

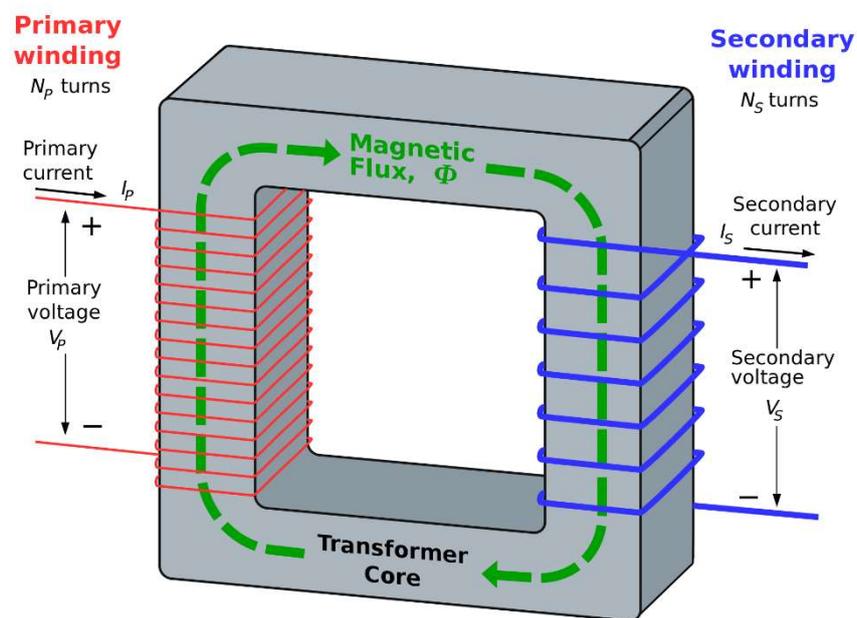
COMPLEMENTO – PALESTRA: TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA – FABRICAÇÃO E ENSAIOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO – ENG° MAGNO SOARES

A palestra visa apresentar os conceitos de transformador e os principais componentes de um equipamento isolado a óleo. O objetivo é ilustrar o processo de fabricação do circuito magnético (núcleo), circuito elétrico (bobinas) e montagem da parte ativa. Após a conclusão da etapa de montagem, o equipamento é testado em laboratórios de alta tensão, a fim de comprovar se o mesmo está dentro das condições especificadas pelos clientes e normas vigentes. Acompanhando a apresentação da palestra, o complemento será dividido em tópicos.

O QUE É O TRANSFORMADOR?

O transformador é um dispositivo responsável por transferir energia de um circuito a outro. A figura 1 abaixo representa um transformador ideal, onde o enrolamento primário é conectado a fonte geradora e o enrolamento secundário é conectado a carga. Os enrolamentos não tem ligação elétrica entre si, tratando-se de um isolamento galvânico. O processo de transferência de energia de um enrolamento ao outro se dá pelo enlace do fluxo magnético, este fluxo é produzido pela bobina primária, onde ocorre a excitação, e por sua vez conduzido para o enrolamento secundário, induzindo neste uma tensão.

Figura 1 – Transformador Ideal

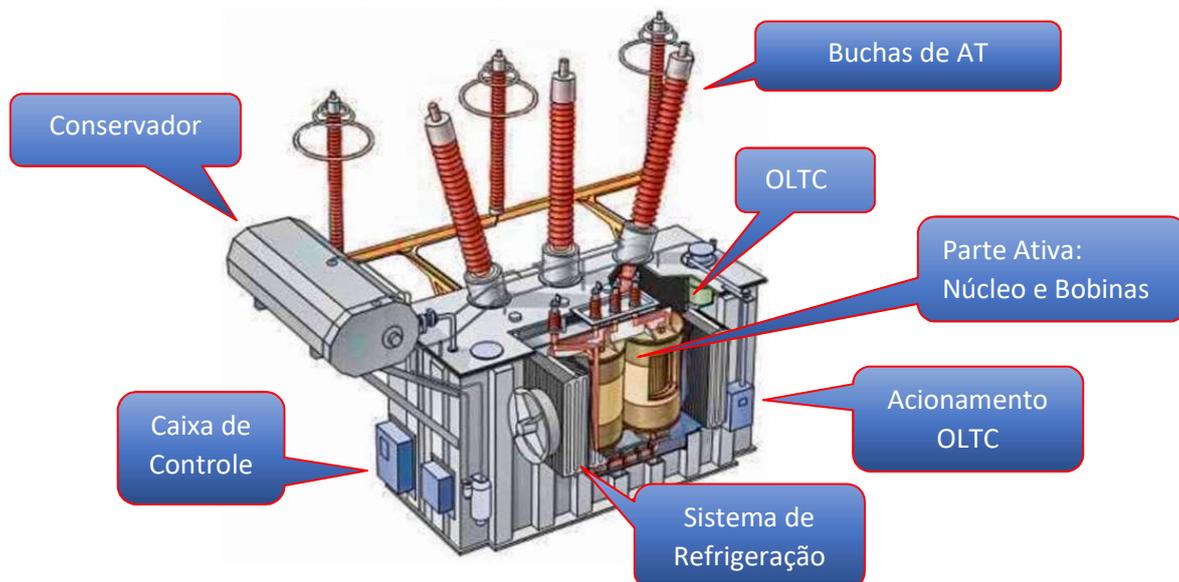


Fonte: Wikipédia, acesso em 2019

PRINCIPAIS COMPONENTES DO TRANSFORMADOR ISOLADO A ÓLEO

Serão abordados os principais componentes de um transformador isolado a óleo, podendo ser óleo mineral isolante (OMI) ou óleo vegetal isolante (OVI) . A figura 2 mostra os componentes aos quais receberão breve descrição.

Figura 2 – Transformador em corte ABB



Fonte: Adaptado de ABB transformers, Zurich, Switzerland, 2006.

Buchas – São os isoladores externos do transformador. Podem ter a parte externa de material cerâmico ou polimérico. Existem vários modelos de buchas de acordo com a classe de tensão, podendo ter o isolamento interno a óleo mineral isolante ou a base de resina. As saias tem o objetivo de maximizar o comprimento axial da bucha, fazendo com que o haja uma distância de escoamento muito maior do que o comprimento físico da bucha.

Vide link para estudos sobre buchas:

[https://library.e.abb.com/public/1bd4422c9affa468c12579bf00538521/1ZSE%202750-105%20en%20Rev%207%20\(GOE\)_low.pdf](https://library.e.abb.com/public/1bd4422c9affa468c12579bf00538521/1ZSE%202750-105%20en%20Rev%207%20(GOE)_low.pdf)

Óleo Isolante – O óleo tem duas funções principais para o transformador. Primeiro, faz parte do sistema isolante, onde sua alta rigidez dielétrica, permite a diminuição entre as distâncias internas dos condutores e bobinas, com isso o equipamento torna-se mais compacto. O segundo objetivo desse fluido é a refrigeração, onde por meio do processo de convecção, o óleo troca calor com o ambiente externo, utilizando os radiadores, paredes do tanque e ventiladores como principal aliado nesse processo de refrigeração.

Vide artigo interessante sobre óleo isolante:

<http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/viewFile/252/206>

Comutador de taps – Esse dispositivo é responsável por variar as espiras do enrolamento de derivações, sempre que encontrar na linha, uma diferença entre a tensão medida e tensão parametrizada para ajuste. Por meio de um relé regulador de tensão, o comando é acionado para aumentar ou diminuir espiras do enrolamento de derivações, esse acionamento pode ser feito automaticamente ou manualmente. Existem dois tipos de comutadores, os que operam

sob carga (OLTC – On load tap changer), e os que operam sem tensão e carga (NLTC – No load tap changer). O OLTC é mais utilizado em equipamentos que interagem com o sistema de distribuição de energia, ou que possuem grandes variações de tensão ao longo da linha, ou seja, onde a correção de tensão é feita várias vezes durante o ciclo de operação de 24 horas. Já o NLTC é muito utilizado em equipamentos industriais ou nos transformadores elevadores próximos ao centros de geração, onde a tensão não sofre grandes variações ao longo do ciclo de carregamento. **O NLTC deve ser operado com o equipamento completamente desligado, enquanto o OLTC pode ser comutado a qualquer instante a plena carga e sob tensão nominal.**

Tipos de comutadores mais utilizados:

https://library.e.abb.com/public/f9831517bd081058c1257db100418441/1ZSC000562-AAL%20pt_LR.pdf

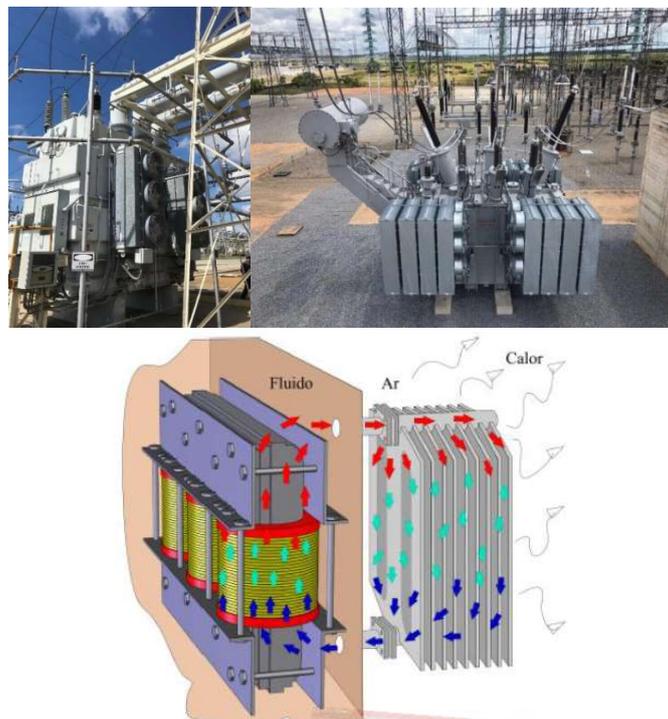
https://library.e.abb.com/public/f9831517bd081058c1257db100418441/1ZSC000562-AAL%20pt_LR.pdf

Parte ativa – É onde todo o trabalho de conversão eletromagnética acontece, onde estão o circuito magnético (núcleo) e elétrico acoplados (bobinas).

Sistema de refrigeração – Onde acontece a troca de calor por meio do fenômeno de radiação térmica e processo de convecção. O sistema pode ser composto por radiadores, ou por radiadores + ventiladores, ou por bombas e trocadores de calor. O dimensionamento desse sistema esta ligado a potência de trabalho e o espaço a ser instalado o transformador. Espaçamentos muito críticos de instalação sugerem a utilização de modelos de resfriamento mais eficientes, tais como os trocadores de calor.

A figura 3 apresenta dois equipamentos, o primeiro utilizando trocadores de calor e o segundo utilizando radiadores e ventiladores. Abaixo o processo de convecção.

Figura 3 – Sistemas de resfriamento e processo de convecção.



Fonte: LinkedIn e UniverTec, acesso em 2019

Sistema de proteção e controle - A caixa de controle do transformador é onde estão instalados os relés de proteção e saída dos TC's de bucha. Os TC's de bucha monitoram as correntes de linha do equipamento e a amostragem em baixa intensidade (5A) é levada para a caixa de controle e conectada aos relés, aos quais são responsáveis pelas proteções de faltas e sobrecargas. Todo o sistema de monitoramento e controle basicamente está alocado na caixa de controle. A figura 4 mostra onde são instalados os TC's de bucha, estes são normalmente instalados em todos os terminais do equipamento, inclusive no terminal de neutro, dependendo das necessidades de monitoramento especificadas pela concessionária (contratante). O cabeamento dos secundários dos TC's é direcionado para a caixa de controle do transformador.

Figura 4 – Localização dos TC's



Fonte: LinkedIn, Sanbian, acesso em 2019

Tanque principal – O tanque principal normalmente constituído de aço carbono, é a estrutura onde é alocada a parte ativa e volume de óleo. Estrutura mecanicamente resistente a sobrepressões (normalmente testado com $0,5 \text{ kgf/cm}^2$) e ao vácuo pleno.

Tanque de expansão ou conservador – Responsável pelo armazenamento de óleo excedente ao tanque principal, o volume excedente deve ser mantido para que em casos de amostragem (a amostragem é periódica) e vazamento, o tanque principal não perca seu volume total de óleo. Dentro do conservador está a bolsa de borracha que faz a conexão com o ar ambiente, possibilitando a variação de pressão interna do equipamento, uma vez que o óleo altera seu volume com a temperatura de operação. Outro dispositivo extremamente importante e que faz a conexão entre tanque principal e conservador, é o relé Buchholz, que ao detectar a presença de gases combustíveis, gera sinal de alarme e trip.

Link para saber mais sobre relé Buchholz.

<https://www.youtube.com/watch?v=YtyYPdvxFLI>

CIRCUITO MAGNÉTICO – NÚCLEO

O núcleo do transformador é composto de aço-silício e é considerado uma das partes mais pesadas do equipamento. O montante de aço-silício utilizado é responsável por conduzir o fluxo magnético de uma bobina à outra. Portanto, deve possuir características de alta permeabilidade magnética e baixas perdas (estrito laço de histerese). Além disso, o material é composto de grão orientado e o processo de laminação é à frio. As chapas possuem dopagem de 3% de silício, o que torna o material, um bom condutor magnético. As outras ligas são responsáveis por manter as características de alta rigidez mecânica, para suportar forças de abalos sísmicos, de transporte e forças de curto-circuito. O circuito magnético dos transformadores pode ser de vários tipos, dependendo da necessidade de quem o especificou.

Núcleo do tipo envolvido (Core type): Núcleo mais utilizado no mercado de transformadores de fabricação nacional. As bobinas envolvem o material ferro-magnético. Esse tipo de núcleo ainda pode ser de três ou cinco colunas para transformadores trifásicos. Os núcleos de cinco colunas são fabricados para casos em que exigem melhor performance do circuito magnético, tais como: baixo nível de ruído, altura reduzida da parte ativa e ponto de saturação elevado. Já um detalhe do tipo de núcleo envolvido e de três colunas é que a impedância de sequência zero (Z_0) é reduzida, normalmente a valores de 80% da impedância positiva (Z_1) do equipamento, como não é regra e outras variáveis podem intervir no esquema de Z_0 , para os equipamentos trifásicos de núcleo envolvido normalmente é contratado o ensaio especial de “Sequência Zero” para conhecer os reais valores. Na figura 5 é apresentado o núcleo tipo core para um equipamento monofásico, a parte ativa é dividida em dois conjuntos de bobinas, nesse caso o núcleo é composto de duas colunas principais e duas colunas de retorno para o fluxo magnético.

Figura 5 – Núcleo tipo Core, dois “Legs” + colunas de retorno magnético.



Fonte: LinkedIn, acesso em 2019

Núcleo do tipo envolvente (Shell type): Os primeiros transformadores foram desenvolvidos com esse tipo de núcleo, e ainda hoje empresas internacionais, como Westinghouse Electric Corporation, ainda fabricam esses equipamentos. A desvantagem está no emprego de uma quantidade extremamente maior de material ferro-magnético para compor o núcleo, consequentemente o aumento de preço do equipamento, inclusive por questões logísticas. O núcleo leva esse nome, pois ele é responsável por envolver as bobinas. A figura 6 apresenta o

núcleo tipo Shell e sua bobina montada, note que as bobinas não são cilíndricas.

Figura 6 – Núcleo tipo shell



Fonte: LinkedIn, acesso em 2019.

CIRCUITO ELÉTRICO – BOBINAS

O circuito elétrico é formado pelas bobinas. As bobinas são constituídas em cobre eletrolítico, e os formatos dos fios variam de acordo com a utilização da bobina, bem como as características necessárias, tais como: capacidade de condução de corrente e nível de tensão. As bobinas podem ser enroladas de diversas maneiras e refletem o know-how de cada fabricante. As mais comuns são as bobinas helicoidais, cilíndricas e de disco. Enrolamentos especiais costumam ser exigidos para mais altas tensões, onde é necessária uma alta capacitância efetiva e entre discos, fazendo assim uma distribuição e amortecimento das tensões impulsivas. O sentido de enrolamento das bobinas indica a polaridade para casos monofásicos e o deslocamento angular para ligações trifásicas. A disposição dos enrolamentos (no caso de núcleo tipo core) é feita de forma concêntrica, ou seja, todos os enrolamentos são sobrepostos e tendo um ponto central como referência. A figura 7 mostra os enrolamentos colocados no núcleo, na foto é possível verificar a presença de 4 enrolamentos. O mais próximo ao núcleo pode ser BT ou Terciário, o segundo pode ser BT, MT ou um dos enrolamentos de AT, o terceiro é o enrolamento de derivações e o quarto é o enrolamento de AT. O enrolamento de derivações normalmente é posicionado na última posição para facilitar a ligação dos cabos no comutador OLTC ou NLTC.

Figura 7 – Disposição concêntrica dos enrolamentos.



Fonte: LinkedIn, acesso em 2019.

ENSAIOS NOS TRANSFORMADORES

A palestra apresenta apenas alguns ensaios elétricos, porém ainda existem os ensaios mecânicos e químicos. Os transformadores e seus acessórios passam por diversos testes durante o seu processo de fabricação. Durante as etapas de fabricação, o fabricante acompanha todo o processo, fazendo as medições necessárias para garantir a qualidade e performance esperada para o equipamento. Além das normas vigentes que cabem a fabricação e ensaios destes equipamentos, a fábrica de transformadores também deve seguir os padrões de qualidade exigidos pela ISO 9001. O laboratório de ensaios deve seguir padrões de calibração conforme normas vigentes e ser acreditado por órgãos competentes para fazer os ensaios propostos. Os ensaios nos transformadores normalmente duram de 2 a 3 semanas. O tempo gasto é devido a gama de ensaios a ser realizado, a complexidade nos ensaios de alta tensão e os tempos de estabilização no ensaio de elevação de temperatura. A figura 8 mostra laboratórios de alta tensão normalmente utilizados durante a inspeção destes equipamentos.

Figura 8 – Laboratórios de Alta tensão.



Fonte: LinkedIn (TSEA) e Google (UFPA), acesso em 2019.

Os ensaios elétricos, mecânicos e químicos são divididos em três categorias: Ensaio de Rotina, Tipo e Especiais.

Ensaio de Rotina – Os ensaios de rotina são realizados em todas as unidades do lote e já tem procedimentos de realização bem embasados nas normas vigentes de ensaios. Ademais seu objetivo primário é atestar os processos de fabricação e montagem, inclusive checar o nível de conformidade entre peças de um mesmo projeto.

Ensaio de Tipo – São ensaios realizados em uma única unidade do lote. A unidade testada representa o lote para fins de atendimento aos requisitos de projeto, tais como: suportabilidade dielétrica, temperatura de operação e etc. Os ensaios de tipo também possuem embasamento normativo.

Ensaio Especiais – São ensaios que expressam as necessidades específicas de um projeto, devido ao local ou ponto de instalação na malha. Alguns desses ensaios já possuem procedimentos embutidos nas normas técnicas, porém outros, devem ser discutidos entre contratante e contratada. O fabricante em comum acordo entende as necessidades do novo teste e junto com a contratante definem as melhores alternativas para simular o fenômeno e verificar se o resultado atende aos requisitos. Normalmente o ensaio especial é realizado em apenas uma unidade do lote.

ENSAIOS DE ROTINA

Ensaio elétrico: Resistência elétrica dos enrolamentos, relação de transformação, polaridade e deslocamento angular, resistência de isolamento (megger), perdas em carga e tensão de impedância (em outras palavras: ensaio em curto-circuito e queda de tensão nos enrolamentos), perdas em vazio e corrente de excitação (em outras palavras: ensaio de circuito aberto), tensão aplicada nos enrolamentos a frequência industrial, tensão induzida a frequência de no mínimo 120 Hz, ensaios nos circuitos auxiliares, ensaios nos TC's de buchas, ensaios no comutador quando aplicável, surto de manobra para equipamentos com tensão ≥ 230 Kv, , impulso atmosférico para equipamentos ≥ 300 kV.

Ensaio mecânico: Estanqueidade e resistência a pressão, esquemas de pintura para equipamentos de tensão ≥ 230 kV, visual e dimensional.

Ensaio químico no óleo isolante para equipamento $\geq 72,5$ kV ou $\geq 5,0$ MVA: Rigidez dielétrica, teor de água, fator de perdas dielétricas, tensão interfacial.

ENSAIOS DE TIPO

Ensaio elétrico: Elevação de temperatura, impulso atmosférico para equipamentos < 300 kV.

Ensaio mecânico: -

Ensaio químico no óleo isolante para equipamento $< 72,5$ kV: Rigidez dielétrica, teor de água, fator de perdas dielétricas, tensão interfacial.

ENSAIOS ESPECIAIS

Ensaio elétrico: Medições de capacitâncias entre enrolamentos e entre enrolamentos e massa, medição de fator de potência do isolamento, medição das tensões transitórias transferidas, impedância de sequência zero, suportabilidade a curto-circuito, nível de ruído, medição de harmônicos, medição de potência absorvida pelos ventiladores, nível de rádio interferência, resposta em frequência e impedância terminal, levantamento da curva de saturação e reatância de núcleo de ar.

Ensaio mecânico: Vácuo interno, medição do ponto de orvalho ou umidade relativa (URSI).

Ensaio químico no óleo: Análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo, grau de polimerização do papel.

Nota: A sequência de ensaios de rotina, tipo e especiais foram adaptadas da ABNT NBR 5356-1, para normas internacionais, os ensaios podem variar entre as categorias e ainda de acordo com a classe de tensão do equipamento.

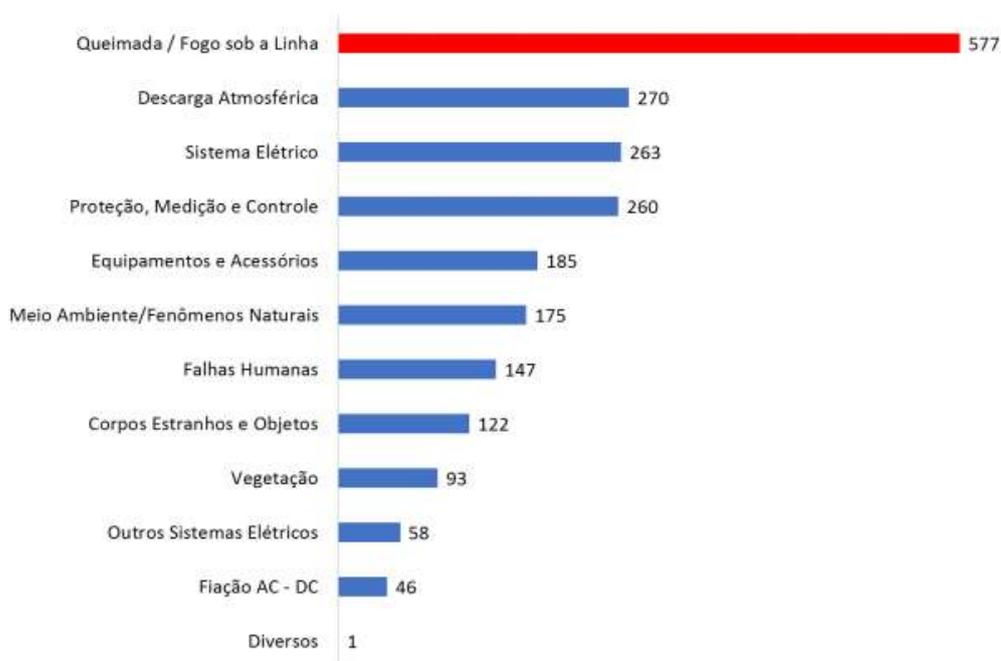
A palestra chama atenção para dois ensaios de alta tensão e que são realizados em tensão contínua. São os ensaios de Impulso Atmosférico de Surto de Manobra. Eles serão abordados em separado adiante.

ENSAIOS DE IMPULSO ATMOSFÉRICO

Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas fazem parte das sobretensões de origem externa há um circuito. Evitá-las é uma tarefa quase impossível, porém existem alguns meios para minimizar os impactos que podem ser causados aos equipamentos e a continuidade do fornecimento de energia. A utilização de cabos-guarda nas torres de transmissão é um exemplo utilizado para evitar que descargas atinjam as fases de transmissão do sistema. Outra maneira de evitar a descontinuidade de fornecimento é o dimensionamento adequado dos equipamentos, coordenação de isolamento e inserção de dispositivos para-raios. Por possuir uma características de alto valor de pico e tempo muito curto, o raio solicita um grande isolamento do material dielétrico que compõe os transformadores e demais equipamentos, podendo ocorrer a ruptura desse isolamento. A Figura 9 mostra que as descargas atmosféricas representam a segunda maior causa de desligamentos no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Figura 9 - Principais causas conhecidas de desligamentos forçados em linhas de transmissão, período de julho/2017 a dezembro/2017. Fonte: ONS.



Fonte: ANEEL, acesso em 2019.

Acesse o material completo pelo link:

<http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>

O ensaio

A descarga atmosférica é simulada nos laboratórios de ensaio de alta tensão e os transformadores são ensaiados conforme sua classe de tensão, utilizando um gerador de MARX. Esse gerador é capaz de gerar impulsos de tensão na casa de MV, seu circuito é composto por capacitores e resistores, onde o carregamento dos capacitores é feito em paralelo e a descarga em cascata, com isso tem-se uma elevada tensão na saída do arranjo. A figura 10 apresenta o gerador de impulsos, o centelhador e o divisor de tensão utilizado neste ensaio.

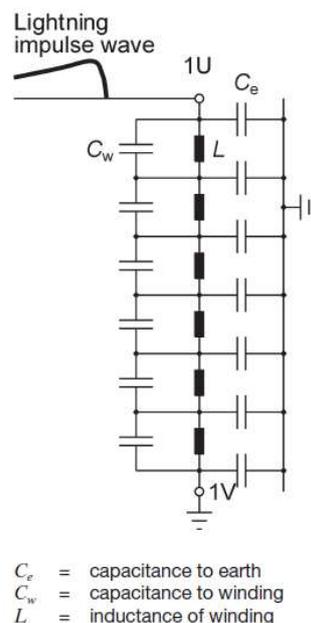
Figura 10 - Mostra a esquerda o gerador de impulsos, a direita o centelhador e ao fundo o divisor de tensão.



Fonte: Dissertação de Raphael Pablo de Souza Barradas, acesso em 2019.

Devido ao transformador possuir um enrolamento com características RLC, vide figura 11, a resposta ao impulso será a mesma em diversos níveis de tensão, permitindo assim, uma avaliação da integridade do isolamento dos enrolamentos após as aplicações de teste.

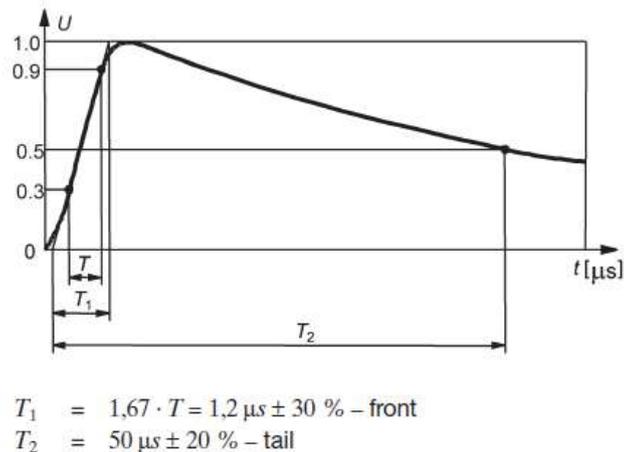
Figura 11 – Rede complexa RLC do enrolamento de um transformador.



Fonte: ABB, Testing of Power Transformer, 1ª Edição de 2003.

A forma de onda obtida a partir do circuito RLC anterior é definida por norma como, uma onda de 1,2/50 μs , isso quer dizer que a tensão de pico chega ao máximo em 1,2 μs e decresce do pico ao valor de 50% de amplitude no tempo de 50 μs . Esses valores possuem tolerâncias conforme norma, devido a dificuldade em definir o circuito de ensaio. A forma de onda teórica de impulso atmosférico é apresentada na figura 12. Para transformadores isolados a óleo, a polaridade do impulso atmosférico aplicada é negativa, diferindo em polaridade da onda apresentada abaixo.

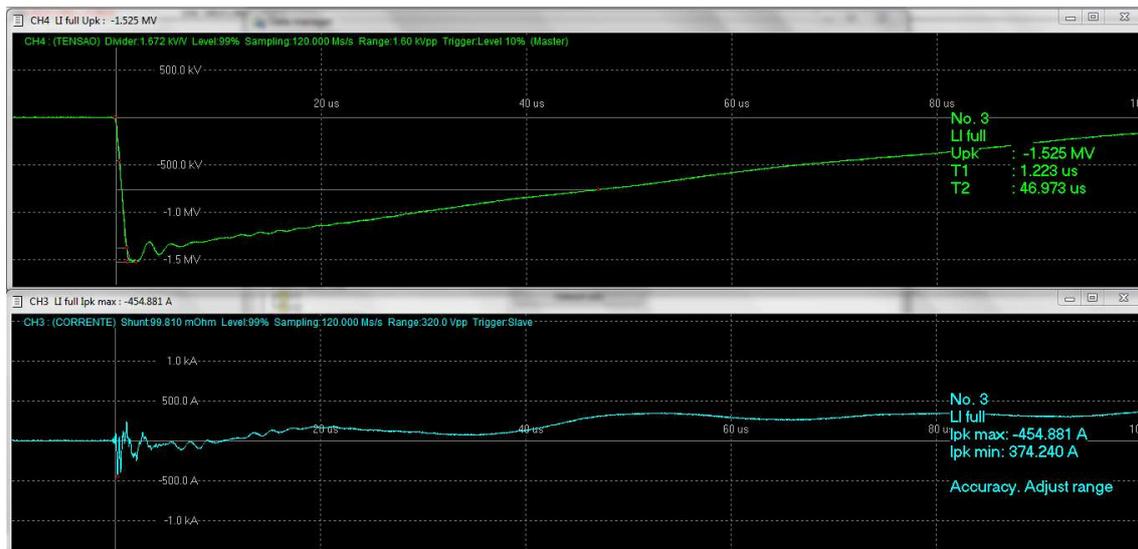
Figura 12 – Forma de onda requerida por norma para ensaio de impulso atmosférico.



Fonte: ABB, Testing of Power Transformer, 1ª Edição de 2003.

As formas de onda de tensão e corrente obtidas em uma medição, são apresentadas abaixo na figura 13.

Figura 13 – formas de onda de tensão e corrente obtidas em ensaio de impulso atmosférico.



Fonte: O autor.

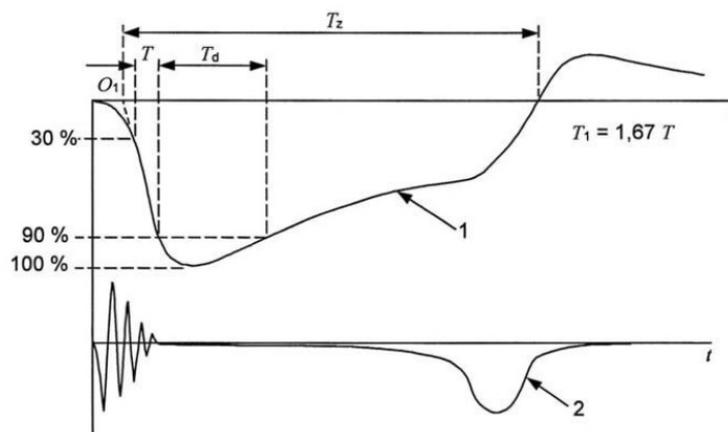
Para mais detalhes sobre gerador de impulsos e o ensaio vide dissertação no link abaixo:

http://ppgee.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/DM%2020_2017%20Raphael%20Pablo%20de%20Souza%20Barradas.pdf

ENSAIOS DE SURTO DE MANOBRA

As sobretensões de manobra são eventos que ocorrem de forma repentina no circuito e que mudam sua topologia. São fenômenos oriundos do próprio sistema. O bom dimensionamento frente aos estudos prévios de energização e manobra dos transformadores, evitam que danos maiores ocorram, quando das necessidades de manobra e em casos de desligamento por trip dos equipamentos de proteção das linhas e subestações. Uma grande diferença entre o ensaio de impulso atmosférico e surto de manobra, é a duração do fenômeno. A forma de onda para o surto de manobra é 100/1000 μ s, ou seja, o fenômeno ocorre mais lentamente, o que pode estressar ainda mais o isolamento do equipamento. Da mesma forma que o impulso atmosférico, ainda com o mesmo gerador de impulsos, o impulso cuja característica deve ter o formato da figura 14, é aplicado ao transformador.

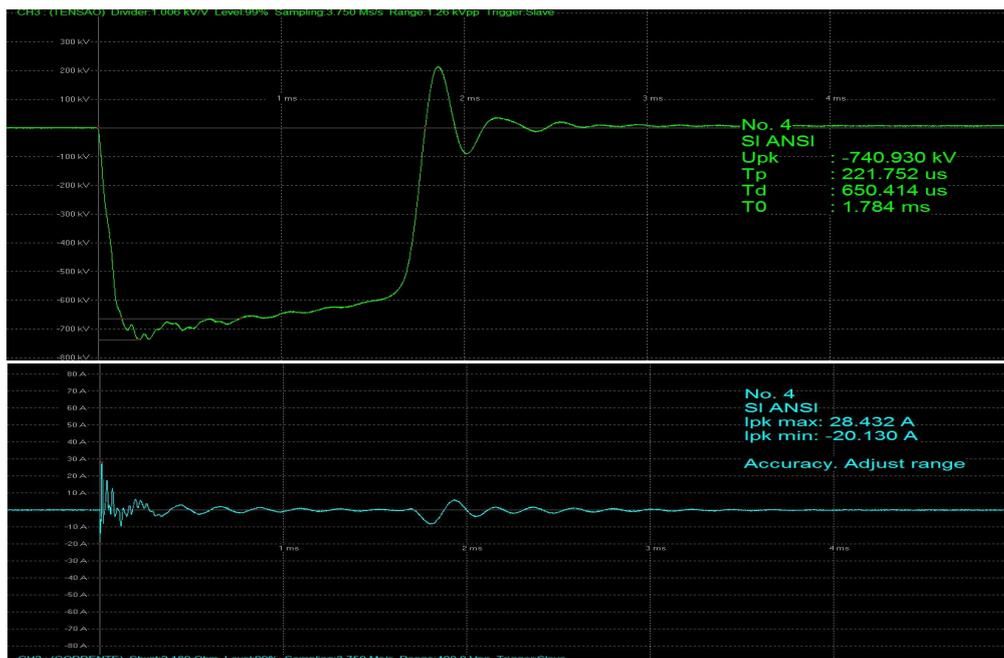
Figura 14 – Forma de onda da tensão e corrente teórica para surto de manobra.



Fonte: ABNT NBR 5356-4, 2007

A forma de onda real do ensaio de surto de manobra é apresentada na figura 15.

Figura 15 – Forma de onda de tensão e corrente obtidas durante ensaio de surto de manobra.



Fonte: O autor

As sobretensões de manobras podem atingir níveis acima de 4 p.u. de tensão. Portanto, representam grande potencial de falha para os equipamentos, embora hajam poucos registros de falhas nessa condição, quando comparadas aos danos causados por descargas atmosféricas.

Referências Bibliográficas

ABB Business Area Power Transformer. **Testing of Power Transformers**. Düsseldorf: Pro Print GmbH, 2003. 296 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1**. Transformadores de Potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 95 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-2**. Transformadores de Potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-3**. Transformadores de Potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 44 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-4**. Transformadores de Potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 39 p.

UNIVERTEC CEFET. **Transformadores: Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência**. Disponível em < http://univertecefetmg.blogspot.com.br/2013/11/toshiba-transformadores-aspectos_19.html>. Acesso em 13 de março de 2019.



Magno Leandro Cardoso Soares - magno.cardoso@outlook.com.br
Atualmente cursando Especialização em Gerenciamento de Projetos pela PUC Minas e Disciplinas Isoladas de Mestrado em Engenharia Elétrica na UFMG e CEFET MG, possui graduação em Engenharia Elétrica (2017) pela Faculdade Pitágoras de Contagem e Curso Técnico em Eletrotécnica (2012) pelo Centro Tecnológico de Contagem. Atua no Departamento de Garantia de Qualidade da TSEA Energia (TOSHIBA), realizando ensaios elétricos de alta tensão em transformadores de potência e reatores shunt desde 2012. Ao todo são nove anos de experiência em transformadores de potência.

 **Deixe-me saber o que achou da palestra respondendo ao questionário abaixo!** 😊 😊
 <https://forms.gle/fz2b1mdsdxQiB8Jh8>