

PEA – 3400

MÁQUINAS ELÉTRICAS I

Resumo das notas de aula

PROGRAMA:**PARTE 1 – TRANSFORMADORES:**

Introdução e caracterização dos transformadores – Aspectos contrutivos e métodos de resfriamento – Funcionamento dos transformadores – Operação em vazio e caracterização dos materiais magnéticos: permeabilidade, saturação, histerése e perdas no núcleo – Operação em carga e fluxos de reação – Dispersão de fluxo, circuito equivalente e diagrama fasorial – Circuitos referidos e em valores por unidade – Ensaio e determinação de parâmetros – Regulação de tensão nos transformadores – Caracterização das perdas e rendimento – Paralelismo de transformadores – Transformadores em sistemas trifásicos – Defasagem e combinação de ligações – Harmônicas em transformadores – Cargas desequilibradas e ligações especiais – Autotransformadores

PARTE 2 – MÁQUINAS SÍNCRONAS:

Caracterização e aspectos construtivos das máquinas síncronas – Formação do campo magnético no entreferro – Máquinas de polos lisos e polos salientes – Ângulo elétrico - Tensão e frequência geradas na M.S. – Formação do sistema trifásico de tensões – Característica de saturação da M.S. – Enrolamentos distribuídos e encurtados – Fatores de enrolamento – Efeito magnetizante e desmagnetizante na máquina síncrona – Composição vetorial de campos no entreferro – Circuito equivalente e reatância síncrona – Conjugado e potência desenvolvidas na M.S. – Ângulo de carga – Operação isolada e suas características – Determinação da reatância síncrona e reatância de Potier

Excitação em carga da M.S. – Máquina síncrona de polos salientes – M.S. no barramento infinito – Sincronização e flutuação da M.S. – Troca de potências reativas e ativas da máquina no barramento – Diagrama de operação – Curvas “V” da máquina síncrona – Estabilidade – Curvas de capacidade da M.S. - Regime transitório da máquina síncrona

BIBLIOGRAFIA:

TRANSFORMADORES – R. G. Jordão – Ed. Edgard Blucher - 2002

MÁQUINAS SÍNCRONAS – R.G. Jordão

MÁQUINAS ELÉTRICAS – Fitzgerald - Ed. McGraw-Hill (*Existem diversas edições desse livro*)

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

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

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

PARTE 1 – TRANSFORMADORES

CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO TRANSFORMADOR NO SISTEMA DE POTÊNCIA

TRANSFORMADOR → COMPONENTE FUNDAMENTAL DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

POSSIBILITA TRANSMISSÃO DE ENERGIA A GRANDES DISTÂNCIAS

PERMITE INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO

PROMOVE ISOLAÇÃO GALVÂNICA ENTRE CIRCUITOS

CONCEBIDO, NA FORMA COMO O CONHECEMOS HOJE, AO FINAL DO SÉCULO XIX, TORNOU POSSÍVEL A TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A GRANDES DISTÂNCIAS EM CORRENTE ALTERNADA, EM OPOSIÇÃO AOS SISTEMAS ORIGINAIS DE CORRENTE CONTÍNUA, CUJAS DISTÂNCIAS MÁXIMAS, ENTRE A GERAÇÃO E A UTILIZAÇÃO, *NÃO ULTRAPASSAVAM POUCOS QUILOMETROS*

ASPECTO FUNDAMENTAL DOS SISTEMAS DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA :

→ POSSIBILIDADE, PROPICIADA PELO USO DO TRANSFORMADOR, DE MUDANÇA DOS NÍVEIS DE TENSÃO NAS DIVERSAS ETAPAS DO SISTEMA

PRINCIPAL IMPACTO DA MUDANÇA NOS NÍVEIS DE TENSÃO:

→ REDUÇÃO DAS PERDAS DE CONDUÇÃO (JOULE)

→ REDUÇÃO NO CUSTO DA INSTALAÇÃO, PRINCIPALMENTE DAS LINHAS

PERDA JOULE: → PRINCIPAL COMPONENTE DE PERDAS DO SISTEMA
→ DEPENDE DO QUADRADO DA CORRENTE CONDUZIDA

AUMENTO DE UMA ORDEM DE GRANDEZA NA TENSÃO DO SISTEMA REDUZ AS PERDAS EM DUAS ORDENS DE GRANDEZA PARA OS *MESMOS CONDUTORES*

→ AUMENTO DRAMÁTICO DO RENDIMENTO DE TRANSMISSÃO

ADEQUANDO-SE OS CONDUTORES À NOVA CORRENTE, AUMENTO DE UMA ORDEM DE GRANDEZA NA TENSÃO, REDUZ AS PERDAS E O PESO DOS CONDUTORES EM UMA ORDEM DE GRANDEZA

→ AUMENTO EXPRESSIVO DO RENDIMENTO E REDUÇÃO SIGNIFICATIVA DO CUSTO

EXEMPLO: LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA - POTÊNCIA : **45 MW**
DISTÂNCIA: **50 km** ENTRE O PONTO DE GERAÇÃO E O PONTO DE CONSUMO.

1º CASO - TRANSMISSÃO NA TENSÃO DE GERAÇÃO DE 13,8kV.

CORRENTE A SER CONDUZIDA : $I_F = 1.882 \text{ A/fase}$

CONDUTORES NECESSÁRIOS (CARREGAMENTO TÍPICO DA ORDEM DE $1,5 \text{ A/mm}^2$) : **2.500 MCM**

RESISTÊNCIA ESPECÍFICA PARA CONDUTOR DE ALUMÍNIO: $0,0216 \text{ } \Omega/\text{km} \rightarrow R_{50\text{KM}} = 1,08 \text{ } \Omega/\text{fase}$

PERDA JOULE TOTAL : $P_J = 3.R.(I_F)^2 = 11,5 \text{ MW}$

PESO TOTAL DE CONDUTORES: 500 ton.

RENDIMENTO DA TRANSMISSÃO: $\eta = (45 - 11,5) / 45 = 0,745 \rightarrow 74,5\%$

2º CASO - TRANSMISSÃO COM TENSÃO ELEVADA PARA 138 kV.

CORRENTE A SER CONDUZIDA : $I_F = 188 \text{ A/fase}$

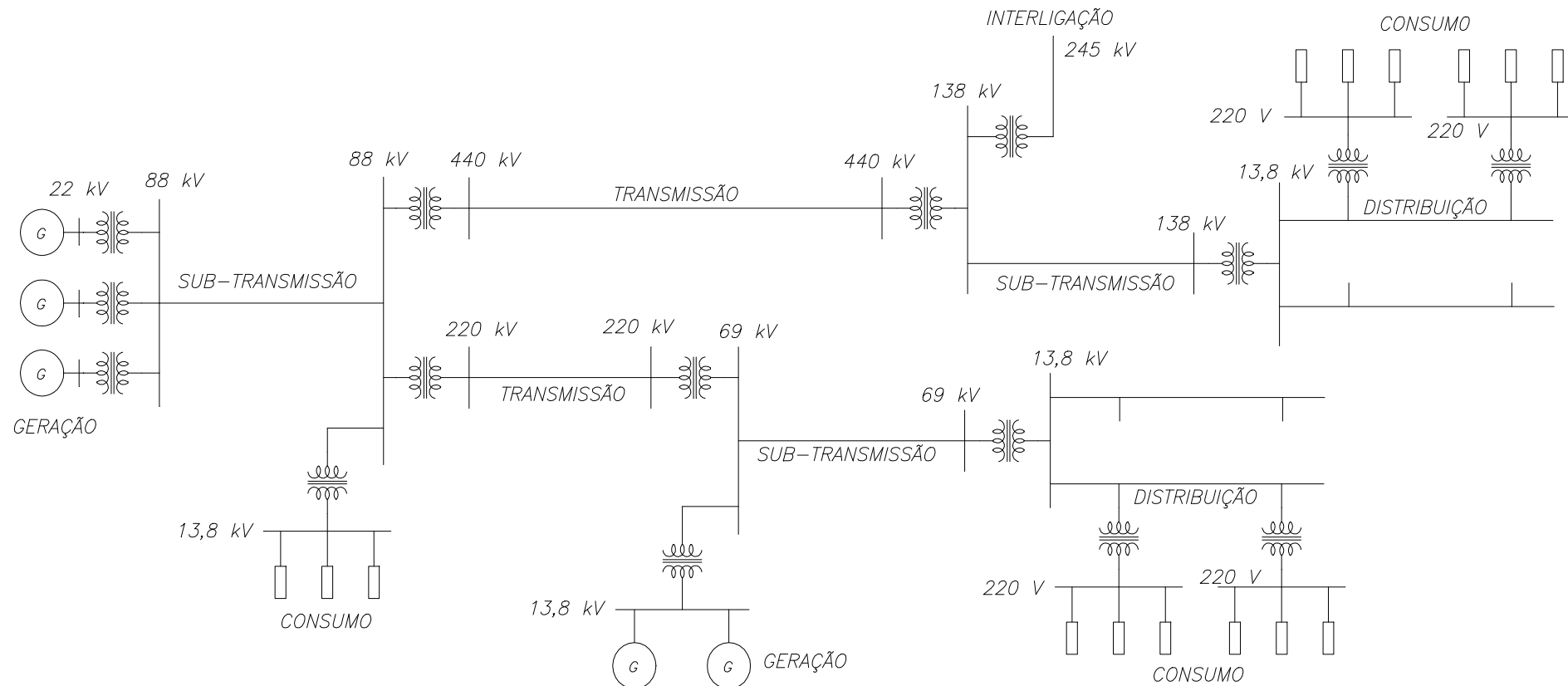
CONDUTORES NECESSÁRIOS (CARREGAMENTO TÍPICO DA ORDEM DE $1,5 \text{ A/mm}^2$) : **300 MCM**

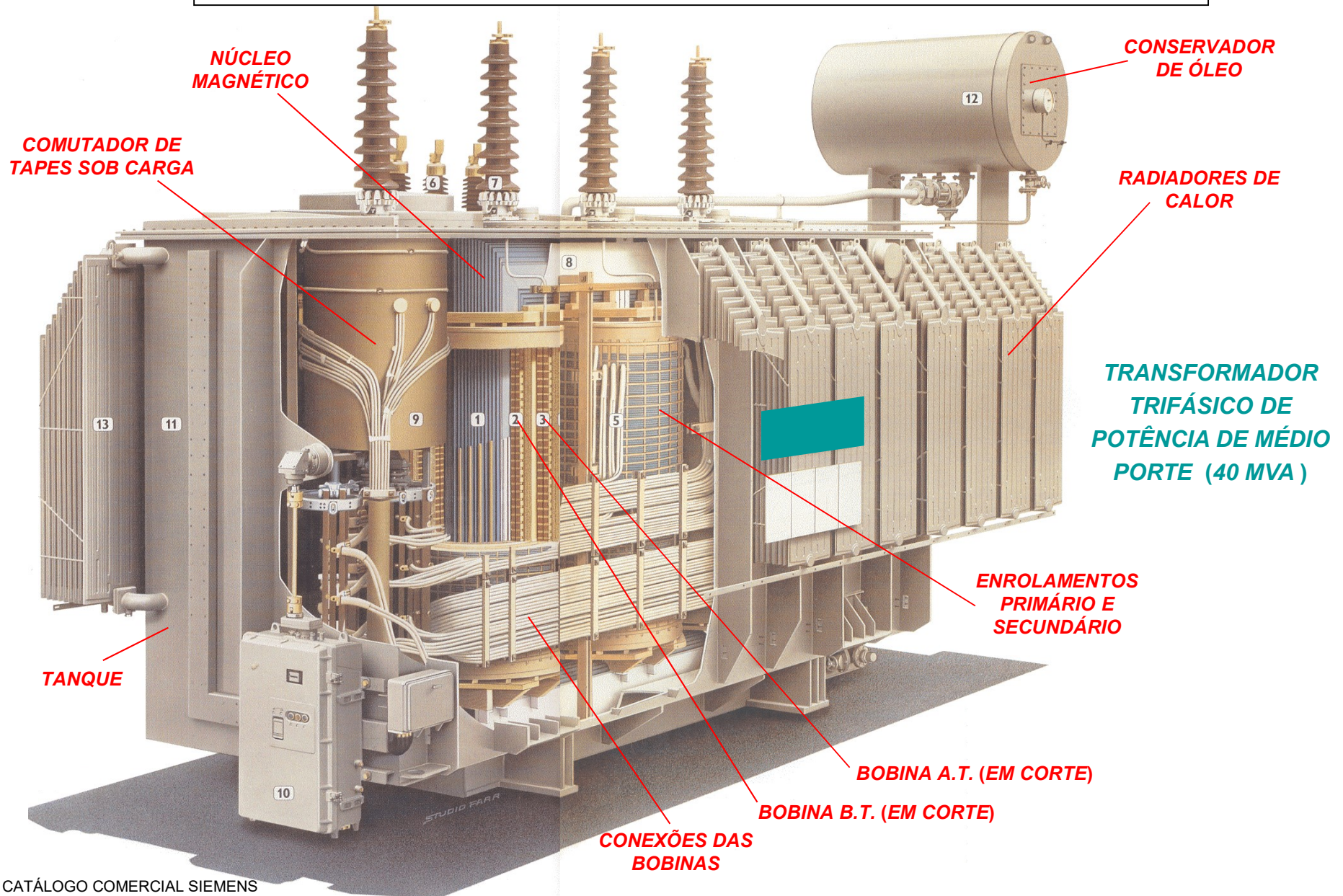
RESISTÊNCIA ESPECÍFICA PARA CONDUTOR DE ALUMÍNIO: $0,18 \text{ } \Omega/\text{km} \rightarrow R_{50\text{KM}} = 8,98 \text{ } \Omega/\text{fase}$

PERDA JOULE TOTAL : $P_J = 3.R.(I_F)^2 = 0,95 \text{ MW}$

PESO TOTAL DE CONDUTORES: 59 ton.

RENDIMENTO DA TRANSMISSÃO: $\eta = (45 - 0,95) / 45 = 0,979 \rightarrow 97,9\%$

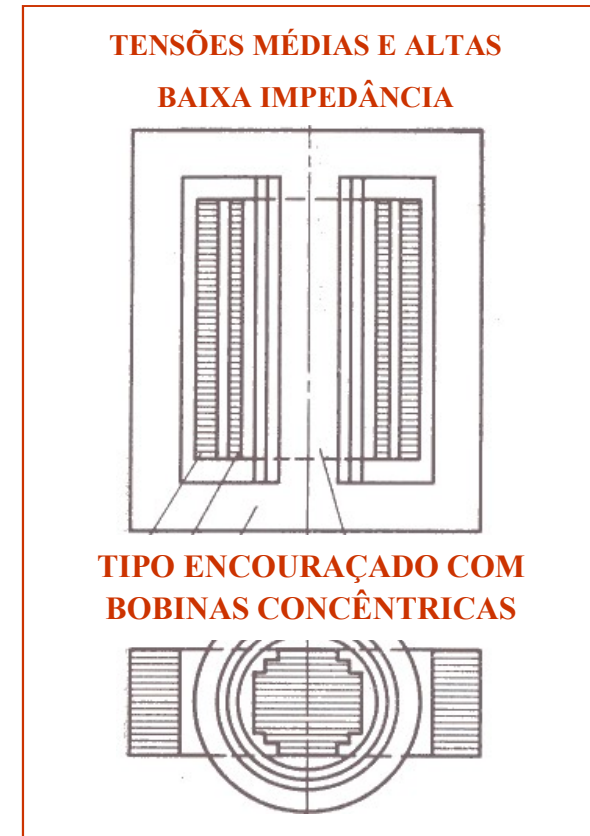
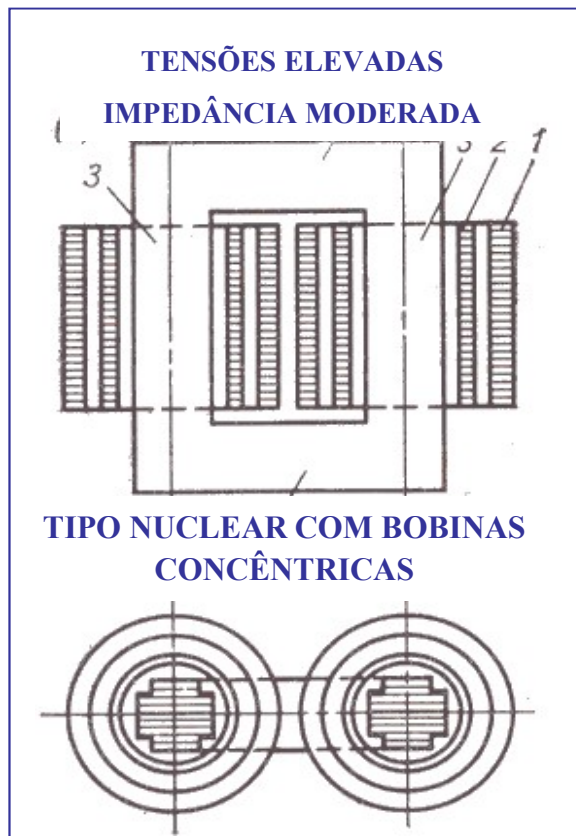
NÍVEIS DE TENSÃO → FUNÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA E DA DISTÂNCIA**SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO:****DISTÂNCIAS ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO → CENTENAS OU ATÉ MILHARES DE QUILOMETROS****→ TRANSFORMADOR PRESENTE EM TODAS AS INSTÂNCIAS DO SISTEMA DE POTÊNCIA**

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

TIPOS DE CONSTRUÇÃO DO NÚCLEO PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS**

VARIANTES QUANTO AO CONCEITO CONSTRUTIVO DO NÚCLEO:

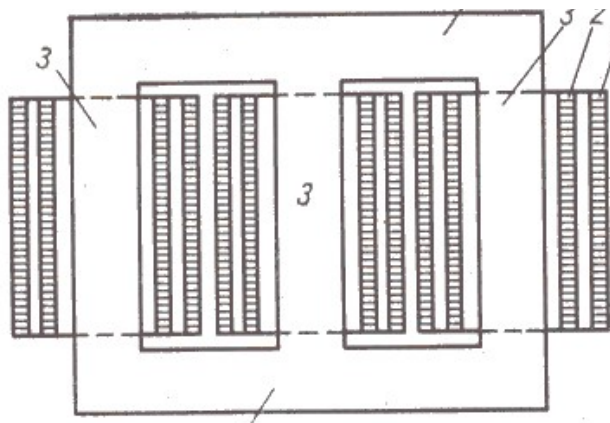
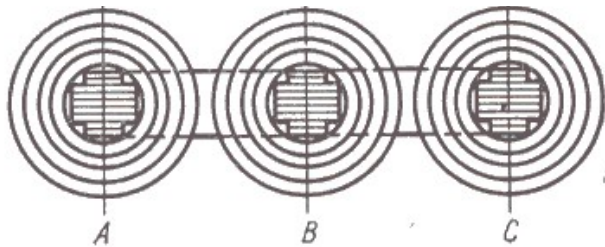
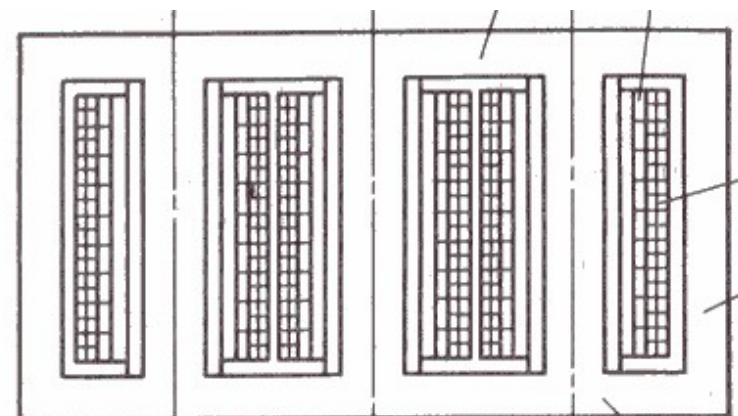
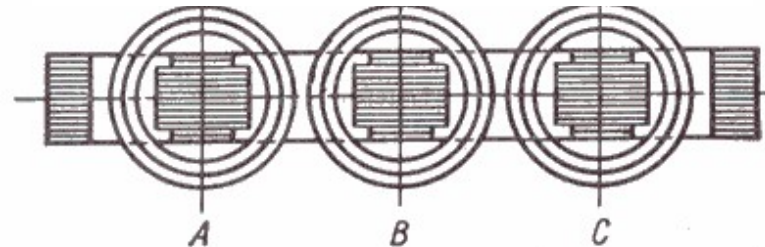
- **NÚCLEO ENVOLVIDO OU TIPO NUCLEAR** → EM GERAL “MAIS COBRE – MENOS FERRO”
- **NÚCLEO ENVOLVENTE OU TIPO ENCOURAÇADO** → EM GERAL “MENOS COBRE – MAIS FERRO”



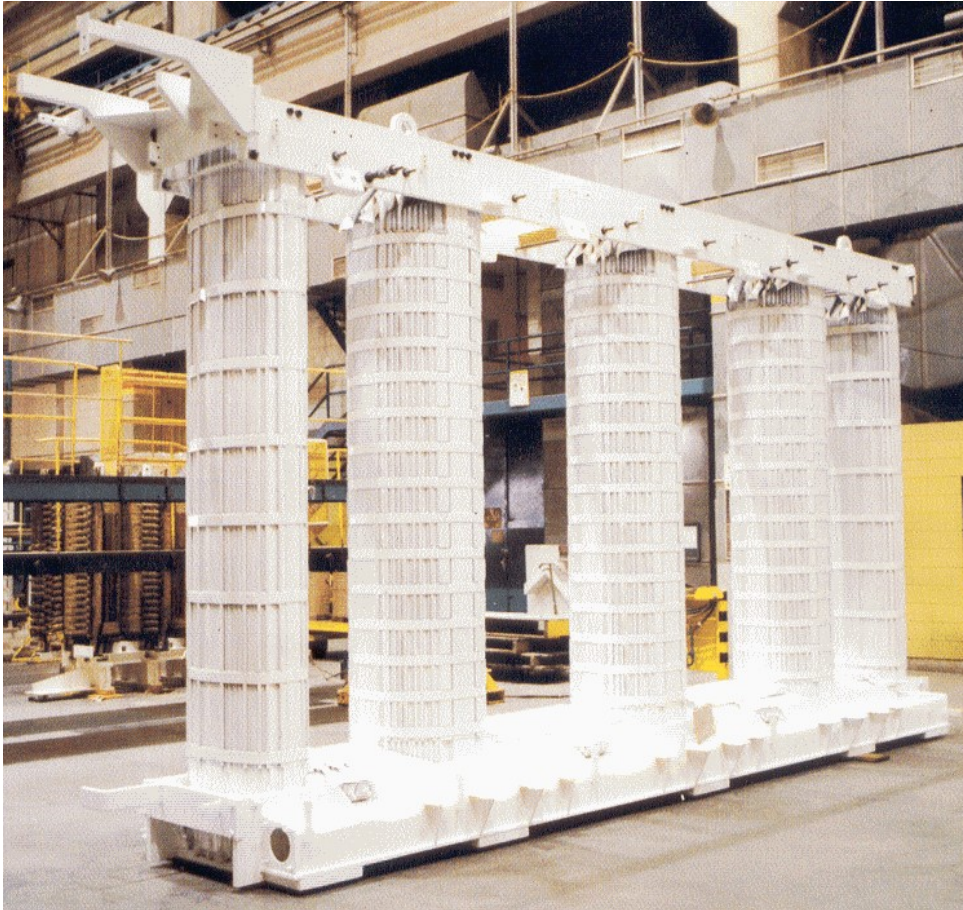
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**VARIANTES CONSTRUTIVAS DO NÚCLEO:**

→ NÚCLEO ENVOLVIDO OU TIPO NUCLEAR → TRANSFORMADOR DE 3 COLUNAS

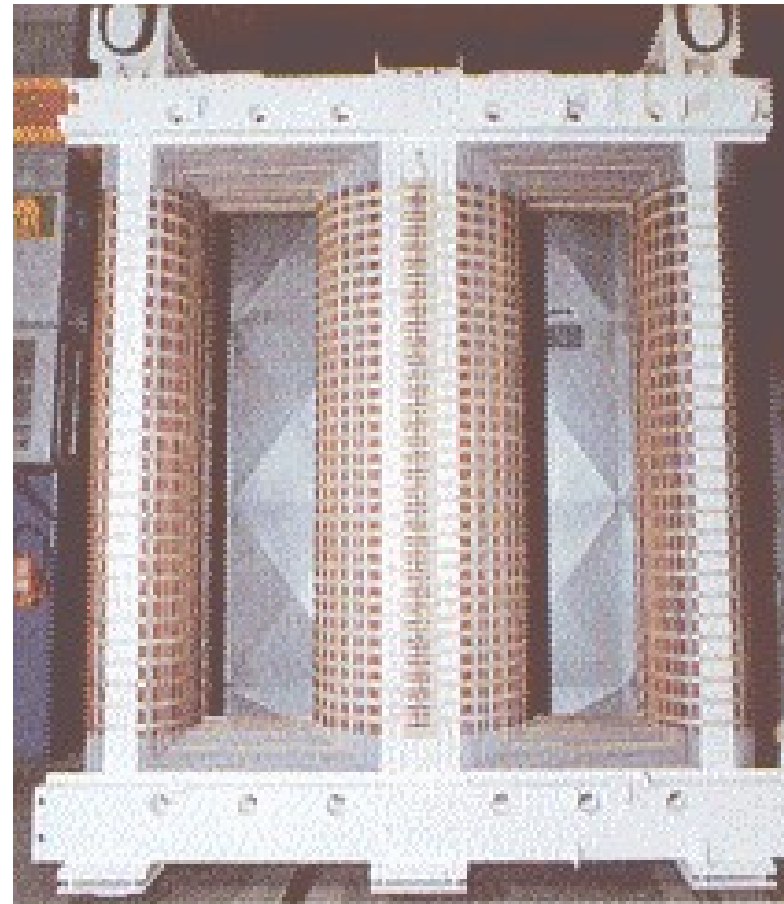
→ NÚCLEO ENVOLVENTE OU TIPO ENCOURAÇO → TRANSFORMADOR DE 5 COLUNAS

BAIXA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO**TRIFÁSICO NUCLEAR DE 3 COLUNAS****ELEVADA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO****TRIFÁSICO ENCOURAÇO DE 5 COLUNAS**

EXEMPLOS DE VARIANTES CONSTRUTIVAS DO NÚCLEO



NÚCLEO TRIFÁSICO DE 5 COLUNAS



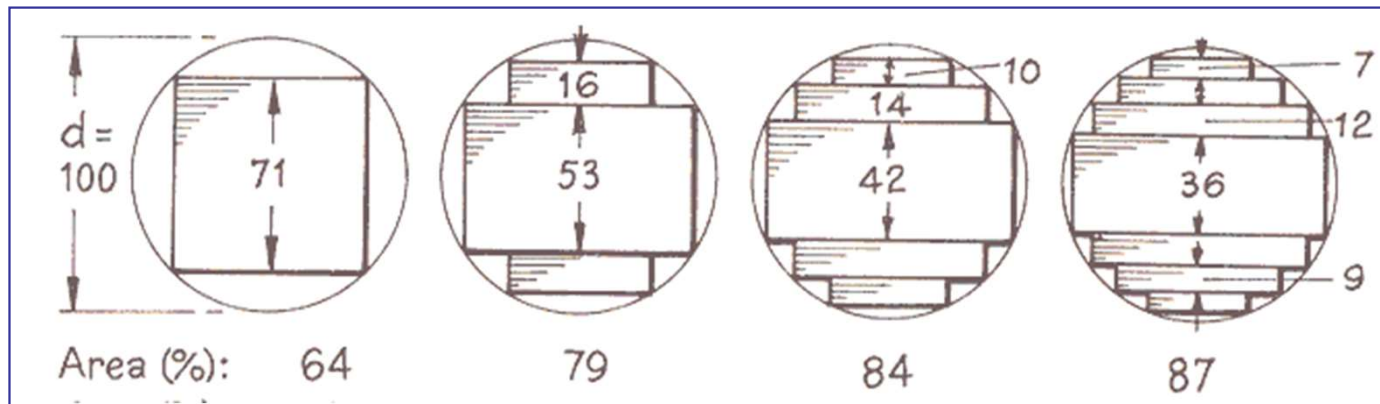
NÚCLEO MONOFÁSICO DE 3 COLUNAS

DETALHES DE EXECUÇÃO DO NÚCLEO

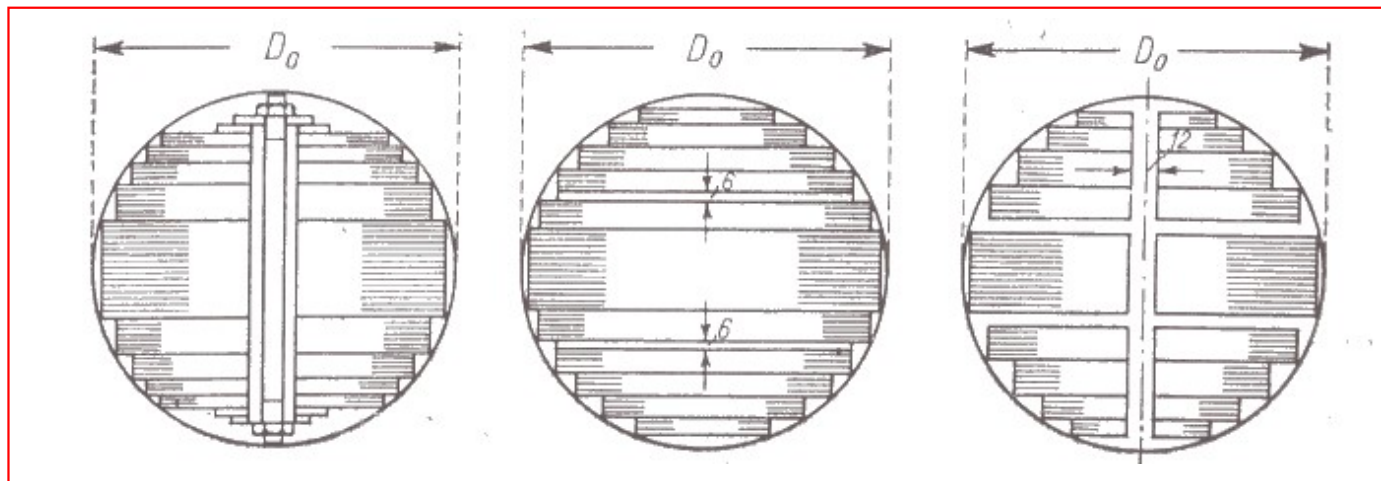
BOBINAS CILÍNDRICAS : MAIOR RESISTÊNCIA AOS ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS E MENOR RESISTÊNCIA ÔHMICA

→ NÚCLEO DEVE ESTAR INSCRITO NA BOBINA DE MODO A MAXIMIZAR A SECÇÃO DE FERRO NUM DADO ESPAÇO

→ NÚCLEO ESCALONADO



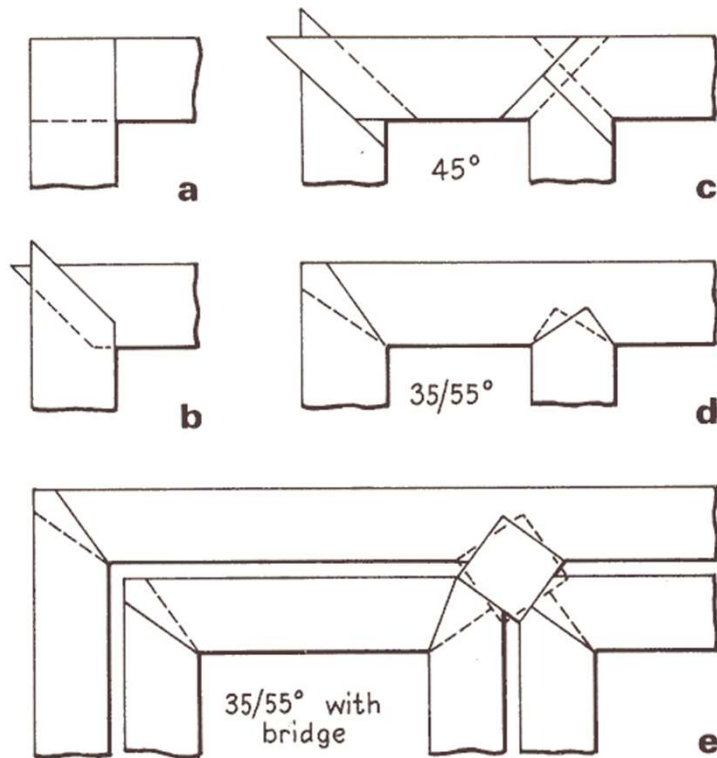
GRADAÇÃO DO
ESCALONAMENTO
EM FUNÇÃO DO
PORTE DO NÚCLEO



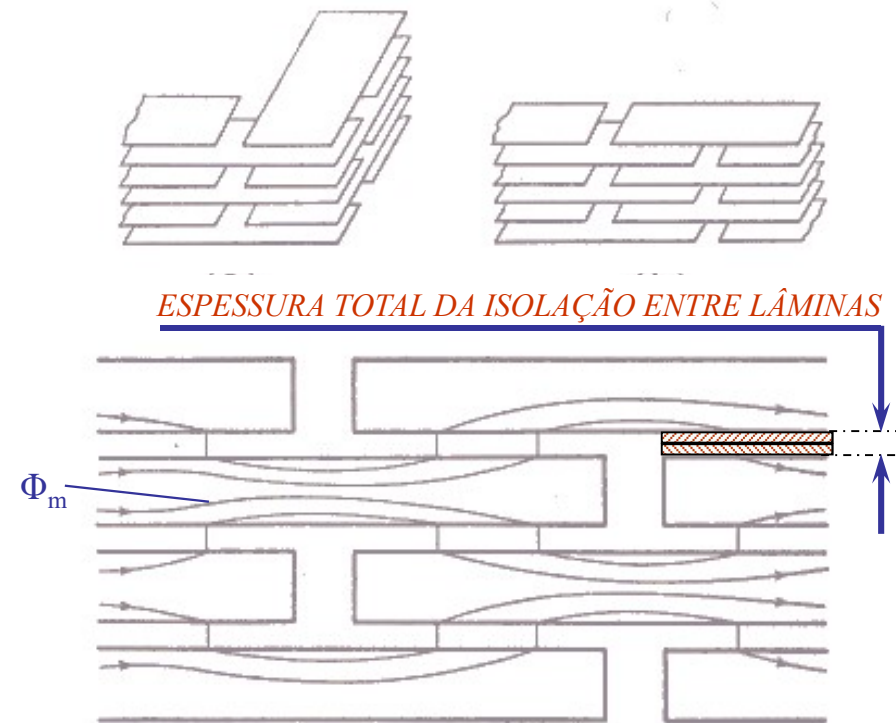
EXECUÇÃO DOS
CANALIS DE
PASSAGEM DE
ÓLEO PARA
REFRIGERAÇÃO
DO NÚCLEO

DETALHES DE EXECUÇÃO DO NÚCLEO

CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA E MAGNÉTICA DO NÚCLEO → *SOBREPOSIÇÃO DAS LÂMINAS*



TÉCNICAS DIFERENTES DE SOBREPOSIÇÃO
EM FUNÇÃO DO PORTE DO NÚCLEO E DE
LIMITAÇÃO DE LARGURA DAS CHAPAS



PROBLEMAS BÁSICOS NA REGIÃO DA SOBREPOSIÇÃO:

→ INCREMENTO DAS PERDAS NO FERRO

→ AUMENTO DA RELUTÂNCIA MAGNÉTICA NA JUNÇÃO

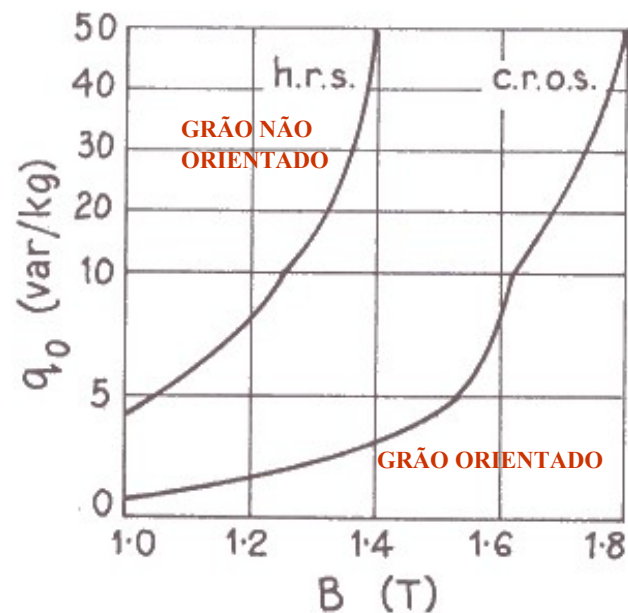
DETALHES DE EXECUÇÃO DO NÚCLEO

MATERIAL FERROMAGNÉTICO USUALMENTE EMPREGADO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA:

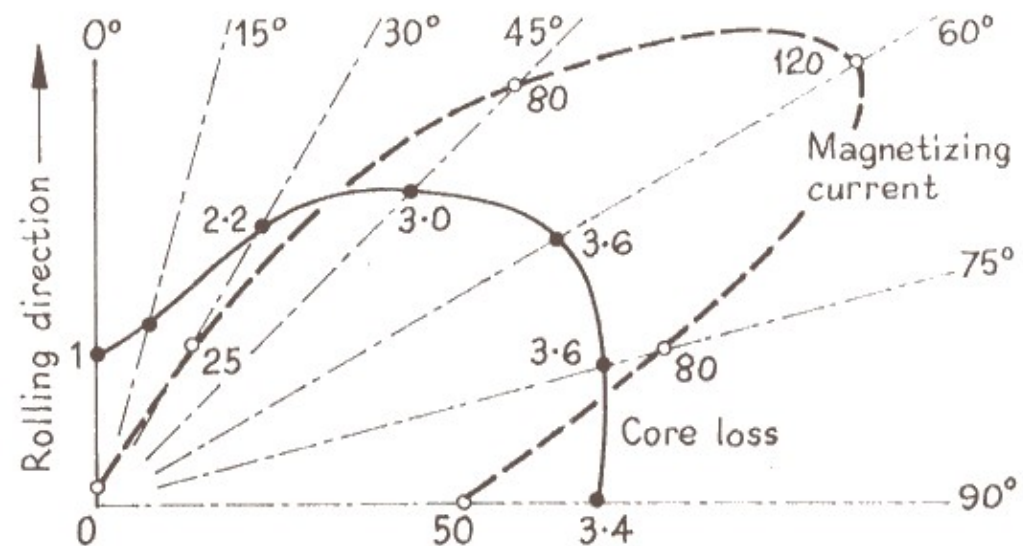
→ AÇO SILICIOSO COM TEOR DE SILÍCIO DE 4 A 5% → LAMINADO A FRIO COM GRÃO ORIENTADO

→ REVESTIDO COM PELÍCULA ISOLANTE ORGÂNICA

ESPESSURA REDUZIDA DA LÂMINA: $\leq 0,35 \text{ mm}$ - DENSIDADE DE FLUXO USUAL: ATÉ $\sim 1,6 \text{ Wb / m}^2$



CONSUMO ESPECÍFICO DE POTÊNCIA
REATIVA MAGNETIZANTE

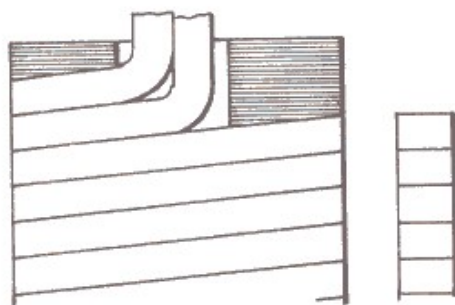


COMPORTAMENTO DA CORRENTE MAGNETIZANTE E
DAS PERDAS NO FERRO COM A DIREÇÃO DA
LAMINAÇÃO DA CHAPA

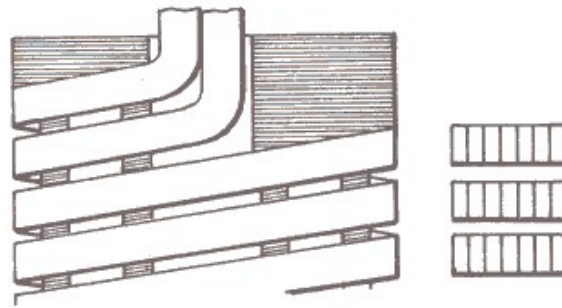
TIPOS DE CONSTRUÇÃO DAS BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

FATORES QUE DETERMINAM O TIPO DE BOBINAS UTILIZADAS:

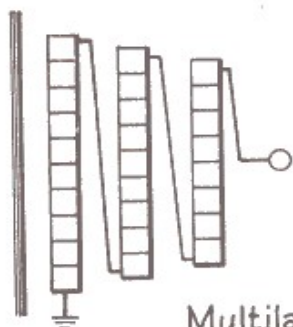
- **POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR**
- **TENSÃO NOMINAL DO ENROLAMENTO**
- **CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS COMO SUPORTABILIDADE A SURTOS**



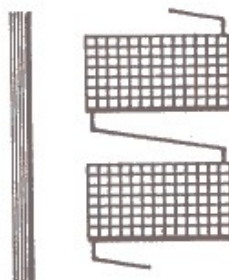
Helix



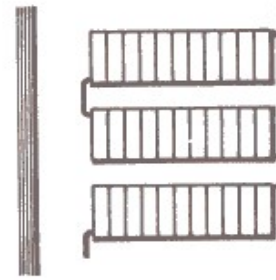
Disc-helix



Multilayer
helix



Crossover



Disc

BOBINAS HELICOIDAIS

→ **ENROLAMENTOS DE
BAIXA E MÉDIA TENSÃO**

**BOBINAS DE MÚLTIPLAS
CAMADAS E EM DISCO**

→ **ENROLAMENTOS DE
MÉDIA E ALTA TENSÃO**

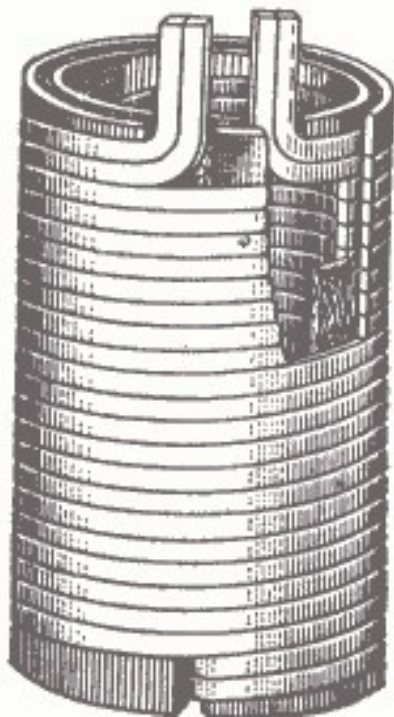
DETALHES DE EXECUÇÃO DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

PROJETO E EXECUÇÃO DAS BOBINAS DEVEM GARANTIR:

→ ADEQUADA SUSTENTAÇÃO MECÂNICA - RESISTÊNCIA AOS ESFORÇOS DE CURTO-CIRCUITO

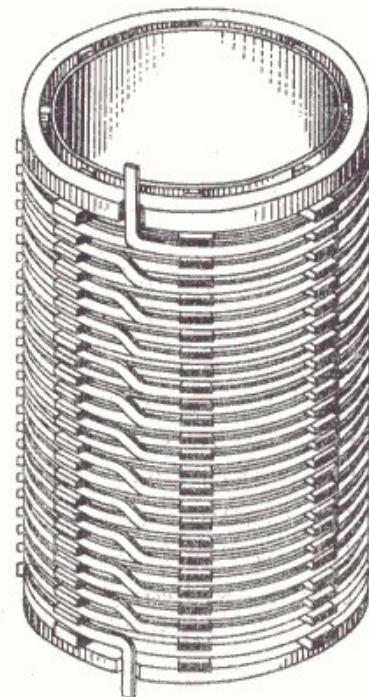
→ ADEQUADA ISOLAÇÃO - SUPORTABILIDADE A SURTOS DE TENSÃO

→ ADEQUADA REFRIGERAÇÃO - PASSAGENS DE ÓLEO PARA TROCA DE CALOR MAIS EFICIENTE



BOBINA HELICOIDAL

- CONDUTORES DE GRANDE SECÇÃO
- CONDUTORES SUBDIVIDIDOS
- ESPIRAS APOIADAS



BOBINA CONTÍNUA

- CONDUTORES DE SECÇÃO REDUZIDA
- CANAIS DE CIRCULAÇÃO DE ÓLEO
- CALÇOS ENTRE CAMADAS E ANÉIS DE PRESSÃO NAS EXTREMIDADES

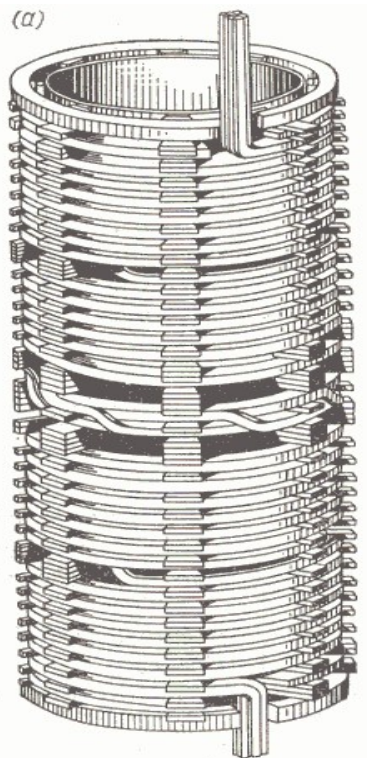
DETALHES DE EXECUÇÃO DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

BOBINAS CONSTRUÍDAS USUALMENTE COM CONDUTORES DE SECÇÃO RETANGULAR:

→ MELHOR ACOMODAÇÃO → MAIOR SUSTENTAÇÃO MECÂNICA → TROCA DE CALOR MAIS EFICIENTE

DENSIDADES DE CORRENTE UTILIZADAS DEPENDEM DO PORTE E DO MÉTODO DE RESFRIAMENTO :

→ VALORES DE REFERÊNCIA: 1,5 - 2,5 A / mm²



BOBINA EM HÉLICE

→ MÚLTIPLOS
CONDUTORES DE
SECÇÃO REDUZIDA

→ CANAIS DE
CIRCULAÇÃO DE ÓLEO

→ CALÇOS ENTRE
CAMADAS E ANÉIS DE
PRESSÃO NAS
EXTREMIDADES

→ TRANSPOSIÇÃO
PARCIAL AO LONGO DA
BOBINA

CONDUTOR USUALMENTE EMPREGADO:

BOBINAS COM MÚTIPLAS ESPIRAS

→ COBRE TREFILADO

→ CONDUTIVIDADE: 97 A 99 % I.A.C.S.

→ ISOLADO COM PAPEL KRAFT / NOMEX

BOBINAS EM FOLHA CONTÍNUA

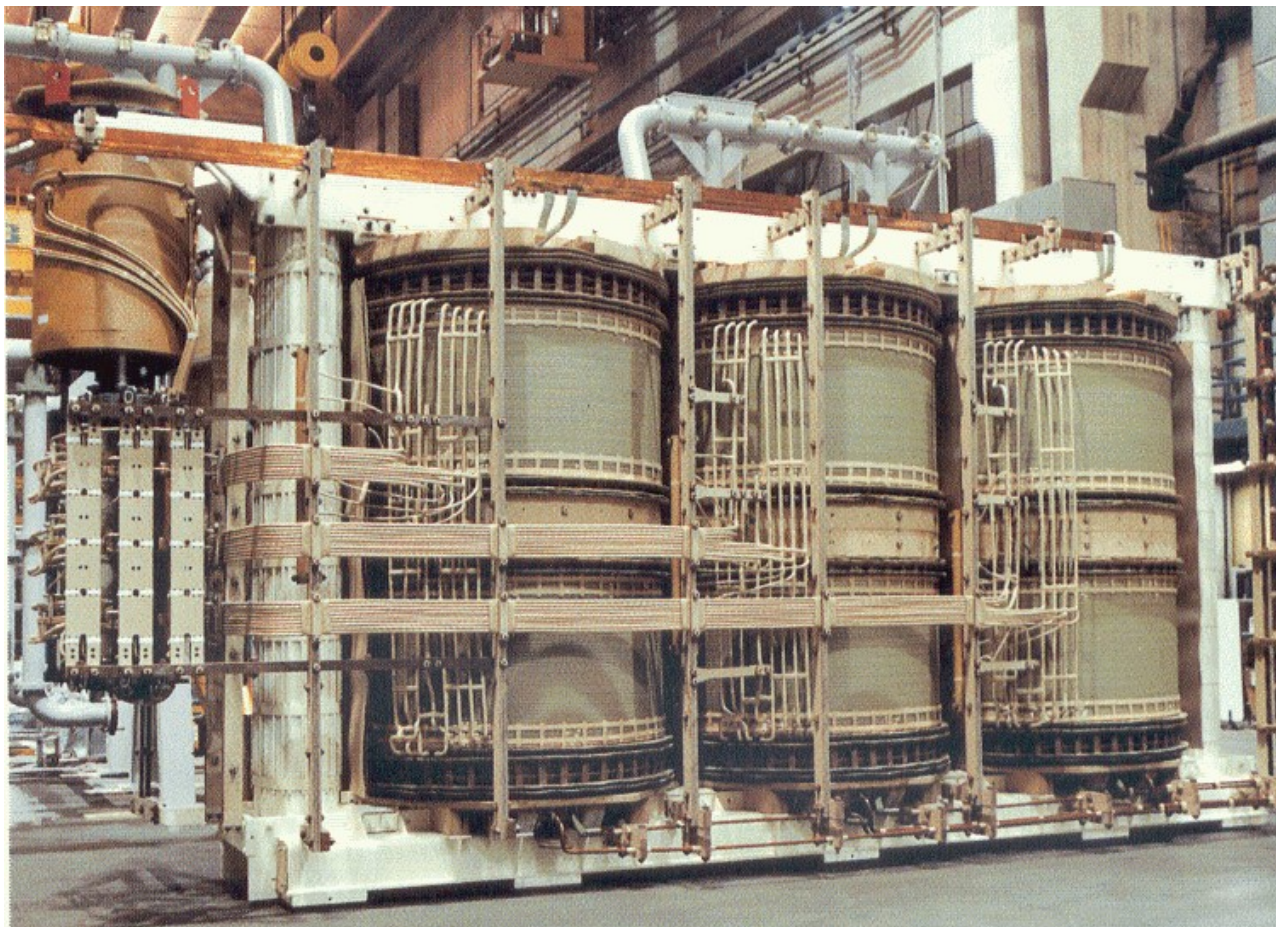
→ ALUMÍNIO LAMINADO

→ CONDUTIVIDADE: 60 A 63 % I.A.C.S.

EXEMPLOS DE BOBINAS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA



**BOBINAS HELICOIDAIS
CONTÍNUAS**



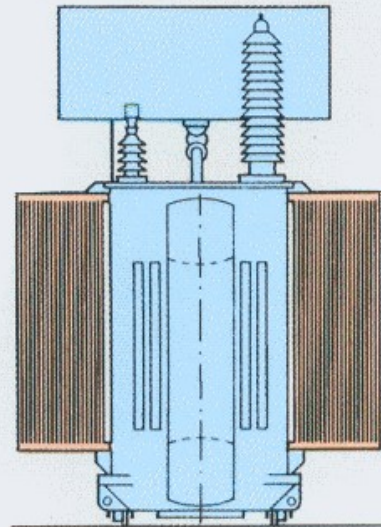
**BOBINAS MONTADAS SOBRE O NÚCLEO E CONECTADAS ENTRE SI
E AO COMUTADOR SOB CARGA**

MÉTODOS DE RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES

DISSIPADORES
FIXADOS À PAREDE
DO TANQUE

CONVECÇÃO
NATURAL DO ÓLEO
INTERNO E DO AR
EXTERNO

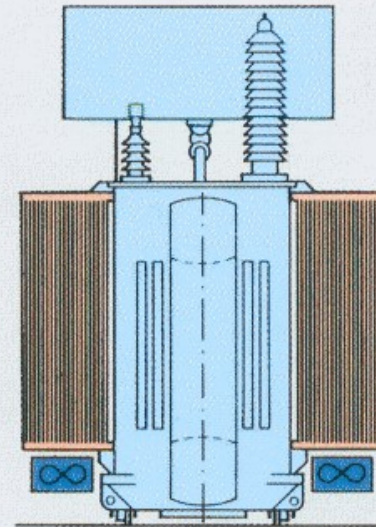
ON-AN



DISSIPADORES
FIXADOS À PAREDE
DO TANQUE

CONVECÇÃO NATURAL
DO ÓLEO INTERNO E
FORÇADA DO AR
EXTERNO

ON-AF

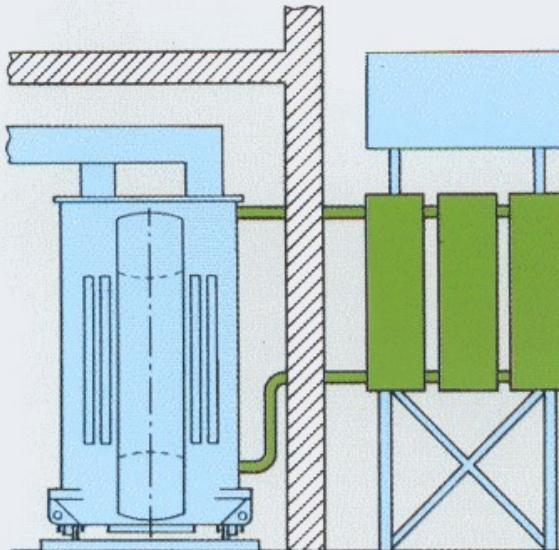


b

DISSIPADORES
EXTERNOS AO
AMBIENTE

CONVECÇÃO
NATURAL OU
FORÇADA DO ÓLEO
INTERNO E DO AR
EXTERNO

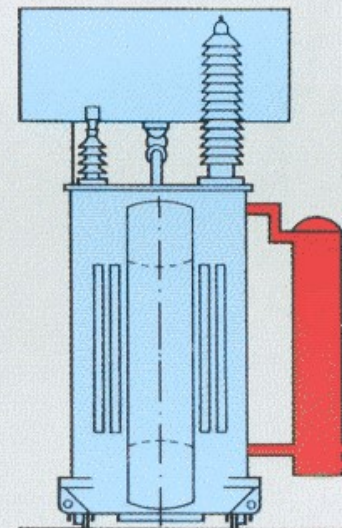
ON-AN OF-AN OF-AF

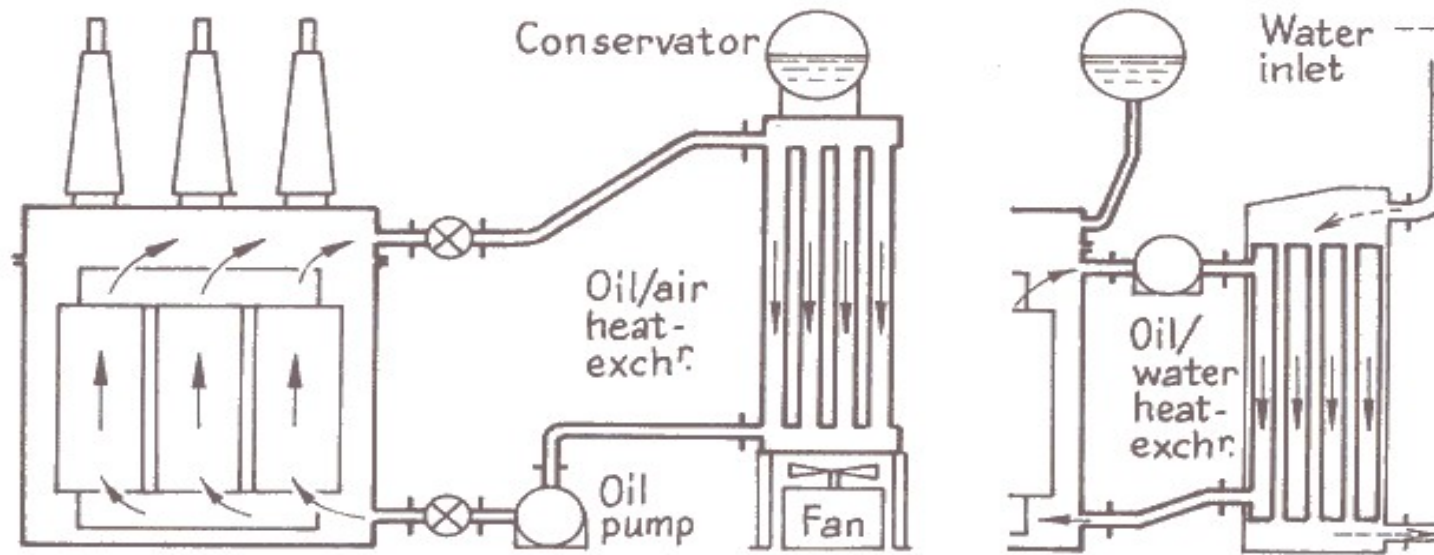


TROCADOR DE CALOR
A ÁGUA NA PAREDE
DO TANQUE

CONVECÇÃO NATURAL
DO ÓLEO INTERNO E
FORÇADA DA ÁGUA
EXTERNA

ON-WF



MÉTODOS DE RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES**OF.AF → RADIADORES INDEPENDENTES****OF.WF → PERMUTADOR DE CALOR ÓLEO -ÁGUA****EXEMPLOS DE MODOS DE RESFRIAMENTO PARA TRANSFORMADORES DE GRANDE PORTE****SOLUÇÃO MAIS COMUM → RADIADORES FIXADOS À ESTRUTURA DO TANQUE**