforme o circuito equivalente mostrado.

**5.10 - CONSTANTE DE TEMPO SUB TRANSITÓRIA DE EIXO DIRETO EM VAZIO**

É também denominada constante de tempo sub transitória em vazio. A figura 5.13 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.



**Figura 5.13 Circuito equivalente na condição sub transitória em vazio.**

A constante de tempo é definida por:

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{\omega \cdot r_{Dd}} \cdot \left( X_{Dd\sigma} + \frac{X_{hd} \cdot X_{e\sigma}}{X_{hd} + X_{e\sigma}} \right) \tag{5.28}$$

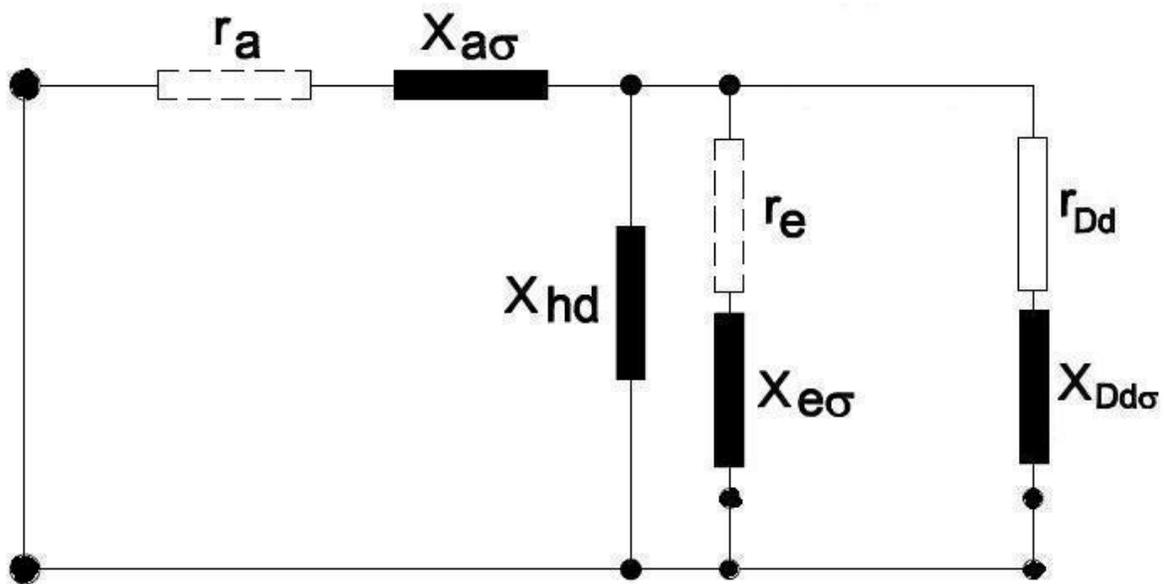
Analogamente pode ser determinada oscilografando-se a tensão de armadura após a abertura de um curto circuito permanente nos terminais da mesma.

Esta tensão terá um crescimento rápido com a taxa  $\tau''_{d0}$  e em seguida

um crescimento mais lento com a taxa  $\tau'_{d0}$ , até atingir o valor da tensão em vazio.

### 5.11 - CONSTANTE DE TEMPO SUBTRANSITÓRIA DE EIXO DIRETO EM CURTO CIRCUITO

A figura 5.14 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.



**Figura 5.14 Circuito equivalente na condição sub transitória em curto.**

A constante de tempo é definida por:

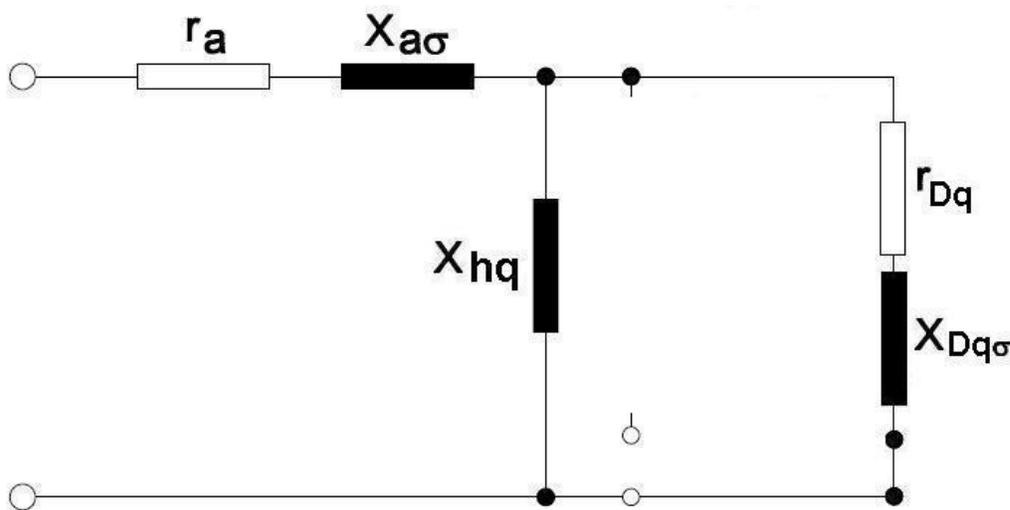
$$\tau''_d = \frac{1}{w \cdot r_{Dd}} \cdot \left( X_{Dd\sigma} + \frac{X_{hd} \cdot X_{e\sigma} \cdot X_{a\sigma}}{X_{hd} \cdot (X_{a\sigma} + X_{e\sigma}) + X_{a\sigma} \cdot X_{e\sigma}} \right) \quad (5.29)$$

A determinação de  $\tau''_d$  pode ser feita com a mesma experiência do

curto circuito brusco do item anterior, oscilografando e usando a envoltória da curva de corrente da armadura em escala logarítmica.

### 5.12 - CONSTANTE DE TEMPO SUBTRANSITÓRIA DE EIXO EM QUADRATURA EM VAZIO

A figura 5.15 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.



**Figura 5.15 Circuito equivalente na condição sub transitória em vazio (considerando valores em quadratura).**

A constante de tempo é definida por:

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{\omega \cdot r_{Dq}} \cdot (X_{hq} + X_{Dq\sigma}) \quad (5.34)$$

A determinação deste valor é feita alimentando-se a máquina com um transformador auxiliar com aproximadamente 15% da tensão nominal com o enrolamento de excitação curto-circuitado. A rotação da máquina deve ser cuidadosamente controlada e alterada, até que se tenha um pequeno

escorregamento entre o rotor e o campo girante. Então no instante em que a corrente da armadura atingir o máximo, isto é, quando a corrente induzida na excitação também atingir o máximo, obtém-se a posição em quadratura entre o campo girante e o rotor. Assim, se neste instante a alimentação for desligada e a tensão de armadura oscilografada obtém-se  $\tau''_{q0}$  da curva de decréscimo da tensão de armadura no tempo.

OBS. “ Da mesma forma poderia se obter  $\tau''_{d0}$  quando a corrente de armadura fosse mínima.”

### 5.13 - CONSTANTE DE TEMPO SUBTRANSITÓRIA EM CURTO CIRCUITO DE EIXO EM QUADRATURA

A figura 5.16 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.

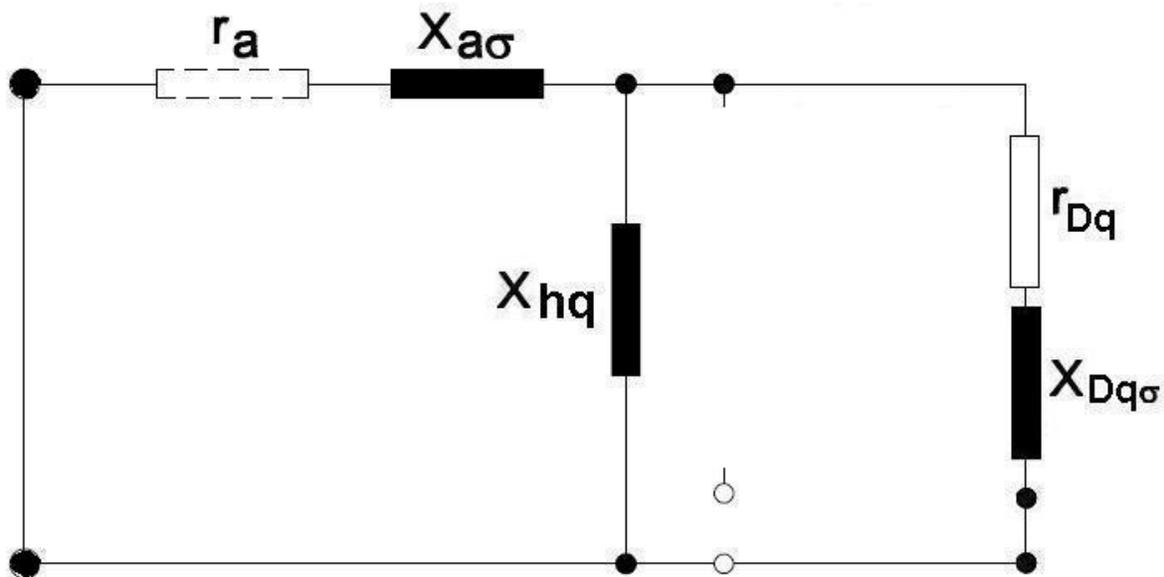


Figura 5.16 Circuito equivalente na condição sub transitória em curto (considerando valores em quadratura).

A constante de tempo é definida por:

$$\tau_q'' = \frac{1}{\omega \cdot r_{Dq}} \cdot \left( X_{Dq\sigma} + \frac{X_{hq} \cdot X_{a\sigma}}{X_{hq} + X_{a\sigma}} \right) \quad (5.35)$$

O seu valor pode ser obtido utilizando-se resultados de medições já efetuadas, desta forma tem-se:

$$\tau_q'' = \tau_{q0}'' \cdot \frac{X_q''}{X_q} \quad (5.36)$$

### 5.14 - CONSTANTE DE TEMPO DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR EM VAZIO DE EIXO DIRETO

A figura 5.17 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.

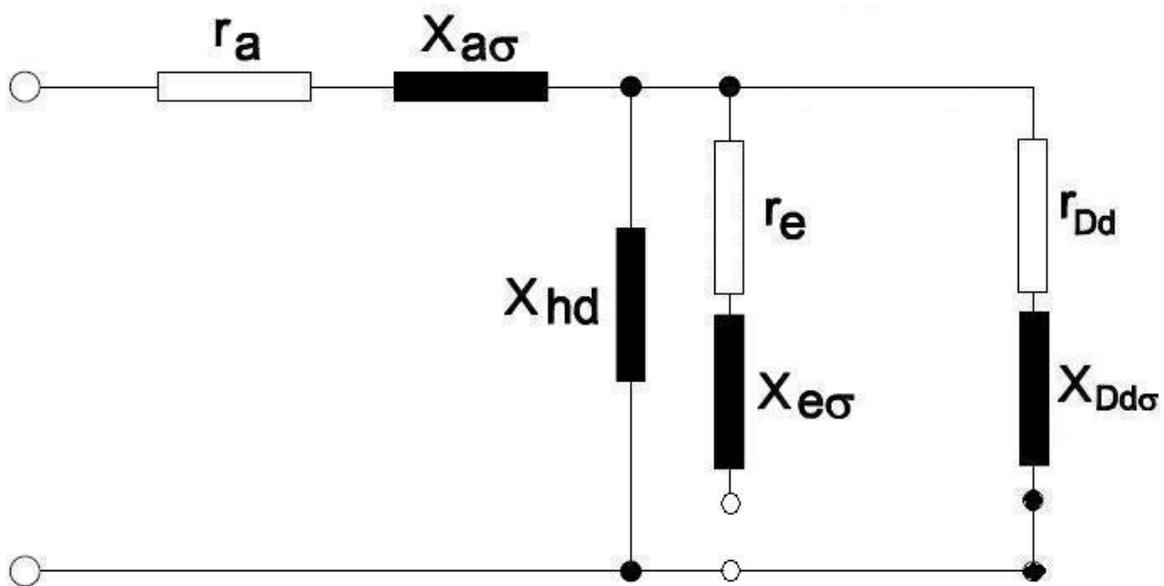


Figura 5.17 Circuito equivalente na condição em vazio (considerando o enrolamento amortecedor).

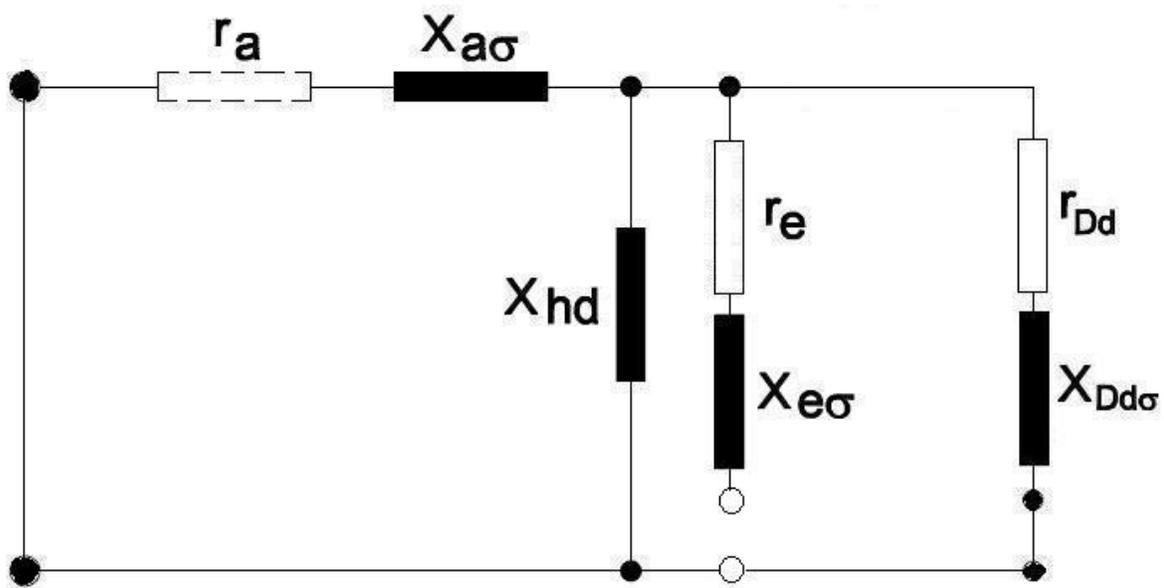
A constante de tempo é definida por:

$$\tau_{Dd0} = \frac{1}{\omega \cdot r_{Dd}} \cdot (X_{hd} + X_{Dd\sigma}) \quad (5.37)$$

Para sua determinação é usado processo análogo ao descrito para  $\tau_{d0}''$ , porém com enrolamento de excitação aberto.

**5.15 - CONSTANTE DE TEMPO DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR EM CURTO CIRCUITO DE EIXO DIRETO**

A figura 5.18 mostra o circuito equivalente a partir do qual a constante de tempo é determinada.



**Figura 5.18 Circuito equivalente na condição em curto (considerando o enrolamento amortecedor).**

A constante de tempo é definida por:

$$\tau_{Dd} = \frac{1}{w \cdot r_{Dd}} \cdot \left( X_{Dd\sigma} + \frac{X_{hd} \cdot X_{a\sigma}}{X_{hd} + X_{a\sigma}} \right) \quad (5.38)$$

Sua determinação é análoga a  $\tau_q''$  porem, com excitação aberta.

### 5.16 - CONSTANTE DE TEMPO DE PARTIDA $\tau_A$

A constante de tempo de partida é o tempo em [seg] necessário para que a máquina saia do repouso e atinja a rotação nominal, acelerada pelo conjugado nominal. O valor desta constante é importante na definição das dimensões principais da máquina a exemplo das reatâncias.

$$\tau_A = \frac{GD 2^2 \cdot n_n}{365 \cdot S_N} \quad (5.39)$$

OBS: é comum encontrar definições onde Ps é substituído pela potência ativa nominal ou a potência útil no eixo.

Outra definição normalmente encontrada é a constante de inércia “H”, calculada pela equação (5.40).

$$H = \frac{GD 2^2 \cdot n_n}{730 \cdot S_N} \quad (5.40)$$

É a relação entre a energia cinética total do conjunto girante pela potência nominal da máquina.

Desta forma tem-se a equação (5.41):

$$\tau_A = 2 \cdot H \tag{5.41}$$

É importante observar que uma redução de  $\tau_A$  provoca:

1. Aumento das oscilações de tensão e rotação na rejeição de carga.
2. Redução da estabilidade da regulação da turbina em funcionamento isolado.
3. Aumento da variação de freqüência para pequenas oscilações de carga.
4. Aumento da capacidade de recuperação da rotação nominal.

Cabe ainda observar que a inércia da massa de água (o impacto da pressão) somente se modifica se for modificado o tempo de fechamento do distribuidor.

**5.17 - VALORES TÍPICOS PARA REATÂNCIAS E CONSTANTES DE TEMPO:**

Reatancias não saturadas [pu] e constantes de tempo [seg]								
	Xd	Xq	X'd	X''d	T'do	T'd	T''d	Ta
com amortecimento	1,25	0,7	0,3	0,2	4	1,5	0,035	0,15
	0,6 a 1,5	0,4 a 0,8	0,2 a 0,5	0,13 a 0,32	1,5 a 10	0,5 a 3,3	0,01 a 0,05	0,03 a 0,25
sem amortecimento	1,25	0,7	0,3	0,3	4	1,5		0,3
	0,6 a 1,5	0,4 a 0,8	0,2 a 0,5	0,2 a 0,5	1,5 a 10	0,5 a 3,3		0,1 a 0,5

Tabela 5.1 Valores típicos de reatâncias e constantes de tempo para geradores síncronos de pólos salientes e 60 [Hz]

---

**5.18 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.**

No capítulo foi mostrado de modo prático, o significado físico das grandezas envolvidas na determinação das reatâncias e constantes de tempo do gerador. É comum, mesmo dentro do ambiente profissional, que estas considerações sejam negligenciadas, seja pela dificuldade de obtenção dos dados, seja pelo sigilo industrial e em parte pela dificuldade inerente.

---

## 6 - AQUECIMENTO E REFRIGERAÇÃO

### 6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo trata de grandezas que são muito importantes para o custo do gerador. O aquecimento é um subproduto da geração de energia que o homem até hoje ainda não conseguiu aproveitar (pelo menos de modo contínuo e satisfatório) e, insistentemente, procura reduzi-lo através da refrigeração. O objetivo é mostrar as fontes do aquecimento e meios usados na sua redução. Serão feitas considerações sobre os aquecimentos que ocorrem em geradores e a conseqüente elevação de temperatura da máquina.

Desde que se tem noticia da criação de máquinas elétricas girantes, uma das maiores preocupações dos projetistas consiste em refrigerar a máquina, de forma a manter o aquecimento dentro de limites aceitáveis para os materiais empregados.

É importante observar que a potencia da máquina praticamente é função de sua refrigeração

É igualmente importante observar que a temperatura em qualquer parte da máquina não ultrapasse o valor admissível, de modo que a vida útil prevista seja alcançada.

De uma forma geral os materiais empregados na construção das máquinas elétricas são: ferro, cobre e materiais orgânicos. Como os metais têm normalmente um ponto de fusão ou perda de características a temperaturas muito altas a limitação da vida útil das máquinas recai sempre nos materiais orgânicos empregados.

A maior fonte de calor dentro das máquinas está na parte ativa e nesta

---

região os materiais orgânicos mais expostos ao calor são os materiais isolantes.

## **6.2 - FONTES DE CALOR**

As fontes de calor nas máquinas ocorrem no:

1. Enrolamento estator
2. Enrolamento rotor
3. Enrolamento amortecedor
4. Conexões do estator
5. Conexões estáticas e rotativas da excitação
6. Anéis coletores e escovas
7. Sistema de excitação
8. Núcleo do estator
9. Núcleo dos pólos

Existem ainda algumas fontes de calor difíceis de serem mensuradas chamadas de adicionais;

10. correntes parasitas nas extremidades do núcleo do estator
11. correntes parasitas nas extremidades e face dos pólos
12. correntes induzidas em elementos de fixação no estator e no rotor
13. outras no enrolamento do estator

As fontes de calor de origem mecânica são;

14. atrito do ar e pressurização do circuito de ventilação

15. mancais

16. sistema de refrigeração propriamente dito

Todas as fontes de calor da máquina contribuem para a elevação de temperatura da mesma e seus efeitos devem ser considerados no projeto do sistema de refrigeração, de forma a manter as temperaturas constantes e dentro da expectativa de vida da máquina.

Indicam-se na tabela 6.1, a título de exemplo, valores aproximados da distribuição percentual destes aquecimentos em geradores:

Origem do aquecimento	Percentual
Ventilação	27%
Mancais (apenas guia)	2%
Núcleo estator	20%
Enrolamento do estator	23%
Enrolamento do rotor	17%
Adicionais	10%
Excitação	1%

Tabela 6.1 Distribuição percentual típica dos aquecimentos em geradores síncronos de pólos salientes.

Atualmente os materiais isolantes empregados nos hidrogeradores são na grande maioria de classe “F” que conforme norma podem suportar continuamente (por uma vida útil padronizada) uma temperatura média de 140 °C e 155 °C no ponto mais quente. Há que se citar como observação que, além

das propriedades dielétricas e térmicas que os isolantes têm que apresentar para serem comercialmente viáveis existem fatores como resistência mecânica, viabilidade de montagem e custo, que também são restritivos na fabricação.

As fontes de calor chamadas de **adicionais** resultam de processos secundários de caráter eletromagnético, provocados por fluxos dispersos, harmônicos das fmm.s, efeito pelicular, correntes parasitas, que aparecem no enrolamento da armadura, nas extremidades do núcleo do estator, superfície da sapata polar, e elementos de fixação em geral.

### **6.3 – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA**

Toda refrigeração necessita de uma transferência de calor. O transporte desse calor depende de uma diferença de temperatura. Quanto maior a resistência ao longo desse caminho maior será a diferença de temperatura entre o ponto mais quente e o meio refrigerante. A resistência ao transporte do calor depende do tipo de transporte.

A transferência de calor para o meio refrigerante pode ser feita por:

- CONDUÇÃO
- CONVECÇÃO
- IRRADIAÇÃO

#### **6.3.1 - CONDUÇÃO**

A transmissão de calor por condução é função da diferença de temperatura entre as superfícies por onde flui o calor e da resistência térmica do meio, calcula-se de acordo com a equação (6.1):

$$Q_{cd} = \frac{\Delta \theta_{cd}}{Rth_{cd}} \quad (6.1)$$

A resistência térmica depende da área através da qual o calor é transferido, da distancia percorrida pelo fluxo de calor e da capacidade de condução de calor do material e é calculada pela equação (6.2):

$$Rth_{cd} = \frac{l_{fc}}{S \cdot \lambda_{cd}} \quad (6.2)$$

### 6.3.2 - CONVECÇÃO

Da mesma forma que para a condução, a transferência de calor de uma superfície para um fluido refrigerante depende da diferença de temperatura entre a superfície e o meio refrigerante e da resistência térmica de convecção e é calculado pela equação (6.3):

$$Q_{cv} = \frac{\Delta \theta_{cv}}{Rth_{cv}} \quad (6.3)$$

A resistência térmica de convecção é inversamente proporcional à área da superfície fornecedora de calor e ao coeficiente de convecção entre a superfície o meio refrigerante e calculado pela equação (6.4):

$$Rth_{cv} = \frac{1}{S \cdot \alpha} \quad (6.4)$$

O coeficiente de convecção depende da velocidade do fluido nas proximidades da superfície, além da capacidade de condução de calor  $\lambda$ , da densidade  $\rho$ , da tenacidade/viscosidade dinâmica  $\mu$  e da capacidade térmica  $c$  do fluido refrigerante.

### 6.3.3 - IRRADIAÇÃO

O fluxo de calor por irradiação a partir de uma superfície é função da temperatura termodinâmica da superfície irradiadora, do coeficiente de irradiação e da área da superfície e calculado pela equação (6.5):

$$Q_{rd} = \sigma \cdot S_i \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (6.5)$$

### 6.3.4 - AQUECIMENTO DE UM CORPO SÓLIDO

Ainda que uma máquina síncrona seja constituída de diversas partes com distintas propriedades físicas, para a análise a seguir, considera-se a mesma um corpo homogêneo com transferência de calor uniforme em toda superfície. Seja  $P_p$  a potencia a ser dissipada que será transformada em calor. No intervalo de tempo  $dt$  uma parcela desta energia elevará a temperatura do corpo, enquanto que a outra será transferida para o ambiente. A parcela transferida ao ambiente cresce à medida que a temperatura do corpo aumenta.

A parcela de energia que eleva a temperatura do corpo depende de seu calor específico  $c$  e de seu peso  $G$ , enquanto que a parcela transferida ao ambiente por condução, convecção e irradiação depende da área do corpo  $S$ , do fator de emissão de calor  $\lambda$  e da temperatura do corpo  $\theta$ .

Desta forma tem-se o balanço térmico estabelecido pela equação (6.6);

$$P_p \cdot dt - S \cdot \lambda \cdot \theta \cdot dt = G \cdot c \cdot d\theta \quad (6.6)$$

A temperatura final do corpo  $\theta_f$  é alcançada quando toda a energia a ser dissipada é transferida para o ambiente;

$$P_p \cdot dt - S \cdot \lambda \cdot \theta_f \cdot dt = 0 \quad (6.7)$$

$$\theta_f = \frac{P_p}{S \cdot \lambda} \quad (6.8)$$

Se os termos da equação (6.8) forem divididos por  $s \cdot \lambda$  e se for tomado

$$\Gamma = \frac{G \cdot c}{S \cdot \lambda} \quad (6.9)$$

Resulta:

$$P_f - \theta \cdot dt = \Gamma \cdot d\theta \quad (6.10)$$

$$\frac{dt}{\Gamma} = \frac{d\theta}{P_f - \theta} \quad (6.11)$$

A integração da equação (6.11) resulta em:

$$\frac{t}{\Gamma} = -\ln(P_f - \theta) + Ci \quad (6.12)$$

Se no instante inicial  $t = 0$  o corpo tem uma elevação de temperatura  $\theta_0$  em relação ao meio ambiente, então resulta na equação (6.13):

$$Ci = \ln(P_f - \theta_0) \quad (6.13)$$

Desta forma, a elevação de temperatura do corpo  $\theta$  em relação ao meio ambiente, em função do tempo é calculada pela equação (6.14):

$$\theta = P_f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\Gamma}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\Gamma}} \quad (6.14)$$

---

## 6.4 – TIPOS DE REFRIGERAÇÃO

### 6.4.1 - EXTERNA

Trata-se de máquina do tipo totalmente fechada, onde todo o calor gerado é dissipado para o ambiente através da superfície externa da máquina.

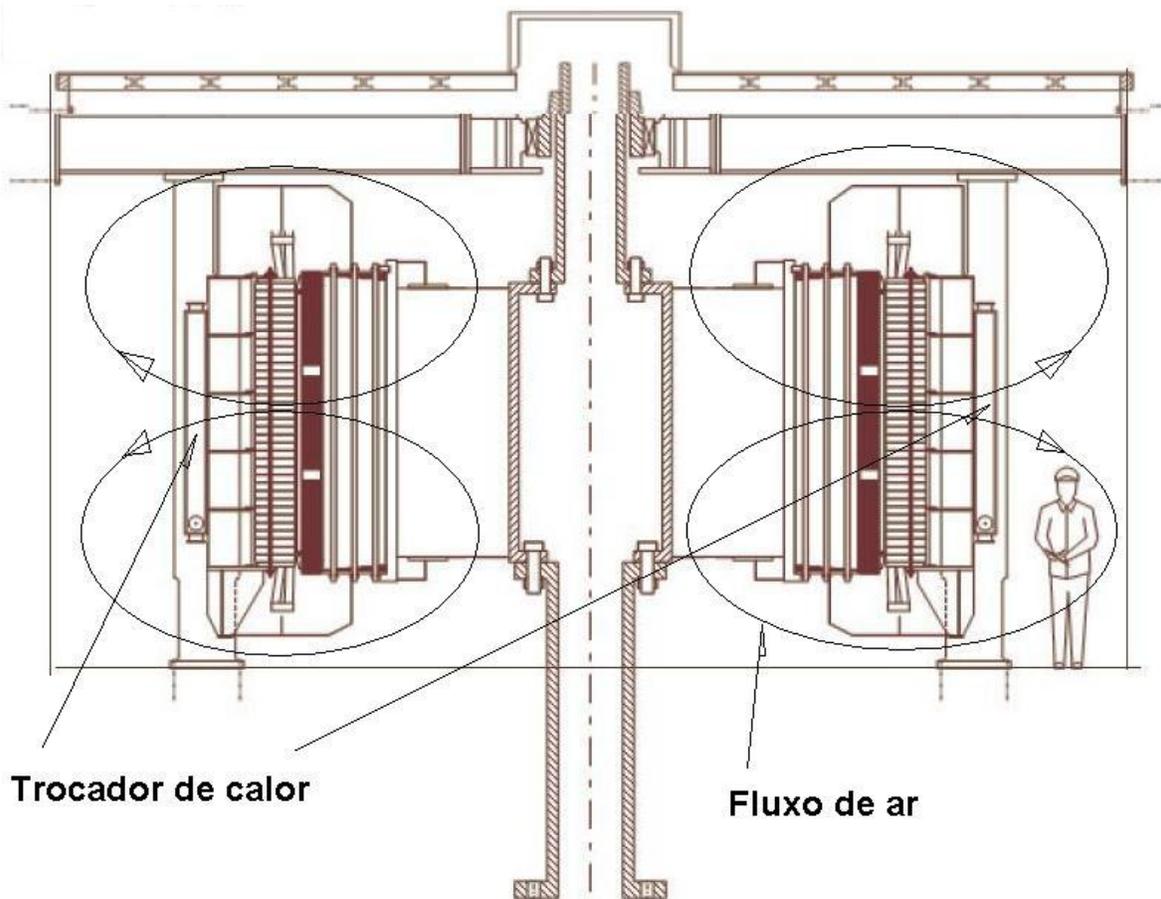
Importante observar que quando o tamanho das máquinas cresce, a energia envolvida cresce em terceira ou quarta potência em relação às dimensões lineares, sendo que a superfície externa cresce apenas com o quadrado. Dessa forma a partir de determinada potência a refrigeração externa começa a ficar inviável. Esse limite gira em torno dos 400 [kW]. Dessa forma não será abordada neste estudo, que trata de hidrogeradores de grande porte.

### 6.4.2 - INTERNA

As máquinas com refrigeração interna podem ser:

- 1) **Aberta**, quando o meio refrigerante (normalmente ar) é levado para dentro da máquina nas partes mais quentes e retirando o calor para o ambiente.
- 2) **Fechada** quando o meio refrigerante (normalmente ar) após retirar o calor é jogado em um trocador de calor, retornando depois ao interior da máquina.

Independente do tipo aberto ou fechado, a preocupação do projetista é como retirar o calor das fontes citadas anteriormente.



**Figura 6.1** Desenho de corte de um hidrogerador típico de pólos salientes com os caminhos da refrigeração.

### 6.5 – CONSIDERAÇÕES SOBRE VENTILAÇÃO NECESSÁRIA.

A potencia a ser dissipada (convertida em calor) de uma máquina elétrica é retirada da máquina através de uma vazão do meio refrigerante primário, o qual possui uma capacidade térmica volumétrica  $c\rho$ , de modo que a elevação de temperatura do meio refrigerante seja mantida em  $\theta_{ref}$ , conforme as equações (6.15) e (6.16):

$$P_p = c\rho \cdot \dot{V} \cdot \theta_{ref} \quad (6.15)$$

$$\dot{V} = \frac{P_v}{c\rho \cdot \theta_{ref}} \quad (6.16)$$

A vazão necessária à dissipação do calor gerado, porém, não pode se limitar a esses valores para garantir o limite de temperatura prescrito nas especificações para os materiais empregados. Porque a temperatura no ponto mais quente é função não apenas da elevação de temperatura do refrigerante, mas também condutividade térmica e transferência de calor, estabelecida entre o ponto mais quente e o meio refrigerante. Assim, cada parte da máquina deverá ser estudada no detalhe usando as equações acima, parte a parte, para se conhecer o aquecimento ponto a ponto.

## 6.6 - NORMAS DE REPRESENTAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO

De modo a dar ao usuário uma visão geral e rápida do tipo de refrigeração de uma máquina, foi estabelecida uma convenção internacional do tipo de refrigeração e do meio refrigerante de uma máquina, para todas as máquinas com refrigerante primário a AR, publicada na IEC 34-6 pela primeira vez em 1969. A convenção estabelece duas letras IC (International Cooling) seguidas de dois números sendo que o primeiro indica o sistema de refrigeração e o segundo o tipo de acionamento do meio refrigerante. Caso haja um circuito secundário para refrigeração acrescentamos mais um dígito alfanumérico entre IC e os dígitos acima. Esta convenção tem sido útil nas relações cliente fornecedor de forma a ordenar as expectativas.

## 6.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo versou sobre a transmissão de calor do gerador e modos de

---

refrigeração. Dentro desse contexto é possível estabelecer como a máquina deve ser projetada de modo a garantir as elevações de temperatura especialmente dos materiais orgânicos envolvidos de forma contínua.

Cabe um parêntesis aqui, para incitar os pensamentos a futuro aproveitamento dos aquecimentos envolvidos, isto é, tornar o rejeito em utilidade.

---

## 7 - CONCLUSÕES

### 7.1 - CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Um dos principais objetivos deste trabalho foi tratamento dos conceitos básicos das máquinas elétricas considerados sob aspectos práticos para se manter viva a possibilidade de promover inovações na geração de energia elétrica.

Foi também mostrar o contato íntimo com as origens para se obter os resultados esperados, otimizar os recursos naturais e propor alterações no estado atual do desenvolvimento.

Ao se observar os detalhes do cálculo é importante notar os limites envolvidos de cada grandeza, tanto do ponto de vista construtivo quanto do ponto de vista do material em si. A contribuição neste caso está na razão da limitação.

Em termos de objetivos específicos tratou-se dos conceitos básicos de finalidade de cada componente que foram enfatizados, não só pelo nivelamento do conhecimento, mas para que os objetivos reais não se percam. Somente assim, as idéias podem ser criadas.

O detalhe abordado do volume da máquina é um exemplo claro dos rumos que o cálculo e definição das máquinas têm tomado, sendo que as preocupações dos fabricantes têm priorizado nos últimos anos o cuidado nas reduções de custo e adaptações de materiais menos agressivos ao meio ambiente e a saúde. É evidente que este caminho é necessário, mas ainda resta espaço para desenvolvimentos de materiais e conceitos que não foram levados a efeito.

---

Foi bastante enfatizada a forte ligação da geometria interna das partes ativas com as características de circuito da máquina, de modo que fique claro que as grandezas elétricas são fisicamente dependentes da geometria e materializando de certa forma os elementos de circuito.

As dispersões são realmente bastante significativas nos elementos de circuito e isso suscita uma análise de campo para evolução que vale a pena ser explorada por novos estudos.

Também as análises transitórias tiveram sua abordagem vinculada aos elementos da máquina de modo que suas alterações possam ser estudadas com maior clareza e quando necessário, adaptadas.

O primeiro item citado como realmente algo a se evoluir seria o aproveitamento dos aquecimentos. Item que até hoje foi abordado como “mal necessário”, “indesejável” ou “item a ser combatido”. É inegável que devido às limitações de materiais, temperaturas e características como isolamento magnetismo etc, tenha se que conviver com restrições aos aquecimentos, mas isso não impede que se pense em aproveitá-lo.

## **7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.**

As contribuições para terem efeito, devem abranger toda a gama de itens da máquina e não apenas os aqui mencionados. Por isso o trabalho não se esgota neste estudo, mas sim apenas se inicia, devendo ser complementado por mais iniciativas deste gênero, de modo a contemplar toda a máquina elétrica.

A seguir alguns temas que podem vir a contribuir neste sentido:

1. Estudo do enrolamento, tanto no quesito ligação como no

---

sentido de preenchimento das ranhuras e também na redução das dispersões.

2. Perdas e aquecimentos de modo que se deixe o mito de redução de perdas e passe ao conceito de usar os aquecimentos.
3. Esforços magnéticos e centrífugos, para que resultem contribuições de equilíbrio e otimização das construções.
4. Materiais isolantes, estudo conjunto fabricantes de máquinas, fornecedores de isolantes e universidades, para que possam ser usados materiais que hoje já podem ser encontrados, mas não estão desenvolvidos para aplicação.
5. Materiais magnéticos, para que surjam novas propostas, pois o desenvolvimento atual está estagnado no que se refere à aplicação nos hidrogeradores de energia elétrica.

---

## 8 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Máquinas de Corriente Alterna  
Michael Liwichitz-Garik and Clyde C. Whipple  
Compañía Editorial Continental. México 1976
- [2] Betriebsverhalten Elektrischer Maschinen  
Sonderausdruck aus dem Handbuch der Elektrotechnik  
Siemens A. G. Berlin 1971
- [3] Hütte Taschenbücher der Technik –  
Elektrische Energietechnik Band 1 Maschinen  
Walter Böning  
Springer Verlag Berlin 1978
- [4] Elektrische Maschinen  
Berechnung rotierender elektrischer Maschinen  
Karl Vogt  
VEB Verlag Berlin 1974
- [5] Die Prüfung elektrischer Maschinen  
Werner Nürnberg  
Springer Verlag Berlin 1965
- [6] Die Theorie der Synchronmaschine  
im nichtstationären Betrieb  
Th. Laible

Springer Verlag Zürich 1952

[7] Elektrische Maschinen Band I

Rudolf Richter

Birkhäuser Verlag Basel 1967

[8] Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen

Johannes Klamt

Springer Verlag Berlin 1962

[9] Betriebsverhalten der Synchronmaschine

Kurt Bonfert

Springer Verlag Berlin 1962

[10] Die Wicklungen elektrischer Maschinen

Heinrich Sequenz

Springer Verlag Wien 1950

[11] Eletromagnetismo

José Roberto Cardoso

USP São Paulo 2000

[12] Analysis of Electric Machinery

Paul C. Krause

McGraw-Hill Book Company New York 1986

[13] Taschenbuch Elektrotechnik Band I und II

Eugen Philippow

VEB Verlag Technik Berlin 1968

[14] The Electrical Engineering Handbook

Richard C. Dorf

IEEE Press 1993

[15] Synchronous Machine: Theory and performance

Charles Concórdia

Wiley, 1951

[16] Introdução ao método dos elementos finitos, para engenheiros  
eletricistas. 1998 José Roberto Cardoso

Publicação independente, 1º edição