

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

Filipe Belo da Rocha Spezapria

**Métodos de Ensaio Aplicados na Manutenção de
Transformadores de Corrente de Alta Tensão**

**Paraíba - PB
Junho 2017**

FILIPPE BELO DA ROCHA SPPEZAPRIA

**MÉTODOS DE ENSAIO APLICADOS NA MANUTENÇÃO DE
TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica como um dos pré-
requisitos para a obtenção do título em
Bacharel em Engenharia Elétrica sob
orientação do Prof. Rogério Gaspar de
Almeida.**

**Paraíba - PB
Junho 2017**

Filipe Belo da Rocha Sppezapria

**Métodos de Ensaio Aplicados na Manutenção de Transformadores de
Corrente de Alta Tensão**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Fabiano Salvadori (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Helon David de Macedo (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Paraíba – PB
Junho 2017

Dedico este trabalho ao meu pai e à
memória de minha mãe!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir a realização deste trabalho e de mais uma etapa de grande importância em minha vida. Por ter sempre me concedido Sua graça em minha vida.

Agradeço ao meu pai por todo ensinamento, motivação e dedicação imensurável para que eu pudesse sempre prosseguir nesta jornada acadêmica e concluir este trabalho. A ele, que jamais mediu esforços para me proporcionar o melhor e por sempre ter acreditado no meu potencial.

Agradeço a minha mãe por todo carinho, motivação e dedicação como papel de mãe. A ela, quem me viu iniciar este longo caminho e que, no entanto, não pôde presenciar sua conclusão. Mas seus ensinamentos e incentivos permanecerão sempre em minha vida.

A minha namorada, amiga e companheira de todos os momentos que sempre me motivou e confiou na minha capacidade, Nathália Britto.

Também agradeço as amigas que o curso foi capaz de me proporcionar, em especial Gilvan Alves, José Hemerson e Paulo Augusto. Eles que sempre estiveram disponíveis a me ajudar, compartilhando diversos momentos desta trajetória. Mais do que amizade acadêmica, levarei para toda a vida.

Agradeço ainda aos ensinamentos e dedicação do meu Orientador Prof. Dr Rogério Almeida, para que este trabalho pudesse ser realizado. Sempre motivando e auxiliando em todos os aspectos deste trabalho.

Por fim, meus sinceros agradecimentos àqueles que foram peças fundamentais para a realização deste trabalho, desde a troca de conhecimento teórico quanto a realização prática dos experimentos: Engenheiro Emerson Rodrigues de Oliveira e o Engenheiro Cristiano Eustáquio Ferreira.

RESUMO

Neste trabalho são abordados os principais ensaios e métodos de manutenção aplicados aos transformadores de corrente de alta tensão, tendo-se por objetivo descrever e avaliar de modo detalhado estes ensaios, obtendo-se como resultado um documento em forma de instrução de trabalho que segue os padrões e recomendações segundo normas nacionais e internacionais, além da realização prática de tais ensaios, discussão dos resultados e consequências para a operação adequada deste equipamento. Foram utilizados os conceitos e fundamentos correspondentes aos transformadores de corrente respaldando-se em normas nacionais vigentes, a fim de garantir o embasamento necessário para o desenvolvimento deste trabalho. No contexto da fundamentação, estão incluídas as principais características e especificações aplicadas aos transformadores de corrente e que são indispensáveis para a consumação dos ensaios. Por fim, é apresentada a realização prática dos ensaios de manutenção discutidos ao longo do trabalho, com o objetivo de se verificar a execução dos procedimentos, avaliando-se as condições operativas adequadas do equipamento. Os resultados foram analisados e interpretados segundo exigências de normas e fabricantes.

Palavras-Chaves: Transformador de Corrente. Métodos de Ensaio. Manutenção.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1. Representação esquemática de um Transformador de Corrente..... | 18 |
| Figura 2-2. Circuito Equivalente do Transformador de Corrente | 20 |
| Figura 2-3. Marcação de terminais do TC | 22 |
| Figura 2-4. Paralelogramo para classe de exatidão 0,3, 0,3S, 0,6 e 0,6S | 26 |
| Figura 2-5. Paralelogramo para classe de exatidão 1,2 | 27 |
| Figura 2-6. Curva de excitação do Transformador de Corrente | 29 |
| Figura 3-1. DTR 8500 | 33 |
| Figura 3-2. Esquema de ligação DTR-8500 | 34 |
| Figura 3-3. Relação de Transformação Método da Corrente | 35 |
| Figura 3-4. Sistema de prova INGVAR - MEGGER | 37 |
| Figura 3-5. Esquema de ligação INGVAR - MEGGER..... | 38 |
| Figura 3-6. Resistências de Isolamento | 40 |
| Figura 3-7. MEGGER – Medidor de Isolamento | 41 |
| Figura 3-8. Primário contra carcaça guardando secundários..... | 43 |
| Figura 3-9. Primário contra secundários guardando carcaça..... | 44 |
| Figura 3-10. Secundários contra carcaça guardando primário | 45 |
| Figura 3-11. Circuito equivalente simplificado de um isolante | 46 |
| Figura 3-12. Analisador portátil de isolamento M4100 | 48 |
| Figura 3-13. Fator de Potência de Isolamento | 49 |
| Figura 3-14. Ensaio Global de Isolação CA | 50 |
| Figura 4-1. Marcação de terminais do TC ensaiado..... | 53 |
| Figura 4-2. Montagem Ensaio de Relação de Transformação..... | 55 |
| Figura 4-3. Representação Gráfica - Erros de relação Família A..... | 58 |
| Figura 4-4. Representação Gráfica - Erros de relação Família B..... | 58 |
| Figura 4-5. Montagem Ensaio de Resistência de Isolamento..... | 60 |
| Figura 4-6. Representação Gráfica - Fator de Potência de Isolamento FamíliaA | 63 |
| Figura 4-7. Representação Gráfica - Fator de Potência de Isolamento Família B | 63 |
| Figura 4-8. Montagem Ensaio de Fator de Potência de Isolamento | 64 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1. Limites do fator de correção da relação e fator de correção da transformação..... | 24 |
| Tabela 4-1. Valores de relação de transformação TC Família A | 56 |
| Tabela 4-2. Valores de relação de transformação TC Família B..... | 56 |
| Tabela 4-3. Valores de Resistência de Isolamento Família A..... | 59 |
| Tabela 4-4. Valores de Resistência de Isolamento Família B | 59 |
| Tabela 4-5. Resultados do Ensaio de Fator de Potência Família A..... | 61 |
| Tabela 4-6. Resultados do Ensaio de Fator de Potência Família B | 61 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI: *American National Standards Institute*

FCR: Fator de Correção de Relação do TC

FCT: Fator de Correção de Transformação do TC

IEC: International Electrotechnical Commission

RTC: Relação de Transformação nominal do TC

RTC_r: Relação de Transformação real do TC

TC: Transformador de Corrente

TP: Transformador de Potencial

LISTA DE SÍMBOLOS

- β : Ângulo do erro de fase do TC
- \emptyset : Fluxo magnético
- $e(\%)$: Erro percentual de relação do TC
- C_p : Capacitância paralela equivalente do isolamento do TC
- $E_c(\%)$: Erro percentual de corrente composto
- E_{ie} : Força eletromotriz limite de exatidão para proteção
- F_{ie} : Fator limite de exatidão
- F_1 : Força magnetomotriz no primário do TC
- F_2 : Força magnetomotriz no secundário do TC
- I_c : Corrente capacitiva
- I_p : Valor eficaz da corrente primária do TC
- i_s : Valor instantâneo da corrente secundária do TC
- i_p : Valor instantâneo da corrente primária do TC
- I_e : Corrente de excitação do TC
- I_R : Corrente resistiva
- I_1 : Corrente primária no TC
- I_2 : Corrente secundária no TC
- I_T : Corrente total do equipamento
- N_1 : Número de espiras do primário do TC
- N_2 : Número de espiras do secundário do TC
- \mathcal{R} : Relutância magnética
- R_n : Relação nominal do TC
- R_1 : Resistência do enrolamento primário
- R_2 : Resistência do enrolamento secundário
- R_0 : Resistência referente às perdas no ferro do núcleo
- R_p : Resistência paralela equivalente do isolamento do TC
- R_c : Resistência da carga nominal do TC
- R_{tc} : Resistência corrigida a 75°C
- T : Duração de um ciclo da corrente primária do TC

- X_1 : Reatância de dispersão do enrolamento primário
- X_2 : Reatância de dispersão do enrolamento secundário
- X_0 : Reatância de magnetização do núcleo
- X_c : Reatância de carga nominal do TC
- X_{tc} : Reatância do enrolamento secundário do TC
- Z_c : Carga conectada ao secundário
- Z_s : Carga do sistema

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. Motivação | 15 |
| 1.2. Objetivos..... | 15 |
| 1.2.1. Objetivos Específicos | 15 |
| 1.3. Organização do Trabalho..... | 16 |
| 2. EMBASAMENTO TEÓRICO | 17 |
| 2.1. Normas Associadas | 17 |
| 2.2. Transformador de Corrente | 17 |
| 2.2.1. Relação de Transformação | 19 |
| 2.2.2. Circuito equivalente..... | 20 |
| 2.2.3. Marcação de terminais do TC..... | 21 |
| 2.2.4. Erros do TC | 22 |
| 2.2.5. TC para serviço de Medição | 23 |
| 2.2.6. TC para serviço de Proteção | 28 |
| 2.2.6.1. Fator Limite de Exatidão | 28 |
| 2.2.7. Curva de Excitação do TC..... | 28 |
| 3. ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE | 31 |
| 3.1. Ensaio de Relação de Transformação..... | 31 |
| 3.1.1. Método da Tensão | 32 |
| 3.1.2. Método da Corrente | 35 |
| 3.2. Ensaio de Resistência de Isolamento..... | 38 |
| 3.3. Ensaio de Medição do Fator de Potência..... | 45 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 52 |
| 4.1. Características dos TCs Analisados..... | 52 |
| 4.2. Ensaio práticos | 53 |
| 4.2.1. Resultados do Ensaio de Relação de Transformação | 53 |
| 4.2.2. Resultados do Ensaio de Resistência de Isolamento | 59 |
| 4.2.3. Resultados do Ensaio de Medição do Fator de Potência..... | 61 |

| | |
|--|-----------|
| 5. CONCLUSÃO..... | 65 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado da demanda no sistema elétrico de potência acarreta a utilização de níveis de tensão e corrente cada vez mais elevados. Com isso, se faz necessária a existência de dispositivos que possam reduzir, tantas vezes quanto necessário, os valores dessas grandezas elétricas de forma que se adequem aos níveis dos instrumentos de medição, proteção e controle.

Os Transformadores para instrumentos são equipamentos integrantes do sistema elétrico e fazem parte dos elementos fundamentais para o funcionamento do sistema. De acordo com a norma ABNT NBR 6546 (2015), são transformadores com responsabilidade de alimentar os instrumentos de medição, dispositivos de controle e proteção. Fazem parte deste grupo, os transformadores de corrente – TC e os transformadores de potencial – TP.

Sendo considerados componentes de grande importância para ao sistema, estes equipamentos devem passar por processos de manutenções periódicas a fim de garantir operações em condições adequadas. Como forma de avaliar as condições de determinado equipamento de modo a evitar falhas, são utilizadas técnicas de manutenção preventivas e preditivas, realizadas por meio de ações de controle e monitoramento fazendo com que seja possível manter o desempenho da função dos equipamentos.

Entre as técnicas de manutenção aplicadas aos equipamentos, se tem a manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Manutenção preventivas e preditivas são realizadas com o intenção de evitar as manutenções corretivas, tendo em vista que estas ocasionam custos, desligamentos no sistema e prejuízos financeiros às empresas.

Segundo Aguiar (2011), entre os métodos de manutenção aplicados aos transformadores de instrumentos, destacam-se os ensaios elétricos de campo, sendo este dividido em ensaios de corrente alternada e ensaios de corrente contínua. Para os ensaios de corrente alternada se tem ensaios de relação e transformação e ensaio de fator de potência de isolamento. Já para corrente contínua são utilizados em maior abrangência os ensaios para medição da resistência de isolamento.

Como escopo deste trabalho, se tem a abordagem e estudo dos itens de manutenção relacionados aos Transformadores de Corrente.

1.1. Motivação

Para a realização de um ensaio, podem ser utilizadas diferentes metodologias, formas e procedimentos, mas que no fim, tendem a alcançar o mesmo objetivo. A não padronização e uniformização de um documento baseado nas normas nacionais e internacionais, capaz de descrever e reunir os principais ensaios e métodos de manutenção mais utilizados, faz com que as empresas integrantes do setor elétrico, realizem as manutenções sem roteiros e procedimentos pré-definidos, baseando-se apenas na experiência da equipe e históricos da empresa.

Dúvidas são geradas com relação ao desempenho e resultados finais dos diferentes testes aplicados aos equipamentos, sobretudo, qual maneira e como seguir, tendo em vista que não se possui a uniformização para os diferentes métodos aplicados. Dessa forma, este trabalho pretende descrever os procedimentos para realização dos principais ensaios de manutenção aplicados aos transformadores de corrente e investigar seus resultados perante valores definidos por norma ou fabricantes.

1.2. Objetivos

Como propósito deste trabalho, visa-se abordar, avaliar e descrever de forma detalhada os principais ensaios e métodos de manutenção aplicados aos transformadores de corrente, obtendo-se como resultado um documento em forma de instrução de trabalho que segue os padrões e recomendações das normas nacionais e internacionais, além da realização prática de tais ensaios e discussão dos resultados e consequências para a operação adequada do equipamento.

1.2.1. Objetivos Específicos

Neste trabalho pretende-se desenvolver as seguintes ações:

- Compreender e caracterizar a operacionalidade dos transformadores de corrente, assim como os ensaios a eles associados;

- Utilizar instrumentos distintos em aspectos de metodologia e fabricação, para a realização dos ensaios de manutenção em transformadores de corrente;
- Descrever de maneira clara e detalhada os métodos de ensaios aplicado aos mesmos;
- Analisar e interpretar os resultados e dados obtidos segundo exigências de normas nacionais e internacionais.

1.3. Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em 4 capítulos, seguindo a estrutura e ordem a seguir:

- O Capítulo 2 tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica relacionada aos Transformadores de Corrente de Alta Tensão. Serão apresentados as características, especificações e conceitos necessários para o entendimento dos capítulos seguintes, tomando-se como base normas nacionais e internacionais vigentes. Ainda como objetivo, descrever os principais itens referentes aos transformadores de corrente segundo última atualização da NBR relacionada.
- No Capítulo 3 são apresentados e descritos detalhadamente os métodos de ensaio aplicados aos Transformadores de Corrente, segundo recomendações de fabricantes e normas relacionadas. Como objetivo principal deste trabalho se tem a descrição dos procedimentos dos ensaios designados aos Transformadores de Corrente.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados da realização prática dos ensaios de manutenção e discussão dos resultados e consequências para a operação adequada do equipamento.
- O Capítulo 5 expõe as conclusões referentes aos resultados obtidos neste trabalho e perspectivas para trabalhos futuros.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica correspondente aos transformadores de corrente de alta tensão. Deste modo, estão incluídas no contexto, as características e especificações aplicadas a estes equipamentos segundo norma nacional vigente, a fim de garantir o embasamento necessário para o desenvolvimento deste trabalho, bem como, realizar uma síntese dos principais itens descritos por norma.

2.1. Normas Associadas

Este trabalho segue as atribuições da norma ABNT NBR 6856 – Transformador de corrente – Especificação e ensaios (2015). Esta norma substitui a NBR 6856/1992, e em sua nova versão, trata das especificações e ensaios aplicados a estes equipamentos. A NBR atende também aos requisitos especificados segundo normas internacionais, como IEC 60044-1: Transformador de Corrente (2003).

Ao longo deste capítulo serão tratados os fundamentos teóricos de maior relevância para o escopo deste trabalho, definidos conforme ABNT NBR 6856. Além disso, serão expostos os principais itens segundo sua última atualização, no que se refere aos conceitos dedicados aos transformadores de corrente, tendo em vista o desprovimento de documentos e referências existentes relacionadas aos transformadores de corrente baseados na última atualização desta norma.

2.2. Transformador de Corrente

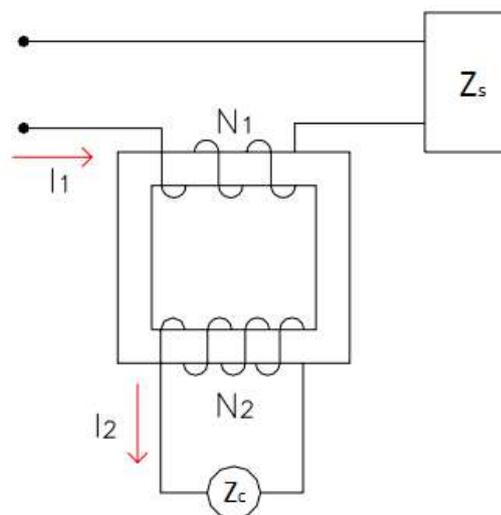
Este equipamento é destinado a realizar a redução das elevadas correntes do sistema elétrico, a valores apropriados para conexão, funcionamento e operação de instrumentos de medição, proteção e controle. Possui seu enrolamento primário conectado em série ao sistema, devendo, portanto, ser capaz de fornecer em seus enrolamentos secundários, corrente de menor intensidade compatível aos instrumentos de medição, controle e proteção, garantindo a reprodução coerente e proporcional da corrente primária.

Conforme NBR 6856 (2015), tem-se como definição para o TC, um transformador que possui enrolamento primário ligado em série em um circuito elétrico, sendo capaz de reproduzir no seu circuito secundário, em condições normais de operação, uma corrente proporcional à do seu primário, com a posição fasorial substancialmente mantida. Estes transformadores podem ser destinados a proteção ou medição.

Além de fornecer no secundário, correntes de amplitude adequada para serem usadas pelos sistemas de medição, proteção e controle, o transformador de corrente possui também a função de garantir isolamento dos equipamentos conectados no circuito secundário, contra o circuito primário de alta tensão (Kindermann, 2005).

Na Figura 2-1 observa-se a representação esquemática do TC em operação, sendo a corrente do sistema elétrico (primário) I_1 , e a corrente secundária I_2 . A impedância Z_s corresponde a carga do sistema de potência, e em contrapartida, Z_c equivale a impedância de todas as cargas conectadas ao secundário.

Figura 2-1. Representação esquemática de um Transformador de Corrente



Fonte: (Júnior, F. S., Gabriel, L, & Damasceno, 2013).

A corrente que passa pelo enrolamento primário do transformador de corrente é consequência da carga do sistema. Devido a sua conexão primária estar em série com o sistema de potência, a impedância do transformador de corrente é desprezível quando comparada com a impedância do circuito de potência e com isso a corrente no secundário não será afetada pela mudança da impedância de carga em uma faixa considerável (Rush, 2011).

2.2.1. Relação de Transformação

Os princípios de funcionamento dos TCs são semelhantes aos transformadores de potência, possuindo como distinção, por exemplo, aspectos construtivos, forma como são conectados ao sistema e a sua finalidade. Devido a semelhança, os mesmos fundamentos relacionados ao eletromagnetismo, são aplicados aos TCs.

A relação existente entre corrente que passa nas bobinas e número de espiras é diretamente proporcional e reproduzem uma força magnetomotriz no primário (F_1) e secundário do Transformador. A força magnetomotriz no secundário (F_2) tende a se opor de forma a desmagnetizar o núcleo e, portanto possui sinal contrário a força magnetomotriz no enrolamento primário.

O núcleo possui uma relutância \mathcal{R} e um fluxo magnético ϕ associado, assim tem-se:

$$F_1 - F_2 = \mathcal{R} \cdot \phi \quad (2.1)$$

Sendo a relutância de um circuito magnético inversamente proporcional a permeabilidade magnética do material, considera-se que o núcleo possui alta permeabilidade e portanto, relutância próxima de zero. Assim, conclui-se que:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \quad (2.2)$$

Sendo N_1 a quantidade de espiras no primário (normalmente igual a 1), N_2 a quantidade de espiras do enrolamento secundário, I_1 a corrente do circuito primário (do sistema) e I_2 a corrente do circuito secundário do TC.

Manipulando a expressão (2.2) de forma a se obter a corrente no secundário do TC, tem-se:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (2.3)$$

Sendo portanto, a relação de transformação do TC (RTC) definida como:

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.4)$$

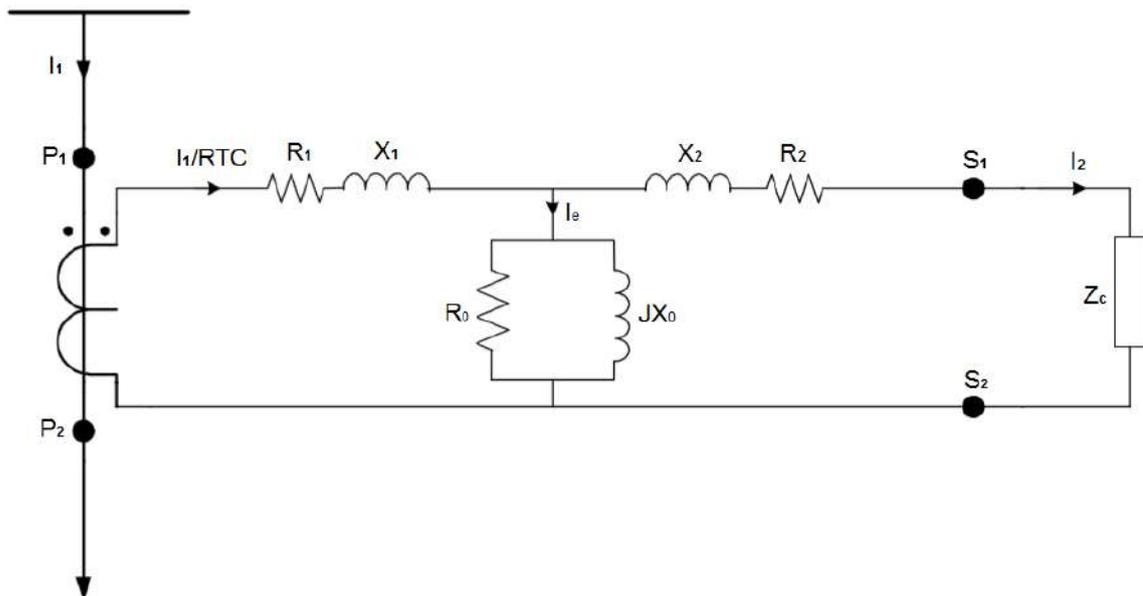
Segundo Fonseca (2014), a expressão anterior pode ser ainda escrita como sendo função das tensões induzidas no primário (E_1) e secundário (E_2), conforme descreve a equação (2.5).

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.5)$$

2.2.2. Circuito equivalente

O circuito equivalente do TC pode ser visto na Figura 2-2.

Figura 2-2. Circuito Equivalente do Transformador de Corrente



Fonte: (Hojo T. & Maezono P., 2012).

Onde:

R_1 : Resistência do enrolamento primário.

R_2 : Resistência do enrolamento secundário.

X_1 : Reatância de dispersão do enrolamento primário.

X_2 : Reatância de dispersão do enrolamento secundário.

R_0 : Resistência referente às perdas no ferro do núcleo.

X_0 : Reatância de magnetização do núcleo.

Z_c : Carga conectada ao secundário.

O núcleo do TC é representado pelo ramo em derivação formado por R_0 e X_0 . Onde o enrolamento primário possui como terminais P_1 e P_2 e o enrolamento secundário S_1 e S_2 .

De acordo com a relação de espiras, no transformador ideal, a corrente primária deveria ser transformada para o secundário resultando apenas na corrente de carga. No entanto a corrente primária ao ser transformada para o secundário é constituída ainda, pela parcela de corrente correspondente ao núcleo I_e , além da corrente circulante através da carga I_2 , conforme segue (Cristina, S.C., 2010):

$$I_1' = I_2 + I_e \quad (2.6)$$

Ou ainda, para a carga, tem-se:

$$I_2 = I_1' - I_e = \frac{I_1}{RTC} - I_e \quad (2.7)$$

Conforme se verifica na equação (2.7), a corrente de excitação é responsável por não garantir a relação direta entre corrente primária e relação de transformação, desta forma, I_e representa o erro que a corrente de carga possui. Este erro é constituído pelo erro de relação e erro de fase.

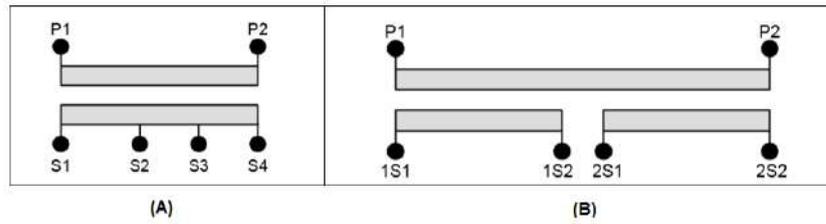
2.2.3. Marcação de terminais do TC

A NBR 6856 (2015) define o procedimento de marcação de terminais dos TCs. Os TCs podem ser projetados para possuírem uma certa quantidade de enrolamentos secundários de acordo com a necessidade de aplicação. Desta forma, o TC poderá ser destinado a circuitos de proteção e medição e com a utilização de enrolamentos secundários distintos.

Na Figura 2-3, tem-se dois exemplos dos diversos tipos de marcações normatizados pela NBR. Na Figura 2-3 (A) se tem um TC de várias relações de transformação, com derivações no secundário. Neste caso o TC possui um núcleo no primário e um núcleo no secundário, sendo que temos no secundário derivações para distintas utilizações e finalidades.

Já na Figura 2-3 (B) se tem um TC com dois enrolamentos secundários. O que significa, que este TC possui um núcleo que constitui o circuito primário e dois núcleos no secundário, podendo ser utilizados para circuitos distintos, ou seja, proteção ou medição.

Figura 2-3. Marcação de terminais do TC



Fonte: (ABNT NBR 6856, 2015)

Cada enrolamento secundário da figura 2-3 (B) pode ainda possuir derivações, de acordo com a necessidade de relação nominal do local de instalação e carga aplicada. Estas marcações são de fundamental importância para o entendimento do processo de ensaios comentados e utilizadas no capítulo 3.

2.2.4. Erros do TC

Devido a influência da corrente de excitação na medição da corrente primária, a relação nominal do TC será distinta da relação de transformação real, assim como também ocorrerá para a fase entre as correntes primárias e secundárias.

- **Erro de Relação**

A fim de se verificar o valor real da relação de um transformador de corrente, é conveniente utilizar o fator de correção de relação, que é dado pelo quociente da relação de transformação real (RTC_r) e a relação nominal de placa (RTC) (Frontin, S. O., 2013):

$$FCR = \frac{I_2 + I_e}{I_2} = \frac{RTC_r}{RTC} \quad (2.8)$$

Com a relação nominal de transformação obtida pela placa dos TCs, pelo produto do fator de correção de relação, é possível encontrar a relação real de transformação.

O erro percentual de relação de espiras pode ser obtido pela expressão 2.9 que relaciona a relação medida e a relação nominal do TC:

$$e(\%) = \frac{RTC_r - RTC}{RTC} 100 \quad (2.9)$$

Qualquer método de ensaio utilizado para obtenção da relação de transformação e consequentemente o erro de relação de um transformador de corrente, deverá fornecer valores suficientemente precisos para que sejam válidos para a finalidade correspondente. A tolerância normalizada do erro para ensaios de rotina (aqueles no qual realizam-se após a entrada do equipamento em operação), deverá possibilitar medidas com variação máxima (erro) permitida de $\pm 0,5\%$ (Paulino, M. E. C., 2012).

- **Erro de Fase**

Frontin (2013), ainda relata que o TC possui um erro de fase a ser considerado, que representa a defasagem entre a corrente vetorial primária e o inverso da corrente vetorial secundária. Este erro ocasiona mudança da relação de fase entre corrente e tensão do secundário ao ser comparada com relação de fase entre corrente e tensão do primário. Isto implica na adição de um erro associado na medição que se está efetuando.

O erro de fase é representado por um ângulo β (também definido em algumas referências por γ). Para qualquer fator de correção de relação conhecido de um TC, os valores limites positivos e negativos de β em minutos podem ser dados pela expressão 2.10 (VVC, 2013):

$$\beta = 2600(FCR - FCT) \quad (2.10)$$

Onde:

FCR – Fator de Correção de Relação

FCT – Fator de Correção de Transformação percentual

Este último corresponde ao fator no qual se deve multiplicar a leitura registrada por um wattímetro ou medidor de energia elétrica ativa, conectado aos terminais de um TC, a fim de corrigir o efeito combinado do FCR e de ângulo de fase.

2.2.5. TC para serviço de Medição

Os TCs destinados para serviço de medição possuem como principal característica manter a fidelidade da corrente a ser medida no primário, apresentando erros mínimos de medição. São utilizados em aplicações que requerem cuidado especial quanto a garantia de exatidão entre valores primário e secundário para correntes de cargas.

Para os serviços de medição, na ocorrência de um curto-circuito, não existe a necessidade que esta elevada corrente de curto, seja transformada com exatidão. Normalmente os TCs de medição tendem a saturar para níveis de curto-circuito, garantindo de certa forma a proteção dos equipamentos conectados no seu secundário. Sendo assim, os TCs de medição devem operar e garantir sua exatidão para correntes de cargas do sistema (Hojo T., & Maezono P., 2012).

Segundo NBR 6856 (2015), os transformadores de corrente para serviços de medição devem manter sua classe de exatidão na faixa de 10 a 100 % da corrente nominal e garantir erros mínimos de relação e de ângulo de fase. A norma define os valores das classes de exatidão (em porcentagem), no qual os transformadores devem estar enquadrados. São eles: 0,3 – 0,6 – 1,2 – 3,0.

As classes de exatidão padrão determinam os limites para os fatores de correção relacionados aos TCs de medição conforme Tabela 2.1.

Para situações específicas, a norma estabelece classes especiais para os serviços de medição. Onde para estes casos, se tem grande variação nos valores da corrente primária nominal em operação e com isso são divididos em: 0,3S e 0,6S. Tendo como limites, a faixa de 5 a 20 % da corrente nominal, onde devem manter o erro correspondente a classe de exatidão.

Tabela 2-1. Limites do fator de correção da relação e fator de correção da transformação

| Classe de Exatidão | Limites dos fatores de correção de relação e transformação | | | |
|--------------------|--|--------|-------------------------|--------|
| | 100% da corrente nominal | | 10% da corrente nominal | |
| | Mínimo | Máximo | Mínimo | Máximo |
| 0,3 | 0,988 | 1,012 | 0,976 | 1,024 |
| 0,6 | 0,994 | 1,006 | 0,988 | 1,012 |
| 1,2 | 0,997 | 1,003 | 0,994 | 1,006 |

Fonte: (Frontin, S. O., 2013).

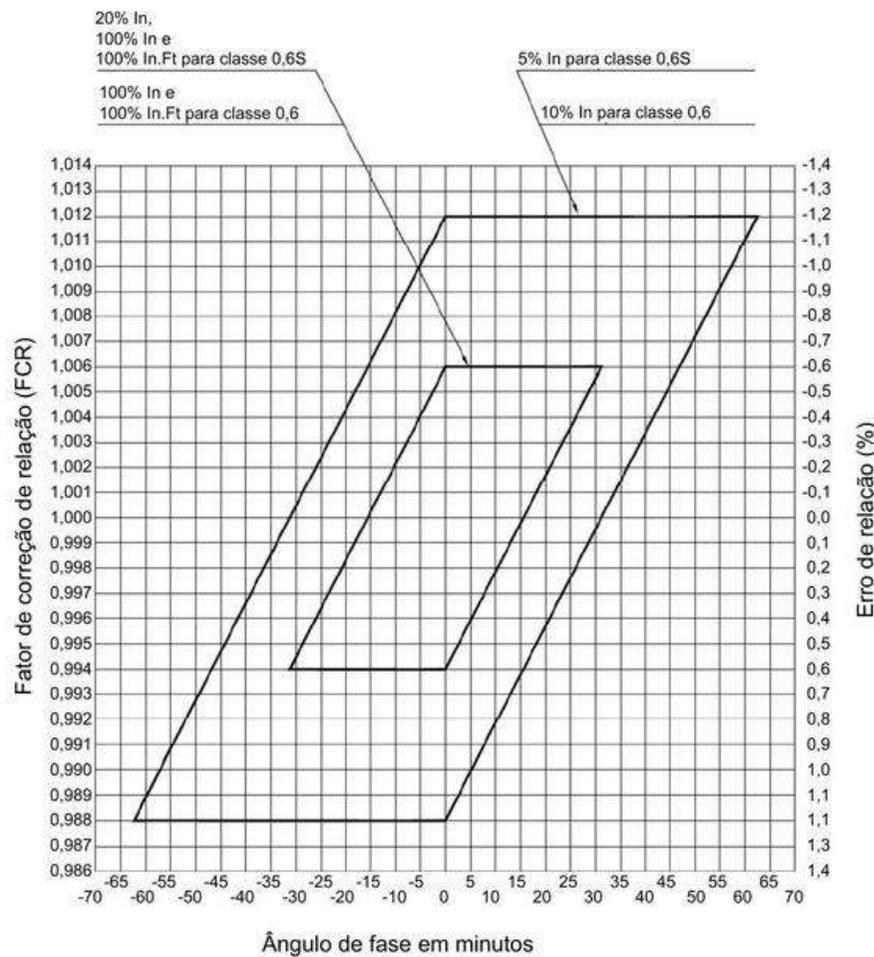
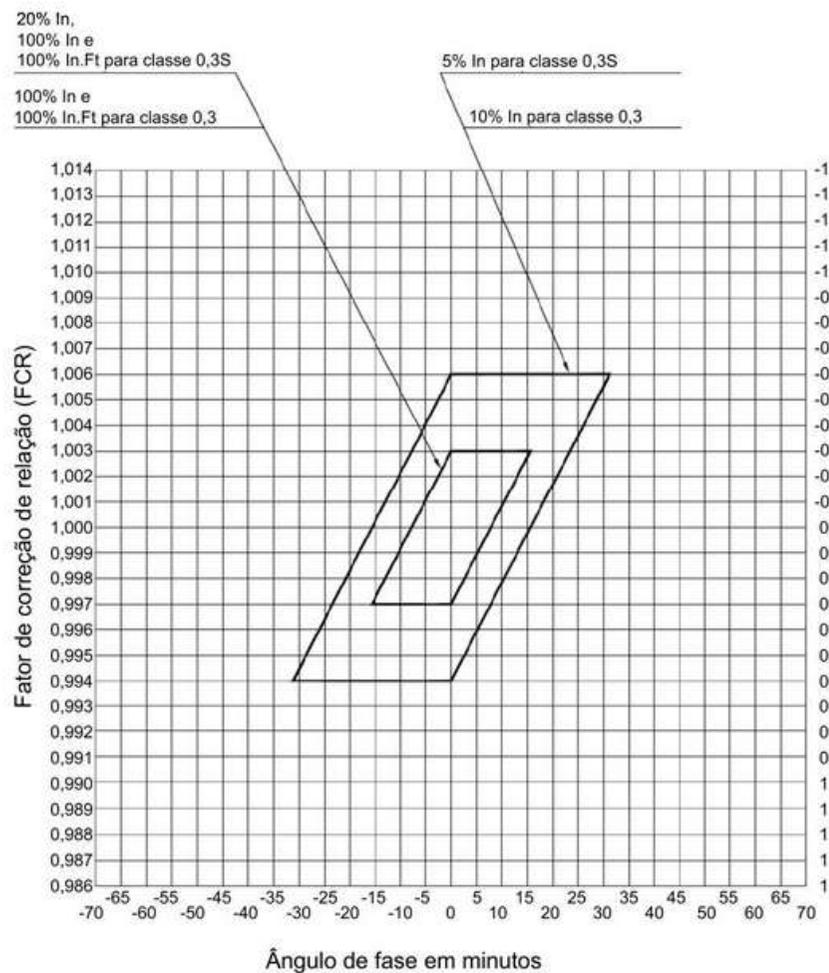
Para a classe de exatidão 3, não existe limitação de ângulo de fase e, portanto, esta classe é considerada atendida quando o fator de correção de relação (FCR) estiver entre os limites de 1,03 e 0,97.

O TC se enquadrará em sua classe de exatidão, quando garantir os limites especificados na Tabela 2.1 e também o erro de fase β . De forma a relacionar estes dois tipos de erros existentes para serviço de medição, a NBR 6856 (2015) utiliza os paralelogramos de exatidão demonstrados nas Figuras 2-3 e 2-4, a fim de caracterizar os limites para cada classe de exatidão.

As classes podem ser verificadas por meio de dois paralelogramos. Sendo um interno (menor) e outro externo (maior). O interno refere-se a corrente de 100% da nominal para as classes 0,3, 0,6 e 1,2 e o paralelogramo externo corresponde aos 10% da corrente nominal.

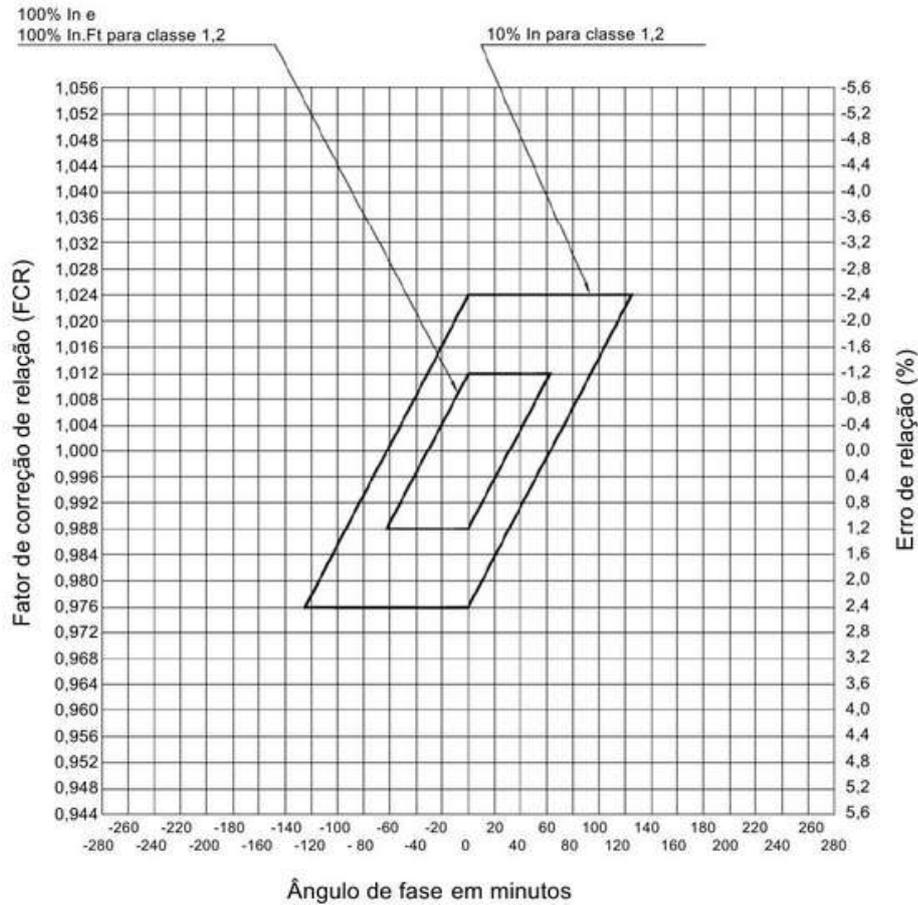
Os paralelogramos relacionam ângulos de fase em minutos, FCR e erro de relação. Estando um determinado TC de medição incluso entre os limites internos e externos, este possuirá sua classe de exatidão garantida. Nas figuras 2-4 e 2-5 são mostrados os paralelogramos para as diferentes classes de exatidão dos TCs.

Figura 2-4. Paralelogramo para classe de exatidão 0,3, 0,3S, 0,6 e 0,6S



Fonte: (ABNT NBR 6856, 2015).

Figura 2-5. Paralelogramo para classe de exatidão 1,2



Fonte: (ABNT NBR 6856, 2015).

Cada classe de exatidão assume quatro valores fixos de fator de transformação FCT, sendo dois correspondentes a 10% da corrente nominal e dois correspondentes a 100% da corrente nominal, como exemplo (VVC, 2013):

Classe 0,6:

FCT = 1,006 e 0,994 – 100% da corrente nominal;

FCT = 1,012 e 0,998 – 10% da corrente nominal;

Conforme FCT varia, obtêm-se os valores negativos e positivos do ângulo β em minutos.

2.2.6. TC para serviço de Proteção

Quando destinados a serviço de proteção, os TCs devem funcionar adequadamente para níveis de correntes elevadas, dentro de suas limitações, sendo a saturação do seu núcleo magnético ocasionada para níveis de curto-circuito acima da máxima corrente admitida.

Diferente da forma como ocorre para os TCs de serviços de medição, os de proteção possuem como característica fundamental, a capacidade de não saturar até determinados limites, na ocorrência de elevadas correntes de sobrecargas ou curtos-circuitos.

Os TCs possuem sua classe de exatidão dada em função do erro composto do percentual mais alto permitido, na corrente nominal primária do limite de exatidão, de acordo com a classe em questão (ABB, 2013).

2.2.6.1. Fator Limite de Exatidão

O fator limite de exatidão é aplicado exclusivamente a núcleos de transformadores destinados a proteção. Este fator relaciona a corrente máxima primária e a corrente nominal primária. Corresponde ao fator que multiplicado pela corrente primária nominal do TC, resultará em uma corrente máxima permitida, que satisfaça os requisitos de erro composto de corrente.

Os fatores limites de exatidão padronizado pela NBR 6856 (2015) são: 5, 10, 15, 20 e 30.

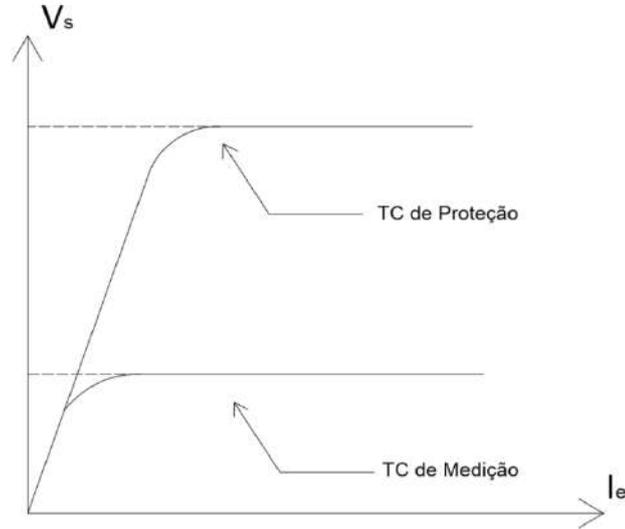
2.2.7. Curva de Excitação do TC

Por meio da curva de excitação do TC, é possível demonstrar a relação existente entre o valor eficaz da corrente de excitação e o valor eficaz da força eletromotriz aplicada aos terminais secundários de um TC, estando o primário aberto.

A tensão secundária do TC será limitada pela saturação. Por meio da Figura 2-5 observa-se a curva de saturação correspondente aos TCs de proteção e medição. Esta curva possui uma relação entre tensão nos terminais secundários (força eletromotriz) e corrente de

excitação, com característica linear até determinado valor de tensão. A partir deste valor de tensão, o TC satura e deixa de operar de maneira coerente.

Figura 2-6. Curva de excitação do Transformador de Corrente



Fonte: Do Autor.

A NBR 6856 (2015) atribui termos associados a esta força eletromotriz ilustrada na Figura 2-5:

- **Força eletromotriz do ponto de joelho**

O ponto de joelho corresponde a parcela da curva onde ocorre a transição da região linear para região de saturação. A força eletromotriz do ponto de joelho corresponde ao valor eficaz da força eletromotriz com frequência nominal aplicada aos terminais do TC, onde um acréscimo de 10% da tensão causará um aumento de 50% da corrente de excitação.

- **Força eletromotriz limite de exatidão para proteção**

Esta força é definida como o produto do fator limite de exatidão pela corrente secundária nominal e pela soma vetorial da carga nominal e impedância do enrolamento secundário, como mostra a equação (2.11).

$$E_{ie} = F_{ie} \times I_s \times \sqrt{(R_c + R_{tc})^2 + (X_c + X_{tc})^2} \quad (2.11)$$

Onde:

R_c - Resistência da carga nominal do TC

X_c - Reatância de carga nominal do TC

R_{tc} - Resistência corrigida a 75°C

X_{tc} - Reatância do enrolamento secundário do TC

O objetivo deste capítulo foi retratar os principais elementos da fundamentação teórica relacionadas aos transformadores de corrente. Foram demonstradas as características e especificações aplicáveis a estes equipamentos, nos quais são imprescindíveis para o entendimento do próximo capítulo.

Além disso, teve-se o propósito de expor os principais itens segundo a última atualização da norma NBR 6856 (2015), no que se refere aos fundamentos, orientações e ensaios aplicados aos transformadores de corrente.

No capítulo 3 serão apresentados e descritos detalhadamente os principais métodos de ensaios aplicados aos transformadores de corrente, responsáveis pela verificação, análise e diagnóstico do equipamento, seguindo orientações e recomendações de fabricantes e normas relacionadas.

3. ENSAIOS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Neste capítulo são demonstrados detalhadamente os principais tipos de ensaios aplicados aos transformadores de corrente, seguindo orientações e recomendações de fabricantes e normas vigentes.

Os ensaios são responsáveis pela verificação e análise do estado do equipamento. Cada ensaio possui uma finalidade diferente, no entanto possuem o resultado comum de validação da situação operacional do equipamento. Sendo assim, sua aplicação e realização torna-se imperiosa nas atividades de manutenção dos transformadores de corrente.

3.1. Ensaio de Relação de Transformação

A fim de verificar a relação entre espiras do enrolamento primário e secundário, é realizado o ensaio de relação de transformação. Por meio deste teste, é possível analisar o estado dos enrolamentos do transformador, se existe algum curto entre espiras ou ainda, se os enrolamentos estão abertos.

Conforme IEEE C57.13.1-2006, o ensaio de Relação de Transformação pode ser realizado de duas maneiras distintas para o TC fora de serviço. Onde, as duas técnicas possuem o mesmo propósito, medição da relação de transformação.

Uma das alternativas é realizar o teste de relação por meio do método da tensão. Este método consiste da utilização de um instrumento como auxílio, responsável pela aplicação de tensão em um dos terminais do TC (secundário) e verificação da tensão no outro terminal (primário). Com isso, torna-se possível se obter o valor da relação de transformação e erros associados.

A outra forma de ensaio, é pelo método da corrente. Nesta alternativa se tem a simulação do TC em estado real de operação, ou seja, será aplicado aos seus terminais primário um determinado nível de corrente AC e medido o valor correspondente ao secundário. Portanto, sendo possível também a obtenção do valor da relação de transformação assim como os erros associados.

As duas formas serão detalhadas a seguir.

3.1.1. Método da Tensão

A relação de transformação é aproximadamente igual a relação entre tensão primária e secundária. Os TCs de Alta Tensão, estão conectados em série ao sistema e normalmente possuem o circuito primário constituído por uma única espira, ou seja, representado pela própria barra conectada aos terminais P1 e P2. Devido a isso, tem-se o primário praticamente em curto e a tensão primária do TC é baixa comparada com o nível de tensão do sistema ao qual está conectado, conforme Figura 3-2.

Para a realização deste ensaio, é aplicado um nível de tensão por meio de uma fonte CA nos terminais do secundário do TC e lê-se a tensão apresentada no primário. A tensão lida nos terminais primário do TC é relativamente inferior à tensão aplicada nos terminais secundários.

De acordo com a equação 2.5, a relação de transformação pode ser obtida em função das tensões induzidas no primário e secundário do TC.

Na prática, o que se tem são valores de tensão aplicada aos terminais secundários e tensão medida nos terminais primários, que de acordo com Almeida (2000), em transformadores monofásicos a relação entre essas tensões é aproximadamente igual ao da relação de transformação. Considera-se também que o ensaio é capaz de medir com alto índice de precisão a relação entre as tensões.

- *Instrumento de Medição Utilizado*

O teste de relação de transformação pode ser realizado utilizando-se o TTR (que significa *Transformer Turn Ratio* na linguagem em Inglês). É um equipamento amplamente utilizado para a realização deste tipo de ensaio em grandes empresas do setor elétrico.

O TTR tradicional utiliza a comparação entre um transformador padrão (interno ao instrumento) com o transformador sob ensaios, a excitação é feita manualmente através de uma manivela (gerador) e o equilíbrio entre a relação do transformador padrão com o transformador sob ensaios é determinada pelo equilíbrio nulo (zero) indicado em um galvanômetro (Aguiar, 2012).

Todavia, a maioria dos instrumentos utilizados atualmente são modelos digitais e possuem funcionamento automático, sendo fornecido diretamente o valor da relação e da

corrente de excitação, dependendo do modelo a ser utilizado. No entanto, o conceito aplicado, procedimento e modo de ligação se mantêm para o TTR digital, devendo-se garantir ainda a correta ligação do esquema associado para o correto funcionamento.

O equipamento a ser utilizado para a representação da medição de relação de transformação neste trabalho é o DTR-8500 (Figura 3-1) da AEMC, que possui funcionamento automático e utiliza os métodos descritos pela norma IEEE Std C57.13.1-2006 para a realização do ensaio. Quando conectado ao TC, o equipamento mede com exatidão a relação de espiras, exibindo a relação de espiras e a corrente de excitação do circuito.

Figura 3-1. DTR 8500



Fonte: (AEMC Instruments, 2016).

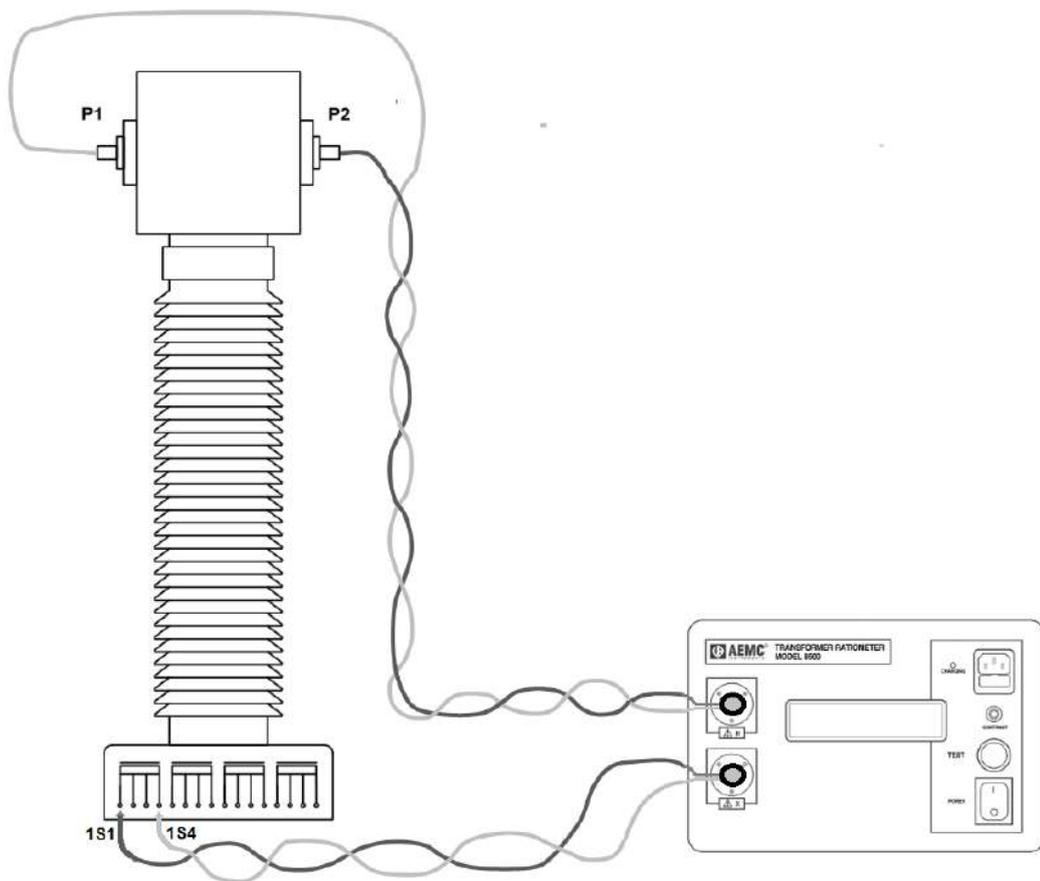
O DTR-8500 pode ser utilizado para a medição de relação em transformadores de potência, transformadores de corrente e transformadores de potencial. Assim como o DTR-8500, outros equipamentos com o mesmo princípio podem ser utilizados para a realização do ensaio.

O processo de ensaio utilizado pelo equipamento garante maior segurança ao operador. São realizados com baixa tensão (secundário), sendo a tensão que surge no outro enrolamento (primário), ainda menor.

- *Procedimento de Ensaio com o DTR-8500:*
 - a) Conectam-se os cabos relacionados a baixa tensão (X) do DTR-8500 nos terminais secundários (S1 e S4 por exemplo) do TC;
 - b) Conectam-se os cabos de terminação (H) do DTR-8500 nos terminais primários (P1 e P2) do TC;
 - c) Aplica-se uma tensão nos terminais secundários (S1 e S4), abaixo da tensão de saturação, de forma que seja apropriada para a realização dos testes;

- d) A tensão primária é lida com um Voltímetro;
- e) Com relação entre tensão aplicada nos terminais secundários e tensão lida nos terminais primários, é obtida a relação de espiras do TC. De acordo com Figura 3-2.

Figura 3-2. Esquema de ligação DTR-8500



Fonte: Do Autor.

A relação poderá ser medida para cada enrolamento secundário.

Os TCs utilizados para demonstração e ilustração neste trabalho seguirão o padrão conforme figura 2-3, sendo um tipo mais específico, possuindo cinco enrolamentos secundários com derivações, ou seja, podendo ser destinados a alimentação e utilização de cinco circuitos distintos. As derivações em cada núcleo são utilizadas de acordo com a relação nominal requerida e carga alimentada.

Devido a relação inversa existente nos transformadores para instrumentos, a tensão deverá sempre ser aplicada aos terminais secundários, uma vez que a tensão lida no primário será inferior a esta aplicada. Caso seja adotado o procedimento inverso, aplicando-se tensão

nos terminais primários, surgirá um nível de tensão proporcionalmente elevado no secundário, colocando em risco a integridade de equipamentos e pessoas envolvidas.

3.1.2. Método da Corrente

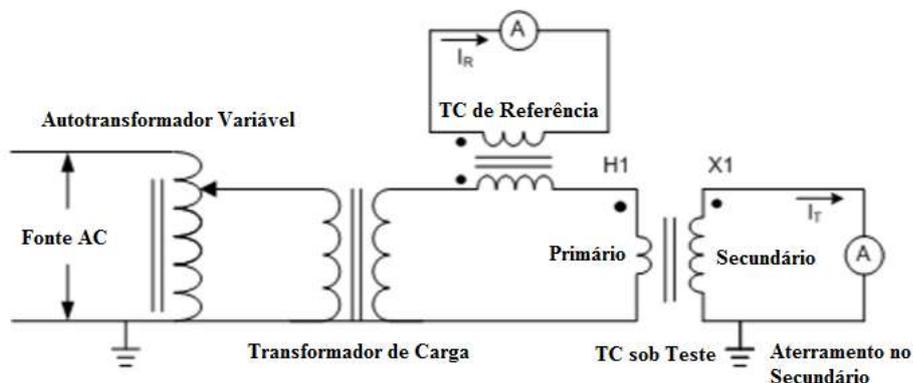
Em seu estado normal de operação, tem-se o TC conectado em série com a instalação, com isso a corrente secundária é obtida em decorrência da corrente primária que passa pelo TC.

Um dos procedimentos de ensaios também utilizado para se obter a relação de transformação dos TC é pelo método da corrente. Este ensaio requer uma fonte de corrente CA que se conecta ao primário, e um amperímetro no secundário para a medição da corrente, além de outros recursos que são necessários dependendo da fonte a ser utilizada.

Este ensaio é recomendável devido ao fato de ser possível simular o Transformador em condições normais de operação. Para isto é necessário a aplicação de níveis de corrente mais próximo possível da nominal.

O procedimento de ensaio fixado pela norma IEEE Std C57.13.1-2006, utiliza além de uma fonte de corrente elevada, um TC adicional de razão conhecida com um amperímetro associado ao seu circuito e um segundo amperímetro para o circuito secundário, conforme ilustrado na Figura 3-3.

Figura 3-3. Relação de Transformação Método da Corrente



Fonte: (IEEE Std C57.13.1, 2006).

A norma relata que a fonte CA, necessária para o teste, poderá ser um transformador de carga, sendo este capaz de fornecer correntes elevadas, ultrapassando a faixa dos 1200A.

Caso seja utilizado um transformador de carga, é recomendável, por norma, a utilização de um autotransformador variável para o controle da tensão primária.

O TC de razão conhecida é utilizado como TC de referência e conectado em série com o circuito primário do TC em teste. A relação do TC sob ensaio é igual a relação de espiras do TC de referência (N_r) multiplicada pela relação entre corrente secundária do TC de referência (I_R) e corrente secundária do TC sob teste (I_T), de acordo com equação 3.12:

$$N_T = N_R \frac{I_R}{I_T} \quad (3.12)$$

Devido ao avanço acelerado da tecnologia, surgem como alternativas para a realização do ensaio de relação de transformação, fontes de correntes com capacidade de fornecer níveis de corrente alternada compatíveis e semelhantes às correntes do sistema elétrico.

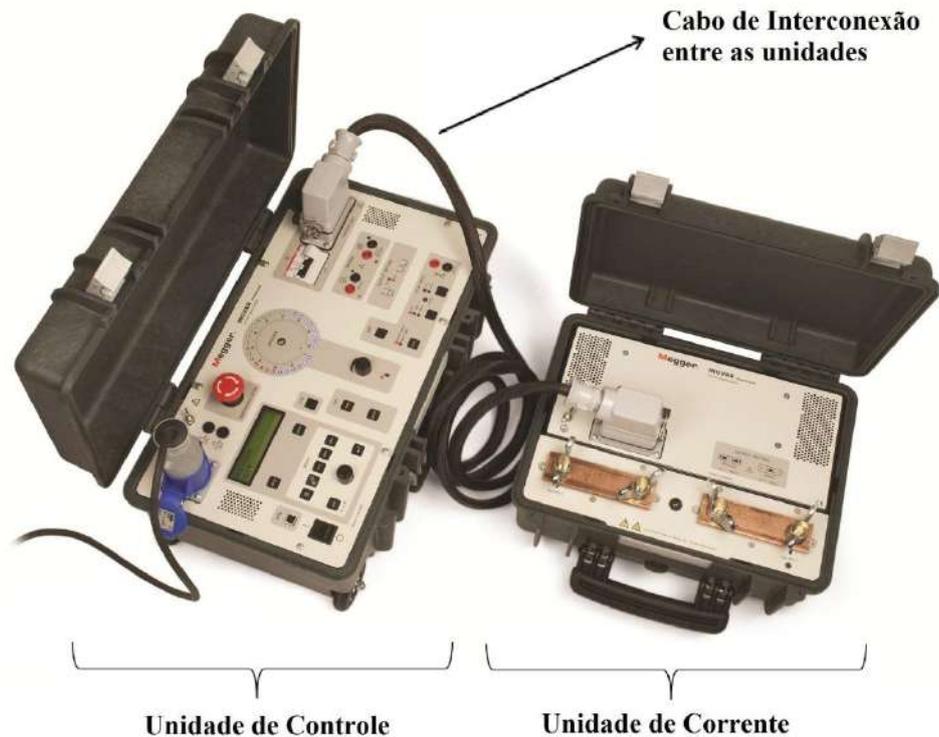
- *Instrumento de Medição Utilizado*

O teste de relação de transformação pode ser realizado utilizando-se um sistema de teste de injeção de corrente primária, ou fonte de corrente. A fonte de corrente utilizada para representação e exemplificação da medição de relação de transformação neste trabalho é o sistema de prova portátil INGVAR - BHZ-72475, do fabricante MEGGER, como mostrado na Figura 3-4.

Este instrumento possui capacidade de corrente de saída de até 5000A em condições especiais. É utilizada para diversos testes e aplicações que requerem correntes elevadas e variáveis.

O sistema INGVAR consiste em duas unidades portáteis e de fácil conexão, sendo uma unidade de controle e uma unidade de corrente. A unidade de controle é responsável pelo controle da saída de corrente da unidade de corrente. Por meio de ajustes de parâmetros na unidade de controle é possível adaptar e inserir operações, funções especiais, configurações de tempo, entre outras características, para a correta geração da corrente de acordo com o circuito de interesse.

Figura 3-4. Sistema de prova INGVAR - MEGGER



Fonte: (MEGGER, 2012).

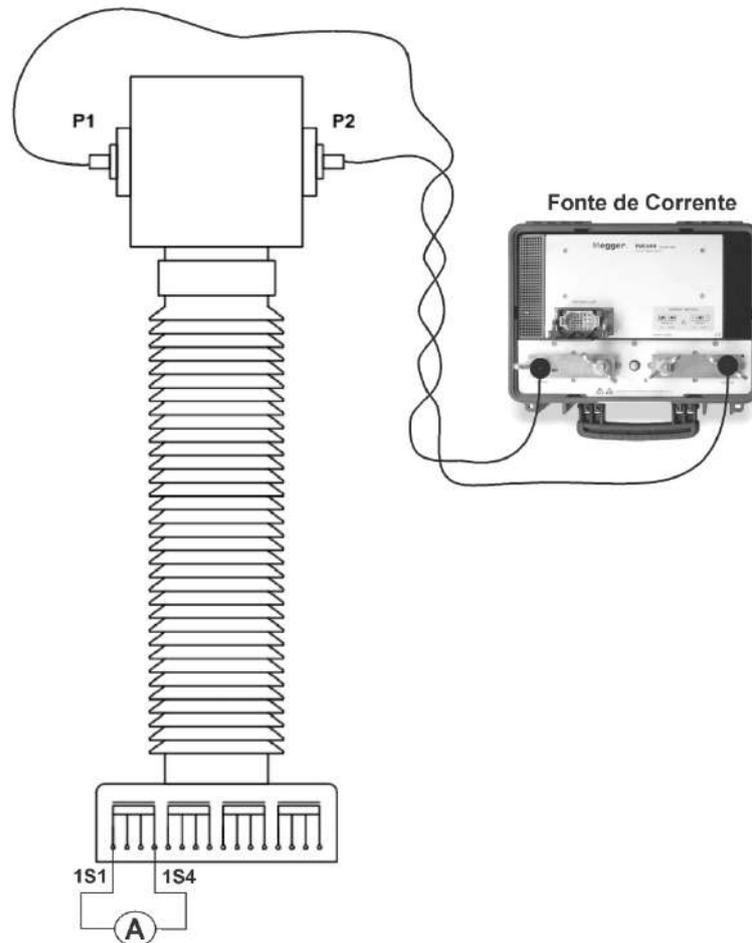
- *Procedimento de Ensaio com a Fonte de Corrente CA*
 - a) Conectar a fonte de corrente CA nos terminais primário do TC;
 - b) Conectar um amperímetro no secundário do TC (Intrínseco a fonte de corrente para este caso);
 - c) Aplicar corrente no circuito primário;
 - d) Verificar valores de corrente primária e secundária;
 - e) De posse dos valores de corrente primária e secundária, calcular a relação de transformação pela relação 3.12.

Por meio da utilização do sistema de prova INGVAR – MEGGER, o item “b” e “d” são supridos pela própria fonte de corrente, ou seja, realizando-se a conexão nos terminais é possível se obter a relação de transformação direta sem a necessidade de um amperímetro nos terminais secundários. Os secundários não utilizados na medição deverão ser curto-circuitados.

Na Figura 3-5 é demonstrado o esquema de ligação para o ensaio de relação de transformação pelo método da corrente. Tem-se uma fonte de corrente conectada aos terminais primário e um amperímetro para medição da corrente secundária. Em caso de

utilização da fonte INVGAR para este experimento, a medição da corrente pode ser verificada pela unidade de controle definida anteriormente.

Figura 3-5. Esquema de ligação INVGAR - MEGGER



Fonte: Do Autor.

3.2. Ensaio de Resistência de Isolamento

Os TCs de Alta Tensão são constituídos por uma coluna de porcelana que é responsável pela isolamento das partes ativas com o meio externo. Com o decorrer do tempo a isolação está sujeita a desgastes devido a fatores externo, como níveis de tensão acima do nominal, stress mecânico, poluição, etc, o que ocasionam a diminuição do isolamento dos Transformadores reduzindo a vida útil desses equipamentos.

Para a verificação do estado da isolação, um dos ensaios aplicados é o ensaio de resistência de isolamento. Por meio deste teste, torna-se possível analisar o nível de isolação

entre enrolamentos de alta e baixa tensão, e entre estes enrolamentos e pontos de aterramento do TC.

A norma IEEE Std C57.13.1-2006 estabelece que a resistência mínima de isolamento aceitável é de $1M\Omega$. Devendo, portanto, os valores medidos nos ensaios ser superior a $1M\Omega$. Outra referência amplamente utilizada e recomendada por norma é a utilização dos valores de relatórios de ensaios de fabricantes ou ensaios anteriores desde que possuam um histórico de resultados.

O fato de não existir isolamento perfeito significa que uma corrente, por menor que seja, passará ao longo do isolamento do equipamento. Ao ser aplicada uma tensão CC a um isolante a corrente que circula através do mesmo possuirá três componentes distintas (Lima, 2016):

- Corrente de Carga – Devido a capacitância natural do material sob ensaio;
- Corrente de Absorção Dielétrica – Circula através do material dielétrico;
- Corrente de Fuga – Pode possuir duas componentes, sendo uma corrente de fuga que passa pela superfície do isolante, e outra, a fuga de corrente através do próprio isolamento.

As três correntes se distinguem basicamente no tempo de existência. A corrente de carga associada a capacitância do corpo possui curta duração e diminui exponencialmente a zero, tornando-se mínima com o tempo, não sendo capaz de influenciar no valor medido da resistência de isolamento, considerando a aplicação de tensão em um tempo razoável.

Apesar de ser necessário um tempo maior para atingir valores desprezíveis quando comparada a corrente de carga, a corrente de absorção com o tempo torna-se de pouca influência para o ensaio.

Como fator de maior impacto no ensaio de isolamento, tem-se a corrente de fuga.

O ensaio de resistência de isolamento tem por objetivo identificar, detectar, diagnosticar e prevenir falhas de sua isolação. A medição é realizada aplicando-se uma tensão contínua por determinado tempo e verifica-se qual o valor da resistência de isolamento. Este ensaio consiste na medição dos valores de resistência entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, e entre esses enrolamentos e a carcaça/massa aterrada do equipamento.

Para o ensaio em TCs, a norma IEEE Std C57.13.1-2006 especifica que podem ser realizados até 5 tipos de conexões distintas para a obtenção da resistência de isolamento entre esses pontos. São elas:

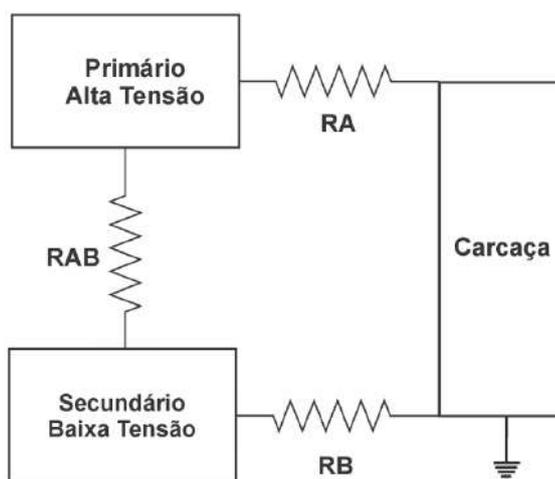
- ❖ Entre terminais secundários S1, S2 e primários P1 e P2;
- ❖ Entre terminais P1, P2 e carcaça;

- ❖ Entre terminais S1, S2 e carcaça.
- ❖ Entre terminais primários P1, P2 e secundários S1 e S2 mais carcaça;
- ❖ Entre terminais secundários S1, S2 e primários P1 e P2 mais carcaça;

Para o caso mais geral, em testes de aceitação e comissionamento, devem ser realizadas todas as opções de ensaios listadas.

Para os ensaios de rotina de manutenção, na determinação e confirmação da qualidade de isolamento em aspectos gerais do TC, aplicam-se três ensaios a fim de verificar o valor de cada resistência, conforme Figura 3-6:

Figura 3-6. Resistências de Isolamento



Fonte: (LIMA, A. S, 2016)

Onde:

RA: Isolação entre enrolamento de alta tensão e carcaça;

RB: Isolação entre enrolamento de baixa tensão e carcaça;

RAB: Isolação entre enrolamentos de alta e baixa tensão.

Estes são os ensaios a serem detalhados neste trabalho.

- *Instrumento de Medição Utilizado*

O instrumento de medição a ser utilizado para representação neste trabalho é o MEGGER MIT1020/2. Este é o equipamento aplicado com maior frequência em testes de isolamento, sendo capaz de realizar o teste de resistência de isolamento com aplicação de tensão CC de até 10kV, seguindo padrões IEEE.

O MEGGER é um equipamento portátil e de campo. O modelo MIT1020/2 oferece alta faixa de medição, chegando até 35TΩ. É possível armazenar os resultados obtidos nos

ensaios, como forma de minimizar os erros de registros. É possível também transferir valores encontrados nos testes, por meio de interface USB ou RS232.

Na Figura 3-7 é ilustrado o equipamento. Os modelos 520/2 e 1020/2 são semelhantes em aspectos visuais, no entanto o modelo 1020/2 fornece uma faixa mais abrangente para medição de resistência.

Possui três cabos de conexão, sendo eles:

- Cabo LINE – Correspondente ao terminal Positivo;
- Cabo EARTH – Correspondente ao terminal negativo ou Terra;
- Cabo GUARD - Correspondente ao cabo Guarda.

Figura 3-7. MEGGER – Medidor de Isolamento



Fonte: (MEGGER, 2016).

O cabo *GUARD* representa o grande diferencial deste instrumento de medição. Ele é responsável por desconsiderar as correntes que percorrem outras resistências no momento de ensaio e que são indesejáveis para a medição. A corrente de fuga, por exemplo, que passa através da superfície do material isolante, é uma componente que não se quer medir e que se for considerada no ensaio, pode introduzir erro nas medidas do isolamento deste material.

O termo *GUARD* refere-se à ação de GUARDAR determinada parte do circuito sob ensaio no qual não se tem interesse na medição, mas que pode influenciar os resultados caso

seja considerado. O cabo *GUARD* representa uma função extra para a obtenção de resultados mais próximos dos reais e realização do diagnóstico do problema.

- *Procedimento de Ensaio*

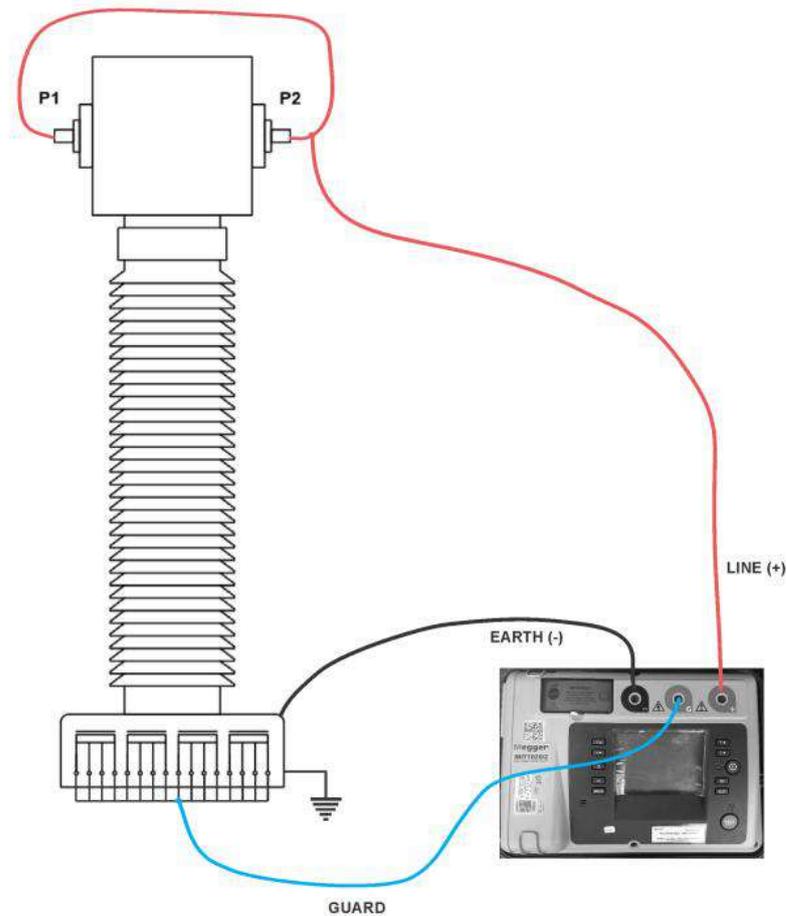
- a) Garantir a isolação do TC, desconectando-o das barras energizadas de Alta tensão;
- b) Verificar/Aterrizar base do TC;
- c) Conectar o Instrumento de medição de acordo com a resistência de interesse.

Nesta etapa, para os ensaios de rotina, na determinação da qualidade de isolamento em aspectos gerais, aplicam-se os três ensaios para obtenção de três valores de resistências de isolamento, conforme mostrado anteriormente na Figura 3-6. As três representações são vistas a seguir:

C.1. Medição de Resistência de Isolamento entre lado de Alta e a carcaça do transformador com o GUARD conectado ao lado de baixa:

- O cabo *LINE* é conectado aos terminais de Alta tensão;
- O cabo *EARTH* é conectado à carcaça do equipamento;
- O cabo *GUARD* é conectado aos terminais de Baixa tensão em um mesmo ponto (curto-circuitados), tendo em vista que não se tem interesse na sua medição.
- Aplica-se a tensão de ensaio 10kV e são verificadas as leituras de RA. Conforme a Figura 3-8.

Figura 3-8. Primário contra carcaça guardando secundários

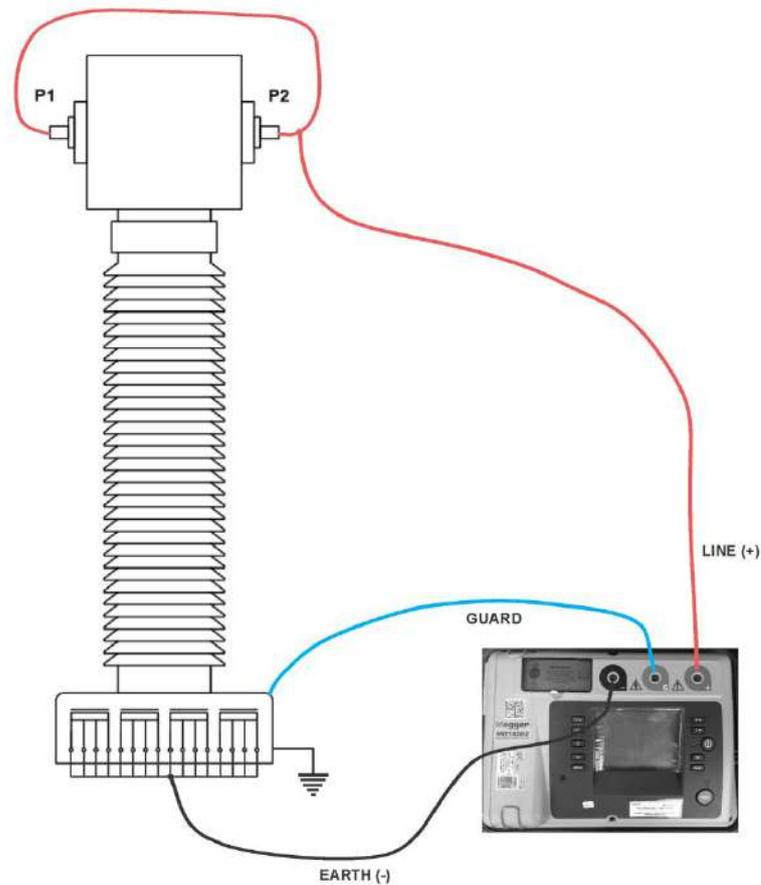


Fonte: Do Autor.

C.2. Medição de Resistência de Isolamento entre lado de Alta e lado de baixa do transformador:

- O cabo LINE é conectado aos terminais de Alta tensão;
- O cabo EARTH é conectado aos terminais de Baixa tensão em um mesmo ponto (curto-circuitados);
- O cabo GUARD é conectado à carcaça do equipamento.
- Aplica-se a tensão de ensaio 10kV e são verificadas as leituras de RAB, conforme a Figura 3-9:

Figura 3-9. Primário contra secundários guardando carcaça

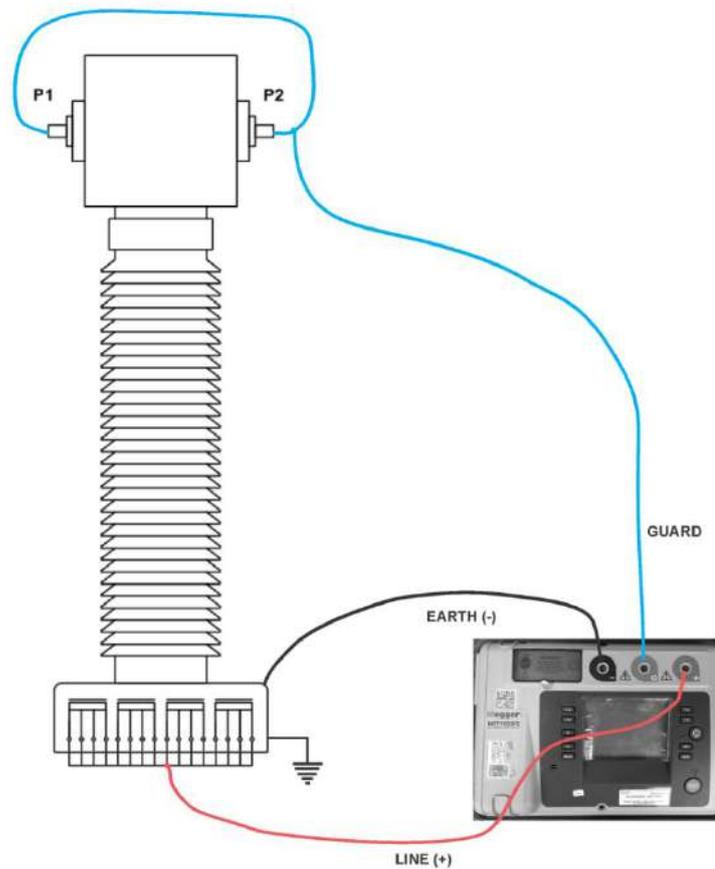


Fonte: Do Autor.

C.3. Medição de Resistência de Isolamento entre lado de Baixa e carcaça do transformador.

- O cabo LINE é conectado aos terminais de Baixa tensão em um mesmo ponto (curto-circuitados);
- O cabo EARTH é conectado a carcaça do equipamento;
- O cabo GUARD é conectado aos terminais primários;
- Aplica-se a tensão de ensaio 500V e são verificadas as leituras de RB. Nesta configuração deve-se atentar para o nível inferior de tensão aplicada, visto que estão sendo verificada a isolação nos terminais de baixa tensão, conforme a Figura 3-10:

Figura 3-10. Secundários contra carcaça guardando primário



Fonte: Do Autor.

Após a realização de qualquer um dos métodos C.1, C.2 e/ou C.3:

- d) Registrar valor da temperatura durante o ensaio;
- e) Registrar os valores de resistência de isolamento para cada ensaio.

3.3. Ensaio de Medição do Fator de Potência

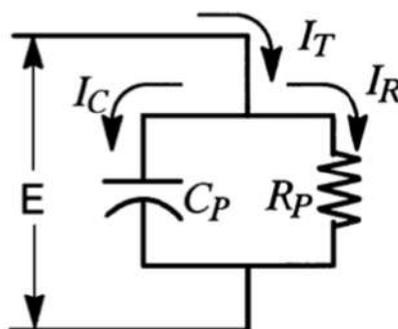
Um sistema de isolamento ideal comporta-se como um capacitor. Quando submetido a uma diferença de potencial de tensão alternada, é percorrido por uma corrente puramente capacitiva, adiantada de 90° em relação à tensão aplicada.

A representação de um material isolante real é dada por um circuito formado por um capacitor e um resistor em associação. Neste circuito, surge uma corrente resistiva em fase com a tensão aplicada. O resistor representa as perdas dissipadas no isolamento originando fuga de potência ativa (CEMIG, 1983).

Para a verificação do estado da isolação, outro método de ensaio comumente utilizado a fim de se detectar isolamentos defeituosos é o ensaio de medição do fator de potência da isolação. Refere-se a um teste completo de perdas dielétricas em corrente alternada, capaz de identificar as condições de isolação do equipamento por meio da variação de suas características.

A Figura 3-11 demonstra o circuito equivalente que pode ser utilizado para representação de um sistema de isolamento.

Figura 3-11. Circuito equivalente simplificado de um isolante



Fonte: (DOBLE, 2006).

Onde:

- E = Tensão de teste;
- I_T = Corrente total do equipamento;
- I_C = Corrente capacitiva;
- I_R = Corrente resistiva (perda da corrente total);
- C_P = Capacitância paralela equivalente do isolamento do TC;
- R_P = Resistência paralela equivalente do isolamento do TC.

De acordo com a NBR 6856 (2015) a medição do fator de perdas dielétricas tem por objetivo obter um parâmetro para avaliação qualitativa do isolamento principal do TC, comparando os valores medidos em campo com os medidos em fábrica.

Segundo a NBR este ensaio é aplicável para TC imerso em óleo submetidos a níveis de tensão acima maiores que 72,5kV. Para o critério de aprovação, é estabelecido que o fator de perdas dielétricas medido à temperatura ambiente não pode exceder 0,5 % para TC imerso em óleo.

Este ensaio consiste em aplicar tensão CA entre os terminais primários e o terra e obter, por medição direta ou cálculos, as grandezas de medidas capazes de diagnosticar o

equipamento sob teste. Para a medição os circuitos secundários deverão estar curto-circuitados.

As características dos materiais isolantes variam de acordo com alguns fatores que podem influenciar nos resultados de ensaios. Entre estes, se tem a temperatura. É de grande importância a determinação da temperatura no momento do ensaio. Posteriormente, os resultados obtidos devem ser convertidos para uma base comum de temperatura, por meio de fatores de correção. Isso deve ser feito de modo a poder comparar os resultados obtidos em diferentes ensaios sob diversas condições de tempo.

Outro fator que influencia nos resultados é a Umidade Relativa do AR. É recomendável que não seja superior a 70%. Caso esteja muito acima do desejado, poderá haver corrente de fuga pela parte externa da porcelana (DOBLE, 2016).

- *Instrumento de Medição Utilizado*

Um dos instrumentos de medição que pode ser utilizado para a realização do ensaio de Fator de Potência de Isolamento é o Analisador Portátil de isolamento M4100 de 10kV da Doble. A NBR 6856 (2015) determina que os ensaios de rotina desta natureza, devem ser realizados a 10kV.

Este é o equipamento aplicado com maior frequência pelas empresas brasileiras de energia elétrica, em testes de aceitação de campo, fábrica e manutenções preventivas de diversos tipos de equipamentos componentes do sistema (DOBLE, 2006).

O M4100 combina a grande precisão dos ensaios com a sua facilidade de utilização. Na Figura 3-12 é ilustrado o equipamento citado. Este, possui três cabos principais de conexão, sendo eles:

- Cabo de Alta Tensão – HV;
- Dois cabos de Baixa Tensão azul e vermelho – LV.

Para a realização dos ensaios, deve ser utilizado o Software específico do M4100, responsável por controlar todas as ações do equipamento, configurações e diagnósticos de ensaio. Desta maneira, são fornecidos dois tipos de cabos de comunicação, sendo um serial e outro USB. Para a utilização por meio do cabo USB é necessário a instalação do Driver, sendo este responsável por criar uma porta de comunicação virtual, possibilitando o acesso

Figura 3-12. Analisador portátil de isolamento M4100



Fonte: (DOBLE, 2006).

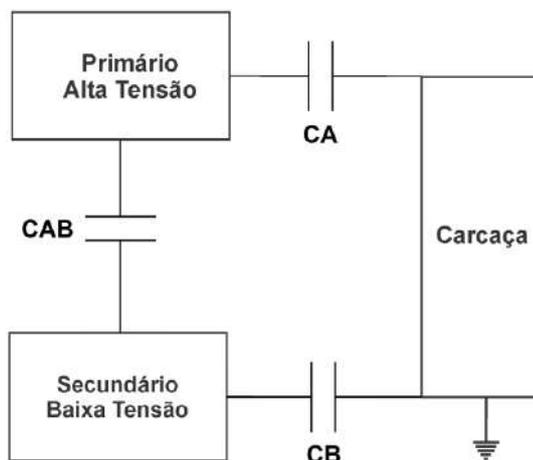
O instrumento dispõe ainda de sensores de temperatura e umidade para utilização durante os testes.

Os cabos de baixa tensão (LV) disponíveis do instrumento deverão ser utilizados de acordo com a necessidade, capacitância no qual se deseja medir e de recomendações do fabricante.

Com os cabos existentes e acesso ao software é possível realizar os ensaios por meio de distintos circuitos e formas de comunicação possível. Na figura 3-13 pode-se observar as capacitâncias envolvidas em um TC. Para os ensaios de rotina, na determinação e confirmação da qualidade de isolamento em aspectos gerais do TC, aplica-se primeiramente o ensaio global envolvendo enrolamento primário e secundários e terra (CAB + CA).

Em casos de necessidade de verificação, onde para o ensaio global obteve-se valores abaixo do permitido, deverão ser realizados os ensaios das demais capacitâncias, com a finalidade de encontrar o local defeituoso.

Figura 3-13. Fator de Potência de Isolamento



Fonte: (LIMA, A. S, 2016)

Onde:

CA: Isolação entre enrolamento de alta tensão e carcaça (carcaça mais terra);

CB: Isolação entre enrolamento de baixa tensão e carcaça;

CAB: Isolação entre enrolamentos de alta e baixa tensão.

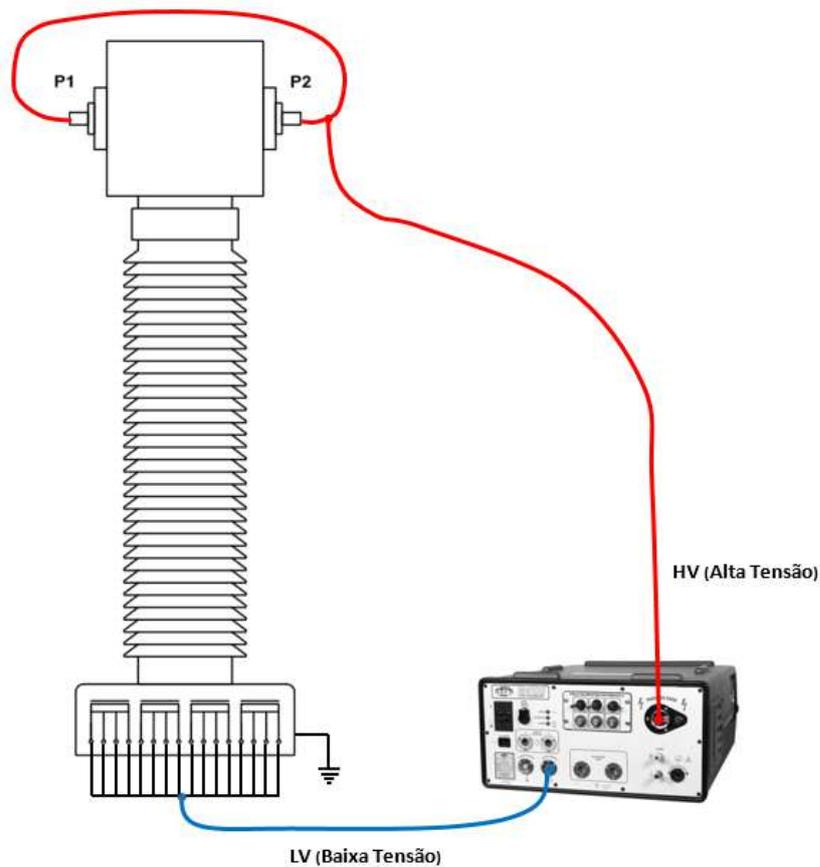
Por objetivo neste trabalho se tem o detalhamento quanto aos métodos e procedimentos de ensaios aplicados. Quando da utilização do M4100 para se efetuar os ensaios, deverão ser consultados manuais, fabricantes, softwares e características específicas do instrumento para a realização do seu correto manuseio. O mesmo foi utilizado como caso exemplo, pelo fato de fornecer o nível de tensão exigida conforme NBR 6856 (2015).

- *Procedimento de Ensaio*

- Garantir a isolação do TC, desconectando-o das barras energizadas de Alta tensão;
- Verificar/Aterrizar base do TC;
- Conectar o Instrumento de medição de acordo com a variável de interesse.

Nesta etapa, para os ensaios de rotina, na determinação da qualidade de isolamento em aspectos gerais, aplica-se o ensaio para obtenção de CAB + CA, sendo este considerado o ensaio Global, conforme modelo de conexão da Figura 3-14.

Figura 3-14. Ensaio Global de Isolação CA



Fonte: Do Autor.

- Conectar o cabo HV de Alta tensão nos terminais primário curto-circuitados;
- Conectar o cabo LV de Baixa tensão nos terminais secundários curto-circuitados;
- Aplica-se a tensão de ensaio 10kV e são verificadas as leituras de CAB + CA.

- d) Registrar valor da temperatura durante o ensaio;
- e) Registrar os valores de fator de potência para o ensaio realizado.

A realização deste ensaio varia de acordo com o instrumento de medição a ser utilizado. Utilizando-se o M4100, para realizar este ensaio, além do esquema de ligação da Figura 3-14 torna-se necessário selecionar o tipo de circuito e configurações no software do sistema. Para isso, deve-se seguir e consultar, recomendações do fabricante, manual, software e características específicas do instrumento que está sendo utilizado para medição.

Em caso de detecção de valores incompatíveis com histórico e diferentes dos recomendados por normas, é necessário aplicar os ensaios para obtenção de CAB, CA e CB em separados, conforme figura 3.13, a fim de segregas as capacitâncias possíveis e verificar se demais isolações estão dentro dos valores permitido.

Tendo em conta os procedimentos que foram descritos neste capítulo, serão apresentados, no capítulo 4, os resultados experimentais relativos a TCs de proteção e medição.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados da realização prática dos ensaios de manutenção explorados no capítulo 3 e discussão dos resultados, como também as consequências para a operação adequada do equipamento.

Será levada em consideração na análise dos resultados, a relação dos valores obtidos com os valores permitidos segundo recomendações e exigências de normas e fabricantes.

Os transformadores de corrente de alta tensão que foram analisados encontram-se em operação e realizam a função de proteção e medição de duas Linhas de Transmissão pertencente à Rede Básica dos Sistema Elétrico. Sendo essas Linhas de Transmissão representada por 6 TCs ao todo, LT 1 – Família A (Fases A, B e C) e LT 2 – Família B (Fases A, B e C).

4.1. Características dos TCs Analisados

Para os transformadores em estudo se tem como principais características:

- Fabricante: PFIFFNER;
- Possui cinco enrolamentos secundários, sendo dois destinados a medição e três a proteção;
- Tensão do circuito: $230/\sqrt{3}$ kV;
- Tensão máxima do sistema: 245kV;
- Corrente Nominal: 600A;
- Frequência de Operação: 60Hz;
- Norma de referência NBR ABNT 6856/2015.

4.2. Ensaio práticos

Os resultados demonstrados nesta seção foram obtidos pela empresa MEC manutenção elétrica, contratada para realização dos ensaios nos TCs. Os ensaios foram realizados nas dependências da empresa Taesa (empresa em que o autor deste documento realizou estágio profissional supervisionado), onde se teve por objetivo avaliar as condições dos TCs por meio dos ensaios elétricos e com isso, verificar se estavam em condições adequadas para a entrada em operação.

Os ensaios e trabalhos realizados tiveram a participação integral do autor deste trabalho, onde posteriormente, após a elaboração dos relatórios de ensaio, os resultados dos ensaios foram analisados a fim de constatar as condições dos transformadores de corrente.

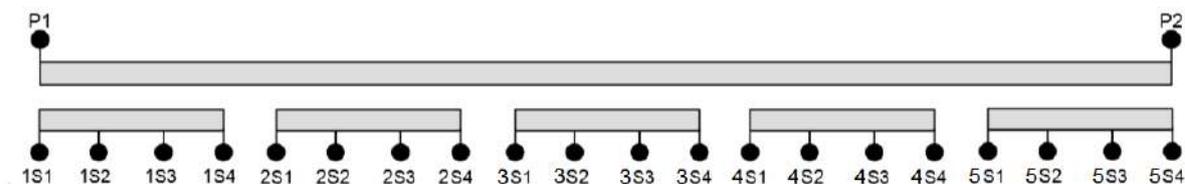
4.2.1. Resultados do Ensaio de Relação de Transformação

Este ensaio foi realizado conforme procedimentos descritos na seção 3.1. Entre as duas possibilidades para o ensaio de relação de transformação, no caso prático foi realizado pelo método da tensão.

Todos os itens da seção 3.1.1, do tópico “Procedimento de Ensaio com o DTR-8500” foram realizados sequencialmente afim de se obter a relação de transformação para os terminais.

De acordo com a sub-seção 2.2.3, as marcações dos terminais de um TC são estabelecidas e padronizadas pela NBR 6856 (2015), podendo variar entre a Figura 2-3(A) e (B), ou ser a associação de ambas. Para o TC ensaiado neste trabalho, é possível observar na Figura 4-1 como estão dividido os terminais secundários.

Figura 4-1. Marcação de terminais do TC ensaiado



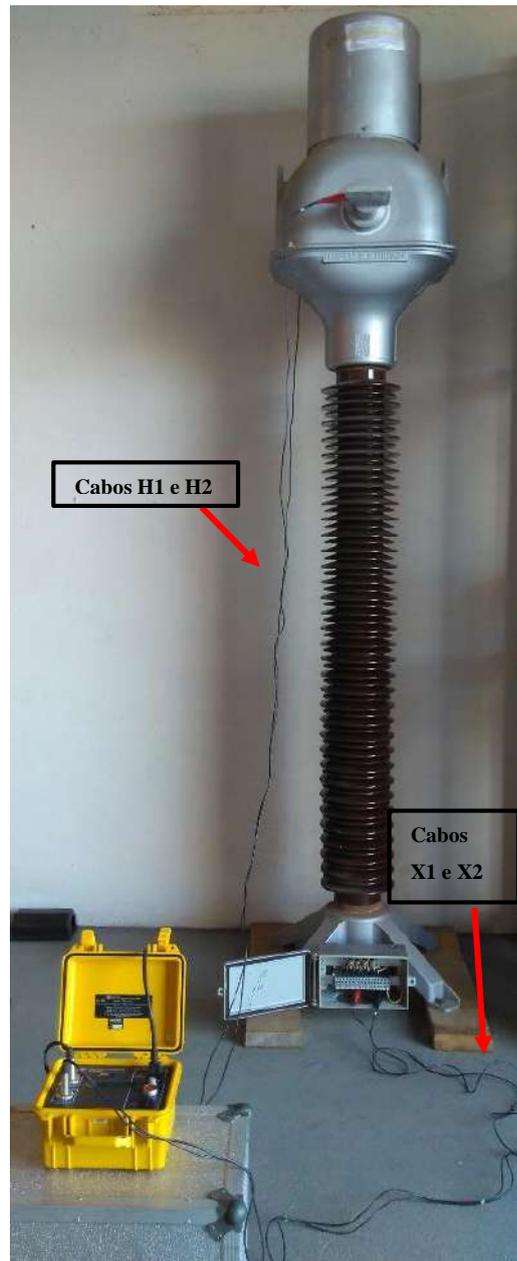
Fonte: Adaptado (ABNT NBR 6856, 2015)

O TC possui um enrolamento primário e cinco enrolamentos secundários (cinco núcleos). Cada enrolamento secundário possui derivações, sendo possível obter distintas

relações de transformações a partir destes. Os diferentes enrolamentos disponíveis para utilização, possibilitam a utilização do TC, tanto para fins de proteção quanto para fins de medição. Pela Figura 4-1, temos que o TC ensaiado possui dois núcleos destinados a medição (1S e 2S) e três núcleos destinados a proteção (3S, 4S e 5S). Com isso, se tem a realização prática do ensaio para cada derivação mencionada.

Os enrolamentos são utilizados de acordo com a necessidade da instalação e projeto, devendo ser levado em consideração a relação nominal do sistema ao qual o TC será instalado. Na Figura 4-2 é ilustrado a montagem para a realização do ensaio de relação de transformação.

Figura 4-2. Montagem Ensaio de Relação de Transformação



Fonte: Do Autor.

Nas Tabelas 4-1 e 4-2 é possível observar a relação encontrada por meio do ensaio (R-E) e a relação nominal de dados de placa do TC (R-N). Com base na diferença existente entre ambos, por meio da equação 2-9 é possível encontrar os valores de erro associado.

Tabela 4-1. Valores de relação de transformação TC Família A

| Relação de Transformação | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-----|---------------|--------|-----|---------------|--------|-----|---------------|
| Terminais | TC A | | | TC B | | | TC C | | |
| | R-E | R-N | Erro (%) | R-E | R-N | Erro (%) | R-E | R-N | Erro (%) |
| 1S1-1S2 | 24,93 | 25 | 0,285 | 24,93 | 25 | 0,293 | 24,93 | 25 | 0,281 |
| 1S1-1S3 | 49,93 | 50 | 0,132 | 49,94 | 50 | 0,128 | 49,94 | 50 | 0,122 |
| 1S1-1S4 | 99,95 | 100 | 0,053 | 99,95 | 100 | 0,051 | 99,95 | 100 | 0,047 |
| 2S1-2S2 | 24,96 | 25 | 0,164 | 24,96 | 25 | 0,164 | 24,96 | 25 | 0,168 |
| 2S1-2S3 | 49,97 | 50 | 0,070 | 49,96 | 50 | 0,076 | 49,97 | 50 | 0,070 |
| 2S1-2S4 | 99,98 | 100 | 0,020 | 99,98 | 100 | 0,025 | 99,97 | 100 | 0,033 |
| 3S1-3S2 | 100,05 | 100 | -0,050 | 100,05 | 100 | -0,050 | 100,06 | 100 | -0,060 |
| 3S1-3S3 | 200,07 | 200 | -0,035 | 200,10 | 200 | -0,050 | 200,11 | 200 | -0,055 |
| 3S1-3S4 | 400,09 | 400 | -0,022 | 400,23 | 400 | -0,057 | 400,19 | 400 | -0,047 |
| 4S1-4S2 | 100,08 | 100 | -0,080 | 100,04 | 100 | -0,040 | 100,04 | 100 | -0,040 |
| 4S1-4S3 | 200,10 | 200 | -0,050 | 200,12 | 200 | -0,060 | 200,07 | 200 | -0,035 |
| 4S1-4S4 | 400,09 | 400 | -0,022 | 400,24 | 400 | -0,060 | 400,11 | 400 | -0,027 |
| 5S1-5S2 | 100,05 | 100 | -0,050 | 100,03 | 100 | -0,030 | 100,04 | 100 | -0,040 |
| 5S1-5S3 | 200,09 | 200 | -0,045 | 200,08 | 200 | -0,040 | 200,07 | 200 | -0,035 |
| 5S1-5S4 | 400,16 | 400 | -0,040 | 400,13 | 400 | -0,032 | 400,12 | 400 | -0,030 |

Fonte: MEC, Relatório de Ensaio, 2016.

Tabela 4-2. Valores de relação de transformação TC Família B

| Relação de Transformação | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|
| Terminais | TC A | | | TC B | | | TC C | | |
| | R-E | R-N | Erro (%) | R-E | R-N | Erro (%) | R-E | R-N | Erro (%) |
| 1S1-1S2 | 24,93 | 25 | 0,285 | 24,93 | 25 | 0,293 | 24,93 | 25 | 0,281 |
| 1S1-1S3 | 49,93 | 50 | 0,132 | 49,94 | 50 | 0,128 | 49,94 | 50 | 0,122 |
| 1S1-1S4 | 99,95 | 100 | 0,053 | 99,95 | 100 | 0,051 | 99,95 | 100 | 0,047 |
| 2S1-2S2 | 24,96 | 25 | 0,164 | 24,96 | 25 | 0,164 | 24,96 | 25 | 0,168 |
| 2S1-2S3 | 49,97 | 50 | 0,070 | 49,96 | 50 | 0,076 | 49,97 | 50 | 0,070 |
| 2S1-2S4 | 99,98 | 100 | 0,020 | 99,98 | 100 | 0,025 | 99,97 | 100 | 0,033 |
| 3S1-3S2 | 100,05 | 100,00 | -0,050 | 100,05 | 100,00 | -0,050 | 100,06 | 100,00 | -0,060 |
| 3S1-3S3 | 200,07 | 200 | -0,035 | 200,10 | 200 | -0,050 | 200,11 | 200 | -0,055 |
| 3S1-3S4 | 400,09 | 400 | -0,022 | 400,23 | 400 | -0,057 | 400,19 | 400 | -0,047 |
| 4S1-4S2 | 100,08 | 100 | -0,080 | 100,04 | 100 | -0,040 | 100,04 | 100 | -0,040 |
| 4S1-4S3 | 200,10 | 200 | -0,050 | 200,12 | 200 | -0,060 | 200,07 | 200 | -0,035 |
| 4S1-4S4 | 400,09 | 400 | -0,022 | 400,24 | 400 | -0,060 | 400,11 | 400 | -0,027 |
| 5S1-5S2 | 100,05 | 100 | -0,050 | 100,03 | 100 | -0,030 | 100,04 | 100 | -0,040 |
| 5S1-5S3 | 200,09 | 200 | -0,045 | 200,08 | 200 | -0,040 | 200,07 | 200 | -0,035 |
| 5S1-5S4 | 400,16 | 400 | -0,040 | 400,13 | 400 | -0,032 | 400,12 | 400 | -0,030 |

Fonte: MEC, Relatório de Ensaio, 2016.

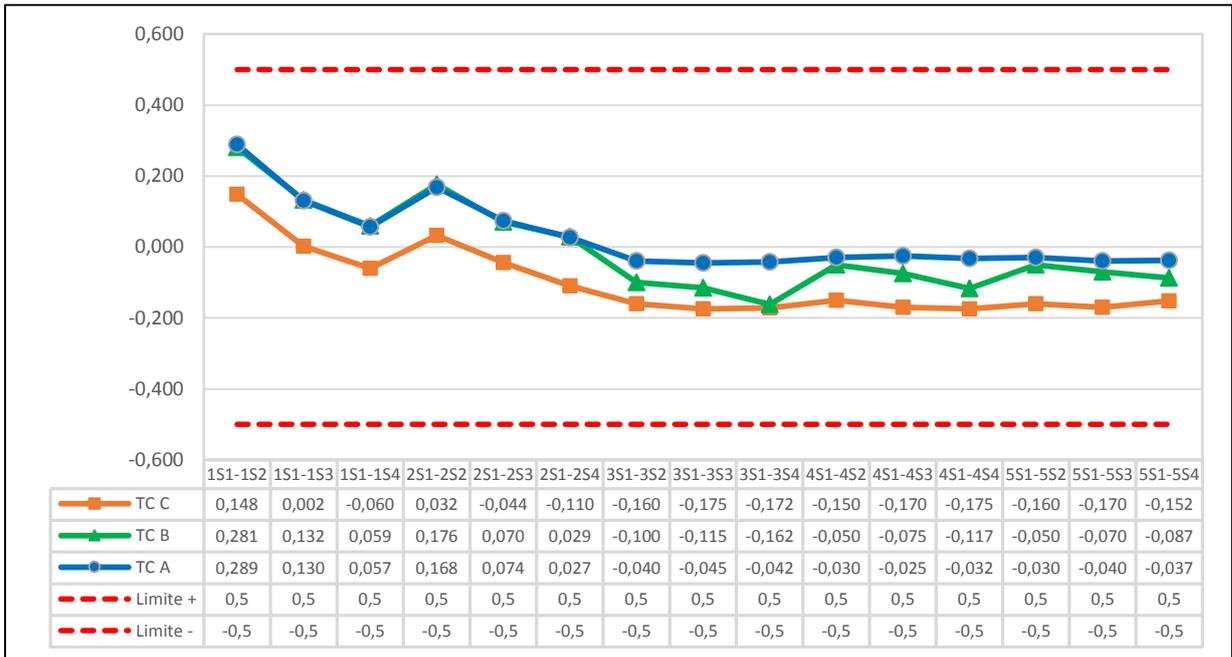
As Figuras 4-3 e 4-4 representam graficamente os erros dos resultados encontrados. Percebe-se que para a Família A de TCs se teve uma maior diferença dos erros entre as fases para todos os terminais. Por outro lado, para a Família B de TCs, os erros encontrados foram bastante próximos entre as três fases para todos os terminais.

O método da tensão para realização do ensaio de relação de transformação é normalmente mais utilizado no setor elétrico devido a sua praticidade de execução. Analisando-se os erros obtidos e conforme descrito na sub-seção 2.2.4, para o ensaio de relação de transformação pelo método da tensão, em termos gerais, o erro de relação será considerado como adequado caso esteja dentro da tolerância normalizada para este ensaio, sendo $\pm 0,5\%$.

Observando-se as Figuras 4-3 e 4-4, percebe-se que a relação encontrada aproxima-se muito da relação nominal e se mantém dentro do limite máximo admissível, estando, portanto, os TCs ensaiados, dentro das condições operativas adequadas.

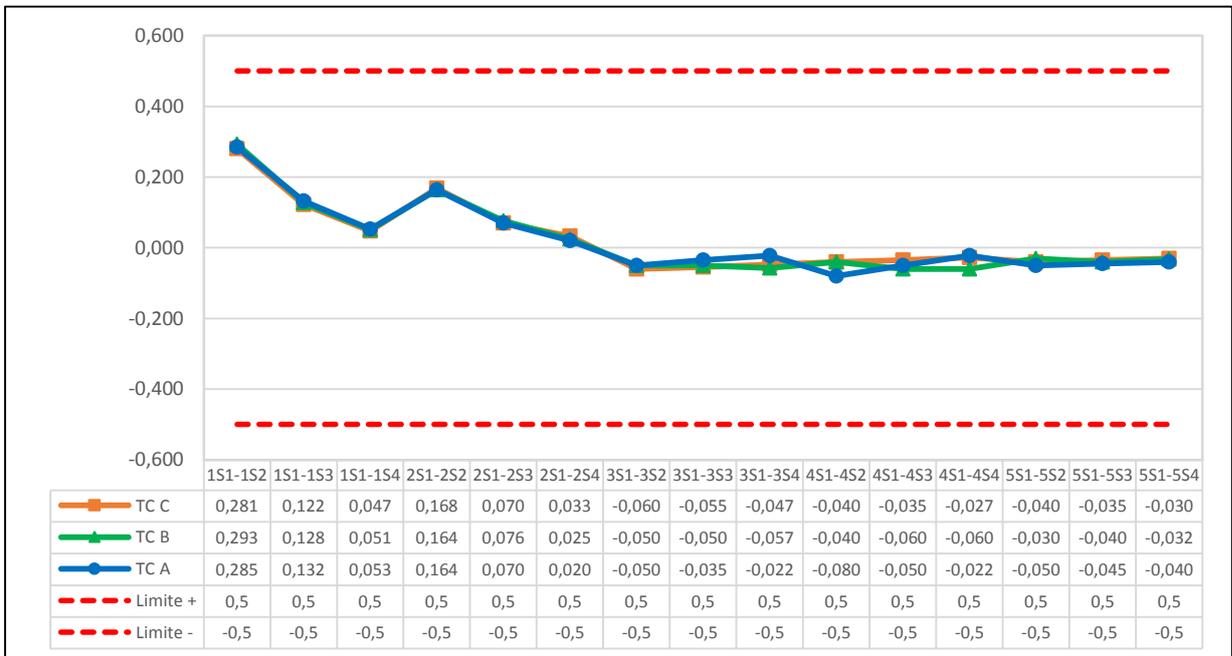
Conforme mencionado na sub-seção 2.2.5, os TCs destinados a medição devem garantir sua classe de exatidão, ou erro mínimo admissível de transformação, para níveis de corrente nominal na faixa de 10% a 100%. Esta afirmação da NBR 6856, refere-se ao ensaio de relação de transformação quando da sua realização pelo método da corrente, onde utiliza-se o conceito do paralelogramo de exatidão e torna-se possível garantir os níveis de corrente nominal e simular o comportamento real do TC. Entre estes, a NBR 6856 garante diversos critérios de aprovação, quando do ensaio de relação é realizado pelo método da corrente que deverá ser levado em consideração nos casos de sua aplicação.

Figura 4-3. Representação Gráfica - Erros de relação Família A



Fonte: Do Autor.

Figura 4-4. Representação Gráfica - Erros de relação Família B



Fonte: Do Autor.

4.2.2. Resultados do Ensaio de Resistência de Isolamento

O ensaio de Resistência de Isolamento foi realizado tomando-se como referência os procedimentos descritos na seção 3.2. As três configurações geralmente aplicadas aos ensaios de rotina nos TCs, assim como os resultados das resistências obtidas, estão resumidas conforme Tabelas 4-3 e 4-4.

Primeiramente, tem-se o valor da resistência de isolamento RAB, que normalmente representa o maior valor medido quando comparada as demais Resistências. Em seguida se tem a medição de RA e RB, respectivamente.

A norma IEEE Std C57.13.1, uma das utilizadas como referência neste trabalho, estabelece que a resistência mínima geralmente aceitável é de 1 M Ω . Percebe-se que os TCs ensaiados possuem valores muito superiores ao mínimo aceitável.

Tabela 4-3. Valores de Resistência de Isolamento Família A

| Isolamento CC | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|
| Conexão | | | | TC A | TC B | TC C |
| Resistência | Line | Earth | Guard | M Ω x1000 | M Ω x1000 | M Ω x1000 |
| RAB | Prim. | Sec's | Massa | 10000 | 9000 | 10000 |
| RA | Prim. | Massa | Sec's | 300 | 150 | 350 |
| RB | Sec's | Massa | Prim. | 5 | 4 | 5 |

Fonte: (MEC, Relatório de Ensaio, 2016).

Tabela 4-4. Valores de Resistência de Isolamento Família B

| Isolamento CC | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|
| Conexão | | | | TC A | TC B | TC C |
| Resistência | Line | Earth | Guard | M Ω x1000 | M Ω x1000 | M Ω x1000 |
| RAB | Prim. | Sec's | Massa | 10000 | 9000 | 10000 |
| RA | Prim. | Massa | Sec's | 130 | 200 | 400 |
| RB | Sec's | Massa | Prim. | 4 | 5 | 8 |

Fonte: (MEC, Relatório de Ensaio, 2016).

Conforme visto anteriormente, os TCs devem garantir a isolação dos equipamentos conectados no circuito secundários, contra o primário de alta tensão. Isso significa que se tem alta isolação entre o enrolamento primário e secundário. Analisando-se os resultados, é

perceptível o valor da Resistência RAB superior quando comparado às demais, tendo em vista que para este caso mede-se a resistência entre primário e secundários.

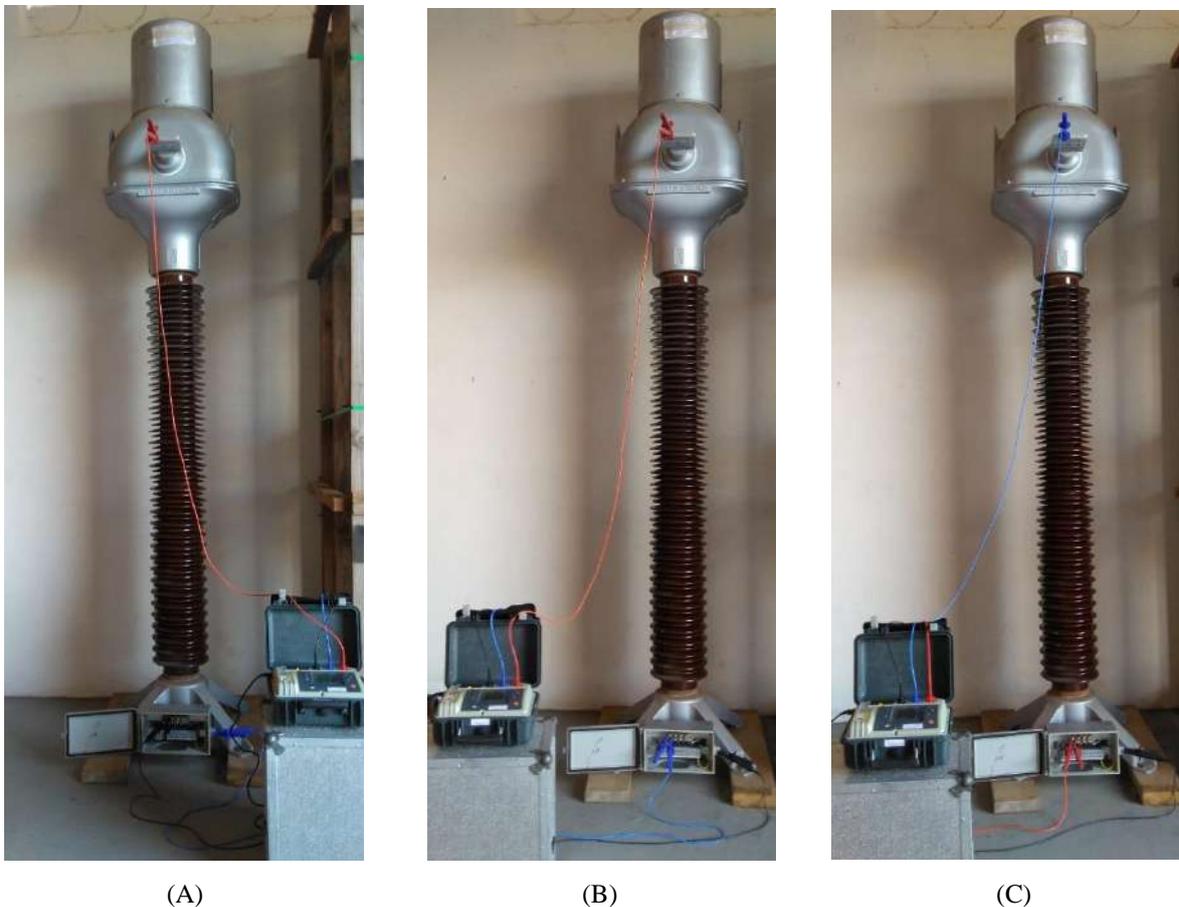
O valor da Resistência RA representa a conexão entre primário e massa do TC, onde também se tem normalmente um alto valor de resistência de isolamento, sendo este intermediário quando comparado com RAB e RB.

A Resistência RB é dada em função do isolamento existente entre os terminais secundários do TC e a massa/carcaça do equipamento. Neste caso, não se tem o envolvimento do enrolamento primário na medição e com isso os valores são inferiores às outras resistências.

Para os resultados conforme Tabela 4-3 e Tabela 4-4, tem-se para Família A e B valores na escala de $G\Omega$. Onde quanto maior o valor de Resistência, melhor situação do equipamento.

Na Figura 4-5 são mostrados os esquemáticos de montagem dos três ensaios de resistência de isolamento mencionados e analisados anteriormente. Se tem da esquerda para a direita (A, B e C), Resistências RAB, RA e RB respectivamente.

Figura 4-5. Montagem Ensaio de Resistência de Isolamento



Fonte: Do Autor.

4.2.3. Resultados do Ensaio de Medição do Fator de Potência

No ensaio de Medição do Fator de Potência é possível detectar os defeitos na isolamento do TC por meio do acompanhamento das manutenções periódicas. Com relação ao critério de aprovação, conforme visto na seção 3.3 a NBR 6856 (2015) estabelece que o fator de perdas dielétricas medido à temperatura ambiente, não deverá exceder 0,5% para TC imerso em Óleo.

A Tabela 4-5 e Tabela 4-6 demonstram os resultados percentuais encontrados para o Fator de Potência de cada TC, assim como também o valor correspondente em mW e mA, que são fornecidos de acordo com o instrumento de medição que está sendo usado.

Tabela 4-5. Resultados do Ensaio de Fator de Potência Família A

| Isolamento CA | | | | | | |
|---------------|-------|-------|----------------|---------|-------|--------|
| Conexão | | | | Medidas | | |
| | HV | LV | Tipo de ensaio | mA | mW | FP (%) |
| TC A | Prim. | Sec's | Global | 3,927 | 0,098 | 0,150 |
| TC B | Prim. | Sec's | Global | 4,038 | 0,109 | 0,190 |
| TC C | Prim. | Sec's | Global | 4,079 | 0,108 | 0,184 |

Fonte: (MEC, Relatório de Ensaio, 2016).

Tabela 4-6. Resultados do Ensaio de Fator de Potência Família B

| Isolamento CA | | | | | | |
|---------------|-------|-------|----------------|---------|-------|--------|
| Conexão | | | | Medidas | | |
| | HV | LV | Tipo de ensaio | mA | mW | FP (%) |
| TC A | Prim. | Sec's | Global | 4,160 | 0,122 | 0,202 |
| TC B | Prim. | Massa | Global | 4,074 | 0,126 | 0,213 |
| TC C | Sec's | Massa | Global | 3,992 | 0,120 | 0,208 |

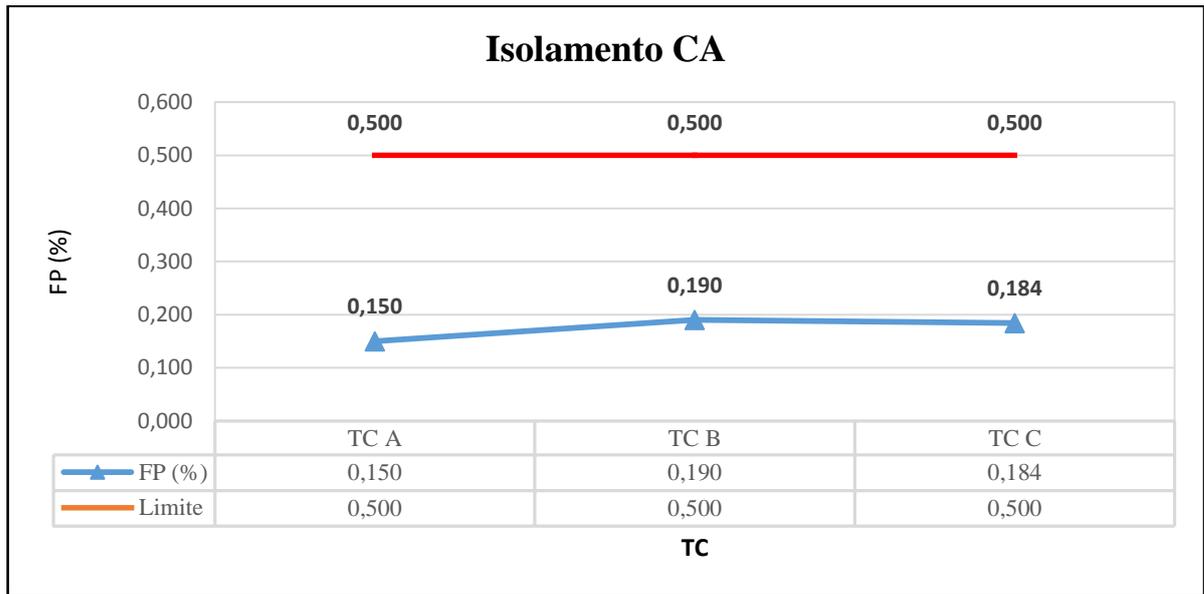
Fonte: (MEC, Relatório de Ensaio, 2016).

As características dos materiais isolantes variam de acordo com alguns fatores que podem influenciar nos resultados de ensaios, entre eles, se tem a temperatura. É de grande importância a determinação da temperatura no momento do ensaio. Posteriormente, os resultados obtidos foram convertidos para uma base comum de temperatura, por meio de fatores de correção.

Isso deve ser feito de modo a poder comparar os resultados obtidos em diferentes ensaios sob diversas condições de tempo.

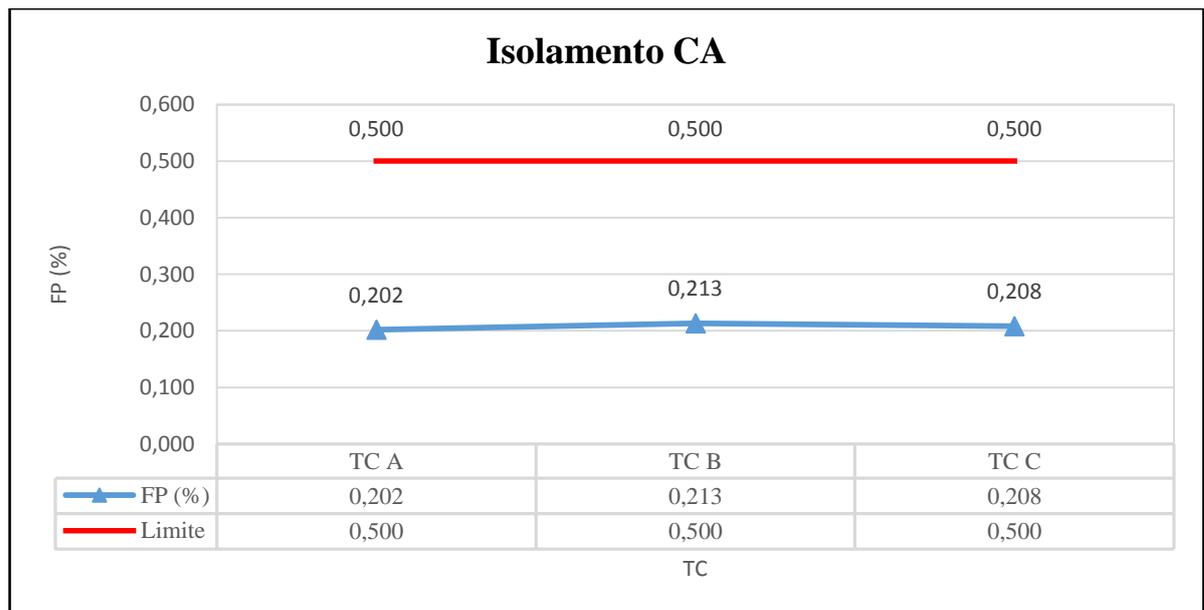
Nas figuras 4-6 e 4-7 é possível observar os resultados do ensaio junto a faixa limite estabelecida por norma para as famílias A e B de isolamento, respectivamente.

Figura 4-6. Representação Gráfica - Fator de Potência de Isolamento Família A



Fonte: Do Autor.

Figura 4-7. Representação Gráfica - Fator de Potência de Isolamento Família B

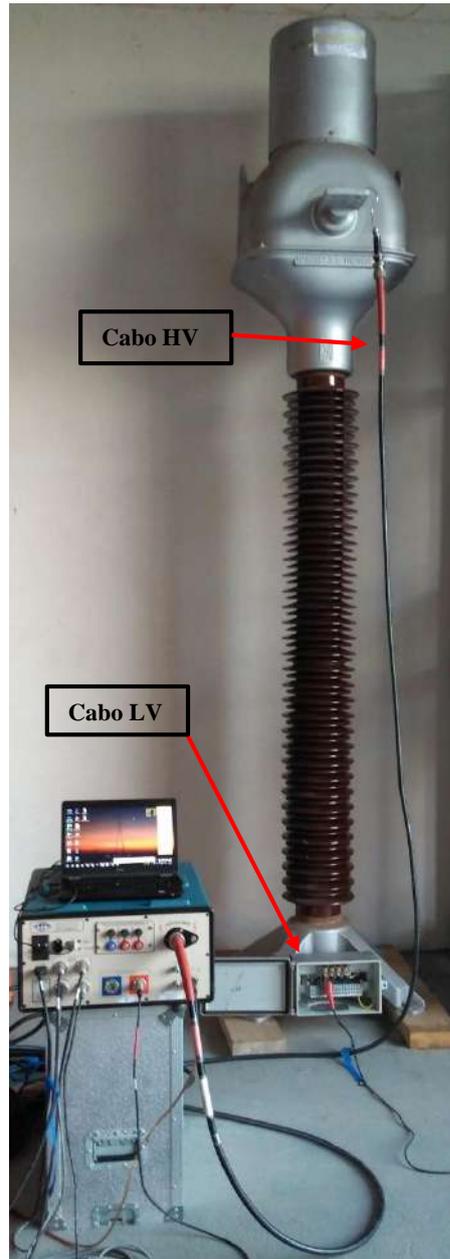


Fonte: Do Autor.

É possível perceber que os valores obtidos nos ensaios para todos os TCs no ensaio de Fator de Potência de isolamento, encontram-se dentro do aceitável pela norma. Os TCs da Família A possuíram ainda valores ligeiramente inferiores quando comparados com a Família B. No entanto, ambos não chegaram a atingir 50% do limite máximo admissível por norma, constatando-se que os equipamentos estão em condições adequadas de operação.

Na Figura 4-8 pode-se observar a representação da montagem para a realização do ensaio de Fator de Potência de Isolamento CA.

Figura 4-8. Montagem Ensaio de Fator de Potência de Isolamento



Fonte: Do Autor.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se a abordagem e avaliação dos principais ensaios e métodos de manutenção aplicados aos Transformadores de Corrente de Alta Tensão. Teve-se o objetivo de redigir um documento em forma de Instrução de Trabalho seguindo padrões e recomendações segundo normas nacionais e internacionais, de modo a servir como procedimentos de execução para realização de tais ensaios.

Primeiramente foi descrita a fundamentação teórica sobre os Transformadores de Corrente, com propósito de relatar os principais conceitos e definições referenciados na norma da ABNT NBR 6856 (2015) que são imprescindíveis para o entendimento dos procedimentos de ensaios dos Transformadores de Corrente, bem como as demais definições pertinentes para o entendimento destes equipamentos.

Foram demonstrados detalhadamente os principais tipos de ensaios aplicados aos transformadores de corrente, seguindo orientações e recomendações de fabricantes e normas associadas. Por fim demonstrou-se a realização prática de tais ensaios, discussão dos resultados e consequências para a operação adequada do equipamento.

Por meio deste estudo, certifica-se que a manutenção preventiva, análise e interpretação dos resultados é necessária e fundamental para o mantimento do equipamento em condições propícias de funcionamento no sistema. O material gerado tem por objetivo contribuir para o setor elétrico e para a comunidade acadêmica de forma que por meio de sua consulta, possam ser realizados os ensaios necessários e exigidos por normas nos Transformadores de Corrente.

Os resultados analisados e realizados tomaram-se como referência a aplicação prática dos procedimentos de ensaios descritos, observando-se que para todas as situações e ensaios os Transformadores de Corrente mantiveram-se seus valores dentro dos limites estipulados por normas e recomendações de fabricantes.

Como perspectiva de trabalhos futuros, pode-se sugerir algumas propostas que tangem aos métodos de ensaio descritos neste trabalho de conclusão de curso. Uma delas seria a comparação entre distintos métodos para a realização de um mesmo ensaio, ou seja, realizar um ensaio de duas ou mais formas diferentes conforme definidos por norma e realizar a análise qualitativa e quantitativa destes resultados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB – **Manual de Aplicação: Proteção e Controle do Transformador RET630**. 2013

ABNT NBR 6856 – **Transformador de Corrente**. 2015.

ANSI IEEE C57.13.1- *Guide for Field Testing of Relaying Current Transformer*. 2006

Aguiar, R. **Diagnósticos e Ensaio em Transformadores**. Apostila - Roberto de Aguiar Treinamento. 2012.

ALMEIDA, A. T. L.; PAULINO, M. E. C. **Manutenção de transformadores de potência. Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétricos** – Unifei, 2012.

CEMIG. **Ensaio de Isolamento Elétrico – MEU - 2,5kV e MH – 10kV da DOBLE**. Departamento de Engenharia de Manutenção de Instalações. 1983.

Cristina, S. C. **Desempenho de Transformadores de Corrente em Regime não Senoidal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2010.

DOBLE. **Procedimentos de teste da Doble**. 2006.

Fonseca, Jackson Farias. **Elementos de manutenção de transformadores de potência**. Trabalho de Conclusão de Curso. Guaratinguetá, 2014.

Frontin, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília. 2013.

GCMME. **Manutenção em Subestação**. Apostila de Manutenção – Engenharia e Serviços Elétricos LTDA, Contagem – MG.

Hojo T., & Maezono P., **Proteção de Sistemas Elétricos: Transformadores para Instrumentos**. 2012.

IEC 60044-1. **Instruments Transformers – Parte 1: Current transformers**. Edição 1.2. 2003.

Kindermann, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Edição do Autor – Florianópolis – SC, 2005, 2ª edição.

Lima, A. S. **Manutenção Elétrica – Transformadores para Instrumentos** – Escola de Engenharia Mauá, – SP.

MEGGER. **Teste de Isolamento acima de 1kV**. Guia para diagnóstico. 2016.

Rush, P. **Proteção e Automação de Redes: conceito e aplicação**. Coordenação da tradução – José Antonio Jardim. Editora Blucher: Schneider. 2011.

VVC – **Tipos de Transformadores de Corrente**. Apostila, Vieira e Varela Consultoria e Representação. 2013