

PEA – 3404

MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACIONAMENTOS

Resumo das notas de aula

**PROGRAMA:****PARTE 1 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA:**

*Caracterização, classificação e aspectos construtivos das máquinas C.C. – Funcionamento da máquina C.C. – Enrolamento pseudo-estacionário – Propriedades fundamentais do enrolamento de armadura na máquina de corrente contínua – Tensão induzida – Produção de conjugado na máquina C.C. - Equações fundamentais da máquina de corrente contínua – Características externas das máquinas C.C. – Máquinas de campo independente, série e composto – Partida e variação de velocidade nas máquinas C.C. – Comutação, enrolamentos de interpolos e de compensação – Modos de alimentação e controle de velocidade – Grupos motor-gerador - Conversores CA-CC – Chopper*

**PARTE 2 – MÁQUINAS ASSÍNCRONAS:**

*Caracterização e classificação das máquinas assíncronas - Aspectos construtivos – Princípio de funcionamento das máquinas de indução polifásicas – Formação do campo magnético rotativo – Campos harmônicos – Enrolamentos trifásicos – Fluxo por polo – F.E.M. induzida - Interação do campo rotativo com os condutores rotóricos – Conjugado e escorregamento – Modos de operação – Natureza da impedância rotórica – Circuito equivalente – Fluxo de potências ativas – Expressão do conjugado – Características externas – Conformação de curvas – Categorias de conjugado – Métodos de partida – Transitório de partida – Variação de rotação da máquina assíncrona – Alimentação com frequência variável – Topologia dos Inversores de frequência - Efeito das harmônicas sobre as características – Modos de operação especiais da máquinas assíncrona – Operação no modo gerador de indução - Motores de indução monofásicos – Modelo de circuito e métodos de partida*

**PARTE 3 – INTRODUÇÃO AOS ACIONAMENTOS:**

*Aspectos gerais dos acionamentos industriais – Coordenação do sistema: Carga + Motor + Controlador - Aplicação e caracterização dos principais tipos de cargas mecânicas - Aplicação e caracterização dos principais tipos de motores elétricos – Tipos de acoplamentos entre motor e carga – Tempo de aceleração – Métodos de partida e frenagem – transitório térmico de aquecimento e resfriamento – Regimes de operação – Potência eficaz – Classes térmicas dos materiais isolantes – Efeito da temperatura ambiente e altitude — Exemplos de aplicação.*

**BIBLIOGRAFIA:**

*ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS* – S. J. Chapman – Ed. McGraw-Hill – 1991

*SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS* – O. S. Lobosco – Ed. McGraw-Hill – 1988

*ELETROMECAÂNICA* – A.G. Falcone – Ed. Edgard Blucher – 1996

*ALTERNATING CURRENT MACHINES* - M. G. Say – Pitman Publishing – 1976

*ELECTRIC MOTOR HANDBOOK* – E. H. Werninck – Ed. McGraw-Hill – 1978

*HANDBOOK OF ELECTRIC MACHINES* – S. A. Nasar – Ed. McGraw-Hill - 1987

**FUNCIONAMENTO DA DISCIPLINA :** ( *Considerando ainda a impossibilidade de atividades presenciais no presente 2º semestre de 2020* )

*Material da aula será divulgado, em geral, um ou dois dias antes da aula correspondente via moodle do Stoa-Usp, na área da disciplina.*

*As aulas serão remotas, por vídeo conferência, utilizando a plataforma Google Meet. O link de cada aula será enviado na forma de aviso dentro do Stoa-Usp, aproximadamente uma hora antes do início de cada aula.*

*As aulas serão gravadas, e o link para a gravação divulgado posteriormente, também na forma de aviso no Stoa-Usp.*

*A presença do aluno será apurada a partir do registro do “chat” da plataforma Google Meet e, para tanto, todos deverão se manifestar presentes nesse “chat” ao longo do período da aula. A não manifestação será considerada ausência na aula.*

### **CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO:**

**2 PROVAS :** P1 – 16 / Outubro / 2020 + P2 – 11 / Dezembro / 2020 ( *Datas fixadas a priori* )  
*Provas serão remotas e assíncronas, com tempo pré determinado para sua realização ( 4 horas )*

**EXERCÍCIOS E / OU TAREFAS** – *Distribuídas ao longo do semestre – Entrega sempre uma semana após a divulgação do enunciado ( Não serão aceitas tarefas fora do prazo ). Enunciado será passado sempre ao final da aula, via “chat” da plataforma utilizada ( Google Meet )*

**MÉDIA GERAL :**  $0,80 \times \text{Média das duas provas} + 0,20 \times \text{Média das tarefas}$

## ***PARTE 1 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA***

A MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA É A MAIS VERSÁTIL DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS:

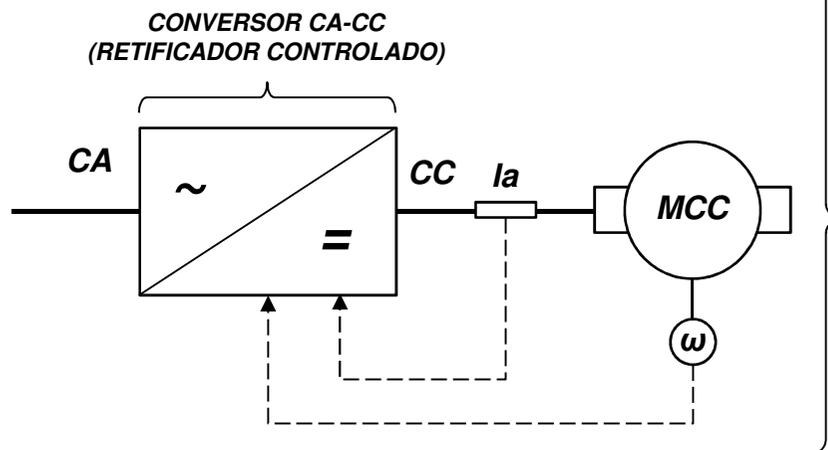
É MÁQUINA DE VELOCIDADE VARIÁVEL POR EXCELÊNCIA

→ VELOCIDADE DE ROTAÇÃO “SÓ” DEPENDE DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO :  $\omega = f(V_a)$

→ CONJUGADO “SÓ” DEPENDE DA CORRENTE ABSORVIDA :  $C = f(I_a)$

→ NA MÁQUINA C.C. IDEAL,  $\omega$  e  $C$  SÃO TOTALMENTE DESACOPLADOS :

- APRESENTA GRANDE CONTROLABILIDADE
- PERMITE ACIONAMENTOS DE ELEVADA PRECISÃO



CONTROLE DE VELOCIDADE É SIMPLES → APENAS  $V_a$

SOLUÇÃO CLÁSSICA PARA ACIONAMENTO DE VELOCIDADE VARIÁVEL:

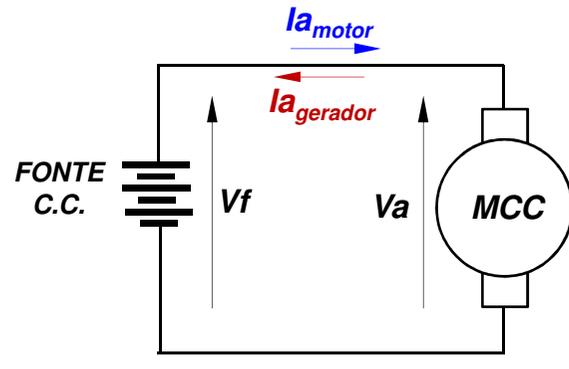
RETIFICADOR CONTROLADO AJUSTA NÍVEL DA TENSÃO CC APLICADA À ALIMENTAÇÃO DO MOTOR

REALIMENTAÇÃO DE VELOCIDADE (VARIÁVEL CONTROLADA)

REALIMENTAÇÃO DE CORRENTE (LIMITAÇÃO DO TORQUE APLICADO)

ATÉ O ADVENTO DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA ASSOCIADOS AO MOTOR DE INDUÇÃO, O USO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA ERA A ÚNICA SOLUÇÃO TÉCNICA E ECONOMICAMENTE DISPONÍVEL PARA ACIONAMENTOS COM ROTAÇÃO VARIÁVEL

→ AINDA UTILIZADO EM UMA GRANDE GAMA DE APLICAÇÕES (SIDERURGIA; USO AUTOMOTIVO; TRAÇÃO ELÉTRICA; INDÚSTRIA)



MÁQUINA CC É FACILMENTE REVERSÍVEL → **MOTOR** ↔ **GERADOR**

MODO DE OPERAÇÃO SÓ DEPENDE DA RELAÇÃO ENTRE TENSÃO DA FONTE E TENSÃO INTERNA DA MÁQUINA (F.E.M INDUZIDA)

→  $V_f > V_a$  → MODO MOTOR

→  $V_f < V_a$  → MODO GERADOR

### ASPECTOS “NEGATIVOS” DAS MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA:

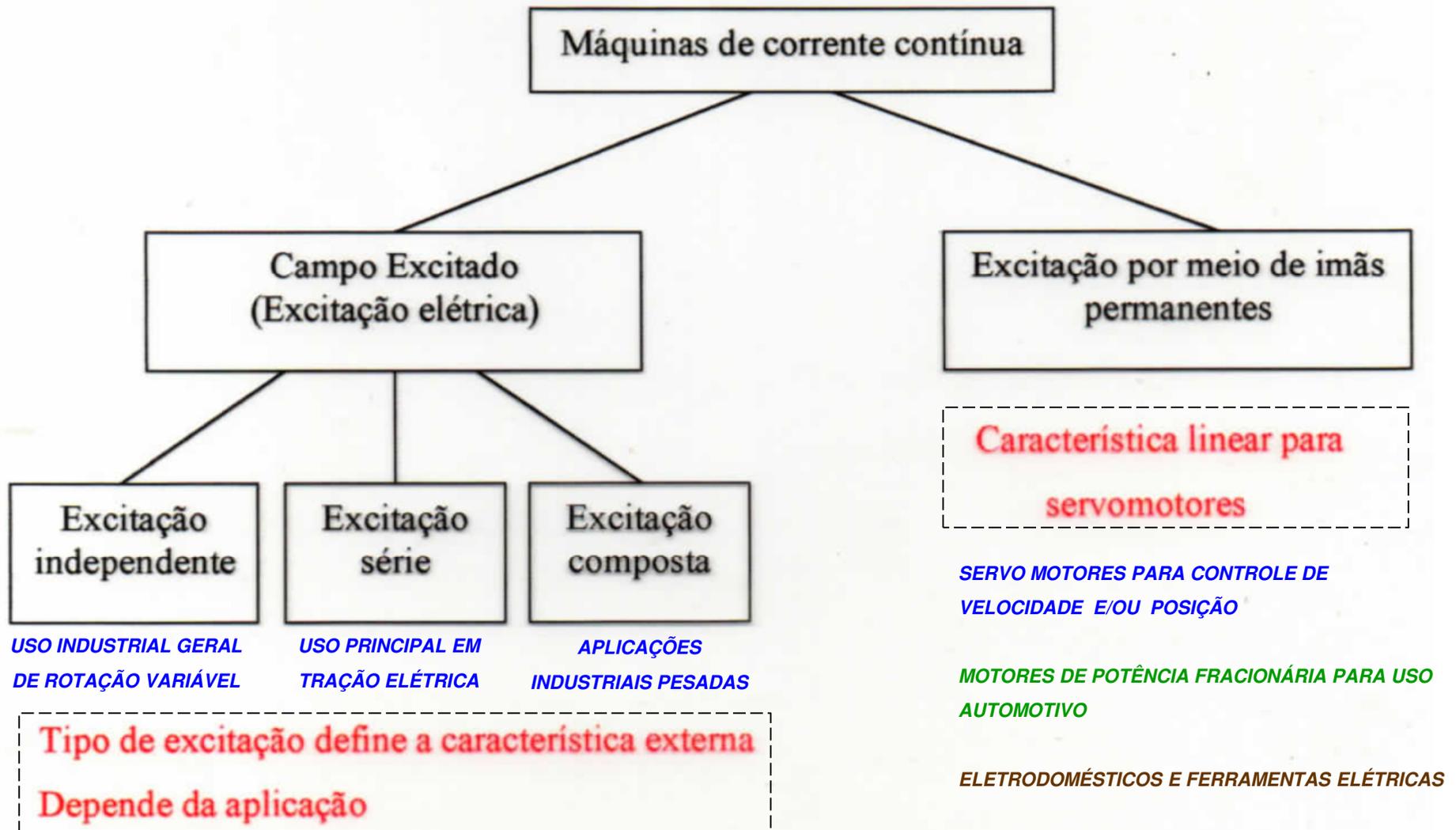
CONSTRUÇÃO MAIS COMPLEXA E DIFÍCIL (COMPARADA ÀS OUTRAS MÁQUINAS ELÉTRICAS – SÍNCRONA E INDUÇÃO)

ENROLAMENTO PRINCIPAL (INDUZIDO) É SEMPRE NO ROTOR → ACESSO E ADUÇÃO DE CORRENTES E TENSÕES DE POTÊNCIA À PARTE ROTATIVA EXIGE EMPREGO DE CONTATOS DESLIZANTES (COMUTADOR + ESCOVAS)

MAIOR PESO (NECESSÁRIOS ENROLAMENTOS AUXILIARES QUE NÃO PARTICIPAM DA CONVERSÃO DE ENERGIA)

MAIOR EXIGÊNCIA DE MANUTENÇÃO ( PRINCIPALMENTE DEVIDO AO SISTEMA COMUTADOR E ESCOVAS )

MAIOR CUSTO DE AQUISIÇÃO E DE OPERAÇÃO

**CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA NO MODO MOTOR**

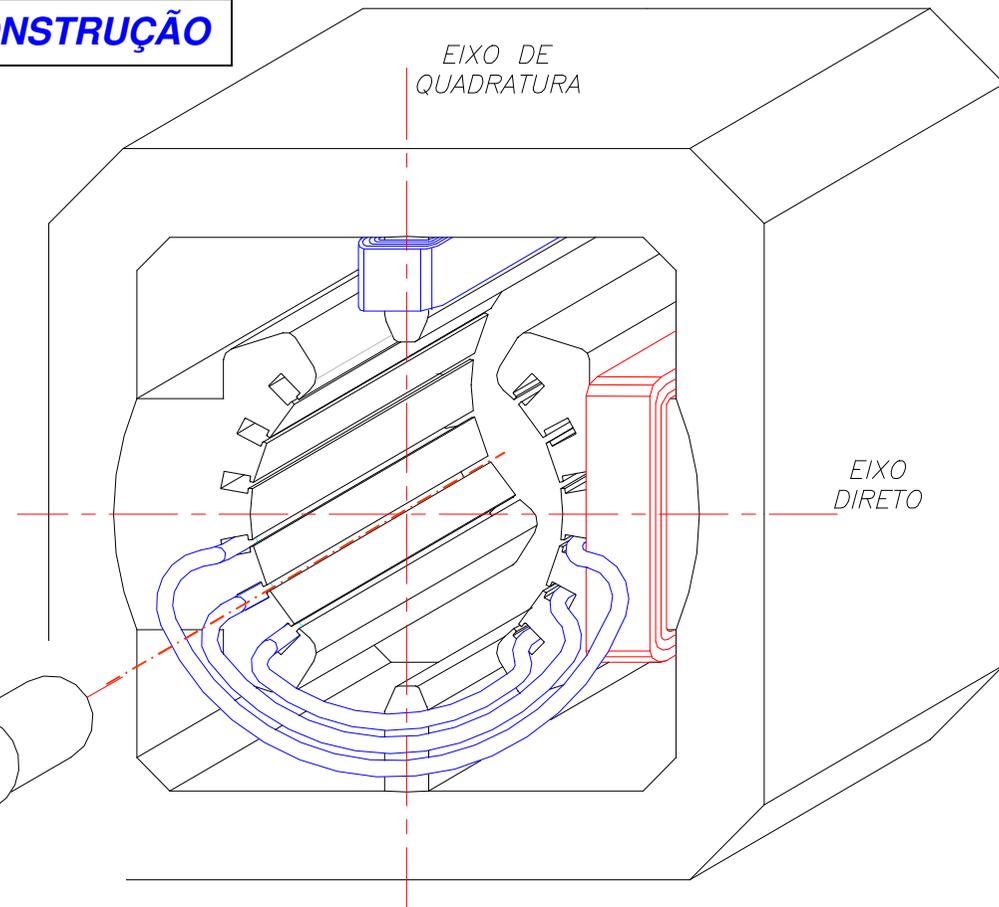
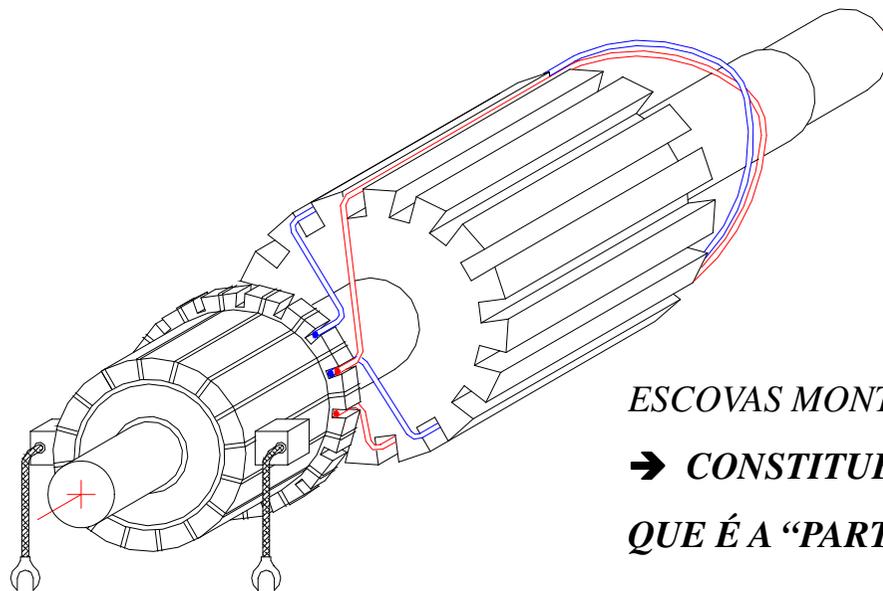
***ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS  
DE CORRENTE CONTÍNUA***

**MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA: CONSTRUÇÃO**

*ROTOR SUSTENTADO DENTRO DO ESTATOR  
POR MEIO DE MANCAIS APOIADOS EM TAMPAS*

*MANUTENÇÃO DO ENTREFERRO NESSA  
MONTAGEM*

*COMO TODA MÁQUINA ELÉTRICA: DOIS COMPONENTES  
FUNDAMENTAIS FORMAM A “PARTE ATIVA” → ROTOR +  
ESTATOR SENDO O ROTOR A ÚNICA PARTE MÓVEL*



*ESCOVAS MONTADAS EM SUPORTES SOLIDÁRIOS AO ESTATOR  
→ CONSTITUEM OS “TERMINAIS DE ACESSO AO ROTOR,  
QUE É A “PARTE DE POTÊNCIA” DA MÁQUINA C.C.*

**DETALHES CONSTRUTIVOS DO ROTOR: TAMBÉM DENOMINADO “ARMADURA” OU “INDUZIDO” DA MÁQUINA C.C.**

**RESPONSÁVEL PELA CRIAÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO ESTACIONÁRIO NO ESPAÇO, INDEPENDENTE DA ROTAÇÃO DO ROTOR → VAI INTERAGIR COM OUTRO CAMPO MAGNÉTICO FORMADO PELO ESTATOR**

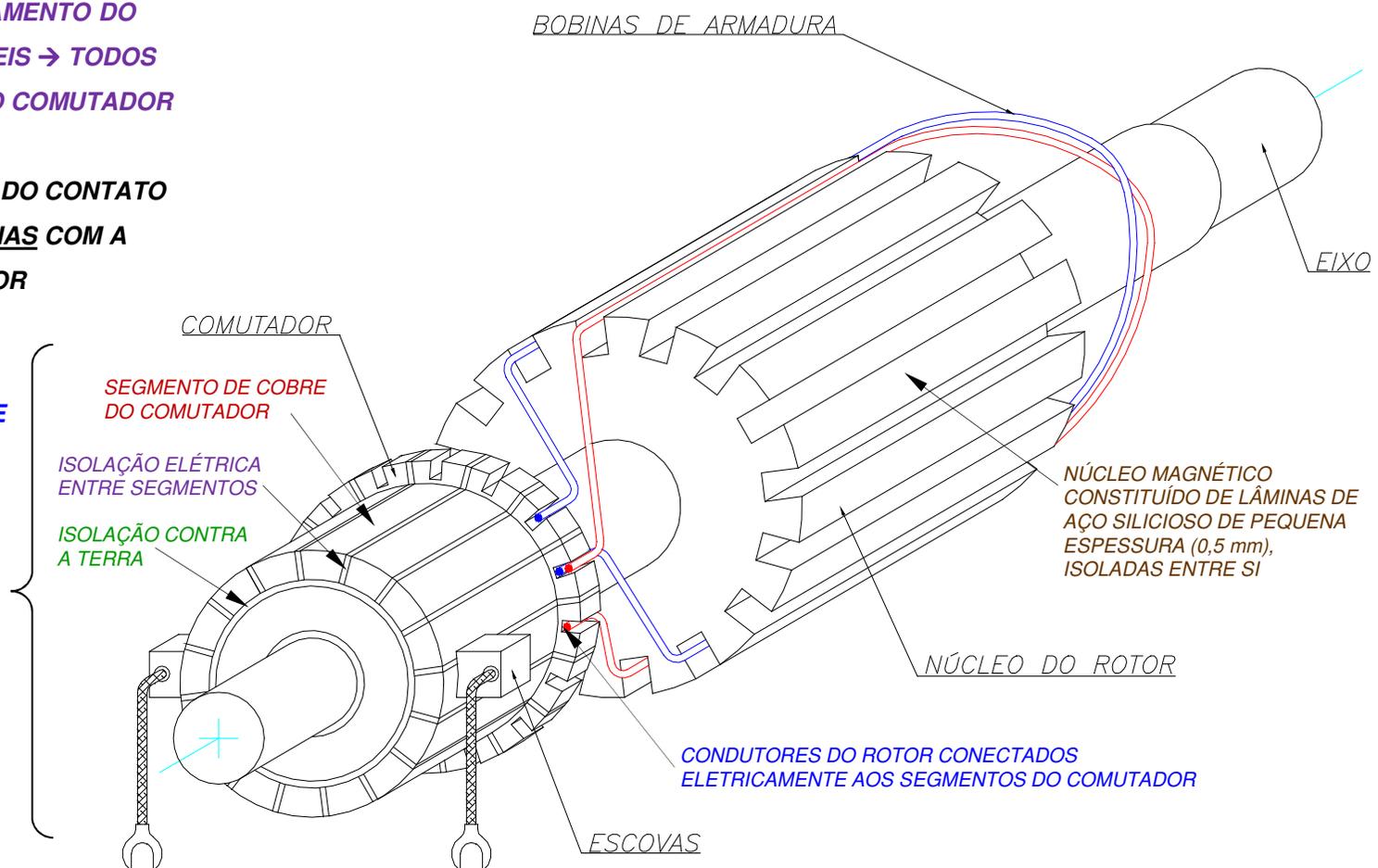
**CONSTITUI A PARTE ONDE SÃO INDUZIDAS AS TENSÕES E CORRENTES → PARTE DE POTÊNCIA DA MÁQUINA**

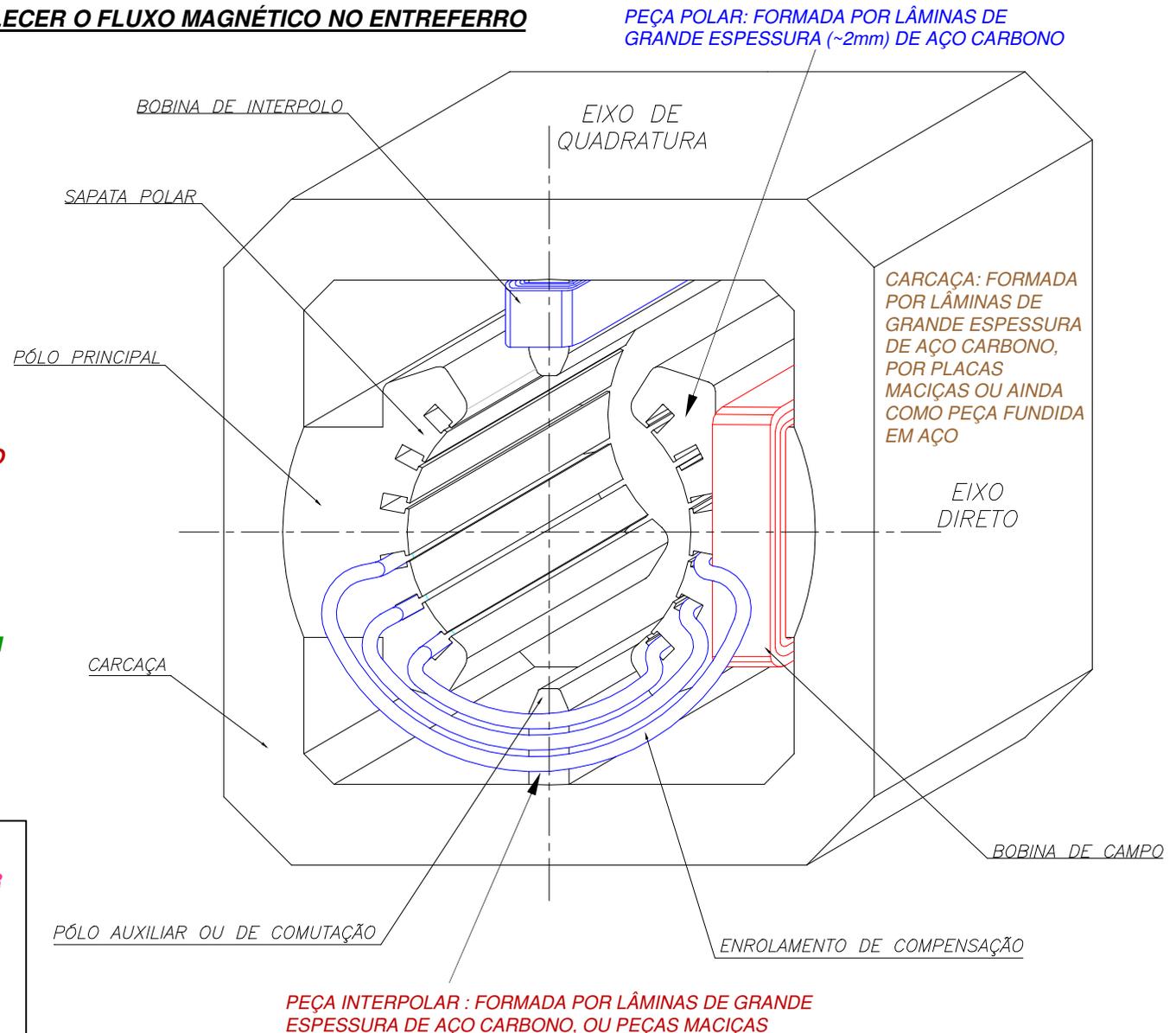
**TERMINAÇÕES DO ENROLAMENTO DO ROTOR NÃO SÃO ACESSÍVEIS → TODOS CONDUTORES LIGADOS AO COMUTADOR**

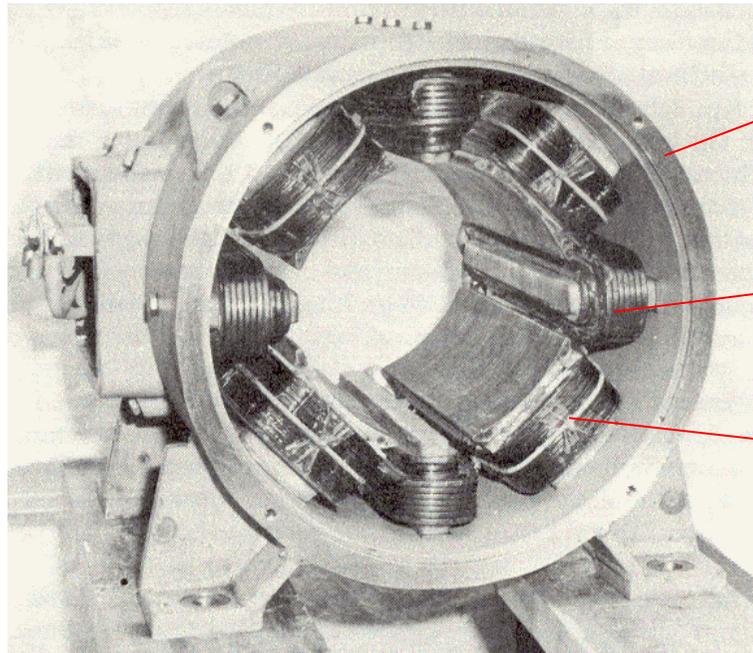
**ACESSO SE FAZ POR MEIO DO CONTATO DE ESCOVAS ESTACIONÁRIAS COM A SUPERFÍCIE DO COMUTADOR**

**COMUTADOR: COMPONENTE ESSENCIAL DA ARMADURA DA MÁQUINA C.C.**

**CONSTITUÍDO DE UM CONJUNTO DE SEGMENTOS OU LÂMINAS DE COBRE, ISOLADAS ENTRE SI E CONTRA A TERRA**



**DETALHES CONSTRUTIVOS DO ESTATOR: TAMBÉM DENOMINADO INDUTOR DA MÁQUINA C.C.****ESTATOR: TEM POR FUNÇÃO ESTABELECER O FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO****ENROLAMENTO DE CAMPO: EXCITA O CIRCUITO MAGNÉTICO PRINCIPAL, CRIANDO O FLUXO MAGNÉTICO DE OPERAÇÃO → PARTICIPA DIRETAMENTE DA CONVERSÃO ELETROMECÂNICA****ENROLAMENTO AUXILIAR OU DE INTERPOLOS: TEM AÇÃO LOCALIZADA NO E.Q. TENDO POR FUNÇÃO FAVORECER A COMUTAÇÃO DOS CONDUTORES DE ARMADURA SEM CENTELHAMENTO → NÃO PARTICIPA DO PROCESSO DE CONVERSÃO****ENROLAMENTO DE COMPENSAÇÃO: TEM POR FUNÇÃO MINIMIZAR OS EFEITOS INDIRETOS DE REAÇÃO DE ARMADURA (EM GERAL, UTILIZADO EM MÁQUINAS DE GRANDE PORTE) → NÃO PARTICIPA DO PROCESSO DE CONVERSÃO****ENROLAMENTOS DE INTERPOLOS E DE COMPENSAÇÃO (QUANDO EXISTENTE), APESAR DE NÃO PARTICIPAREM DO PROCESSO DE CONVERSÃO ELETROMECÂNICA NA MÁQUINA, SÃO ESSENCIAIS PARA UM DESEMPENHO SATISFATÓRIO DA MESMA**

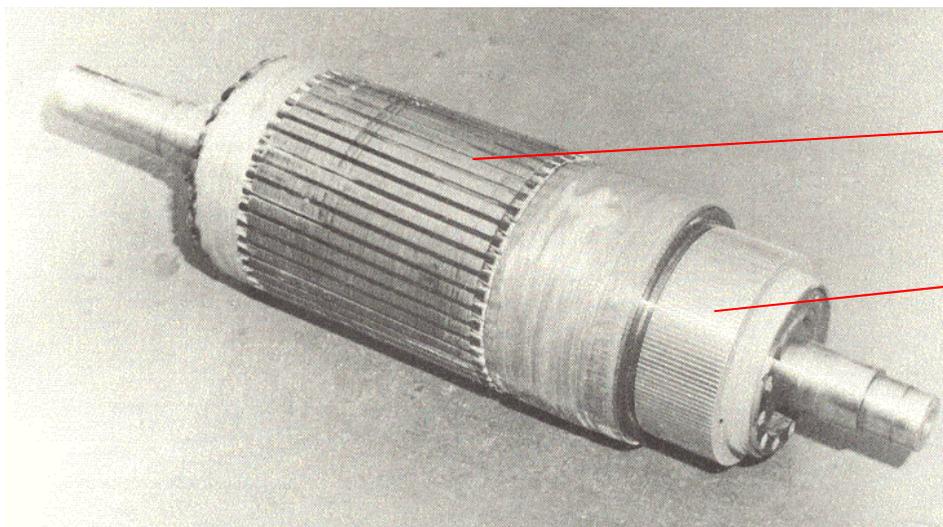


CARCAÇA

INTERPOLO

PÓLO PRINCIPAL

**MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**  
**USO INDUSTRIAL**  
**PORTE MÉDIO**



NÚCLEO DO ROTOR

COMUTADOR

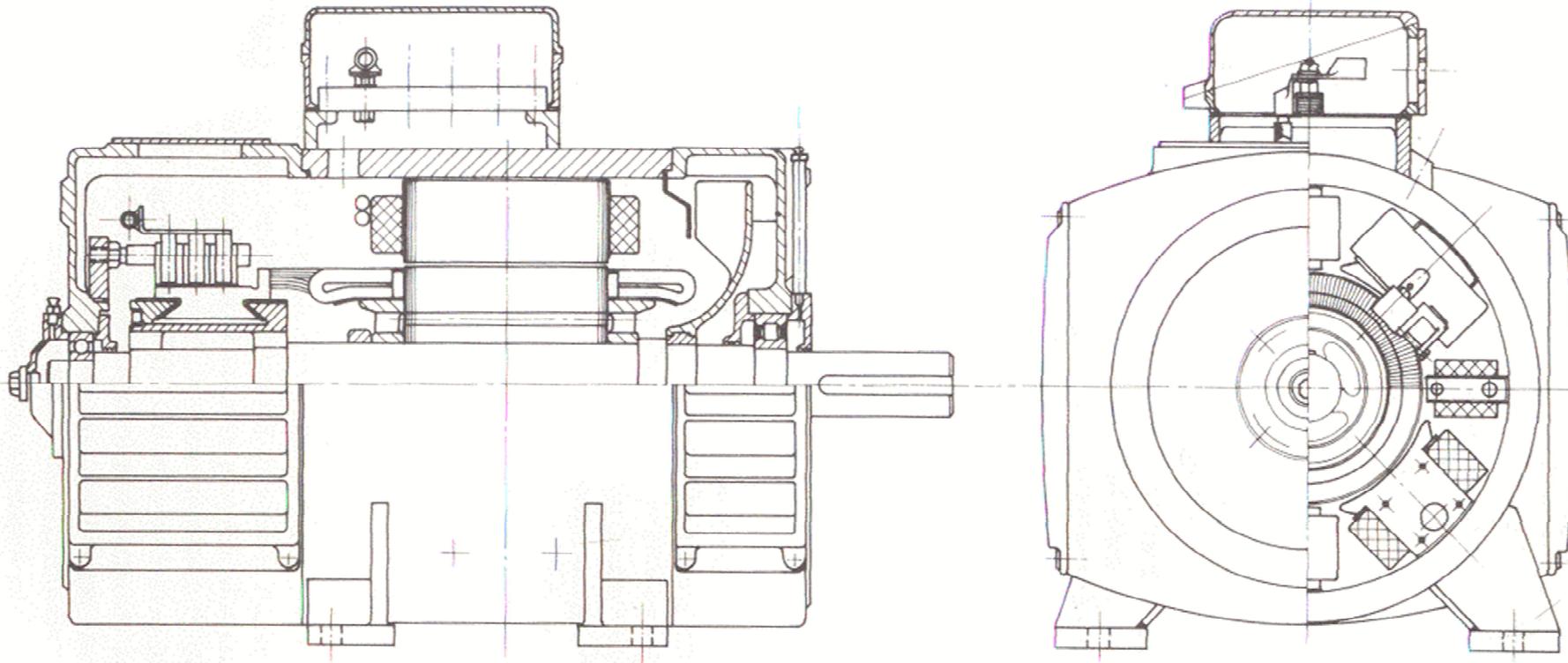
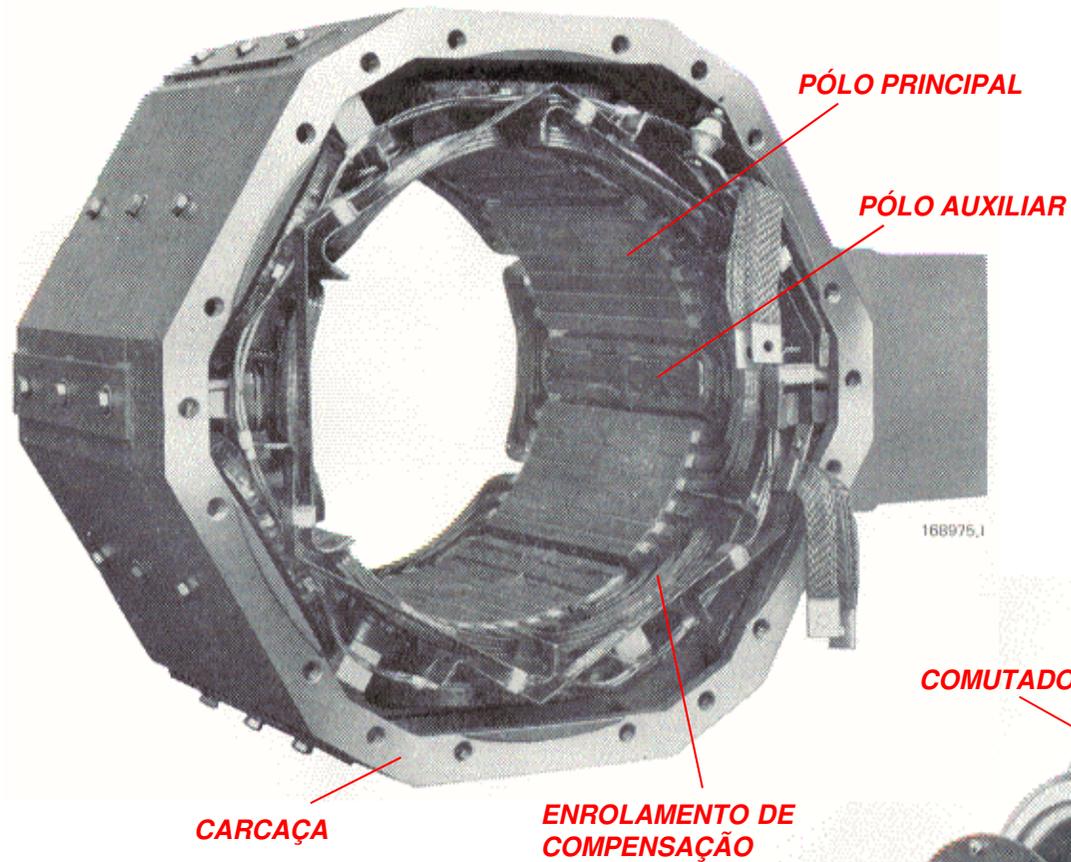


Fig. 3.16 Sectional arrangement of a thyristor drive motor, 56 kW, 1800 rev/ min., 440 volts

***CORTE TRANSVERSAL TÍPICO DE MOTOR C.C. INDUSTRIAL***

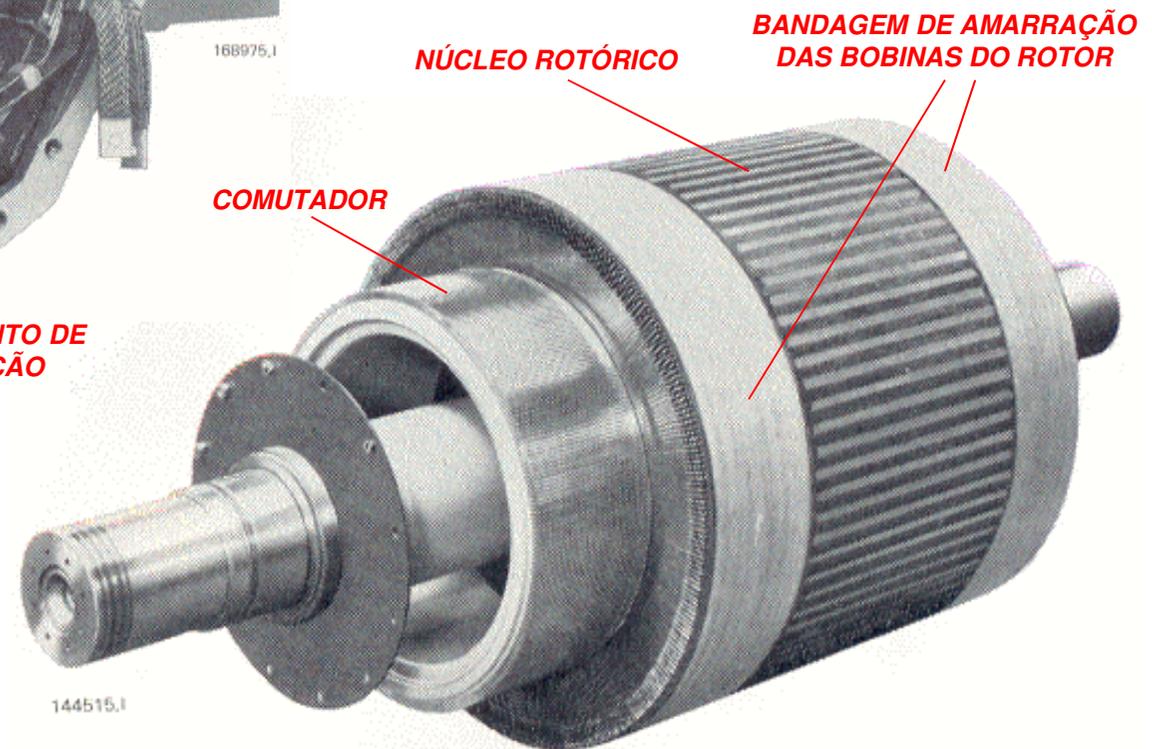


**MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

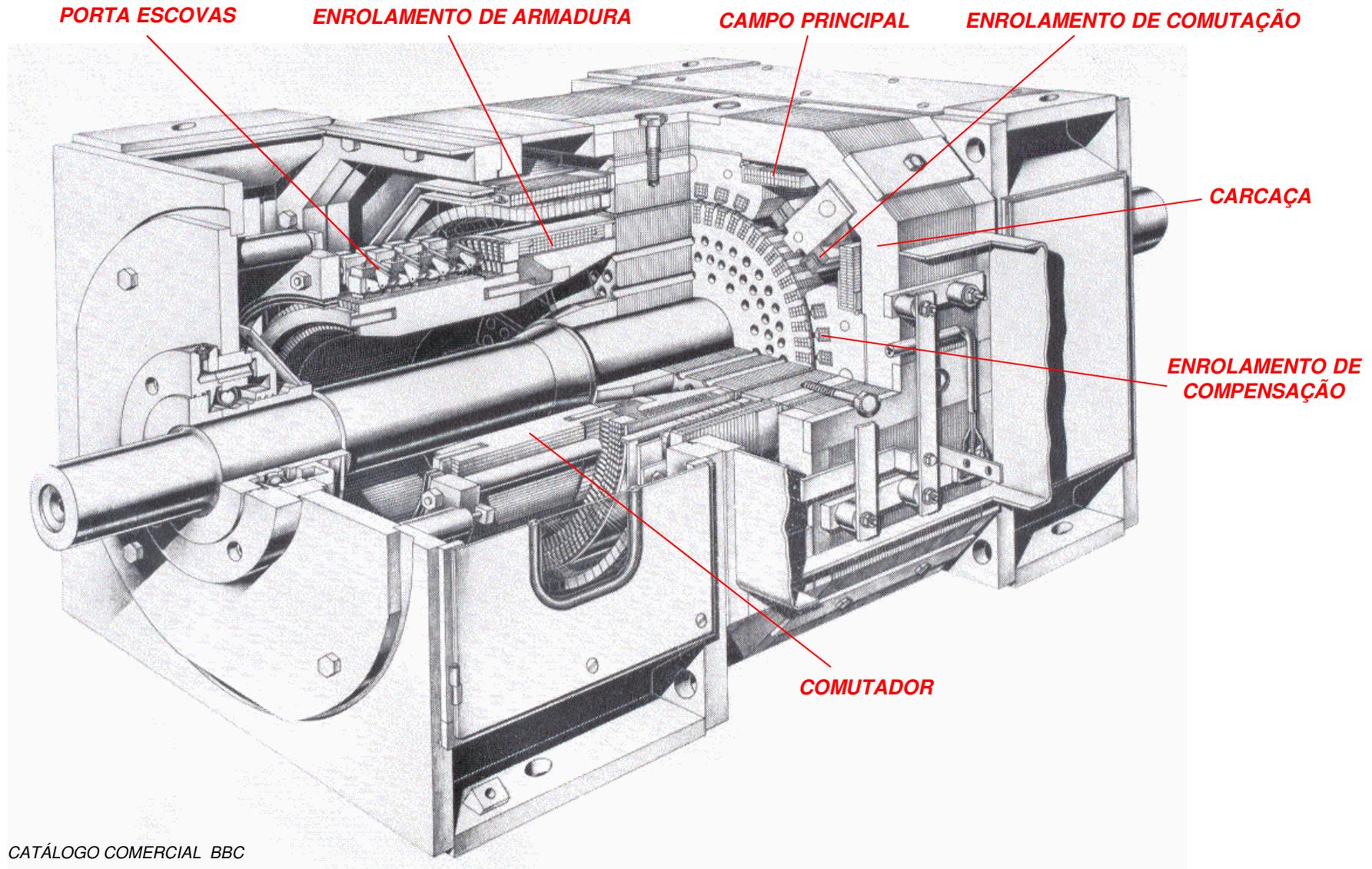
**USO INDUSTRIAL**

**GRANDE PORTE**

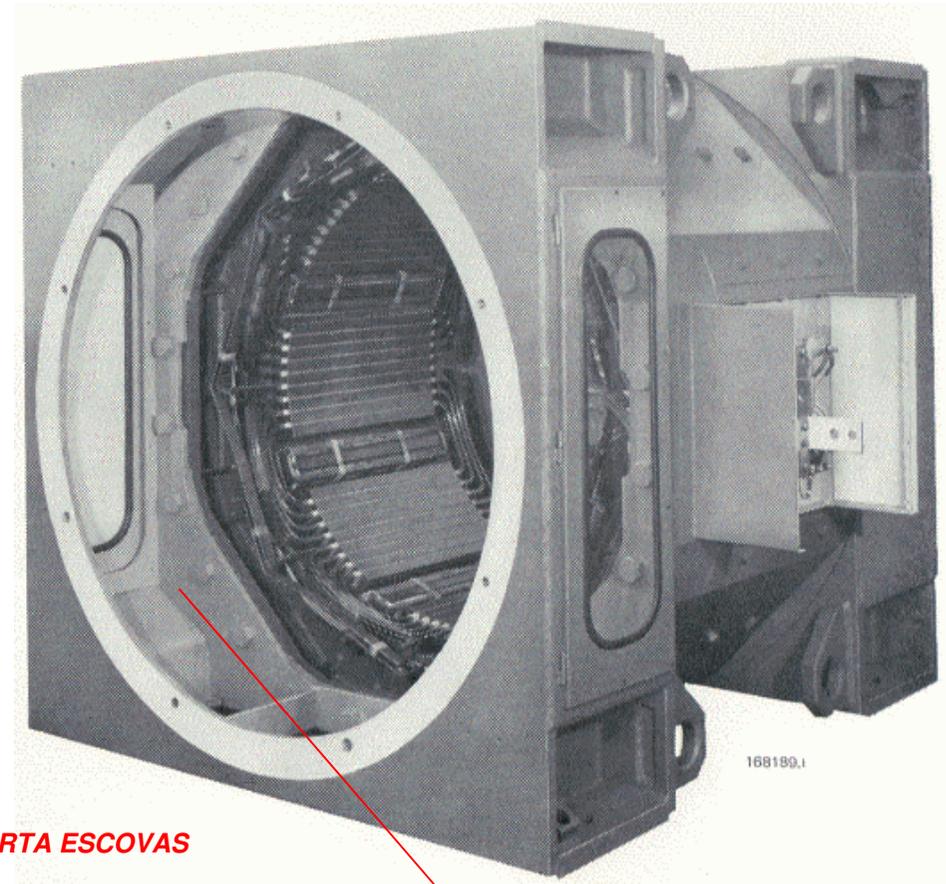
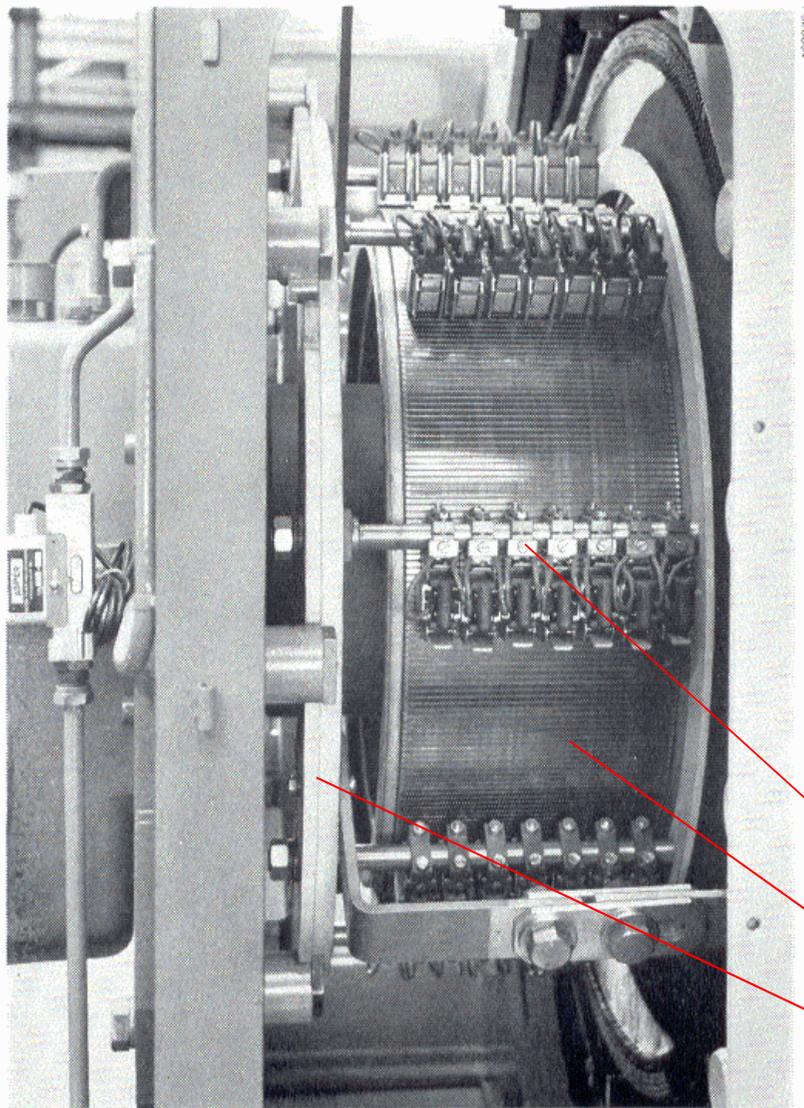
**COM ENROLAMENTO DE  
COMPENSAÇÃO**



**VISTA EM CORTE DE MOTOR C.C. INDUSTRIAL COMPENSADO**



**DETALHES CONSTRUTIVOS – COMUTADOR E PORTA ESCOVAS**

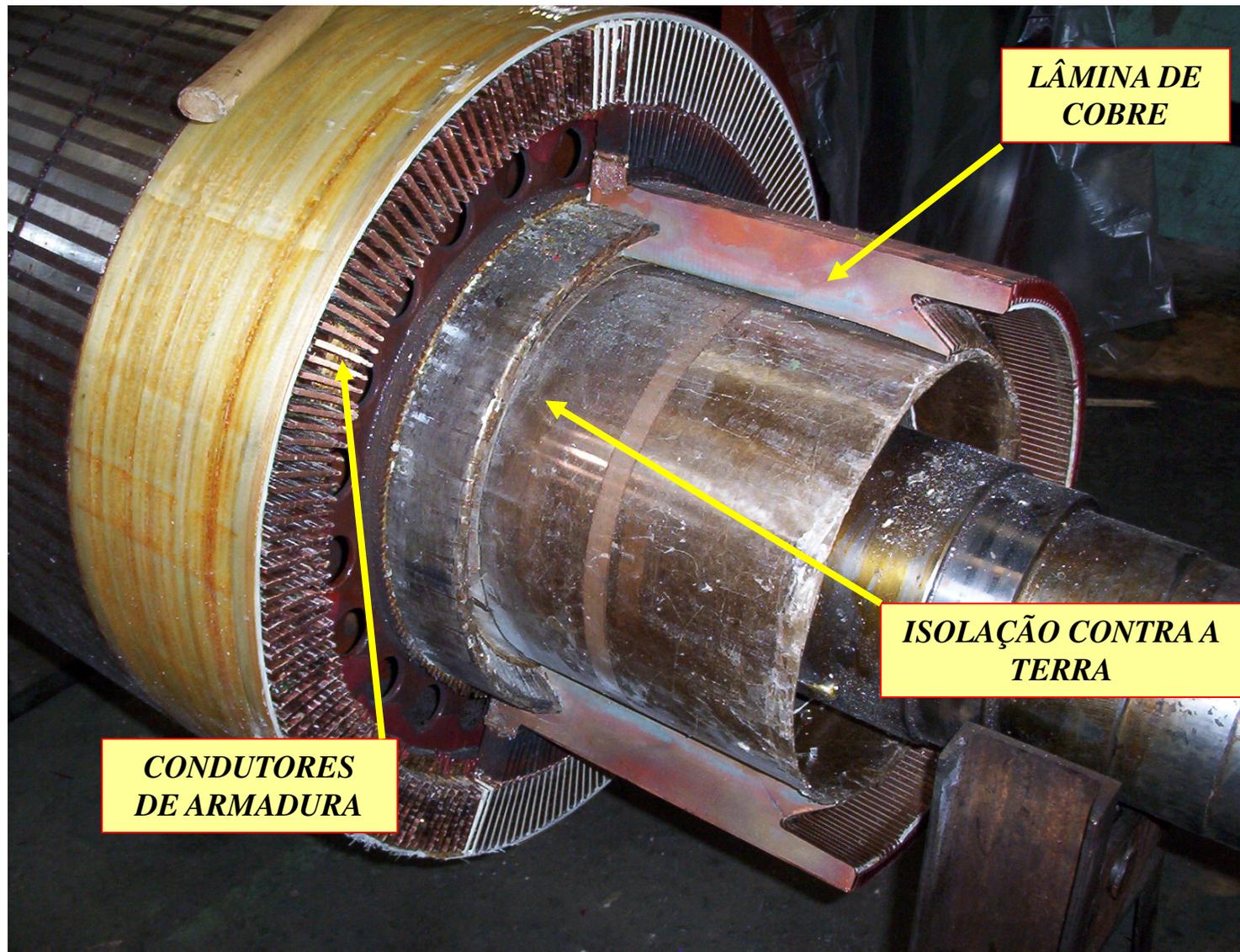


**PORTA ESCOVAS**

**COMUTADOR**

**ANEL DE FIXAÇÃO E AJUSTE**

**ALOJAMENTO DO CONJUNTO  
PORTA ESCOVAS**



**DETALHE CONSTRUTIVO DE COMUTADOR CONVENCIONAL**

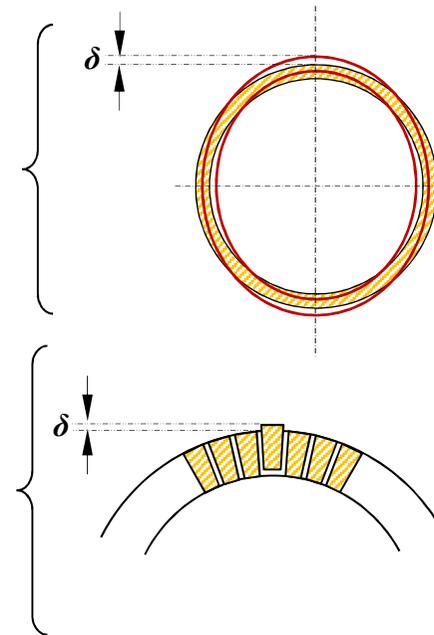
COMUTADOR → PARTE MAIS CRÍTICA DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

**PARTICULARIDADES CONSTRUTIVAS E DE OPERAÇÃO DO SISTEMA COMUTADOR – ESCOVAS NAS MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA**

**CONDIÇÃO GEOMÉTRICA DO COMUTADOR ( A QUENTE ):**

**DESVIO DE CIRCULARIDADE NA PISTA DE APOIO DAS ESCOVAS:**  
 → **MENOR QUE 0,025mm (COMUTADORES ATÉ DIÂMETRO DE 600 mm)**

**MÁXIMA PROJEÇÃO DE LÂMINAS INDIVIDUAIS FORA DO CÍRCULO IDEAL:**  
 → **MÁXIMO ENTRE 0,015 e 0,030mm DEPENDENDO DA ROTAÇÃO E DIÂMETRO**



**CONDIÇÕES OPERACIONAIS DAS ESCOVAS:**

→ **DENSIDADE DE CORRENTE: 7,5 – 12,5 A/cm<sup>2</sup>**

→ **PRESSÃO SOBRE O COMUTADOR: 180 – 350 g/cm<sup>2</sup>**

→ **COEFICIENTE DE ATRITO TÍPICO: 0,10 – 0,35**

→ **QUEDA DE TENSÃO NO CONTATO COM AS LÂMINAS: 1,5 – 2,5 V/par (POSITIVAS + NEGATIVAS)**

→ **TAXA DE DESGASTE EM CONDIÇÕES NORMAIS: 5x10<sup>-9</sup> a 25x10<sup>-9</sup> mm/m (VIDA ÚTIL ~ 8.000 a 12.000 HORAS)**