

# Grupo#2

de Grupo#2 Grupo#2

---

**Data de envio:** 03-ago-2021 02:55PM (UTC-0300)

**Identificação do Envio:** 1627392243

**Nome do arquivo:** Trabalho\_1\_Grupo\_2\_Relat\_rio.pdf (1.37M)

**Contagem de palavras:** 2440

**Contagem de caracteres:** 13240

**ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**



**PEA3503 - Subestações e Equipamentos**

**TRANSFORMADORES E  
AUTOTRANSFORMADORES**

Giuseppe Gaffo de Fazio - NUSP: 10336977

Matheus Cardoso Pedroso de Moraes - NUSP: 9837135

Adrian D' Lucas Cardoso Gonçalves - NUSP: 8802412

## 1 Introdução

Os transformadores são dispositivos essenciais na transmissão e distribuição de energia elétrica, pois permitem transformar os níveis de tensão de forma mais apropriada conforme o uso desejado.

No transporte por longas distâncias é desejável um nível de tensão elevado (de até 1000 KV) afim de minimizar as perdas nos condutores. Já próximo ao consumo final, são necessários níveis de tensão mais baixos (220/110 V) com o objetivo de garantir a segurança e uso pelo consumidor.

## 2 Princípios Básicos e Propriedades

### 2.1 Funcionamento

A criação dos transformadores se baseia em dois princípios físicos básicos: a corrente elétrica produz campo magnético; campo magnético variante no interior de um circuito gera corrente elétrica em seus terminais.

Assim, é necessário criar condições para que uma corrente elétrica circule, gerando assim campo magnético. Esse campo, por sua vez, deve ser capaz de induzir corrente e tensão em outra parte do circuito.

Nos transformadores, um enrolamento primário desempenha o papel de gerador de campo magnético, enquanto um enrolamento secundário sofre a indução magnética e apresenta uma tensão em seus terminais. Como resultado dessa indução, o enrolamento secundário terá uma tensão que se relaciona com a tensão do primário através de uma relação, idealmente, linear. A figura a seguir mostra uma representação dos aspectos construtivos de um transformador:

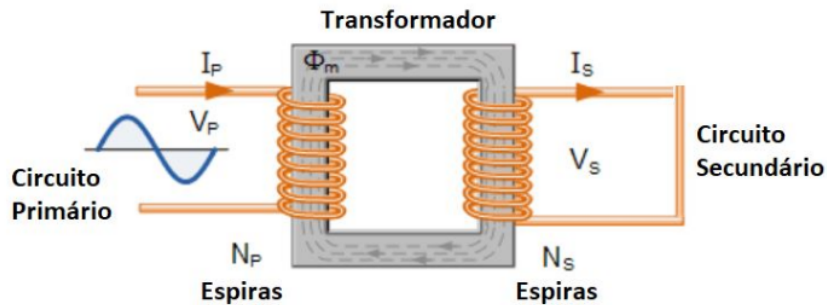


Figura 1 – Esquema simplificado de um transformador.

Para uma primeira análise, será adotado o modelo do transformador ideal, a partir das seguintes premissas: o núcleo possui permeabilidade magnética  $\mu$  infinita; o fluxo é confinado dentro do núcleo e percorre os dois enrolamentos, não havendo dispersão do fluxo; e que não ocorrem perdas resistivas nos enrolamentos ou no núcleo.

Como para esse modelo não ocorrem perdas de nenhuma natureza, a potência elétrica que entra pelo primário sai pelo secundário. Desta forma, obtemos uma primeira

relação:

$$V_P \cdot I_P = V_S \cdot I_S$$

A conexão magnética entre os enrolamentos, em que o fluxo magnético é confinado no núcleo, permite o equacionamento da tensão nos terminais por meio da Lei de Faraday:

$$V_P = N_P \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_S = N_S \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$\therefore \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

A partir da primeira equação que considera o fluxo de potência, temos a seguinte equação:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S}$$

A relação entre o número de espiras  $\frac{N_P}{N_S}$  é denominada como relação de transformação.

## 2.2 Construção

Transformadores são formados, de maneira simplificada, por alguns componentes básicos: enrolamentos; núcleo; e isolantes.

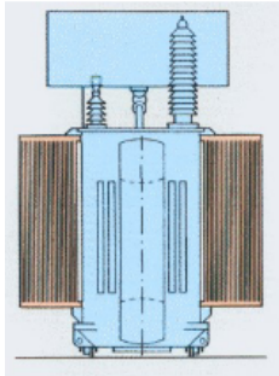
Os enrolamentos são formados através do arranjo de uma ou mais bobinas, formadas por espiras de condutores. As bobinas são dispostas de modo a garantir uma sustentação mecânica à esforços eletromecânicos, isolamento suficiente a surtos de tensão e adequada refrigeração.

As bobinas e espiras podem ser feitas de cobre ou alumínio. Transformadores com bobinas de alumínio possuem volume maior que os trafos que utilizam cobre, porém apresentam menor peso. Dessa forma, quando não há limitações de espaço em subestações, a compra de transformadores de alumínio facilita a logística de transporte do equipamento.

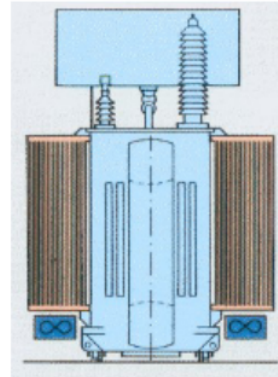
O núcleo ferromagnético é formado através de chapas de aço-silício intercaladas junto a uma película isolante, com o intuito de reduzir a indução de correntes parasitas (Perdas Foucault). Além disso, um dos motivos do emprego do aço-silício é sua resistividade um pouco mais elevada, que reduz ainda mais o valor das correntes parasitas. Na laminação, os domínios magnéticos do aço são alinhados para aumentar a capacidade de densidade de fluxo.

A isolamento no transformador é feita, em geral, por óleo mineral e celulose. Folhas de papel ou presspan (papel isolante térmico com capacidade térmica e absorção de óleo) são utilizados para garantir a isolamento elétrica entre os condutores. O óleo, por sua vez, atua também com importância na refrigeração dos equipamentos.

O resfriamento do transformadores é feito através da circulação do óleo em radiadores fixados na estrutura ou trocadores de calor externos. Nos dissipadores a circulação de óleo pode ocorrer por convecção natural ou forçada, assim como a circulação de ar.



(a) Dissipador com circulação natural de óleo e ar



(b) Dissipador com circulação natural de óleo e forçada de ar

Figura 2 – Resfriamento através de dissipadores fixados no transformador

### 3 Tipos de transformador

Os transformadores podem ser classificados de acordo a sua finalidade, sendo divididos em transformadores de potência, de distribuição, de corrente ou de potencia.

Transformadores de potência são empregados para adequar níveis de tensão e corrente em diferentes trechos do sistema de geração, transmissão ou distribuição e trabalham em grandes faixas de potência. Os de distribuição, por sua vez, são empregados no abaixamento de tensão para 220 V ou 380 V (tensão de linha), nível da tensão utilizada pelos consumidores finais.



(a) Transformador de potência



(b) Transformador de distribuição

Figura 3 – Transformadores de potência e de distribuição

Os transformadores de corrente e de potencial são empregados na medição e proteção com o intuito de adequar os níveis de corrente e tensão, respectivamente, para os medidores.



(a) Transformador de corrente



(b) Transformador de potencial

Figura 4 – Transformadores de corrente e de potencial

Existem também os autotransformadores, que possuem apenas um enrolamento por fase, dessa forma, não há o isolamento elétrico entre os terminais de saída e entrada.

Cada enrolamento possui no mínimo 3 terminais e são utilizados de forma a elevar ou abaixar a tensão. A ligação dos autotransformadores é apresentada na figura a seguir:

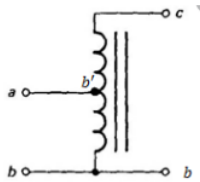


Figura 5 – Terminais do autotransformador

## 4 Especificações de transformador

As especificações técnicas dos transformadores ditam como será o comportamento do dispositivo em regime. Por esse motivo, é fundamental o conhecimento dos parâmetros elétricos e mecânicos dos transformadores e como eles influenciam na sua operação. Dentre eles, podemos destacar:

**Potência Nominal:** A potência nominal é definida como o produto da corrente e tensão nominais. As normas IEC e IEEE diferem quanto a conceitos importantes na potência nominal. Enquanto a IEC define que a potência nominal deverá ser a mesma independente dos terminais usados como primário e secundário, a norma IEEE estabelece um sentido para o fluxo de potência.

**Tensões e Derivações:** As tensões nominais nos terminais são definidas com o transformador em vazio. Essa relação depende exclusivamente da relação de espiras do transformador. Derivações são justamente ajustes que podem ser realizados nas relações de espiras e conseqüentemente na relação entre as tensões.

**Ligações entre os enrolamentos:** Em dispositivos trifásicos existe a possibili-

dade de realizar a ligação dos enrolamentos em ligação estrela (Y), ligação delta ( $\Delta$ ) ou ligação Zigue-Zague (Z).

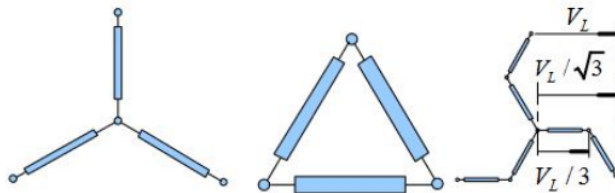


Figura 6 – Estrela (Y), delta ( $\Delta$ ), zigue-zague (Z)

Enrolamentos de dispositivos usados na transmissão de energia são de modo geral ligados em estrela, pois isso permite a existência de um ponto de aterramento (o neutro), o que diminui a sobretensão em terminais linha-terra. Um benefício da ligação delta é a supressão de terceira harmônica de tensão e corrente.

## 5 Análises de Desempenho

Transformadores possuem uma longa vida útil e devem ser capazes de funcionar de maneira confiável. Portanto seu desempenho eletromagnético, térmico e mecânico são relevantes na análise.

O primeiro passo na análise do transformador é a do núcleo magnético, seu elemento mais importante. No núcleo que ocorre as interações eletromagnéticas, onde uma diferença de potencial aplicada em seus terminais produz um campo magnético (H) e uma indução magnética (B), assim uma curva de magnetização  $B \times H$  pode ser levantada. Tal curva depende do material escolhido e os mais utilizados são: o aço magnético de grão orientado laminado a frio, o aço magnético de grão super orientado laminado a frio e o aço magnético de grão orientado com domínios refinados cujo valor máximo de indução magnética em regime seja de 2 Teslas. As perdas causadas por essa interação podem ser divididas em: perdas por histerese, perdas Foucault e perdas adicionais.

### 5.1 Desempenho eletromagnético

Transformadores operam em tensão alternada, tipicamente senoidal com frequência de 50 ou 60 Hz, onde a cada 10ms ocorre pelo menos uma inversão de polaridade de forma que os domínios precisam superar a inércia e o atrito. Esse efeito é a origem da perda por histerese que reflete o trabalho necessário para a reorientação dos domínios magnéticos em relação ao campo aplicado. Essa energia é dissipada na forma de calor, a figura x ilustra um laço de histerese.

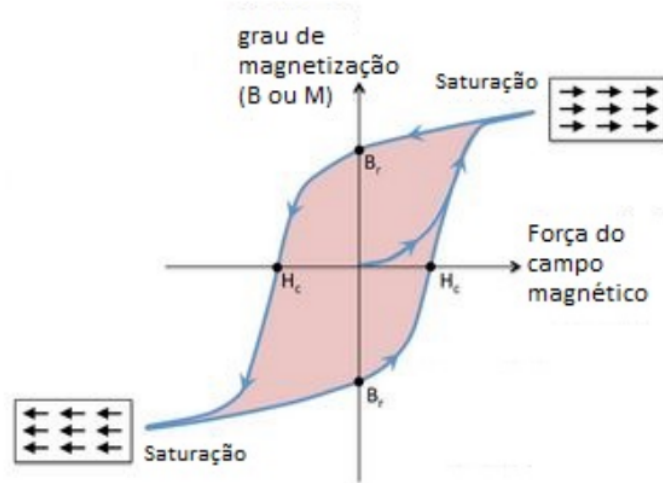


Figura 7 – Laço de histerese em um material ferromagnético

Matematicamente, as perdas por histerese no núcleo se dão pela seguinte fórmula:

$$P_{histerese} = k \cdot f \cdot B^2$$

onde  $f$  é a frequência de alimentação,  $B$  a indução magnética e  $k$  é um fator construtivo.

Analogamente as perdas por histerese, que são causadas por variação de tensão, as perdas por corrente induzidas correm devido a variação da corrente de magnetização do núcleo, de forma que o fluxo magnético estabelece forças eletromotrizes que induzem correntes de circulação nas chapas do núcleo. Essas perdas são chamadas de perda Foucault devido as correntes circulantes também serem chamadas de corrente de Foucault e são descritas pela fórmula a seguir:

$$P_{foucault} = k \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot e^2$$

onde  $e$  é a espessura das chapas do núcleo e  $k$  a mesma contante construtiva já citada.

Uma maneira simples de minimizar essa perda ôhmica é diminuir a espessura das chapas, visto na figura x.



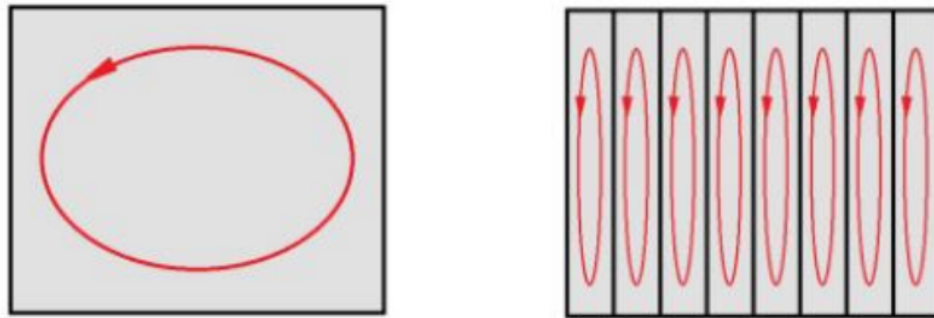


Figura 8 – Representação das Correntes de Foucault

A perda joule é a maior perda no transformador e por operar em corrente alternada, também ocorre um adensamento de corrente nas extremidades do condutor, conhecido como efeito pelicular, o que aumenta as perdas. Algumas medidas podem ser tomadas para limitar os efeitos do adensamento (figura x).

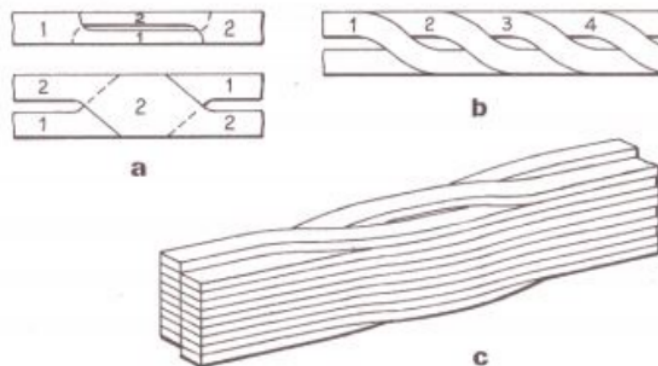


Figura 9 – Disposição dos condutores para limitação do adensamento

Onde (a) representa a subdivisão de condutores de secção elevada, (b) a distribuição de bobinas em paralelo adequadamente conectadas e (c) uso de condutores ou barras com transposição.

Por último, há perdas por fluxos dispersos na estrutura, perdas dielétricas por efeito do campo elétrico no sistema isolante e nas conexões internas as quais interligam os enrolamentos entre eles, para as buchas terminais e/ou comutadores de tensão, que representam uma pequena parcela das perdas. A determinação das perdas por fluxo de dispersão são dependentes da distribuição do campo magnético de dispersão através dos enrolamentos e dos componentes estruturais externos aos enrolamentos e constitui num aspecto complexo do projeto de um transformador. Em geral, programas computacionais utilizando métodos numéricos são aplicados nesta etapa do projeto.

## 5.2 Desempenho Térmico

Foi descrito que perdas no núcleo causam elevação de temperatura do mesmo. Temperaturas elevadas diminuem a eficiência e podem diminuir a vida útil do equipamento e causar danos. Em transformadores de baixa potência o resfriamento é realizado através da convecção natural e/ou óleo isolante em transformadores de maior potência. A figura x esquematiza duas configurações possíveis de resfriamento:

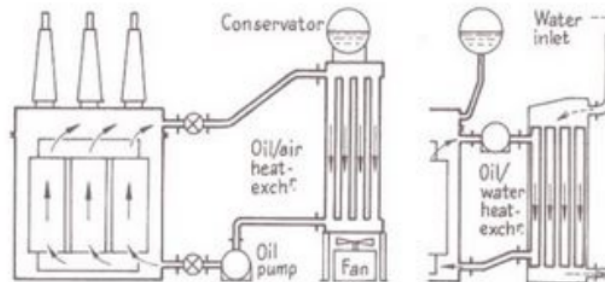


Figura 10 – Métodos ON-AF e OF-WF de resfriamento de transformadores

Um dos objetos de análise mais importante no quesito térmico é a caracterização da elevação de temperatura da superfície do núcleo e do ponto mais quente em relação ao óleo isolante. O aquecimento elevado do óleo isolante pode produzir gases combustíveis, reduzindo a vida útil do transformador como um todo.

A construção dos diversos tipos de núcleo ocorre de modo não ideal, que juntamente com a distribuição não uniforme de fluxo acarretam o surgimento de regiões de maiores perdas, implicando locais de maior temperatura de operação, que precisam ser mitigados a fim de respeitar os limites térmicos dos isoladores.

A norma ANSI - C57.91 apresenta uma equação para estimar a perda de vida útil diária:

$$\log\left(\frac{PV}{100 + h}\right) = A - \frac{6328,8}{273 + Th}$$

Onde PV é a perda de vida útil do transformador em porcentagem; h é o tempo durante o qual o transformador operou com a temperatura Th; Th é a temperatura do ponto quente em °C mantida constante durante h; A = 11,968 para transformadores de 55°C ou A = 11,268 para transformadores de 65°C.

Paralelamente, a norma ABNT - NBR - 5461/1981 estabelece a equação:

$$\log\left(\frac{PV}{100 + h}\right) = A - \frac{6328,8}{273 + Th}$$

Em que A = 14,133 para transformadores de 55°C ou A = 13,391 para transformadores de 65°C. A figura x apresenta a diferença entre as fórmulas apresentadas pela ANSI, ABNT e PEC:

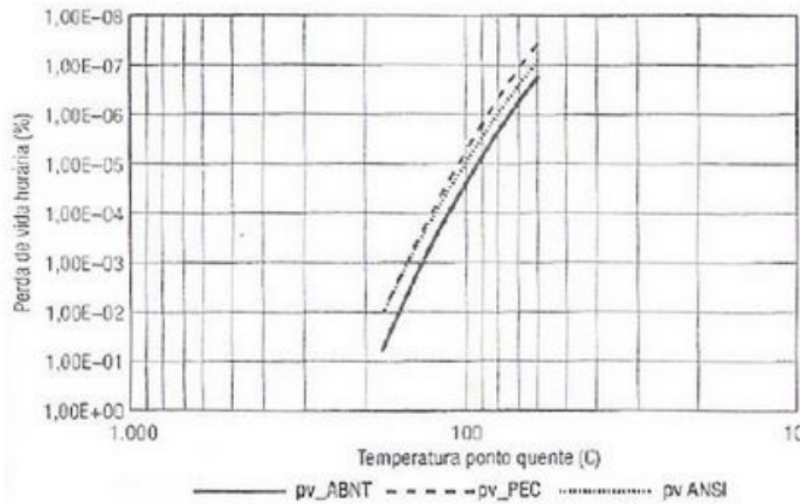


Figura 11 – Métodos ON-AF e OF-WF de resfriamento de transformadores

Outros componentes de relevância no isolamento térmico e elétrico são as barreiras isolantes entre pacotes do núcleo e separadores de canais de resfriamento, comumente de celulose, que via de regra devem ser de classe térmica F (155°C) ou superior para cumprir suas funções.

### 5.3 Desempenho Mecânico

Um transformador está sujeito a forças eletromagnéticas que são de difícil determinação pela complexidade de arranjo dos enrolamentos em sua geometria, que por sua vez estão imersos numa distribuição complexa de campo magnético. Essas forças causam estresse mecânico, vibração, ruídos, causam danos ao isolamento e diminuem a vida útil do transformador.

As componentes de força incidentes no transformador podem ser radiais ou axiais. As forças radiais causam compressão em enrolamento interno, tração em enrolamento externo e deterioração da isolação de celulose. As forças axiais causam compressão axial do enrolamento, deslocamento axial de espiras, deslocamento radial de condutores do enrolamento, compressão dos calços radiais do enrolamento e também deterioração da isolação de celulose. Tudo isso demonstra que a estrutura do transformador deve ser cuidadosamente projetada para suportar repetidos esforços mecânicos assim como os causados em situações de sobrecarga e curto. A figura x exemplifica força axial em ação num condutor.

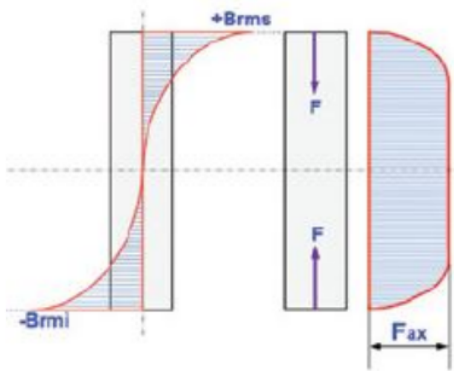


Figura 12 – Força axial em enrolamento de transformador

## 6 Operação

Durante sua operação, o dispositivo elétrico poderá estar sujeito a falhas externas, que podem causar danos consideráveis aos seus componentes ou diminuição de vida útil. Podemos destacar alguns tipos mais comuns de falhas:

**Sobretensões:** Esse tipo de falha ocorre quando os níveis de tensão suportados com segurança pelos isoladores são ultrapassados. Mesmo quando o nível de sobretensão não é o suficiente para destruir imediatamente o material isolante, as propriedades físicas e químicas dos materiais podem ser afetadas aumentando a chance de falhas de isolamento futuras.

**Sobrecorrentes:** falhas de sobrecorrente exigem do material condutor, além da correspondente isolamento, operação além do seu limite confiável. Os problemas causados se dão pela exposição do material isolante a níveis de campo magnético superiores para o qual ele está projetado que causam forças eletromecânicas que podem danificar o isolamento, além de expor o condutor a uma temperatura superior a suportada por ele.

A fim de realizar o diagnóstico do estado de operação do transformador, deseja-se verificar: a quantidade de umidade presente no óleo e isolamento sólida; O estado da prensagem dos enrolamentos; A expectativa de vida residual dos componentes com indicações do risco de falhas de cada um deles.

# Grupo#2

---

## RELATÓRIO DE ORIGINALIDADE

---

**13%**  
ÍNDICE DE  
SEMELHANÇA

**0%**  
FONTES DA INTERNET

**0%**  
PUBLICAÇÕES

**13%**  
DOCUMENTOS DOS  
ALUNOS

---

## FONTES PRIMÁRIAS

---

**1** Submitted to Universidade de Sao Paulo **12%**  
Documento do Aluno

---

**2** Submitted to UT, Dallas **<1%**  
Documento do Aluno

---

Excluir citações  
Excluir bibliografia

Desligado  
Desligado

Excluir  
correspondências

Desligado