

PEA – 2400

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

PARTE 3 – 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

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.

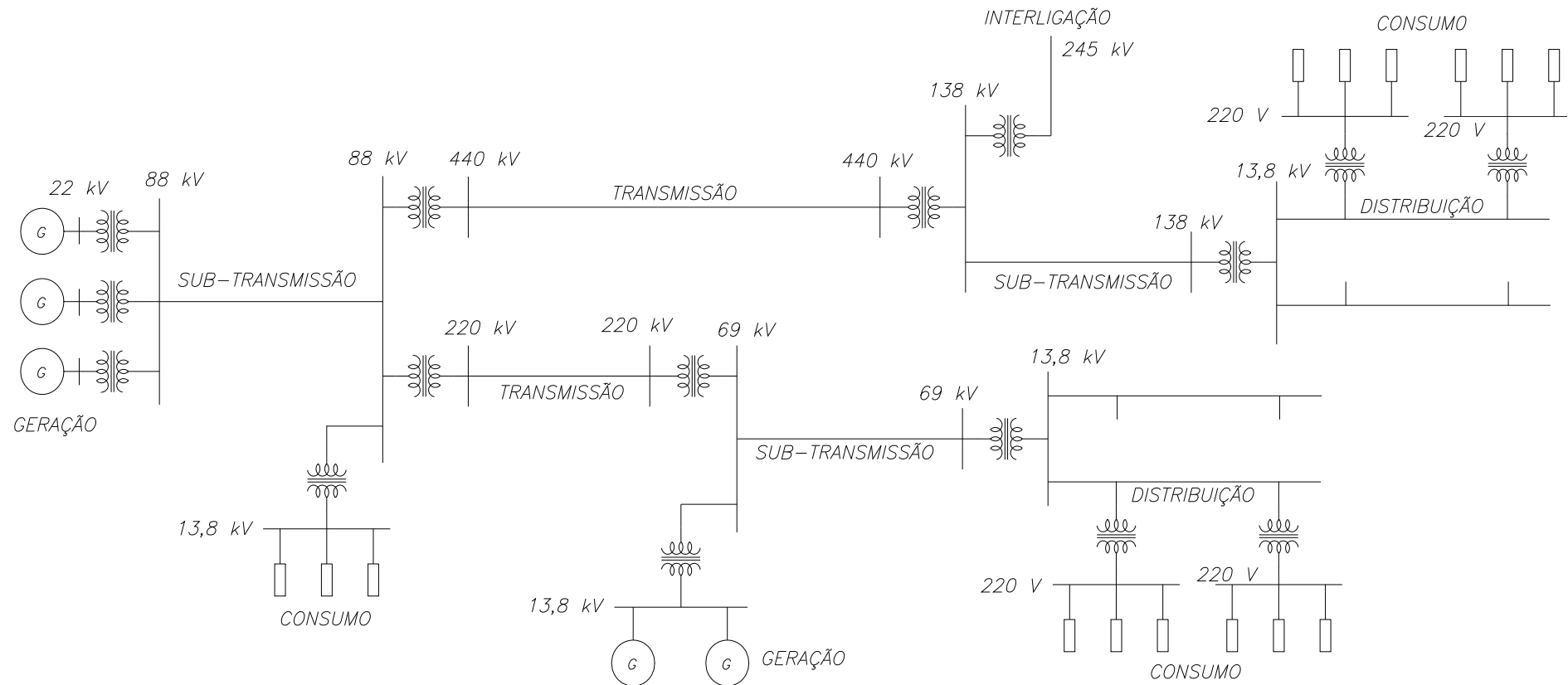
RENDIMENTO DA TRANSMISSÃO: $\eta = (45 - 0,95) / 45 = 0,979 \rightarrow 97,9\%$

NÍVEIS DE TENSÃO → FUNÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA E DA DISTÂNCIA

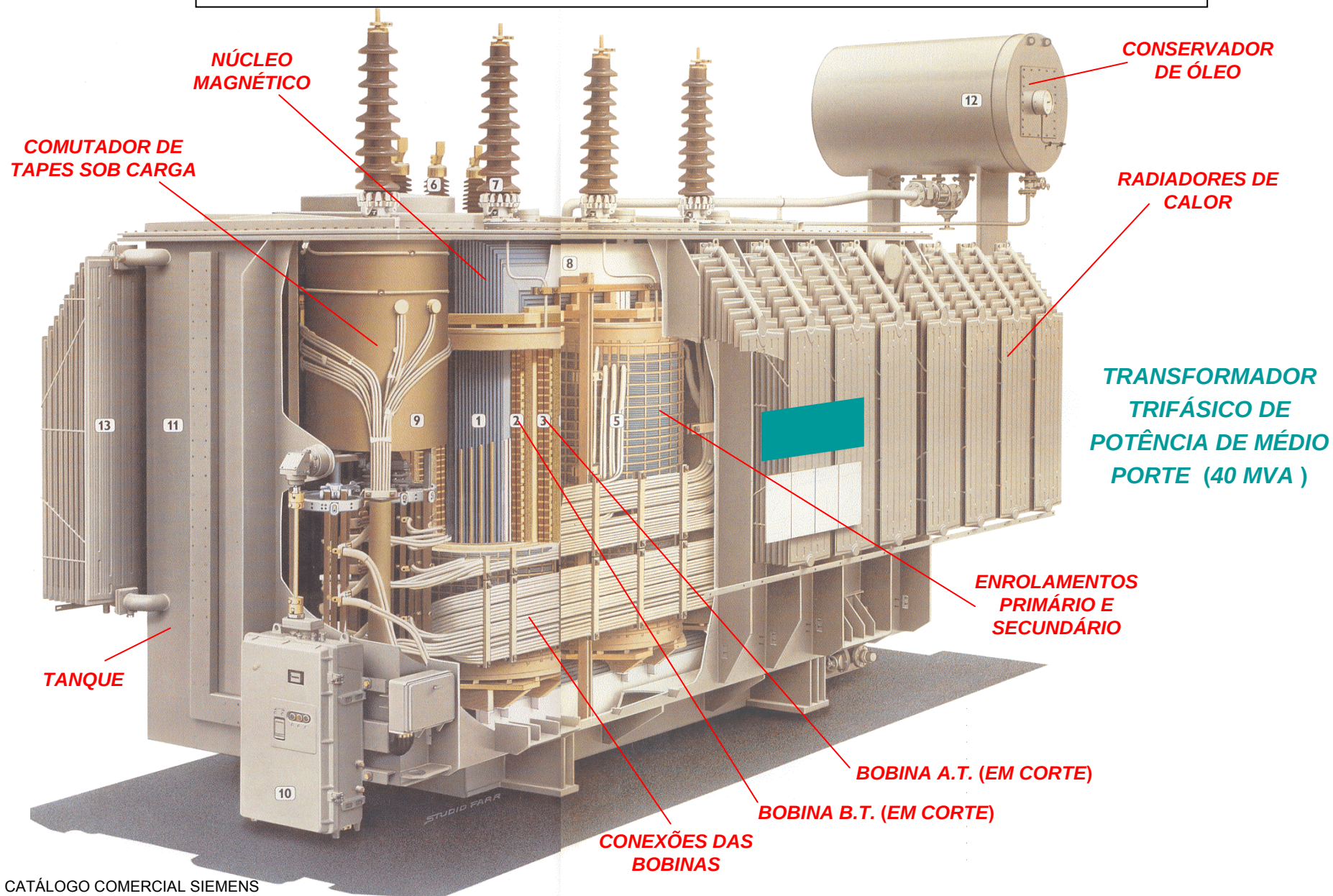
SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO:

DISTÂNCIAS ENTRE GERAÇÃO E CONSUMO → CENTENAS OU ATÉ MILHARES DE QUILOMETROS

→ TRANSFORMADOR PRESENTE EM TODAS AS INSTÂNCIAS DO SISTEMA DE POTÊNCIA

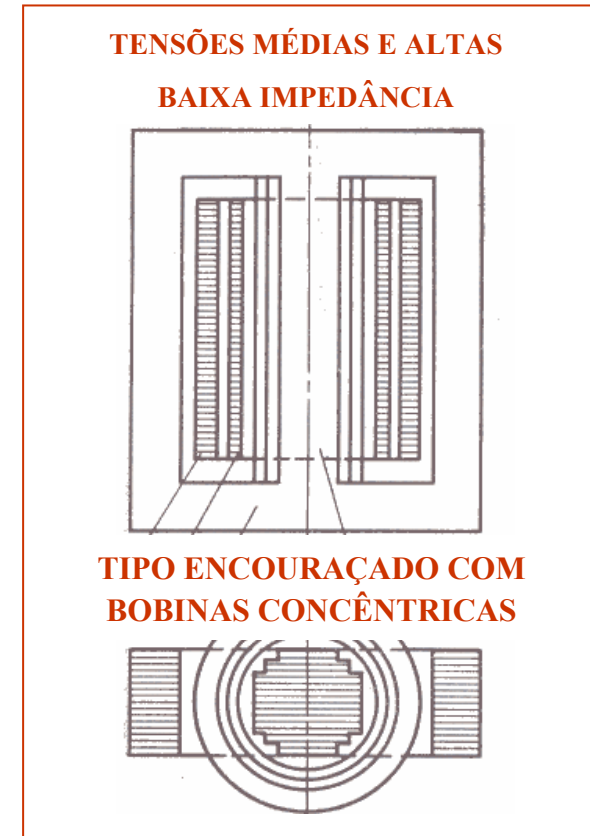
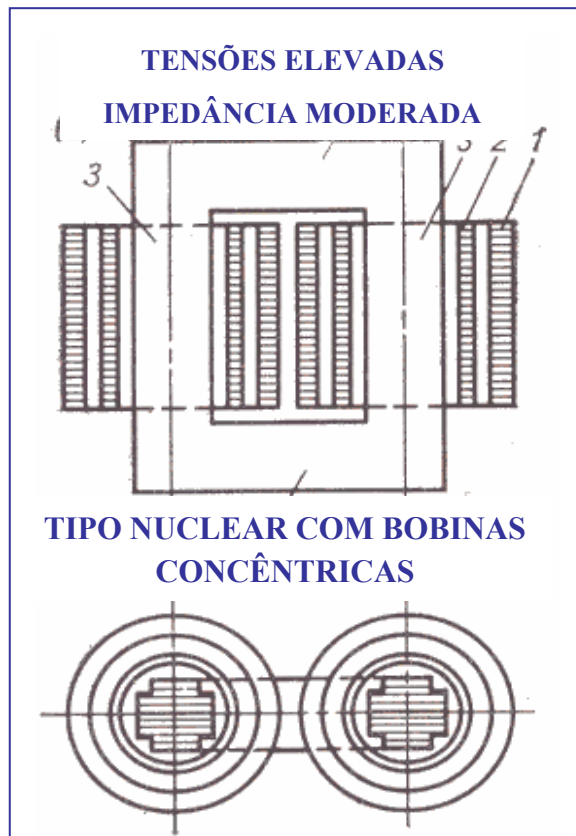


ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA



TIPOS DE CONSTRUÇÃO DO NÚCLEO PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA***TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS*****VARIANTES QUANTO AO CONCEITO CONSTRUTIVO DO NÚCLEO:**

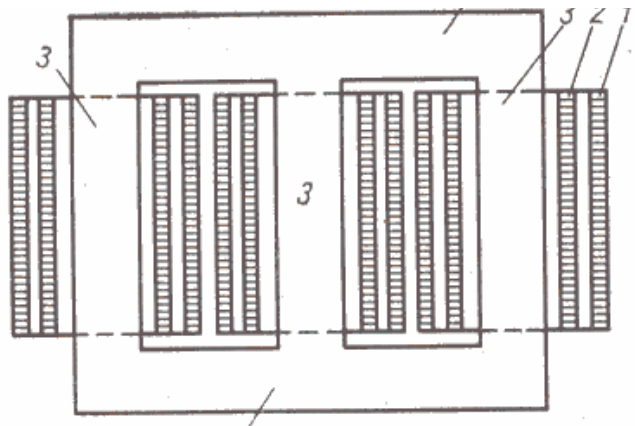
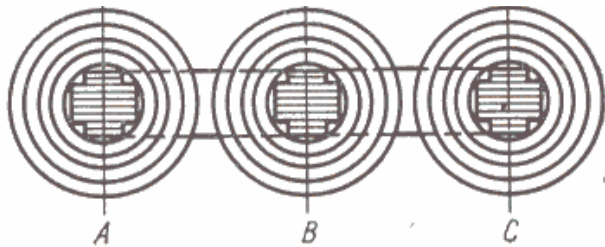
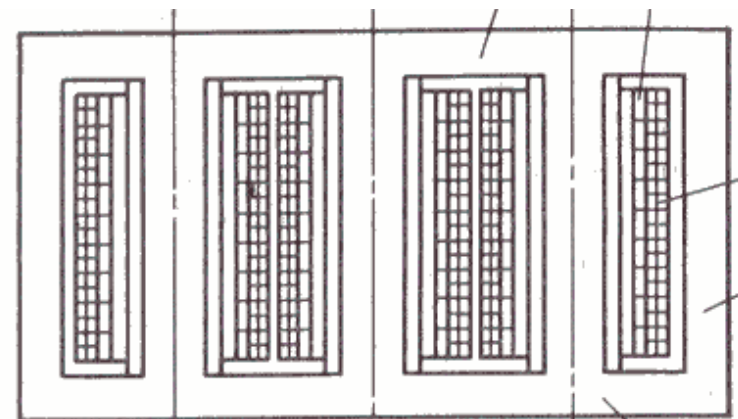
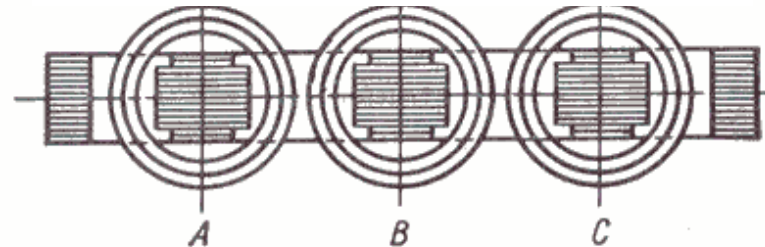
- ➔ **NÚCLEO ENVOLVIDO OU TIPO NUCLEAR ➔ EM GERAL “MAIS COBRE – MENOS FERRO”**
- ➔ **NÚCLEO ENVOLVENTE OU TIPO ENCOURAÇADO ➔ EM GERAL “MENOS COBRE – MAIS FERRO”**



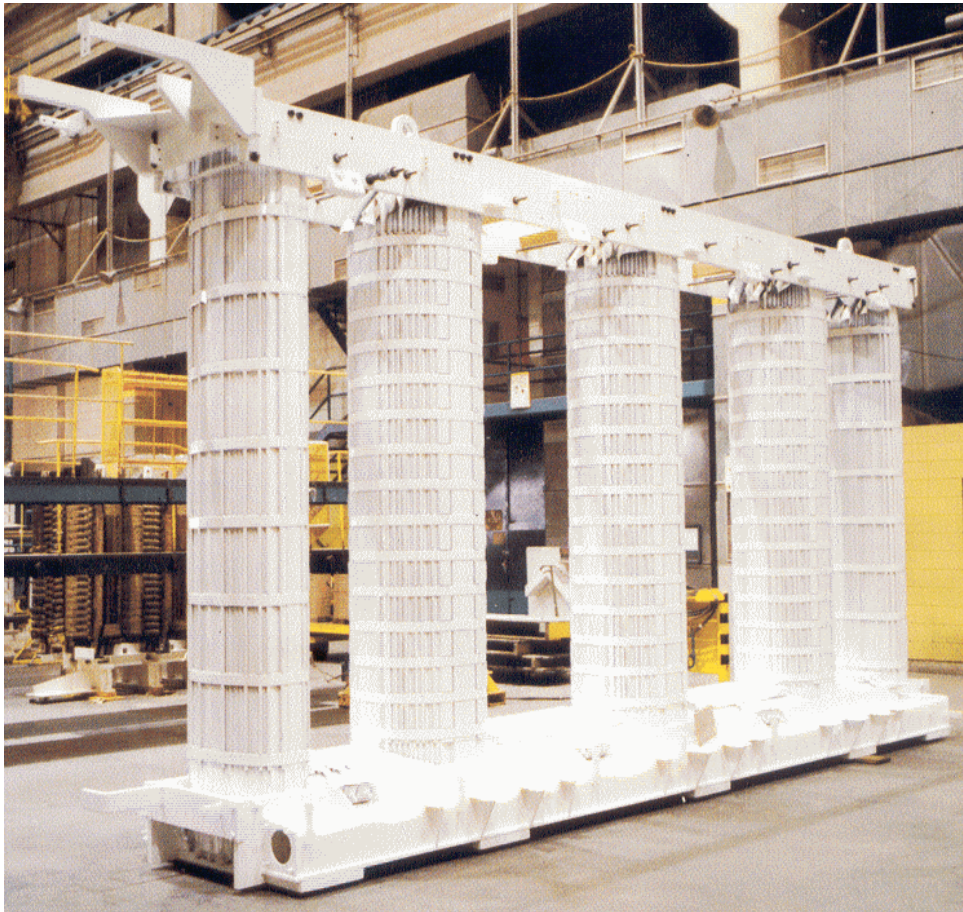
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**VARIANTES CONSTRUTIVAS DO NÚCLEO:**

→ NÚCLEO ENVOLVIDO OU TIPO NUCLEAR → TRANSFORMADOR DE 3 COLUNAS

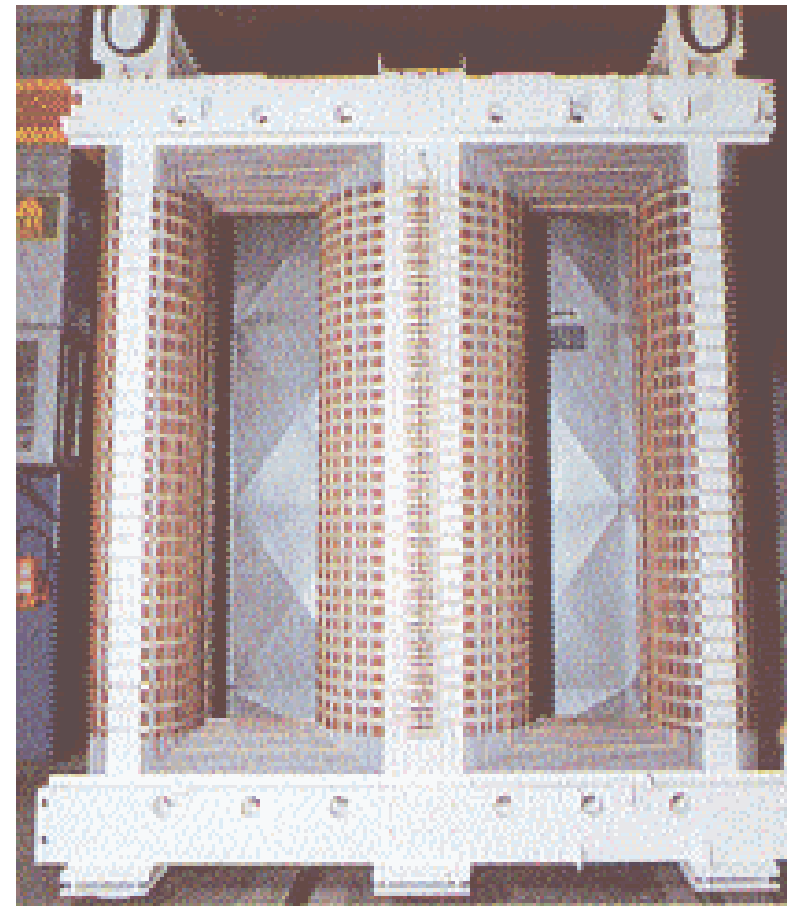
→ NÚCLEO ENVOLVENTE OU TIPO ENCOURAÇO → TRANSFORMADOR DE 5 COLUNAS

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



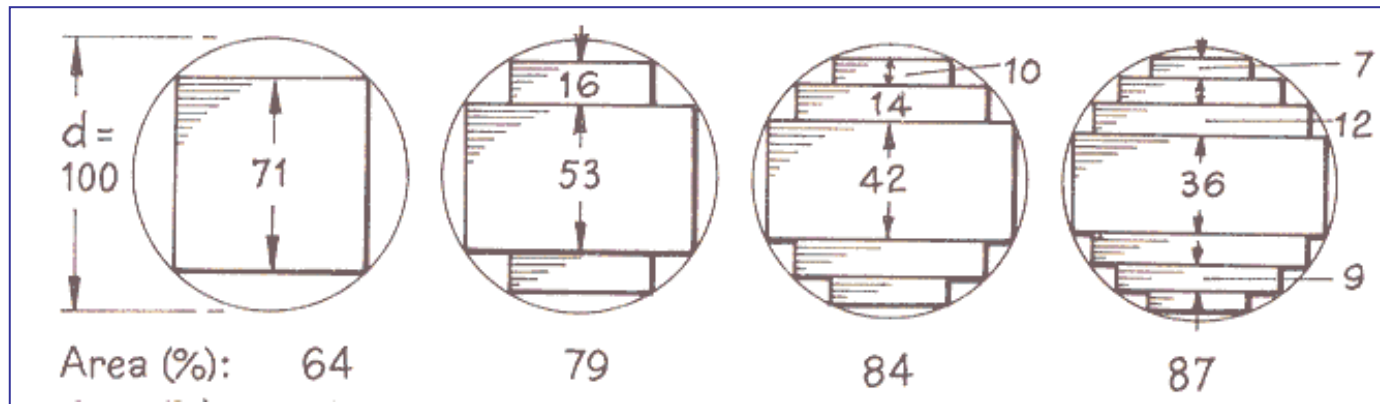
NÚCLEO MONOFÁSICO DE 3 COLUNAS

DETALHES DE EXECUÇÃO DO NÚCLEO

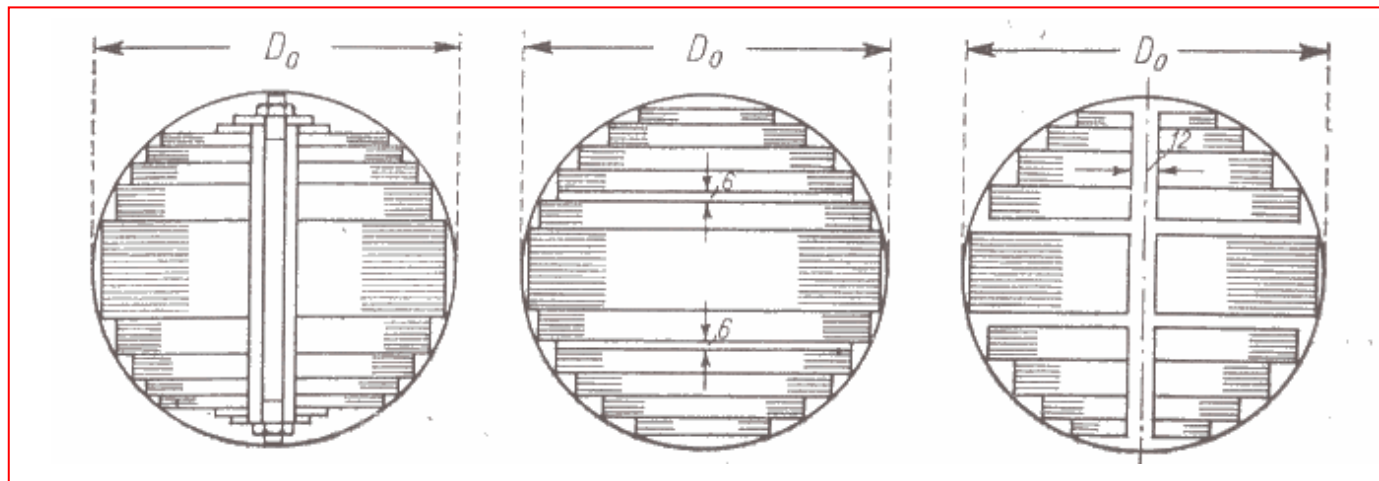
BOBINAS CILÍNDRICAS : MAIOR RESISTÊNCIA AOS ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS E MENOR RESISTÊNCIA ÔHMICA

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

→ NÚCLEO ESCALONADO



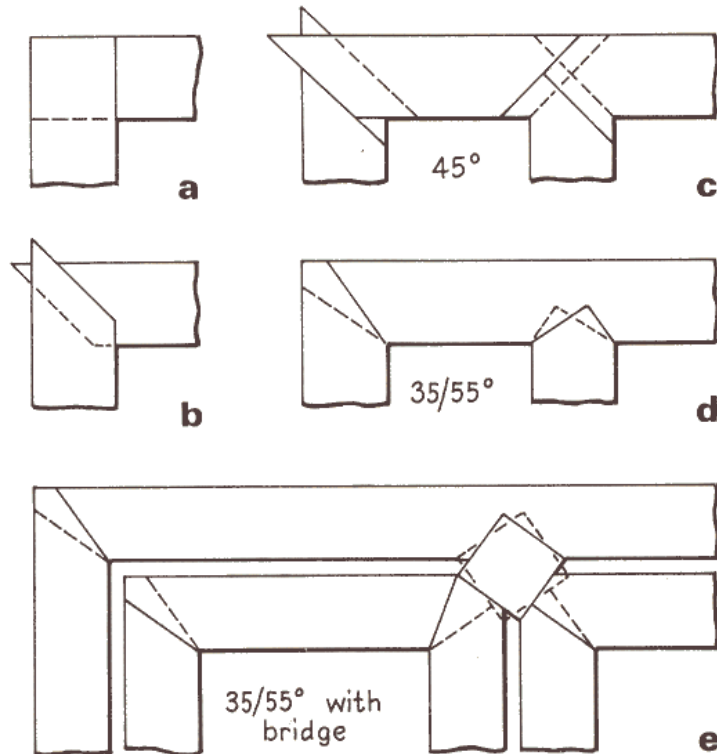
GRADAÇÃO DO
ESCALONAMENTO
EM FUNÇÃO DO
PORTE DO NÚCLEO



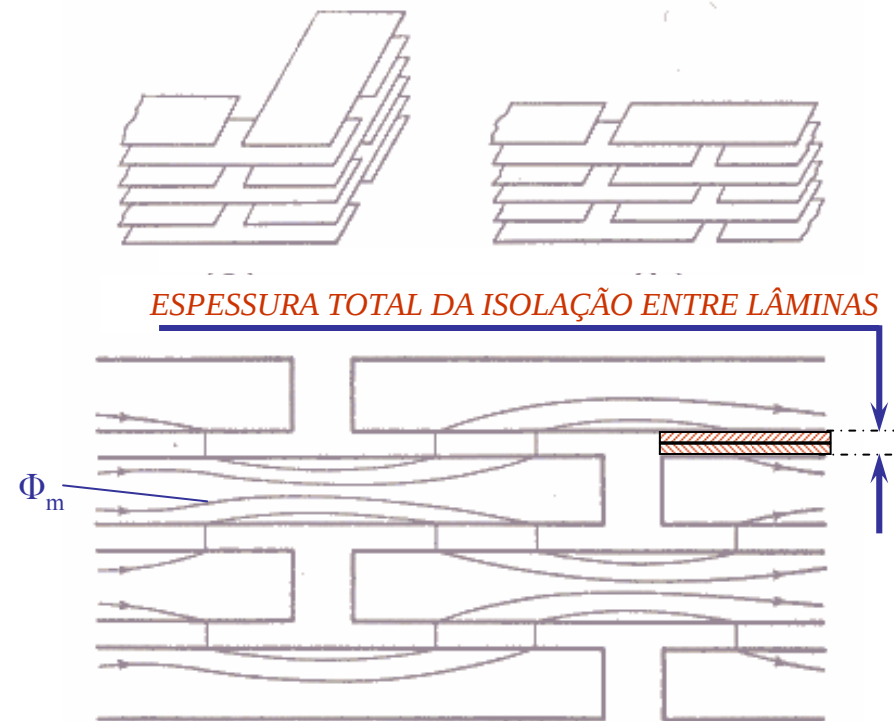
EXECUÇÃO DOS
CANALIS DE
PASSAGEM DE
ÓLEO PARA
REFRIGERAÇÃO
DO NÚCLEO

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

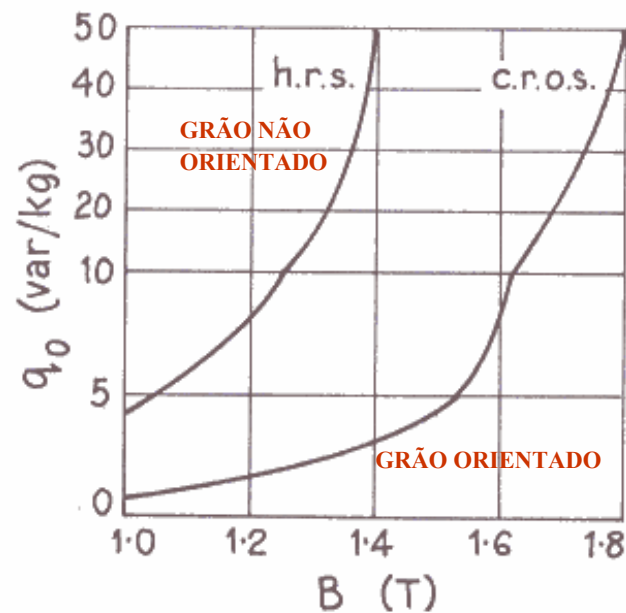
DETALHES DE EXECUÇÃO DO NÚCLEO

MATERIAL FERROMAGNÉTICO USUALMENTE EMPREGADO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA:

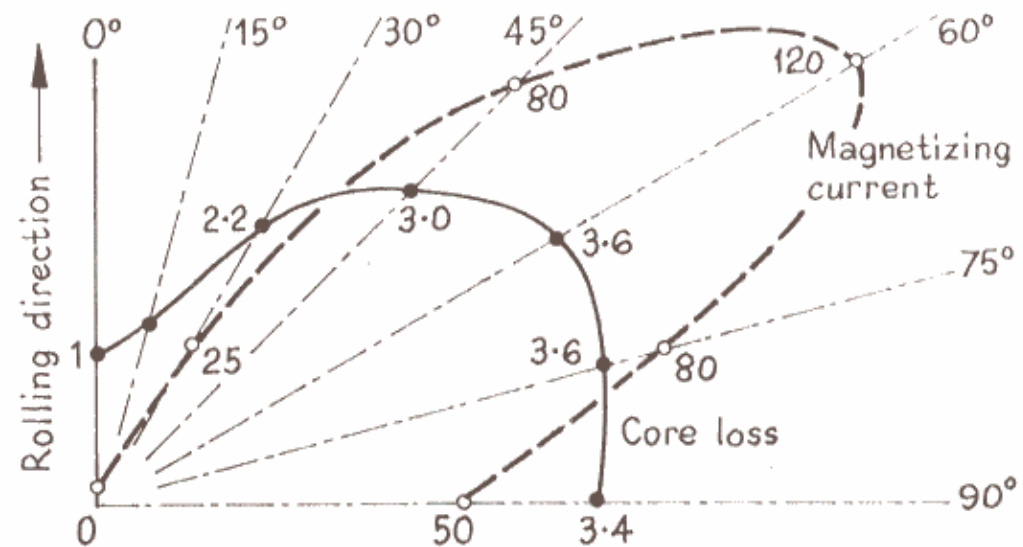
→ AÇO SILICIOSO COM TEOR DE SILÍCIO DE 4 A 5% → LAMINADO A FRIO COM GRÃO ORIENTADO

→ 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

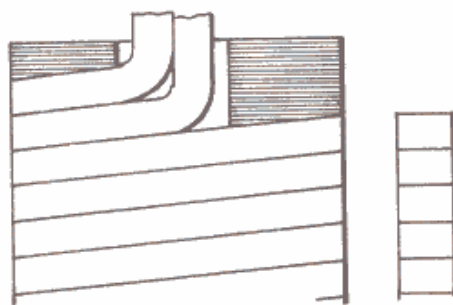


COMPORTAMENTO DA CORRENTE MAGNETIZANTE E
DAS PERDAS NO FERRO COM A DIREÇÃO DA
LAMINAÇÃO DA CHAPA

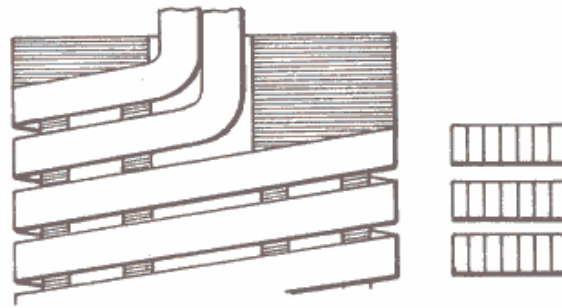
TIPOS DE CONSTRUÇÃO DAS BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

FATORES QUE DETERMINAM O TIPO DE BOBINAS UTILIZADAS:

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



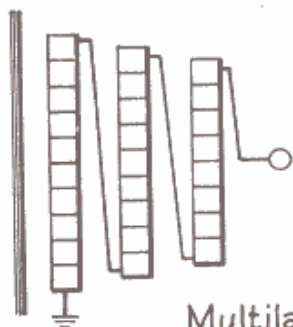
Helix



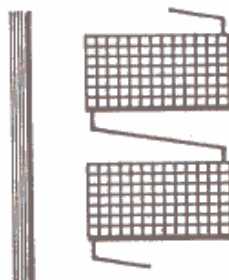
Disc-helix

BOBINAS HELICOIDAIS

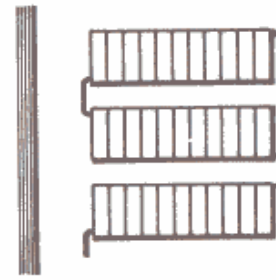
→ **ENROLAMENTOS DE BAIXA E MÉDIA TENSÃO**



Multilayer helix



Crossover



Disc

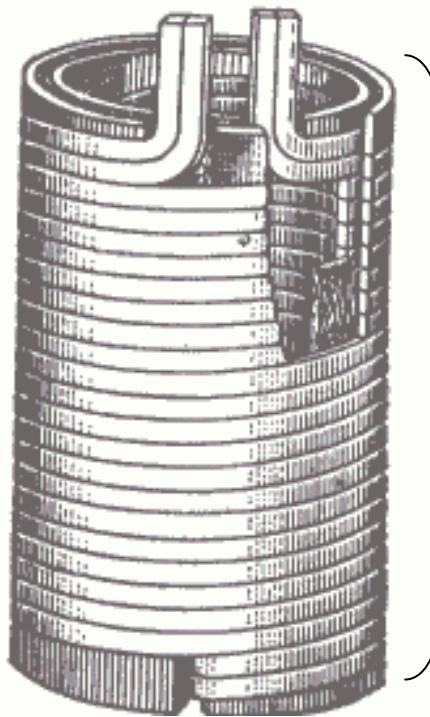
BOBINAS DE MÚLTIPLAS CAMADAS E EM DISCO

→ **ENROLAMENTOS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO**

DETALHES DE EXECUÇÃO DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

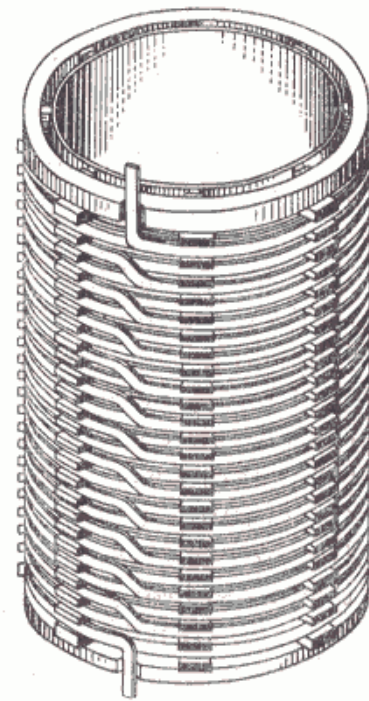
PROJETO E EXECUÇÃO DAS BOBINAS DEVEM GARANTIR:

- 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

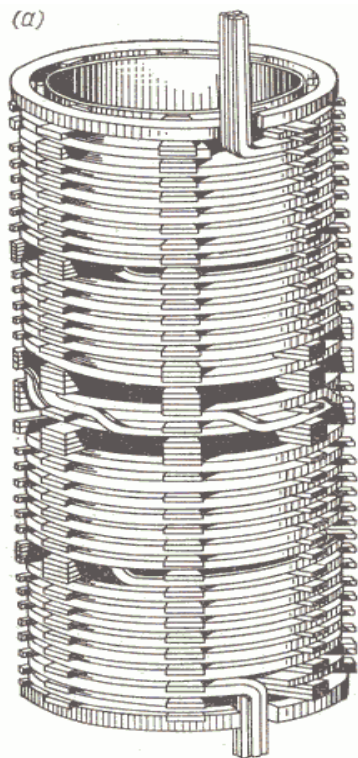
DETALHES DE EXECUÇÃO DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

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 MÚLTIPLAS ESPIRAS

→ COBRE TREFILADO

→ CONDUTIVIDADE: 97 A 99 % I.A.C.S.

→ ISOLADO COM PAPEL KRAFT / NOMEX

BOBINAS EM FOLHA CONTÍNUA

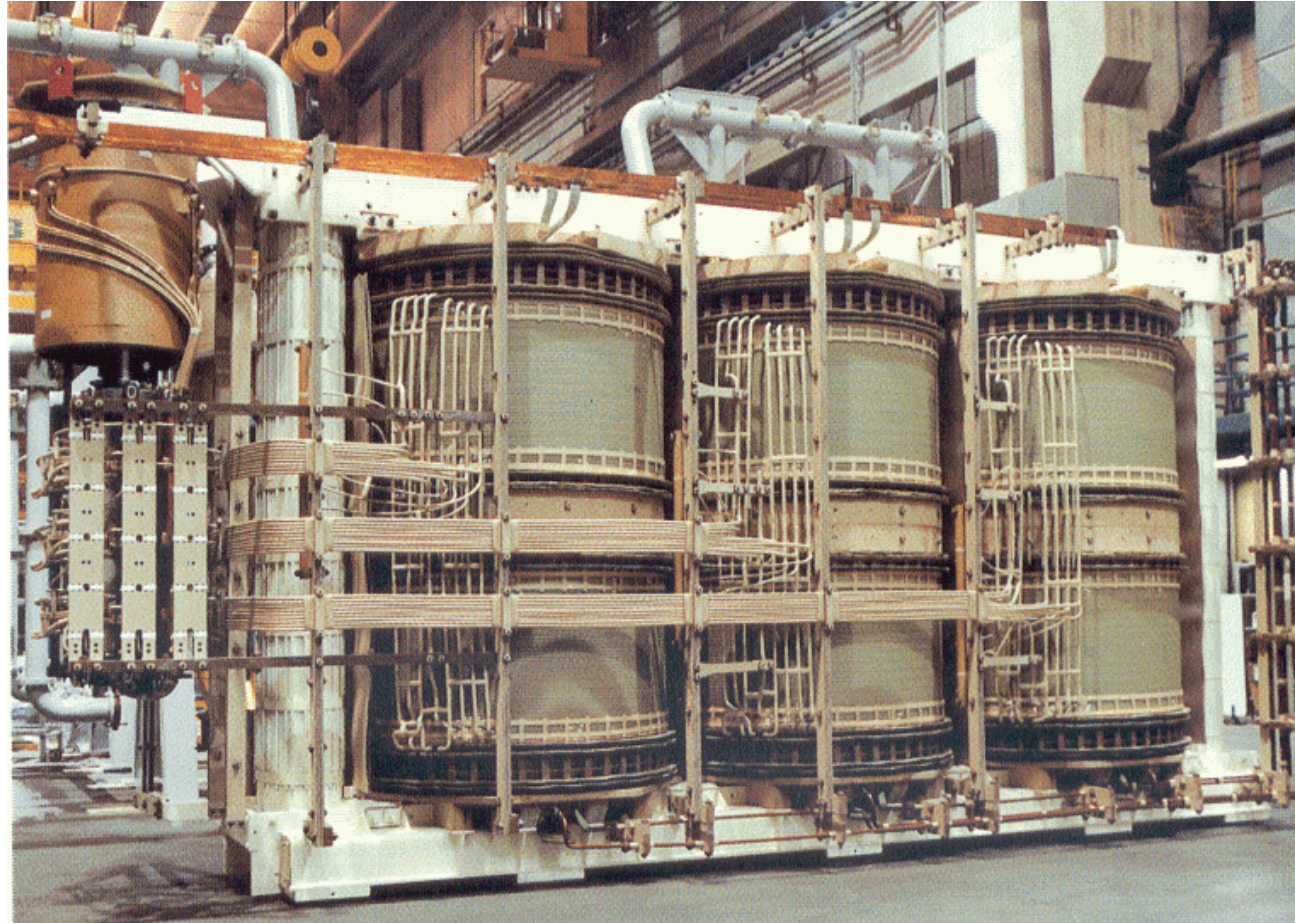
→ ALUMÍNIO LAMINADO

→ CONDUTIVIDADE: 60 A 63 % I.A.C.S.

EXEMPLOS DE BOBINAS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA



**BOBINAS HELICOIDAIS
CONTÍNUAS**



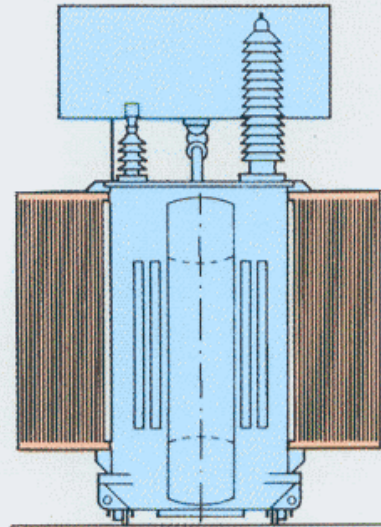
**BOBINAS MONTADAS SOBRE O NÚCLEO E CONECTADAS ENTRE SI
E AO COMUTADOR SOB CARGA**

MÉTODOS DE RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES

DISSIPADORES
FIXADOS À PAREDE
DO TANQUE

CONVECÇÃO
NATURAL DO ÓLEO
INTERNO E DO AR
EXTERNO

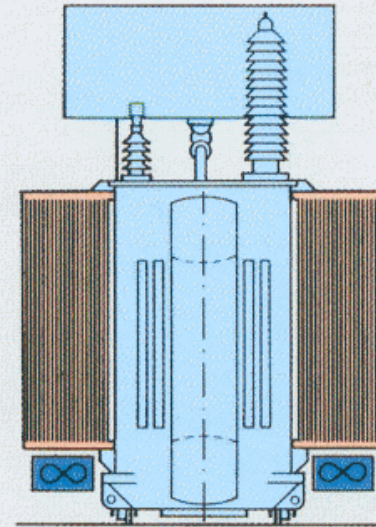
ON-AN



DISSIPADORES
FIXADOS À PAREDE
DO TANQUE

CONVECÇÃO
NATURAL DO ÓLEO
INTERNO E FORÇADA
DO AR EXTERNO

ON-AF

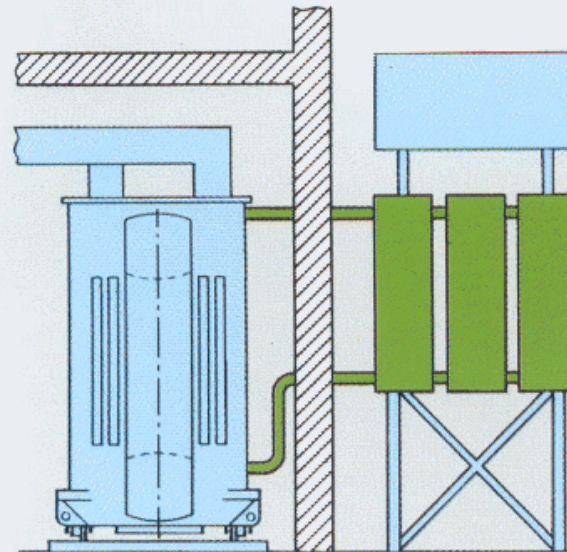


b

DISSIPADORES
EXTERNOS AO
AMBIENTE

CONVECÇÃO
NATURAL OU
FORÇADA DO ÓLEO
INTERNO E DO AR
EXTERNO

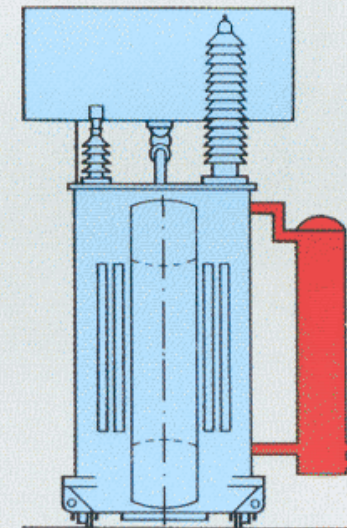
ON-AN OF-AN OF-AF

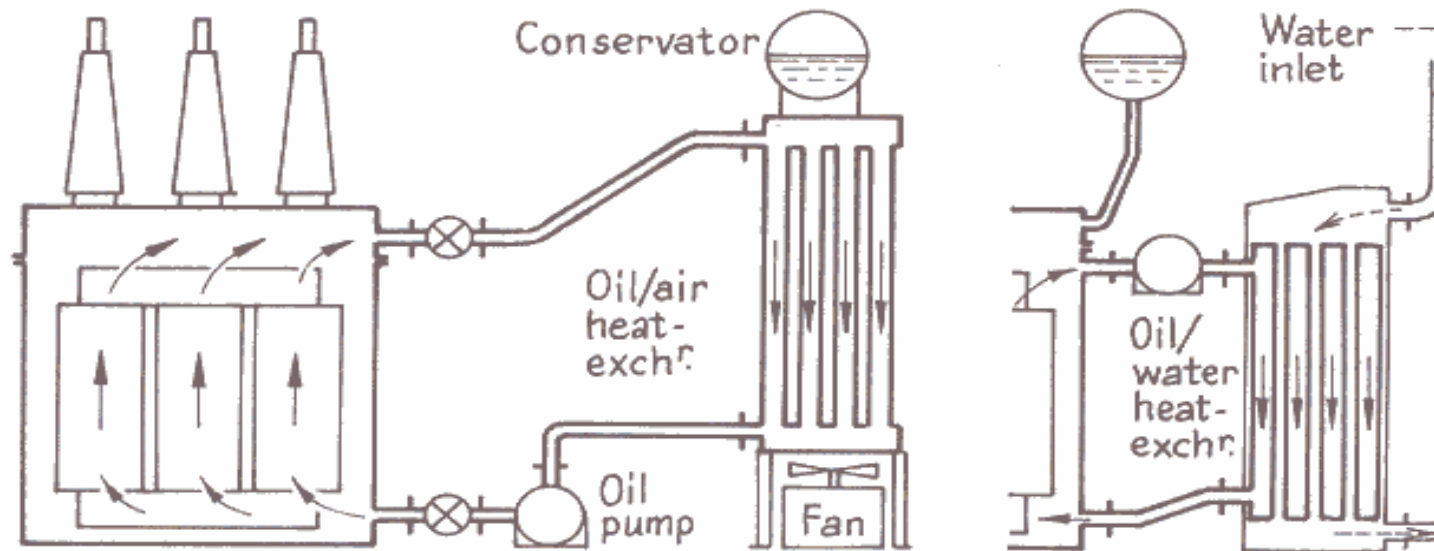


TROCADOR DE CALOR
A ÁGUA NA PAREDE
DO TANQUE

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**

FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

TRANSFORMADOR → ESTRUTURA CONSTITUÍDA DE NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO ASSOCIADO A UMA BOBINA DE EXCITAÇÃO (DESCONSIDERADO, POR ORA, O SECUNDÁRIO)

→ CONFIGURA UM CIRCUITO MAGNÉTICO COM SECÇÃO “ S_{FE} ” E COMPRIMENTO “ L_{FE} ”

CONECTADO À FONTE DE TENSÃO V_1 :

→ ABSORVE CORRENTE DE EXCITAÇÃO: I_m

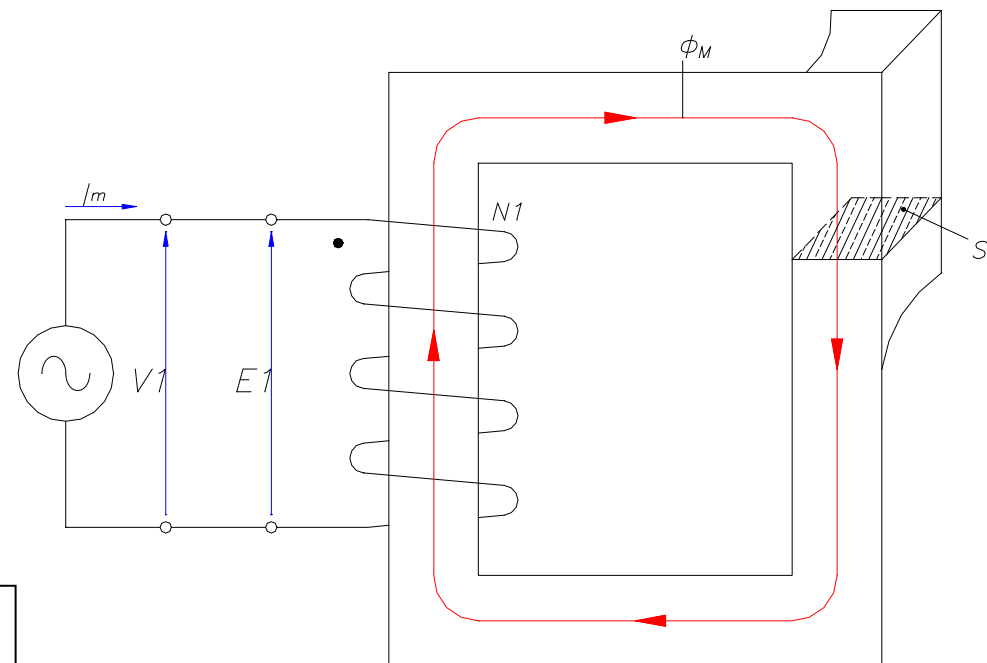
→ FORÇA MAGNETOMOTRIZ: $F_{MM} = N_1 \cdot I_m$
APLICADA AO CIRCUITO MAGNÉTICO

→ RESULTA FLUXO MAGNÉTICO
ESTABELECIDO NO NÚCLEO: $\Phi = F_{MM} / \mathfrak{R}$
ONDE $\mathfrak{R}$ É A RELUTÂNCIA NO NÚCLEO

*FLUXO SE DISTRIBUI UNIFORMEMENTE NA SECÇÃO DO NÚCLEO,
PRODUZINDO UMA DISTRIBUIÇÃO DE INDUÇÕES: $B_{FE} = \Phi / S_{FE}$*

*FORÇA MAGNETOMOTRIZ SE APLICA AO LONGO DO COMPRIMENTO
DO CIRCUITO MAGNÉTICO, RESULTANDO NUMA DISTRIBUIÇÃO DE*

CAMPO MAGNÉTICO: $H_{FE} = F_{MM} / L_{FE}$



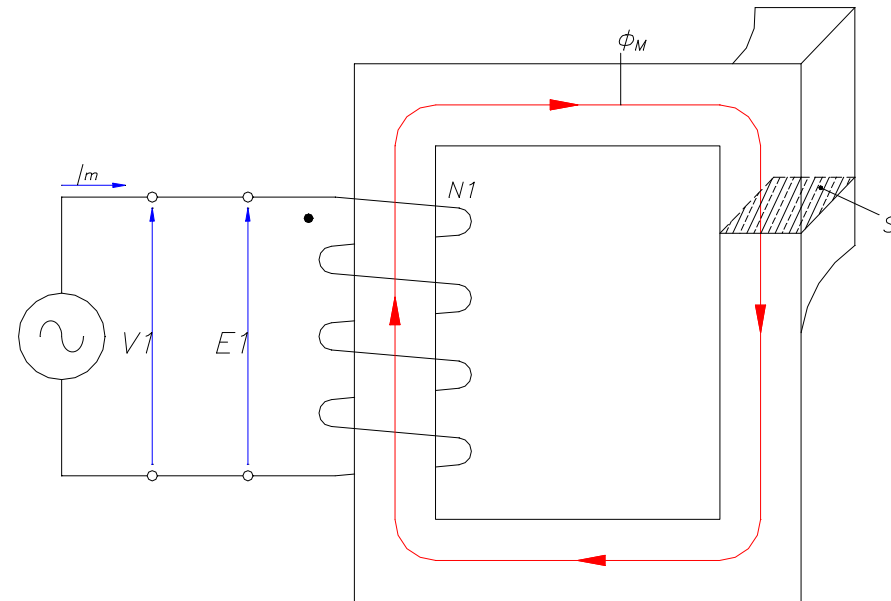
F_{MM}
(CAUSA)



Φ
(EFEITO)

CIRCUITO MAGNÉTICO ALIMENTADO EM
TENSÃO ALTERNADA:

- CORRENTE DE EXCITAÇÃO É ALTERNADA
- FORÇA MAGNETOMOTRIZ É ALTERNADA
- FLUXO É ALTERNADO NO TEMPO
- $\Phi = \Phi(t) = \Phi_M \cdot \sin \omega \cdot t$



LEI DE FARADAY: $E_1 = E_1(t) = N_1 \cdot d\Phi(t) / dt$

$E_1 \rightarrow$ f.e.m. INDUZIDA, QUE EQUILIBRA A TENSÃO APLICADA PELA FONTE,
PERMITINDO A ABSORÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO I_m

$$V_1(t) \approx E_1(t)$$

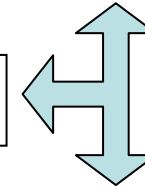
$$E_1(t) = N_1 \cdot d\Phi(t) / dt = N_1 \cdot d/dt (\Phi_M \cdot \sin \omega \cdot t) = N_1 \cdot \Phi_M \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t = E_M \cdot \cos \omega \cdot t$$

$$E_M = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_M = \sqrt{2} \cdot E_1 \rightarrow E_1: \text{VALOR EFICAZ DA TENSÃO INDUZIDA}$$

$$\rightarrow E_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_M = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_M$$

$$\Phi = \Phi_M \cdot \sin \omega \cdot t \rightarrow B_{FE} = B_M \cdot \sin \omega \cdot t \rightarrow H_{FE} = H_M \cdot \sin \omega \cdot t \rightarrow I_m = I_M \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$E_1 = E_M \cdot \cos \omega \cdot t \rightarrow V_1(t) \approx E_1(t) \rightarrow V_1 = V_M \cdot \cos \omega \cdot t$$



→ CORRENTE DE EXCITAÇÃO ABSORVIDA, ATRASADA 90° DA TENSÃO APLICADA
→ CORRENTE REATIVA INDUTIVA

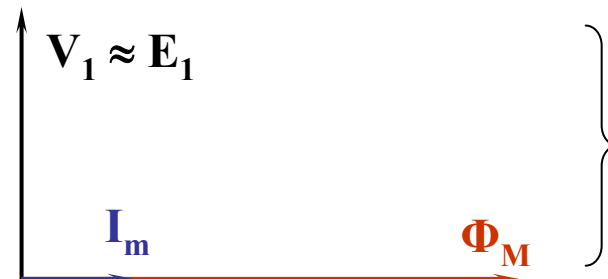


DIAGRAMA DE FASORES DA OPERAÇÃO DO
CIRCUITO MAGNÉTICO – TRANSFORMADOR
EM VAZIO, COM NÚCLEO SEM PERDAS

MATERIAIS MAGNÉTICOS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DOS NÚCLEOS
CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

MATERIAL FERROMAGNÉTICO DO NÚCLEO NÃO IDEAL:

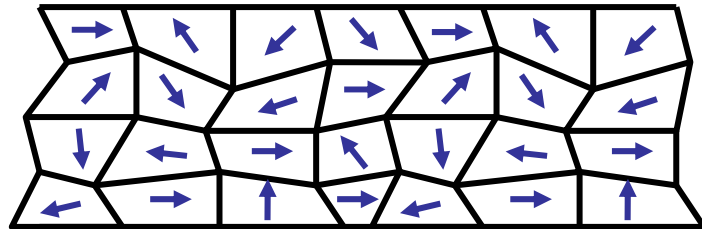
- **PERMEABILIDADE ELEVADA PORÉM FINITA**
- **MANIFESTA EFEITOS DE SATURAÇÃO E HISTERÉSE MAGNÉTICA**
- **MANIFESTA PERDAS DE ENERGIA COM MAGNETIZAÇÃO CÍCLICA**

PERMEABILIDADE ELEVADA → CONTRIBUIÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS COM O CAMPO EXTERNO APLICADO, REFORÇANDO O CAMPO NO INTERIOR DO MATERIAL

SATURAÇÃO → LIMITE DE CONTRIBUIÇÃO DO MATERIAL, POR ALINHAMENTO COMPLETO DOS DOMÍNIOS COM O CAMPO EXTERNO

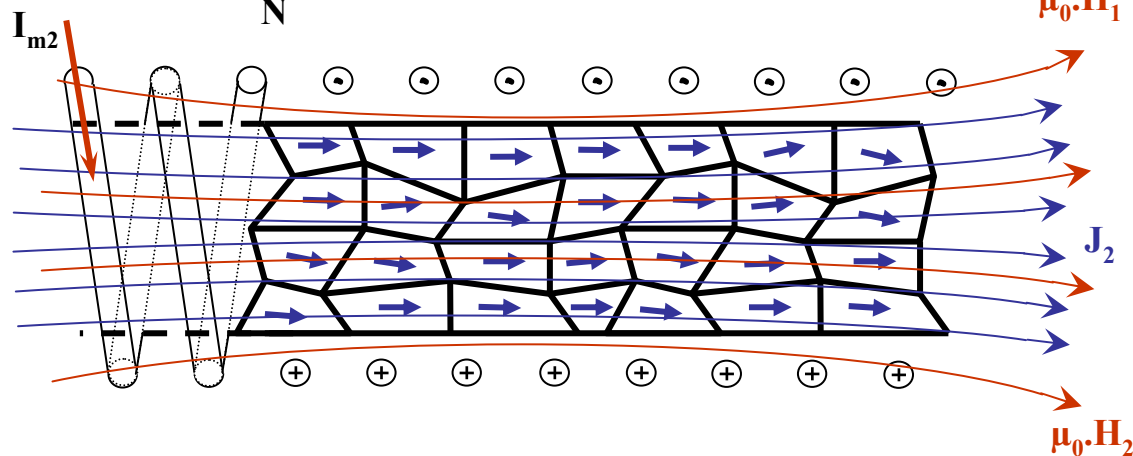
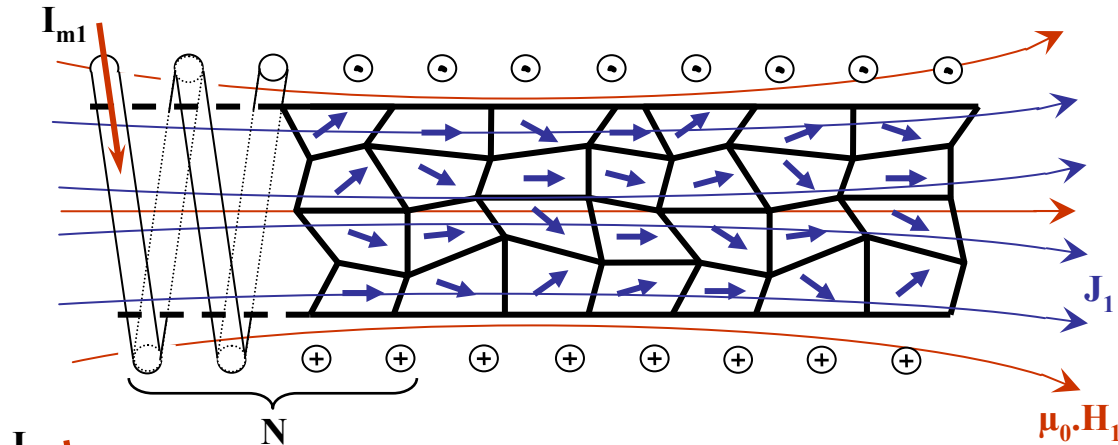
HISTERÉSE → RETENÇÃO DE MAGNETIZAÇÃO RESIDUAL NA AUSÊNCIA DE CAMPO EXTERNO, DEVIDO A RELAXAÇÃO NÃO INTEGRAL DOS DOMÍNIOS

CARACTERIZAÇÃO DA PERMEABILIDADE E SATURAÇÃO MAGNÉTICA



MATERIAL FERROMAGNÉTICO

→ DOMÍNIOS MAGNÉTICOS ORIENTÁVEIS



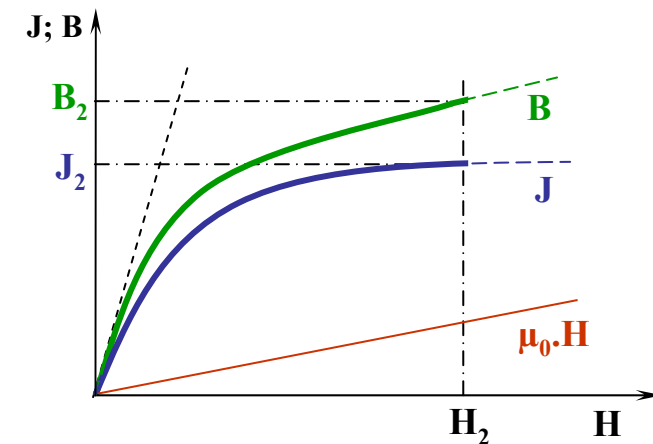
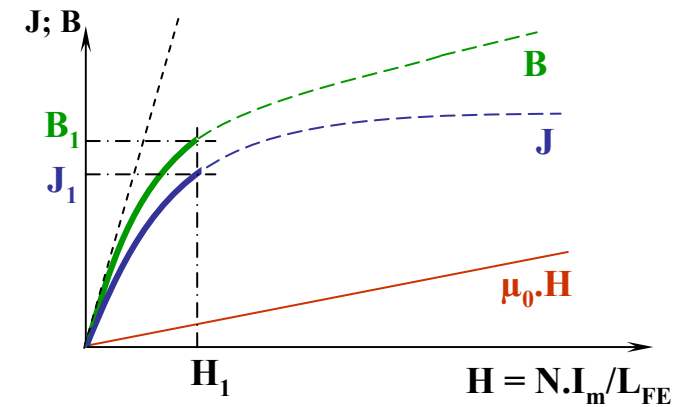
MECANISMO DE MAGNETIZAÇÃO NÃO LINEAR DO NÚCLEO:

H → INTENSIDADE DE CAMPO PRODUZIDA PELA CORRENTE DE EXCIT. I_m

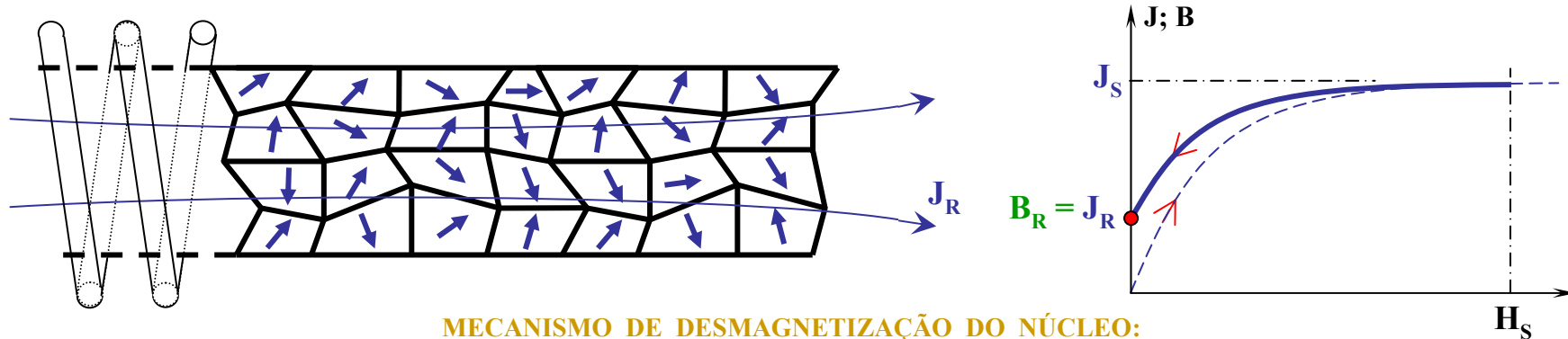
$\mu_0 \cdot H$ → INDUÇÃO RESULTANTE NO AR (SEM O MEIO FERROMAGNÉTICO)

J → POLARIZAÇÃO MAGNÉTICA DO MEIO (RESPOSTA DO MATERIAL)

B → DENSIDADE DE FLUXO TOTAL RESULTANTE NO MEIO: $B = \mu_0 \cdot H + J$



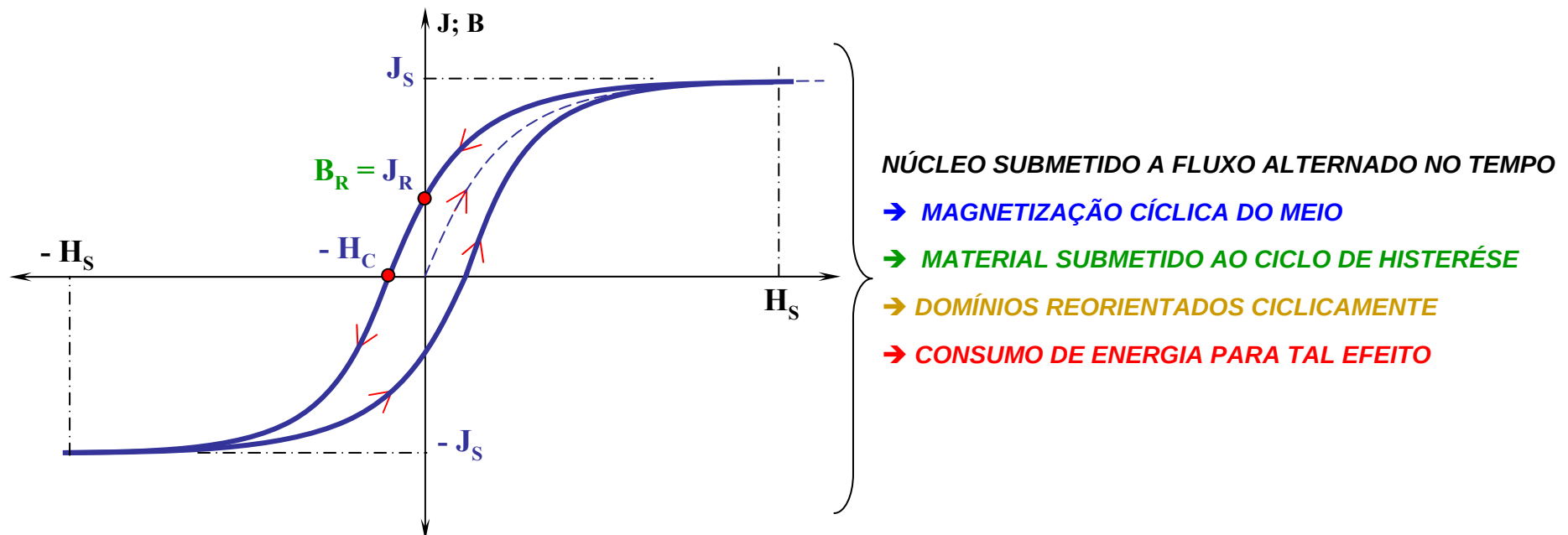
CARACTERIZAÇÃO DA HISTERESE MAGNÉTICA



$H \rightarrow$ INTENSIDADE DE CAMPO ANULADA APÓS A SATURAÇÃO $\rightarrow$ RELAXAÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS NO MATERIAL

$J_R \rightarrow$ POLARIZAÇÃO MAGNÉTICA RESIDUAL DO MEIO $\rightarrow$ RELAXAÇÃO INCOMPLETA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

$B_R \rightarrow$ DENSIDADE DE FLUXO RESIDUAL – INDUÇÃO REMANENTE



CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS NO FERRO

MAGNETIZAÇÃO *CÍCLICA* DO MATERIAL DO NÚCLEO →

{

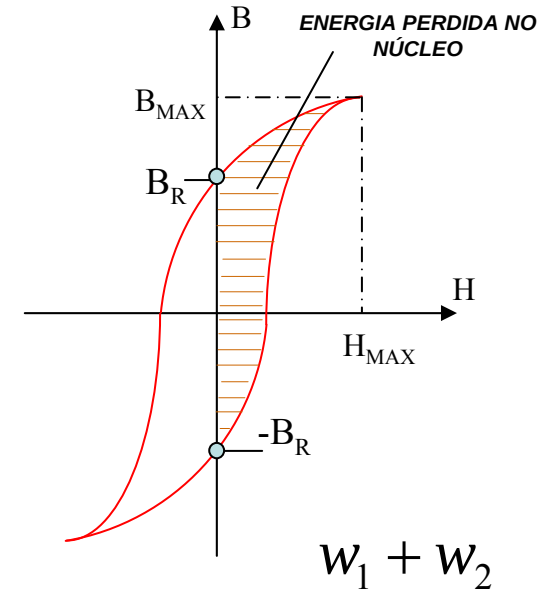
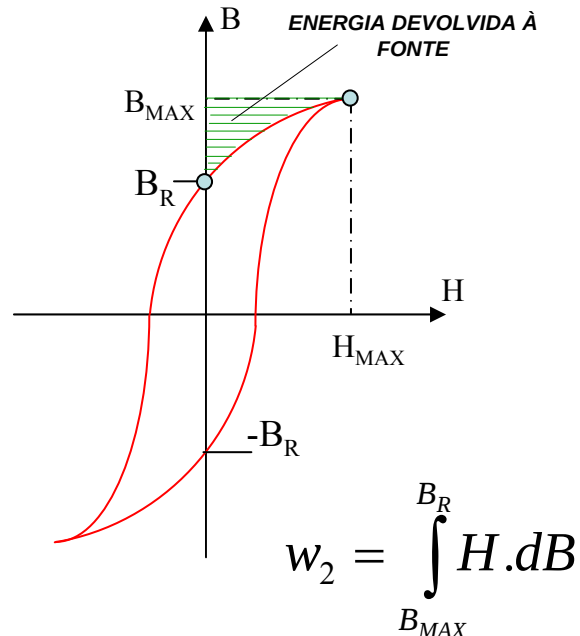
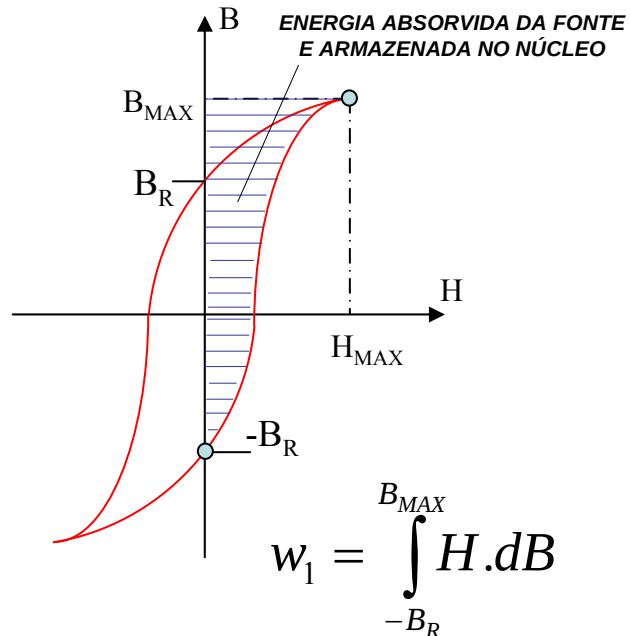
PERDA POR EFEITO DE HISTERÉSE MAGNÉTICA

PERDA POR CIRCULAÇÃO DE CORRENTES PARASITAS

PERDA “ANÔMALA”

DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA ARMAZENADA NO CAMPO MAGNÉTICO [J / m³] → $w_m = \int_0^B H \cdot dB$

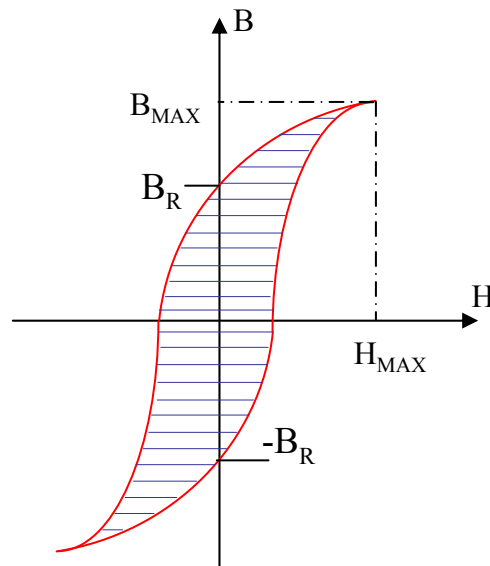
VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE ENERGIA MAGNÉTICA ARMAZENADA EM MATERIAL COM HISTERÉSE :



CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS NO NÚCLEO (PERDAS NO FERRO)**1 - MAGNETIZAÇÃO CÍCLICA EM MATERIAL MAGNÉTICO DOTADO DE HISTERÉSE :**

→ **ENERGIA PERDIDA NA FORMA DE CALOR NO VOLUME DO NÚCLEO EM CADA CICLO**

→ **ENERGIA PROPORCIONAL À ÁREA DO CICLO DE HISTERÉSE**



$$W_H = Vol. \oint H \cdot dB$$

POTÊNCIA DE PERDAS POR HISTERÉSE → $p_H = f \cdot W_H$

RELAÇÃO DE STEINMETZ → $\oint H \cdot dB = k_H \cdot B_{FE}^\alpha$

PERDA HISTERÉTICA →

$$p_H = k_H \cdot B_{FE}^\alpha \cdot f \cdot Vol$$

α : 1,6 A 2,2 → DEPENDE DO MATERIAL (*TEOR DE SILÍCIO - PROCESSO DE LAMINAÇÃO*)

k_H : COEFICIENTE DE PERDA HISTERÉTICA → DEPENDE DO MATERIAL

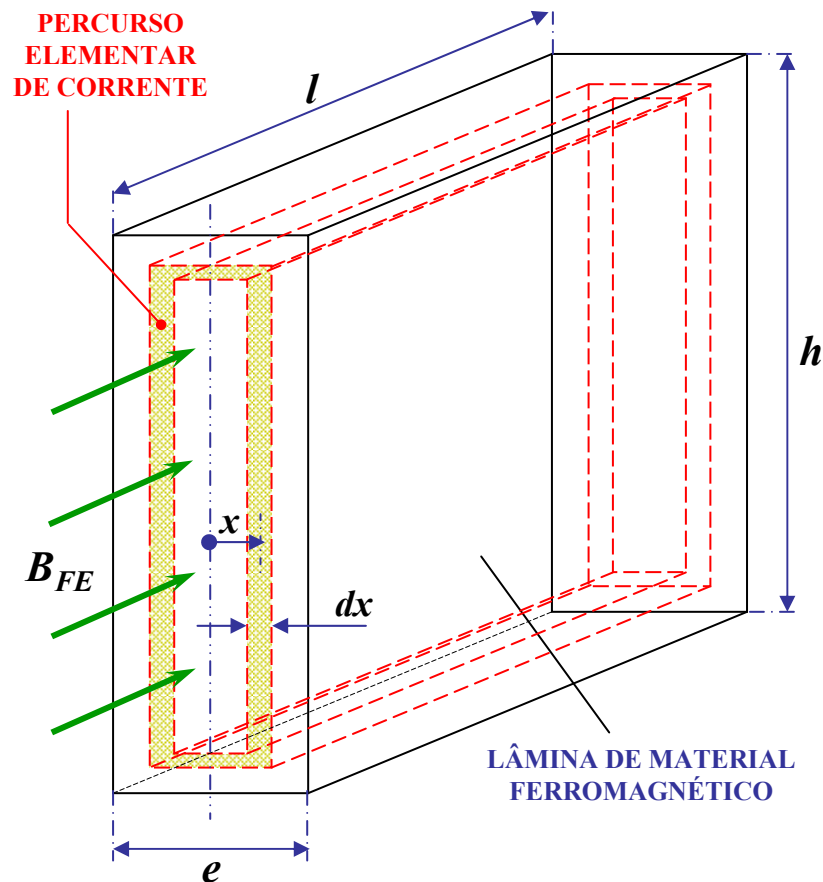
f : [Hz] → FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

Vol : [m³] → VOLUME TOTAL DO NÚCLEO ONDE ESTÁ ESTABELECIDO A INDUÇÃO B_{FE} [T]

2 - MATERIAL FERROMAGNÉTICO → CONDUTOR ELÉTRICO DE RESISTIVIDADE “ELEVADA”

FLUXO ALTERNADO ESTABELECIDO NO NÚCLEO → INDUÇÃO DE TENSÕES NO MEIO MATERIAL ($E = d\phi/dt$)

CIRCUITOS ELÉTRICOS ELEMENTARES NO MEIO → CIRCULAÇÃO DE CORRENTES PARASITAS



LÂMINAS DE PEQUENA ESPESSURA → $e \ll h$

TENSÃO INDUZIDA NO PERCURSO ELEMENTAR

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{FE} \cdot 2 \cdot h \cdot x$$

RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO PERCURSO ELEMENTAR

$$r_{FE} = \frac{\rho_{FE} \cdot 2 \cdot h}{l \cdot dx}$$

CORRENTE ELEMENTAR INDUZIDA NO PERCURSO

$$di_F = \frac{E}{r_{FE}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{FE} \cdot l \cdot x \cdot dx}{\rho_{FE}}$$

POTÊNCIA DE PERDAS NO FERRO, POR CIRCULAÇÃO DE CORRENTES PARASITAS

$$p_F = \int_0^{0,5.e} E \cdot di_F = \int_0^{0,5.e} \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 B_{FE}^2 h \cdot l \cdot x^2 \cdot dx}{\rho_{FE}} \Rightarrow p_F = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot B_{FE}^2 \cdot h \cdot l \cdot e^3}{6 \cdot \rho_{FE}}$$

VOLUME TOTAL DA LÂMINA $\rightarrow Vol = h \cdot l \cdot e$

PERDA “FOUCAULT” NO VOLUME TOTAL DE FERRO

$$p_F = \frac{\pi^2}{6 \cdot \rho_{FE}} \cdot B_{FE}^2 \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot Vol \Rightarrow p_F = k_F \cdot B_{FE}^2 \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot Vol$$

$\rho_{FE} : [\Omega \cdot m] \rightarrow$ RESISTIVIDADE DO MATERIAL (*TEOR DE SILÍCIO – MODO DE LAMINAÇÃO*)

$k_F : \text{COEFICIENTE DE PERDA FOUCAULT} \rightarrow$ DEPENDE DO MATERIAL (*REVESTIMENTO - PROCESSAMENTO*)

$f : [Hz] \rightarrow$ FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO

$e : [m] \rightarrow$ ESPESSURA DA CHAPA

$Vol : [m^3] \rightarrow$ VOLUME TOTAL DO NÚCLEO ONDE ESTÁ ESTABELECID A INDUÇÃO $B_{FE} [T]$

PERDA NO FERRO TOTAL $\rightarrow p_H + p_F$

$$p_{FE} = \frac{1}{\gamma_{FE}} \cdot \underbrace{(k_H \cdot B_{FE}^\alpha \cdot f + k_F \cdot B_{FE}^2 \cdot f^2 \cdot e^2)}_{\text{PERDA ESPECÍFICA NO FERRO (W / kg)}} \cdot G_{FE} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma_{FE} = \text{DENSIDADE DO FERRO} \\ G_{FE} = \text{MASSA DE FERRO DO NÚCLEO} \end{array} \right.$$

PERDA ESPECÍFICA NO FERRO – VALORES TÍPICOS:

1,25 A 2,30 W / kg @ 1T - 50Hz - CHAPA NÃO ORIENTADA - 0,50 mm
 0,30 A 0,80 W / kg @ 1T - 50Hz - CHAPA ORIENTADA - 0,35 mm

DADOS DISPONÍVEIS EM CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO E DE PERDAS TOTAIS

CURVAS FORNECIDAS PELOS FABRICANTES DE CHAPAS MAGNÉTICAS, OBTIDAS A PARTIR DE ENSAIOS DE AMOSTRAS (ENSAIO DE EPSTEIN)

CARREGAMENTO MAGNÉTICO ESPECÍFICO $\rightarrow$ INDUÇÃO MÁXIMA NO NÚCLEO B_{FE}

MATERIAL : AÇO SILÍCIO COM ELEVADO TEOR (4 A 6 % DE SILÍCIO) - ESPESSURA 0,35mm / 0,50 mm

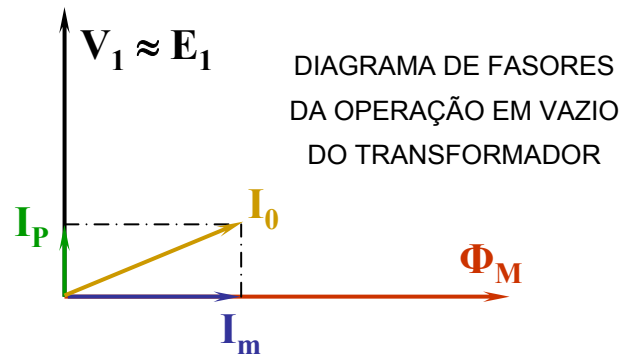
$B_{FE} \rightarrow 0,9$ A $1,2$ T - AÇO SILÍCIO NÃO ORIENTADO, REVESTIDO, ESP. 0,50 mm

$B_{FE} \rightarrow 1,3$ A $1,6$ T - AÇO SILÍCIO ORIENTADO, REVESTIDO, ESP. 0,35 mm

DIAGRAMA FASORIAL E CIRCUITO EQUIVALENTE PARA OPERAÇÃO EM VAZIO DO TRANSFORMADOR

PERDAS NO FERRO SÃO SUPRIDAS PELA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR

RESULTA NECESSARIAMENTE A ABSORÇÃO DE UMA COMPONENTE DE CORRENTE ATIVA, I_p , PARA O SUPRIMENTO DE TAIS PERDAS



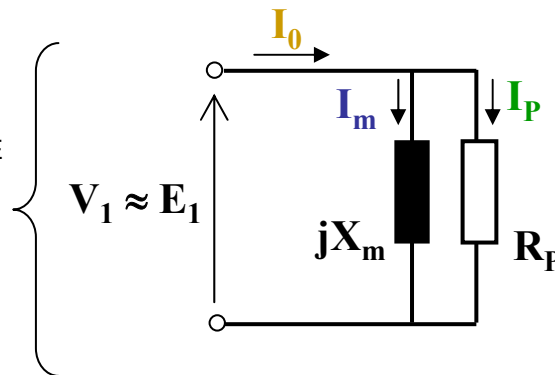
$$\bar{I}_0 = \bar{I}_p + \bar{I}_m = I_p + j \cdot I_m$$

I_0 : CORRENTE TOTAL EM VAZIO

I_p : CORRENTE DE PERDAS NO FERRO

I_m : CORRENTE MAGNETIZANTE

CIRCUITO EQUIVALENTE
PARA OPERAÇÃO EM
VAZIO DO
TRANSFORMADOR



X_m : REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO

R_p : RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE PERDAS NO FERRO