



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
DIEGO PEREIRA DA SILVA

**Sistema de testes de módulo de Paralelismo de Transformadores
de Força**

Palhoça
2018

DIEGO PEREIRA DA SILVA

**Sistema de testes de módulo de Paralelismo de Transformadores
de Força**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
Telemática, da Universidade do Sul de Santa
Catarina, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Fábio Ignácio Rosa, Esp. Eng.

Palhoça
2018

DIEGO PEREIRA DA SILVA

**Sistema de testes de módulo de Paralelismo de Transformadores
de Força**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Telemática da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 29 de junho de 2018.



Prof. Fábio Ignácio Rosa, Esp.Eng. - Professor Orientador
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Paulo Roberto May, MSc. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Rafael Paulo dos Santos, Eng.
Celesc Distribuição S.A.

RESUMO

A operação em paralelo de transformadores de força, é uma técnica utilizada por diversas empresas do setor elétrico, no mundo inteiro. A necessidade de manter os níveis de tensão estabilizados de acordo com a variação da carga, e atender à crescente demanda de potência fornecida, exige um sistema que monitore as condições dos transformadores quanto a mudança automática de relação de transformação, de forma sincronizada quando da operação em paralelo. A falha neste sistema de controle e monitoramento afeta diretamente os índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica, acarretando em perdas financeiras devido a atual legislação dos indicadores de qualidade no fornecimento de energia da ANEEL. Este trabalho aborda a teoria envolvida na operação em paralelo de transformadores de potência, as suas vantagens, desvantagens e problemas oriundos do mau funcionamento do sistema, dando ênfase ao módulo simulador de paralelismo, que permite um diagnóstico preciso de defeitos nos módulos supervisores.

Palavras chave: Transformadores; Operação em Paralelo; Indicadores da ANEEL.

ABSTRACT

The parallel operation of power transformers is a technique used by several companies in the electric power sector, worldwide. The need to maintain voltage levels stabilized according to load variation and to meet the increasing demand for power supplied requires a system that monitors the conditions of the transformers in relation to the automatic change of the transformation ratio in a synchronized way when the operation in parallel. The failure in this control and monitoring system directly affects the quality indices in the electricity supply, leading to financial losses due to the current legislation of ANEEL power quality indicators. This work deals with the theory involved in the parallel operation of power transformers, their advantages, disadvantages and problems arising from the malfunction of the system, with emphasis on the parallelism simulator module, which allows an accurate diagnosis of defects in the supervisory modules.

Keywords: Transformers; Parallel Operation; ANEEL quality indicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Taxa de crescimento da carga de energia no Brasil	11
Figura 1.2 – Fiscalização da Aneel	12
Figura 1.3 – Divisão das equipes de Operação e Manutenção	15
Figura 1.4 – Fluxograma encaminhamento manutenção paralelismo	16
Figura 1.5 – Fluxograma destacado encaminhamento manutenção paralelismo.....	18
Figura 1.6 – Fluxograma novo encaminhamento manutenção paralelismo	19
Figura 1.7 – Fluxograma teste do módulo de paralelismo	20
Figura 2.1 – Anel de Faraday	23
Figura 2.2 – Transformador elementar	24
Figura 2.3 – Transformador monofásico ideal	26
Figura 2.4 – Correntes parasitas no núcleo a partir do fluxo magnético	28
Figura 2.5 – Correntes parasitas no núcleo laminado a partir do fluxo magnético	30
Figura 2.6 – Laço de histerese	30
Figura 2.7 – Fluxo disperso	31
Figura 2.8 – Circuito equivalente do transformador monofásico	32
Figura 2.9 – Transformador trifásico	32
Figura 2.10 – Ligações transformadores de potência	33
Figura 2.11 – Esquemático simplificado do SIN	34
Figura 2.12 – Elementos componentes de transformadores de potência	35
Figura 2.13 – Núcleo de Transformador de potência com três colunas principais	36
Figura 2.14 – Núcleo de Transformador de potência com três colunas principais e duas de retorno	36
Figura 2.15 – Vista das chapas de um núcleo real.....	36
Figura 2.16 – Enrolamento real de um transformador de potência	37
Figura 2.17 – Bucha tipo capacitiva	38
Figura 2.18 – Processo de troca de calor por convecção	40
Figura 2.19 – Esquema de ligação de comutador de derivação em carga.....	41
Figura 2.20 – Comutador de derivação em carga Tipo M	43
Figura 2.21 – Esquema de funcionamento do comutador de derivação em carga....	43
Figura 2.22 – Chave didática do comutador de derivação em carga	46
Figura 2.23 – Representação de associação de transformadores “A” e “B” em Paralelo	47

Figura 2.24 – Representação de associação de transformadores trifásicos “A” e “B” em Paralelo	49
Figura 2.25 – Sistema de paralelismo de transformadores trifásicos	50
Figura 2.26 – Diagrama unifilar do sistema de paralelismo.....	51
Figura 2.27 – Diagrama de configuração do módulo de paralelismo.	52
Figura 2.28 – Diagrama esquemático do módulo de supervisão de paralelismo	54
Figura 2.29 – Diagrama esquemático da coroa potenciométrica	55
Figura 3.1 – Diagrama em blocos da execução dos testes.....	57
Figura 3.2 – Dispositivo de teste completo em funcionamento	61
Figura 3.3 – Circuito de resistores para indicação de Tap	63
Figura 3.4 – Módulo supervisor de paralelismo.....	64
Figura 3.5 – Cabos para conexões	64
Figura 3.6 – Conexões internas sistema de testes.....	65
Figura 3.7 – Painel Frontal e Layout do dispositivo	66
Figura 3.8 – Módulo em teste.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	TEMA.....	9
1.2	PROBLEMA.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	OBJETIVOS.....	19
1.4.1	Objetivo Geral	19
1.4.2	Objetivos Específicos	19
1.5	DELIMITAÇÃO.....	20
1.6	PROPOSTA DE SOLUÇÃO	20
1.7	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	20
1.8	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	TRANSFORMADORES	22
2.1.1	Funcionamento básico.....	24
2.1.2	Transformador monofásico ideal	25
2.1.3	Perdas no transformador	27
2.1.3.1	Perdas no ferro	28
2.1.3.2	Perdas no cobre	31
2.1.4	Transformador real e representação do circuito equivalente	31
2.2	TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	32
2.3	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	33
2.3.1	Elementos associados a transformadores de potência.....	34
2.4	COMUTADOR DE DERIVAÇÃO EM CARGA	40
2.4.1	Manutenção do comutador de derivação em carga	44
2.5	OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM PARALELO.....	46
2.6	SUPERVISOR DE PARALELISMO	50

2.6.1	Configuração do módulo	52
2.6.2	Entradas e saídas digitais e analógicas	54
3	DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA	56
3.1	PROPOSTA DE SOLUÇÃO DE HARDWARE.....	56
3.2	PROTOTIPO DA SOLUÇÃO	60
3.3	VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO	66
4	CONCLUSÕES.....	68
4.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO	73

1 INTRODUÇÃO

Descrevem-se neste capítulo as definições gerais do projeto: tema, problema, justificativa, objetivo geral e específico e proposta da solução.

1.1 TEMA

A humanidade ao longo do tempo experimentou a sua evolução marcada por descobertas que permitiram um salto de qualidade na maneira de viver, de se relacionar entre si e com a natureza. A descoberta e domínio do fogo trouxeram proteção contra predadores e o cozimento dos alimentos, a domesticação dos animais e o conhecimento das estações do ano permitiram o cultivo e a manutenção dos recursos de subsistência, a manipulação de ferramentas com pedra e posteriormente metais, facilitaram os primeiros trabalhos inicialmente rudimentares, a observação da natureza e o início do método científico, são alguns exemplos das mudanças de patamar tecnológico, que mudaram definitivamente os caminhos da humanidade e conduziram a sua evolução até os dias atuais.

Tais descobertas tiveram a sua importância, cada uma em seu tempo, sendo experiência cumulativa e passada às gerações seguintes, perfazendo um processo sequencial de evolução. Entretanto, umas das descobertas mais importantes que alavancou o desenvolvimento humano, e permitiu o avanço de diversas outras descobertas tão importantes numa velocidade nunca vista antes, foi a eletricidade, como define a Eletrobrás:

A eletricidade se tornou a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Atividades simples como assistir televisão ou navegar na internet são possíveis porque a energia elétrica chega até a sua casa. Fábricas, supermercados, shoppings e uma infinidade de outros lugares precisam dela para funcionar. Grande parte dos avanços tecnológicos que alcançamos se deve à energia elétrica. Obtida a partir de todos os outros tipos de energia, a eletricidade é transportada e chega aos consumidores no mundo inteiro por meio de sistemas elétricos complexos, compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo. (Eletrobrás, 2018)

Também reitera esta importância em uma escala internacional, a IEC¹:

Electricity is the most versatile and easily controlled form of energy. At the point of use it is practically loss-free and essentially non-polluting. At the point of generation it can be produced clean with entirely renewable methods, such as Wind, water and sunlight.

Electricity is weightless, easier to transport and distribute, and it represents the most efficient way of consuming energy. (IEC, 2018)

Todas as pesquisas para aplicações do uso deste tipo de energia, diversificaram consistentemente as atividades humanas, desde as mais simples, até as mais complexas, onde podemos exemplificar:

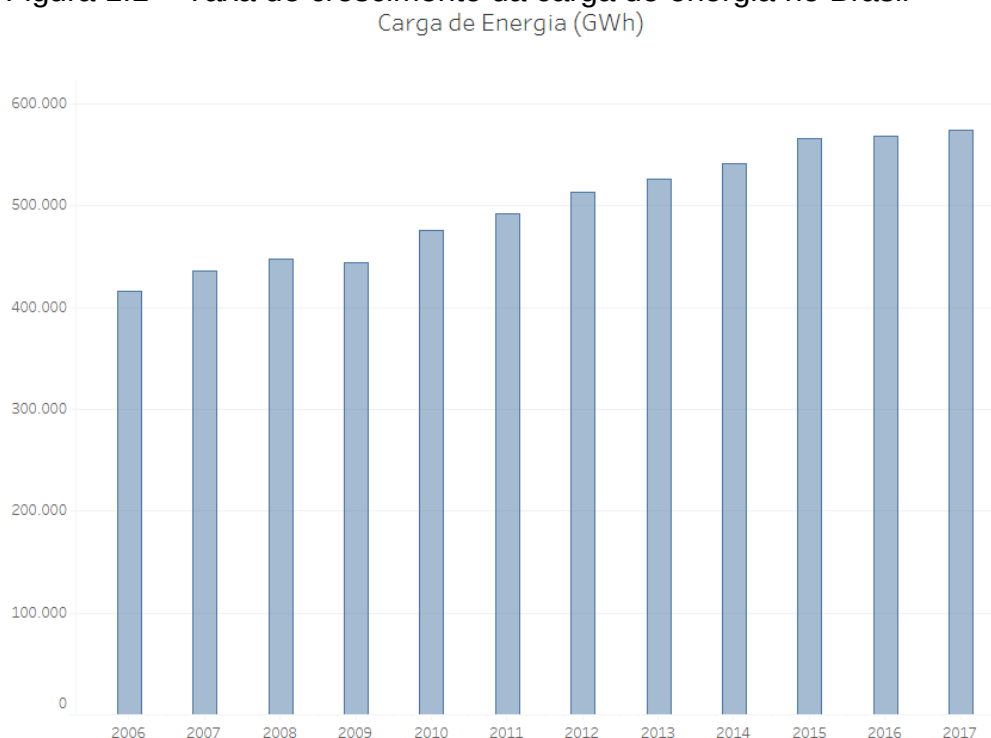
- **Motores elétricos:** presentes na indústria e nos serviços domésticos, executando diversos trabalhos;
- **Comunicações:** observamos todos os dias, o efeito da eletricidade transformada em informação, nas telas de televisão, computadores, internet, telefone;
- **Iluminação:** presente em praticamente todos os lares;
- **Medicina:** com os mais diversos equipamentos, quase na sua maioria, dependentes de energia elétrica, auxiliando o diagnóstico, reabilitação e intervenções médicas.

Enfim, as aplicações da energia elétrica são tão vastas, que seria impossível neste trabalho descrever todas, e eleger qual aplicação tem maior importância. O fato é que a eletricidade está tão presente em nossas vidas e tão indispensável, que o crescimento do seu consumo aumenta gradativamente com o passar dos anos, como podemos observar no gráfico da Figura 1.1 que mostra o crescimento de carga de energia no Brasil, onde passou de 415.841 GWh em 2006 para 574.526 GWh em 2017, segundo ONS².

¹ IEC - International *Eletrotechnical commission*.

² ONS - Operador Nacional do Sistema elétrico, criado em 1998 pelo governo Federal.

Figura 1.1 – Taxa de crescimento da carga de energia no Brasil



Fonte: Baseado em ONS, 2018.

Contudo, com o crescimento da demanda por energia elétrica no Brasil, a ANEEL³, criou a partir dos anos 90, regras e formas de fiscalização e regulação do setor de energia no sistema interligado nacional, ao qual estão inseridas as empresas distribuidoras de energia elétrica. Estas regras são aplicadas em todas as etapas do processo, desde a geração, transmissão, distribuição e finalmente consumo as quais tem objetivo de garantir a entrega de energia com qualidade ao consumidor, e manter o sistema seguro.

Os aspectos técnicos fiscalizados pela ANEEL que são de interesse deste trabalho, dizem respeito a parâmetros que conferem qualidade no fornecimento de energia elétrica, onde podemos destacar os três mais importantes conforme Figura 1.2.

³ ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, criada em 1996 pelo governo Federal.

Figura 1.2 – Fiscalização da Aneel



Fonte: Baseado no organograma Aneel, 2018.

- **Frequência constante:** Conforme resolução da ANEEL nº 674, a frequência das redes é monitorada pelo ERAC - Esquema Regional de Alívio de Carga, onde a frequência é monitorada por relés específicos que desligam partes de cargas definidas pela ANEEL, quando a mesma encontra-se fora da faixa nominal. Esta medida permite a estabilidade de todo sistema interligado, evitando colapsos ao sistema. Esta proteção opera numa faixa de subfrequência entre 4% e 2,5% da frequência nominal, que no Brasil é 60 Hz.
- **Limites máximos e mínimos de tensão eficaz:** A ANEEL estabelece os valores máximos e mínimos do fornecimento de tensão eficaz no PRODIST, que são os documentos elaborados pela própria agência, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. No Módulo 8, do PRODIST, na tabela 7 estão definidos os valores máximos e mínimos de tensão eficaz, que não deve variar mais de 10% para mais ou para menos tomando como base o valor nominal de tensão eficaz, que pode ser diferenciado de região para região no Brasil.
- **Fornecimento Contínuo:** As empresas de distribuição têm o compromisso de fornecer a energia elétrica aos seus consumidores 24 horas por dia, 365 dias por ano, ou seja, ininterruptamente. Entretanto devido a muitos fatores que pesam contra este serviço, a ANEEL estabeleceu alguns meios de controlar a continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica. O controle de qualidade/continuidade do fornecimento de energia é aferido pelos indicadores coletivos de continuidade DEC (Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de

interrupção por unidade Consumidora). Circuitos selecionados pela agência servem de amostragem para apurar os dados que geram os índices.

Com o intuito de garantir o fornecimento de energia dentro dos padrões estabelecidos pela Aneel, as concessionárias de energia no Brasil adotam algumas técnicas, arranjos, topologias e configurações em suas subestações, agrupando um conjunto de equipamentos que possibilitam a distribuição de energia para os seus consumidores atendendo aos níveis de segurança e de exigência estabelecidos. Numa destas topologias, é usual a utilização de transformadores em paralelo, que suprem conjuntamente o fornecimento de potência e podem em situações adversas, assumir as cargas uns dos outros melhorando os índices de continuidade. Buscando atender a mais um item fiscalizado pela ANEEL, as distribuidoras buscam alternativas para melhorar os índices de tensão eficaz constante.

Durante a operação de distribuição de energia, a demanda é variável conforme o padrão de consumo. Esta variação se dá pelo perfil dos consumidores, que ao longo do tempo, ao utilizarem a energia conectando e desconectando equipamentos elétricos, refletem esta ação na fonte de fornecimento, drenando mais ou menos energia da rede de distribuição. Para satisfazer uma das condições de fornecimento, a de tensão eficaz constante, os transformadores contam com uma chave especial que mantém estes valores dentro de uma faixa estabelecida no PRODIST, independente da variação da carga conectada ao transformador. Esta técnica é consagrada e utilizada mundialmente, onde consiste em uma chave inserida dentro do transformador que através de um circuito controlador, muda automaticamente os níveis de tensão eficaz. Chamada CDC⁴, ou comutador de derivação em carga, esta chave varia a relação de transformação do transformador sem interromper o circuito de fornecimento, regulando os níveis de tensão para os consumidores.

De maneira complementar, visando satisfazer as condições de continuidade e de tensão eficaz constante, há uma junção das duas técnicas instalando-se transformadores em paralelo, com regulação automática através de chaves de derivação em carga. Este tipo de instalação deve ser monitorada e

⁴ Também referenciado como OLTC - *On Load Tap Changer*

controlada por um equipamento que possa fazê-lo de forma autônoma operando o sistema dentro de uma faixa de regulação de tensão pré-ajustada.

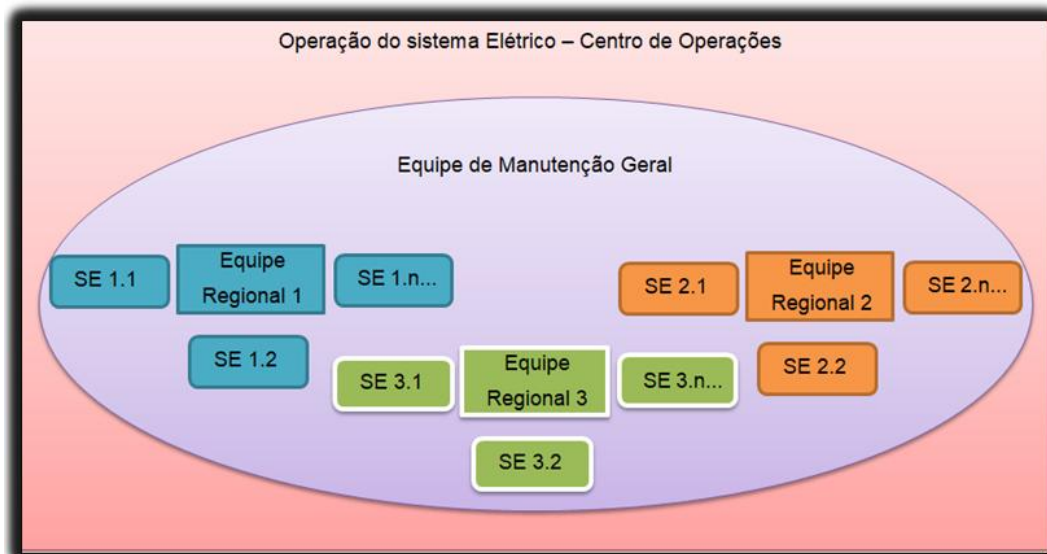
O mau funcionamento destes equipamentos supervisores de paralelismo, acarreta em perda de sincronismo entre os transformadores ligados em paralelo que reflete na perda de qualidade dos índices de fornecimento de energia, principalmente na qualidade dos valores de tensão eficaz, prejudicando os consumidores e consequentemente, penalidades às concessionárias.

Para atender as questões situacionais, as empresas de distribuição contam com equipes que são complementares, atuando nas fases de operação e manutenção de maneira coordenada, como ilustrada na Figura 1.3. Este organograma tem como base empresa de distribuição de energia elétrica conectada ao sistema interligado nacional brasileiro:

- **Operação do Sistema** através do **Centro de Operações**, monitora todos os componentes do sistema de distribuição onde estão incluídas as linhas de subtransmissão, subestações e redes de distribuição, bem como todos os componentes e equipamentos que as integram, acionando as equipes regionais ou de manutenção geral conforme necessidade;
- **Equipes Regionais** atuam diretamente nas subestações (SE) pertencentes a sua região específica definida pela concessionária, executando trabalhos referentes a operação e manutenção segundo orientações e demanda do Centro de Operações. A quantidade de subestações por regional pode variar conforme características particulares das cidades integrantes como industrialização e densidade demográfica principalmente;
- **Equipe de Manutenção Geral**, atua como suporte das equipes regionais em situações mais complexas das atividades de manutenção, segundo orientações e demanda do Centro de Operações, planejamento e programação gerada no próprio departamento de Manutenção.

A organização das equipes descritas anteriormente é apresentada na Figura 1.3.

Figura 1.3 – Divisão das equipes de Operação e Manutenção



Fonte: Do autor, 2018.

1.2 PROBLEMA

Como citado no tópico anterior, problemas no funcionamento dos supervisores de paralelismo afetam diretamente os sistemas de distribuição, como a circulação de corrente reativa entre os transformadores, diminuindo a capacidade de transformação, e ainda oscilação dos níveis de tensão eficaz entregue, prejudicando assim a qualidade da energia. Após vários atendimentos realizados pelas equipes regionais verificou-se que não era possível solucionar o problema, acionando assim a equipe de manutenção geral, que constatou que em 70% das ocorrências a falha encontrava-se no módulo supervisor, e a sua substituição imediata resolveria o problema. Porém a simples substituição do equipamento não pode ser executada sem a anterior execução de ensaios e programações, os quais necessitam dos componentes instalados nos painéis dos transformadores. Entretanto durante todo o tempo dos ensaios, o sistema automático permanece inoperante sendo esta condição não desejada pela concessionária. Como já apresentado, a falta de sincronismo e o controle precário da tensão eficaz, acarreta em perda de qualidade no fornecimento de energia afetando diretamente os índices, prejudicando os consumidores e trazendo prejuízo financeiro para a concessionária devido as penalidades impostas pela agencia reguladora ANEEL.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para as concessionárias que operam nos sistemas elétricos com topologias de transformadores de força em paralelo, quando ocorre uma avaria no sistema de paralelismo em alguma subestação monitorada pelo Centro de Operações, uma sequência padrão é adotada. A qual é apresentada na Figura 1.4.

Figura 1.4 – Fluxograma encaminhamento manutenção paralelismo



Fonte: Do autor, 2018.

A sequência ilustrada no fluxograma é composta da seguinte forma:

1° - Operação Normal, não há alarmes ativos, sistema operando em modo automático;

2° - Na ocorrência de problema no paralelismo em qualquer subestação, um alarme é disparado no centro de operações “FALHA DE PARALELISMO”, identificando a regional, a subestação e os transformadores envolvidos no problema;

3° - O centro de operações de maneira remota intervém, bloqueando a função automática de regulação, e atua de forma remota/manual no ajuste da tensão dos transformadores para níveis adequados afim de minimizar os efeitos do problema sobre os índices de qualidade de fornecimento. Conforme já apresentado, a regulação deve ser dinâmica conforme a variação de carga conectada aos transformadores, onde o operador do centro de operações deve permanentemente monitorar os níveis de tensão a fim de mantê-los adequados;

4° - O centro de operações aciona as equipes regionais que trabalham em bases próximas as subestações;

5° - As equipes regionais se deslocam até a Subestação que foi informada. Como as subestações são todas tele controladas, uma dupla, dentro do seu turno, é responsável por atender a várias subestações da sua região. Logo o tempo de deslocamento é interferido diretamente pela distância, condições de trânsito ou outras situações de manobra ou ocorrências em outras subestações que por ventura ocorram no mesmo tempo;

6° - Após avaliação completa, ao ser detectado que o problema encontra-se no módulo supervisor, a equipe regional reporta o problema ao centro de operações que aciona outra equipe, a de manutenção geral;

7° - A equipe de manutenção geral desloca-se até a subestação para que sejam realizados testes, verificações e substituição de equipamento, com os transformadores em operação (ligados). Similar a estrutura das equipes regionais, a equipe de manutenção geral, é responsável por todas as regionais compostas das suas subestações. Assim como as equipes regionais, o atendimento varia de acordo com os mesmos complicadores, todavia a abrangência no atendimento da equipe de manutenção geral é muito maior, logo, o tempo de atendimento pode ser longo, e isso caracteriza um grave problema para a concessionária e conseqüentemente uma situação a ser evitada;

8° - Na abordagem do problema na subestação, a equipe de manutenção geral faz algumas simulações e medições para identificar a origem do problema. Concluída esta etapa, o módulo é substituído. Finalizado a substituição, os testes são executados para validar o novo módulo com os transformadores ligados e o sistema volta a operar. Somente neste momento é dispensado a operação remota por parte do centro de operações ao retornar o controle automático de paralelismo;

9° - A equipe de manutenção geral registra o problema encontrado no equipamento identificando, na medida do possível, a origem exata do defeito, e o encaminha para oficina credenciada para o devido reparo;

10° - A equipe de manutenção recebe o equipamento reparado da oficina, e precisa se deslocar até uma subestação para submeter o módulo aos testes de validação, ficando o módulo como peça reserva, para atendimento em situações futuras de problemas de paralelismo em outras subestações.

A apresentação das etapas seguidas pelo fluxograma da Figura 1.4, submete a concessionária uma logística deficitária em vários aspectos, tanto técnicos quanto financeiros. À vista disso é sugerida a modificação do fluxograma

conforme Figura 1.5, otimizando as etapas destacadas em laranja, a partir da concepção de um dispositivo que permita testar o módulo supervisor em laboratório.

Figura 1.5 – Fluxograma destacado encaminhamento manutenção paralelismo



Fonte: Do autor, 2018.

Com a introdução do dispositivo de testes e a consequente modificação do fluxograma nas etapas destacadas na Figura 1.5, sugere que a equipe regional na etapa 6 já possua o módulo supervisor testado em laboratório, e efetue a substituição de forma direta sem a necessidade de outros testes permitindo neste caso que o sistema já retorne a sua condição operativa ideal, autônoma. Este procedimento reduz o tempo de operação manual por parte do centro de operações, bem como dispensa o deslocamento da equipe de manutenção geral. Nos fluxogramas das Figuras 1.4 e 1.5, o tempo total de atendimento da ocorrência se dá com a soma dos seguintes tempos:

- Deslocamento da equipe regional (Dependente da distância da equipe até a subestação com problema);
- Avaliação da equipe regional;
- Deslocamento da equipe de manutenção geral (Dependente da distância da equipe até a subestação com problema);
- Testes para diagnóstico do módulo com problema;
- Tempo de testes do novo módulo.

Já no fluxograma apresentado na Figura 1.6, com a mudança implementada, as equipes regionais já possuem o equipamento testado em

laboratório, e podem fazer a substituição diretamente e encaminhar para a equipe de manutenção geral, testar e diagnosticar o módulo supervisor, reduzindo sobremaneira o tempo dispendido no atendimento da ocorrência.

Figura 1.6 – Fluxograma novo encaminhamento manutenção paralelismo



Fonte: Do autor, 2018.

1.4 OBJETIVOS

Descreve-se neste tópico os objetivos, geral e específicos deste trabalho.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral proposto neste trabalho, é a concepção de um sistema de testes capaz de diagnosticar problemas em módulos de supervisão de paralelismo de transformadores, melhorando os aspectos técnicos e logísticos da operação em sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos propostos neste trabalho são:

- Pesquisar solução de baixo custo via hardware, que apresentem viabilidade de diagnóstico em módulos de supervisão de paralelismo;
- Conceber um protótipo funcional para validação da proposta de solução;

- Simular as condições operativas dos módulos de supervisão, identificando as possíveis falhas.

1.5 DELIMITAÇÃO

O sistema proposto neste trabalho fica restrito apenas a testes de módulos de supervisão de paralelismo de transformadores de potência trifásicos, instalados em subestações de subtransmissão, em empresa de distribuição de energia elétrica interligada ao Sistema Interligado Nacional.

1.6 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

O sistema de teste dos módulos de paralelismo, visa a simulação das condições operacionais dos mesmos, de forma a diagnosticar os defeitos nos diversos circuitos que os compõe. A Figura 1.7 ilustra um fluxograma do procedimento adotado ao testar-se os módulos de paralelismo, onde cada teste é realizado em uma sequência que possibilita a identificação do problema, otimizando os recursos de manutenção no tempo de reparo do equipamento. Em qualquer uma das etapas quando apresenta algum problema, inviabiliza a utilização do equipamento marcado com o caminho em vermelho, sendo necessário o seu reparo.

Figura 1.7 – Fluxograma teste do módulo de paralelismo



Fonte: Do autor 2018.

1.7 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho consiste de uma pesquisa bibliográfica, e o desenvolvimento de um protótipo, embasado em dados gerenciais do processo de operação de distribuição de energia elétrica, que norteiam as demandas da equipe

de manutenção geral de empresa de distribuição conectada ao sistema interligado nacional. A base bibliográfica, é sustentada por livros, artigos e fontes fidedignas que auxiliam na busca de uma otimização dos processos de distribuição de energia elétrica, observando as técnicas e as necessidades de operação e manutenção para este fim. De acordo com Lakatos e Marconi (2010, p.65),

Método é o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo, conhecimentos válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista.

1.8 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Para que se tenha uma visão clara e objetiva deste trabalho, o conteúdo do mesmo foi organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Apresenta as definições do projeto, tais como: tema, problema, justificativa, delimitações, objetivo geral, objetivos específicos, proposta da solução e, metodologia do trabalho;
- **Capítulo 2:** Apresenta a fundamentação teórica, os conceitos, bem como as informações que sustentam o desenvolvimento do projeto;
- **Capítulo 3:** Descreve o desenvolvimento do projeto, focando no princípio de funcionamento das partes que o compõem, como também uma explicação do hardware desenvolvido e os métodos utilizados para validar o hardware desenvolvido, bem como os resultados encontrados ao término do desenvolvimento;
- **Capítulo 4:** Apresentada uma visão geral do presente trabalho, os problemas enfrentados durante o desenvolvimento do mesmo, bem como críticas e sugestões para melhorias que possam ser aplicadas em trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos elementos principais que contextualizam o trabalho. Serão abordados os principais aspectos técnicos de cada componente, bem como as suas funções dentro do âmbito geral do problema apresentado.

2.1 TRANSFORMADORES

A operação no fornecimento de energia, exige das companhias e seus colaboradores engenheiros e técnicos, a aplicação dos mais diversos conceitos e técnicas para este fim, que vem sendo estudado, desenvolvido e evoluindo ao longo do tempo. Esta evolução vem se desenvolvendo desde a concepção do primeiro transformador⁵ idealizado por Michael Faraday em 1831, conhecido como anel de Faraday, apresentado na Figura 2.1. Em suas experiências práticas ele descobriu que uma estrutura de duas bobinas enroladas em um anel de ferro, e submetendo a uma delas uma tensão contínua, induzia na outra uma pequena tensão por um curto intervalo de tempo. Com esta descoberta Faraday é considerado como um grande cientista, pois esta descoberta contribuiu muito para a utilização desta forma de energia. Porém até a consolidação da tecnologia empregada na utilização da energia elétrica, várias etapas foram superadas e vários eventos históricos marcaram esta trajetória. (DIAS; MARTINS, 2004)

⁵ Transformador - Máquina elétrica capaz de modificar os níveis de tensão e corrente, e transferir potência elétrica de um circuito para o outro.

Figura 2.1 – Anel de Faraday



Fonte: Dias, Martins, 2004.

Após as descobertas de Faraday e de vários ilustres cientistas e pesquisadores da eletricidade, a utilização desta forma de energia primeiramente se dava através da sua forma contínua que acarretava em problemas de logística de distribuição, e inviabilizava a transmissão em longas distancias, devido a grande bitola dos condutores. A definição da mudança para o sistema alternado polifásico como conhecemos hoje, se deu através de um fato histórico conhecido como a “guerra das correntes”, que justamente foi o embate entre Thomas Edson, detentor dos direitos industriais de energia elétrica sob a forma contínua, contra George Westinghouse e Nicola Tesla que buscavam a introdução e padronização do sistema de corrente alternada. O fim desta disputa se deu em 1893, quando pela primeira vez ocorreu a transmissão de energia elétrica em corrente alternada a partir da usina hidroelétrica nas Cataratas do Niágara, e o sistema se consolidou como padrão para todo mundo. (DIAS; MARTINS, 2004)

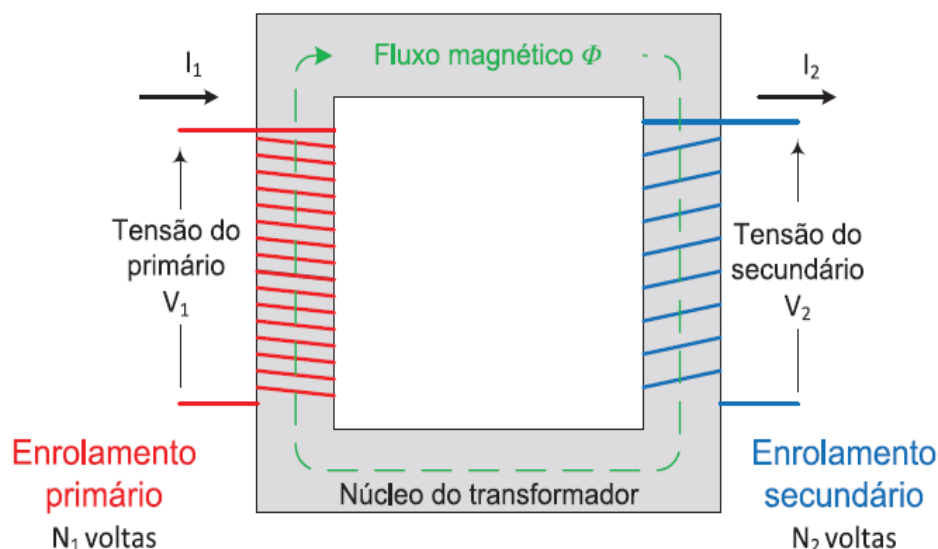
A validação da padronização deste novo sistema de distribuição em corrente alternada ocorreu devido a facilidade em adequar os níveis de tensão e corrente através do transformador que é peça chave na logística da universalização da energia elétrica, conectando os sistemas de geração, transmissão e distribuição. Desta maneira completando as ideias de Tesla, a implementação deste sistema pioneiro em corrente alternada configurou-se com a obtenção da patente de Lucien Gaulard e de Jhon Dixon Gibbs (inventores do transformador para sistemas de potência em Corrente alternada), por George Westinghouse. (DIAS; MARTINS, 2004)

Assim, nota-se que a invenção do transformador foi um fator importante que permitiu toda evolução da distribuição de eletricidade até os dias atuais, conectando os sistemas em grandes distâncias com elevada eficiência, tornando a distribuição de eletricidade economicamente viável. Ao longo do tempo foram implementadas algumas modificações tecnológicas que atualizaram os projetos dos transformadores tornando-os mais eficientes e robustos de acordo com as suas finalidades, porém o conceito básico de funcionamento ainda permanece inalterado desde a sua concepção, o qual será aprofundado nos tópicos seguintes.

2.1.1 Funcionamento básico

O transformador é uma máquina eletromagnética constituída de enrolamentos de fios elétricos, cuja nomenclatura é dada por bobinas (N_1 e N_2), e um caminho otimizado para o fluxo magnético (Φ) construído por lâminas de ferro, chamado de núcleo, conforme Figura 2.2. O funcionamento de um transformador elétrico, baseia-se nos fundamentos do eletromagnetismo, onde define que um fluxo magnético variável produzido pela corrente I_1 , é conduzido até o enrolamento secundário pelo núcleo, e a sua interação com este, é responsável pelo surgimento de uma Força eletromotriz. Estes são fenômenos de mútua indução entre dois circuitos N_1 e N_2 eletricamente isolados. (NASCIMENTO, 2011)

Figura 2.2 – Transformador elementar



Fonte: Carvalho, 2013.

2.1.2 Transformador monofásico ideal

Para um melhor entendimento dos princípios funcionais de um transformador, adota-se o modelo de transformador ideal, onde pode-se avaliar todos os fenômenos eletromagnéticos sem a consideração de perdas. O transformador ideal é assim definido:

Um transformador monofásico ideal é aquele em que o acoplamento entre seus enrolamentos é perfeito, ou seja, todos concatenam, ou “abraçam”, o mesmo montante de fluxo. Isso significa assumir a hipótese de que a permeabilidade magnética do núcleo ferromagnético é alta ou, no caso ideal, infinita, e que o circuito magnético é perfeitamente fechado. (NBR 5356-1, 2007)

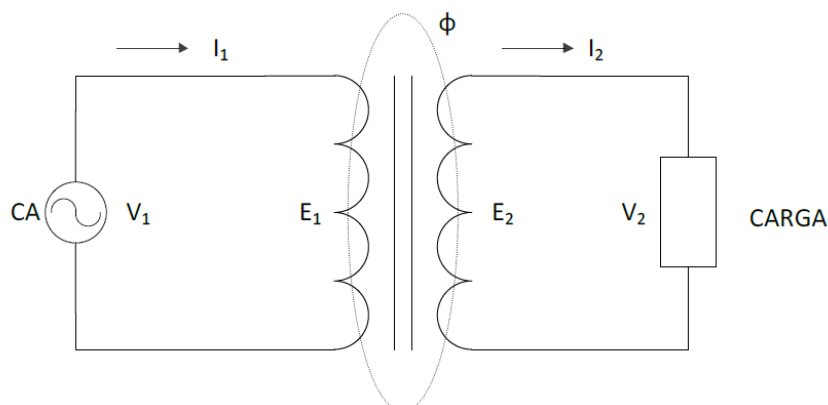
De modo resumindo o funcionamento de um transformador ideal é assim considerado:

- A permeabilidade μ do núcleo é infinita;
- Todo fluxo é confinado no núcleo e portanto, envolve todas as voltas dos dois enrolamentos;
- As perdas no núcleo e na resistência dos enrolamentos são nulas.

Para o transformador ideal ilustrado na Figura 2.3, o enrolamento do lado esquerdo, denominado aqui de primário, está conectado a uma fonte senoidal de potência, enquanto o lado direito, enrolamento secundário, está conectado a uma carga. Neste exemplo não há aquecimentos, perdas ou dispersão de fluxo no transformador. Toda potência é transmitida do primário para o secundário. Deste modo é fornecido a carga mediante o enrolamento secundário, toda potência que entra no enrolamento primário. (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). Tendo como premissa que a potência elétrica é dada pelo produto entre a tensão e corrente, pode-se afirmar que o produto de tensão e corrente é igual nos dois lados, ou seja:

$$P_E = P_S = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (0.1)$$

Figura 2.3 – Transformador monofásico ideal



Fonte: Baseado em Fitzgerald, 2006.

No funcionamento de um transformador ideal, pode-se dizer que o produto da corrente I_1 pelo número de voltas N_1 fornece a força magnetomotriz FMM, que produz o fluxo magnético Φ que circula dentro do núcleo. Como o núcleo é constituído de material de ferro de alta permeabilidade magnética, significativamente maior que a do ar, o fluxo fica confinado no interior do núcleo. Uma Força Eletro Motriz FEM proporcional à taxa de variação do fluxo devido a fonte senoidal, é induzida no enrolamento secundário, pelo qual pode circular uma corrente I_2 limitada a impedância conectada a este enrolamento.

Assumindo que o fluxo magnético varia de forma senoidal conforme a tensão e corrente V_1 e I_1 , e que o transformador é um modelo ideal, as tensões E_1 e E_2 induzidas pela variação de fluxo são iguais às tensões terminais V_1 e V_2 , respectivamente, conforme a lei de *Faraday*, (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

$$V_1 = E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (0.2)$$

$$V_2 = E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (0.3)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (0.4)$$

O resultado da razão entre as duas equações apresentadas, é um resultado o qual é chamado de fator K, que representa a relação de transformação do transformador. Logo, para um transformador ideal, ocorre a transformação direta conforme a razão do número de espiras de seus enrolamentos e considerando a manutenção da potência em (0.4), pode-se aplicar o fator K em (0.5) e (0.6). (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (0.5)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (0.6)$$

As perdas em um transformador podem ser desconsideradas, quando utiliza-se um modelo ideal, o qual permite um melhor entendimento para a análise do funcionamento de um transformador. Todavia na análise de um transformador real estas perdas representam importância, à medida que interfere no rendimento da máquina quando em operação. Considerando tal relevância, as perdas serão apresentadas a seguir.

2.1.3 Perdas no transformador

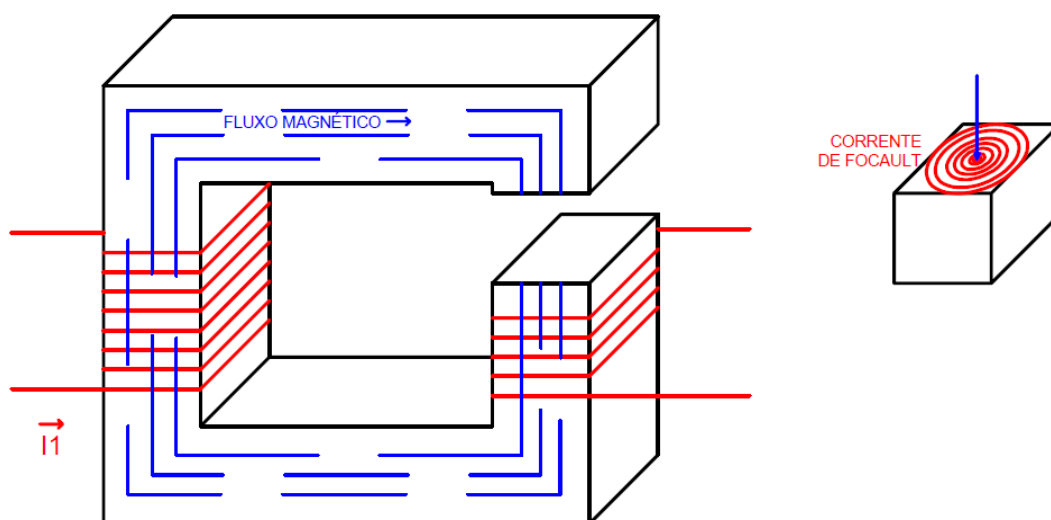
O transformador, bem como toda máquina elétrica, apresenta perdas no processo de transformação. Isto significa que uma parte da potência ao ser transferida para a carga, é consumida pela máquina antes de chegar ao seu destino final. Estas perdas ocorrem em todas as etapas do processo de transformação, e podem ser abordadas em duas modelagens distintas: Perdas no cobre, decorrentes do efeito joule da passagem da corrente elétrica pela resistência ôhmica intrínseca aos enrolamentos primário e secundário, e perdas no ferro ocasionadas principalmente pela histerese magnética, correntes parasitas no núcleo e fluxo disperso nos enrolamentos. (MARTIGNONI, 1991). As perdas serão apresentadas distintamente a seguir.

2.1.3.1 Perdas no ferro

O fluxo magnético variável criado pela corrente que circula no enrolamento primário percorre o núcleo constituído de material com elevada permeabilidade magnética, onde encontra uma condição favorável para a circulação. Todavia neste caminho alguns fenômenos ocorrem, impondo a este fluxo um consumo de energia ao qual chamamos de perdas no ferro. Estas perdas são divididas em três grupos que são apresentados separadamente: perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault, perdas por histerese e perdas por fluxo disperso.

- **Correntes de Foucault:** Como destacado anteriormente o núcleo é constituído de material ferromagnético que possui boas características magnéticas permitindo a circulação de fluxo magnético. Entretanto este material sendo metálico, também possui características de condução elétrica que ao ser atravessado pelo fluxo há a formação de anéis de corrente induzida. (Bastos, 2012). A Figura 2.4 representa um transformador com núcleo de material ferromagnético percorrido por um fluxo magnético Φ , produzindo anéis de corrente de Foucault representadas no corte em vermelho.

Figura 2.4 – Correntes parasitas no núcleo a partir do fluxo magnético



Fonte: Baseado em Nascimento 2011.

Ao percorrer o material ferromagnético, a corrente de Foucault imposta pelo fluxo, interage com a resistência elétrica do material gerando calor, ou perdas

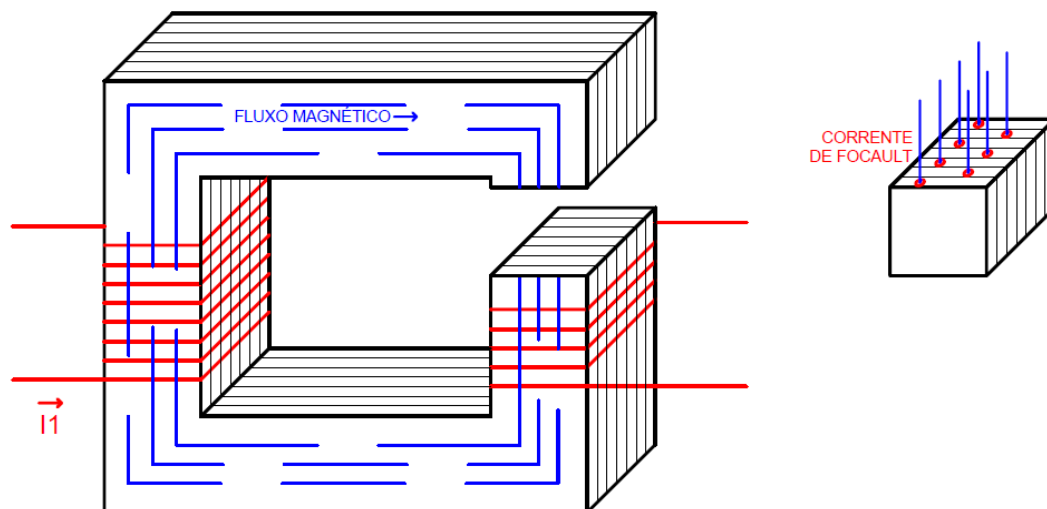
por efeito joule. Este efeito limita o funcionamento do transformador pelo excesso de temperatura no núcleo. Também o rendimento do transformador é afetado pela interação entre o fluxo magnético produzido pelas correntes de Foucault que tem sentido oposto ao fluxo magnético original, provocando redução no fluxo transferido ao enrolamento secundário devido a lei de Lenz, que essencialmente expressa: “o sentido da corrente induzida é tal que o fluxo produzido por ela tende a se opor à variação de fluxo que a originou.” (Bastos, 2012)

Desta forma, um fluxo com menor intensidade é guiado até o enrolamento secundário afetando conseqüentemente a potência transferida.

De conhecimento destes fenômenos nocivos ao bom funcionamento do transformador a tecnologia avançou de modo a diminuir os efeitos destas correntes de Foucault, uma vez que no âmbito real, é impossível eliminá-la. O núcleo passou a ser constituído em lâminas a fim de formarem conjuntamente o núcleo do transformador. Esta técnica mantém as características magnéticas do núcleo, sem prejuízo a circulação do fluxo magnético, porém do ponto de vista elétrico, as correntes parasitas são divididas pelas lâminas que são isoladas eletricamente entre si, impedindo a sua circulação totalmente livre através do aumento da resistência elétrica do núcleo, conforme Figura 2.5. Este isolamento entre as lâminas, é composto de uma fina película de vidro e de verniz à base de fosfato. Este revestimento apresenta excelente desempenho térmico, isolante e mecânico sendo muito utilizado pela indústria na construção de transformadores de potência. (BASTOS, 2012)

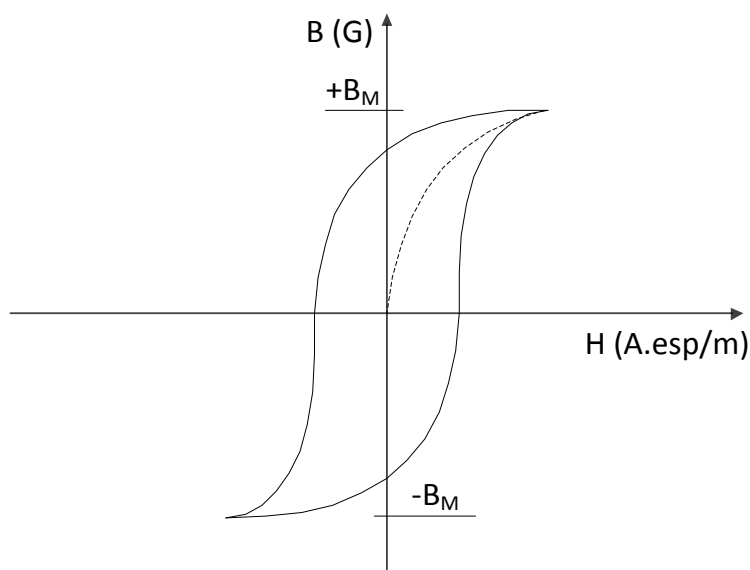
- **Perdas por histerese:** Outro efeito indesejado provocado pela passagem do fluxo magnético no núcleo dos transformadores é a curva ou laço de histerese característica, cuja representação relaciona a indução magnética (B) com a intensidade de campo magnético (H) sendo uma característica não linear. A quantidade de histerese está relacionada com a reorientação dos domínios magnéticos do material a cada inversão de ciclo, é obtida através da área limitada pela curva, conforme Figura 2.6. Este efeito, mostra que é consumida uma parte da energia do processo, para reorientar o sentido dos domínios magnéticos, surgindo uma memória magnética indesejável nos transformadores a qual nomeia-se perda por histerese. (BASTOS, 2012)

Figura 2.5 – Correntes parasitas no núcleo laminado a partir do fluxo magnético



Fonte: Baseado em Nascimento, 2011.

Figura 2.6 – Laço de histerese

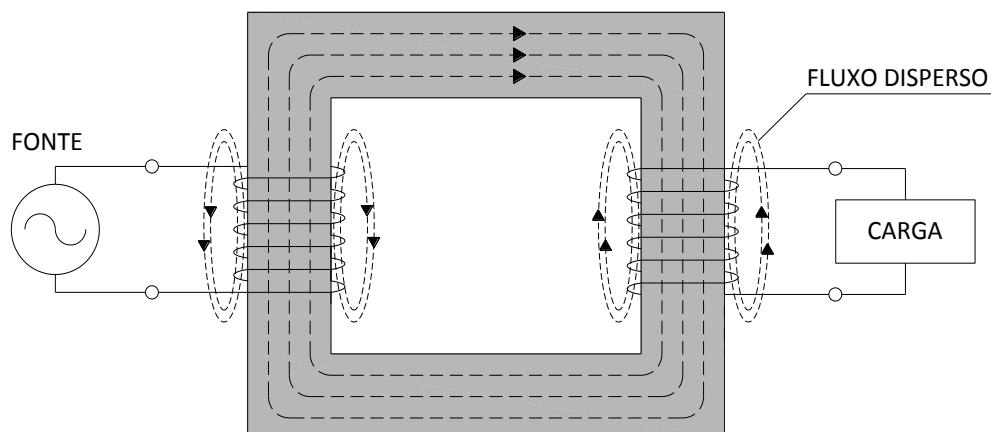


Fonte: Baseado em Bastos, 2012.

- **Fluxo disperso:** No funcionamento de um transformador real, uma parte do fluxo produzido pela corrente que circula no enrolamento não fica contida no núcleo. Há uma quantidade de fluxo disperso que circula pelo ar, ao redor do enrolamento que o produziu, sem concatenar-se com o outro enrolamento, conforme Figura 2.7. (MARTIGNONI, 1991)

Na construção de um transformador esta pequena parcela de fluxo disperso deve ser contabilizada, afim de o circuito equivalente representar com fidelidade as características próprias da máquina.

Figura 2.7 – Fluxo disperso



Fonte: Baseado em Martignoni, 1991.

2.1.3.2 Perdas no cobre

Os enrolamentos dos transformadores são constituídos basicamente de fios de cobre, por ser um material relativamente abundante e reunir características importantes para o processo de condução de energia elétrica, e ser maleável. Porém apesar de o material cobre ser um excelente condutor, apresenta uma pequena resistência ôhmica que ao ser submetida à passagem da corrente elétrica impõe uma perda por efeito joule. Esta perda é proporcional ao valor da resistência e da corrente que circula pelos enrolamentos tanto o primário quanto o secundário. (MARTIGNONI, 1991)

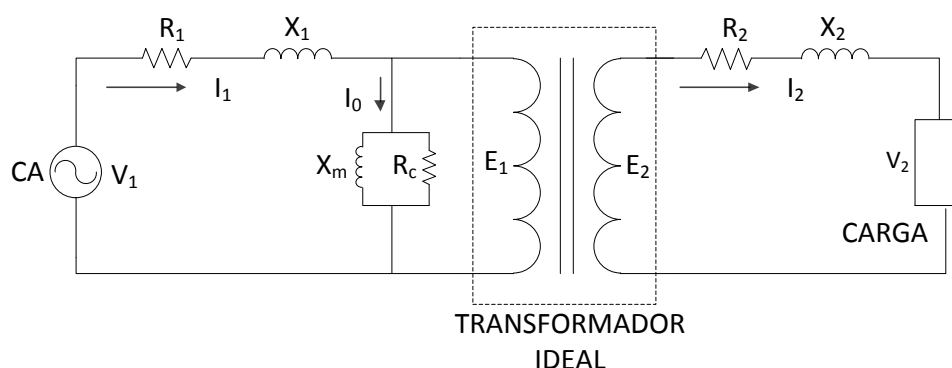
2.1.4 Transformador real e representação do circuito equivalente

De acordo com a abordagem acerca das perdas existentes no transformador, pode-se tratar da modelagem de um transformador real a partir das seguintes representações, conforme Figura 2.8:

- R_1 e R_2 representam as resistências elétricas, provenientes das características dos condutores dos enrolamentos primário e secundário respectivamente;
- X_1 e X_2 representam as reatâncias indutivas provenientes de efeitos dos fenômenos oriundos da corrente alternada nos enrolamentos primário e secundário respectivamente;

- R_c e X_m são representados em uma associação em paralelo caracterizando as perdas pelo efeito joule das correntes parasitas e a reatância indutiva de magnetização. (FITZGERALD; KINGSLEY; UMAS, 2006)

Figura 2.8 – Circuito equivalente do transformador monofásico

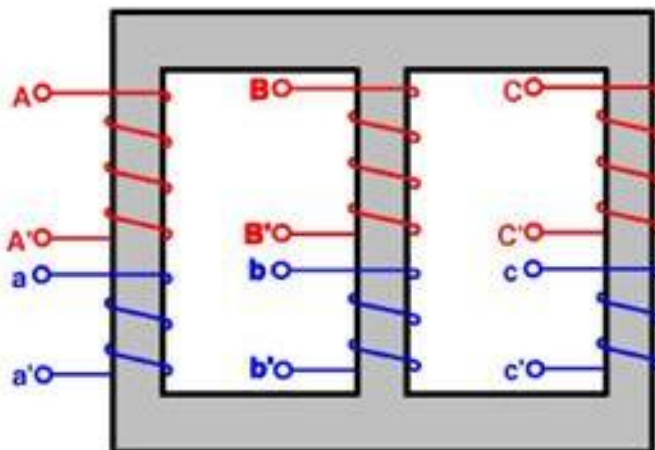


Fonte: Baseado em Fitzgerald, 2006.

2.2 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

A construção de um transformador trifásico, pode ser a junção de três transformadores monofásicos. Deste modo apenas as ligações das bobinas caracterizam um transformador trifásico. Estas ligações na sua grande maioria são as ligações em triângulo ou estrela. Um outro meio de construir um transformador trifásico é uma montagem em um núcleo tipo “E” e “I” onde acomoda-se as bobinas em três colunas distintas conforme Figura 2.9. (HARLOW, 2004)

Figura 2.9 – Transformador trifásico



Fonte: Harlow, 2004.

A topologia ilustrada na Figura 2.9, é consagrada por unir características técnicas e econômicas ótimas. Os fluxos produzidos pelos enrolamentos derivam da rede de alimentação, e são defasados de 120° . (HARLOW, 2004)

2.3 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência ou força, é assim denominado por reunir características próprias para a finalidade de transformação elétrica de grandes blocos de energia. Recebem esta nomenclatura quando a sua potência nominal ultrapassa os 500 kVA.

Transformador de potência é um equipamento estático, com dois ou mais enrolamentos, que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternadas em outro sistema, sendo este, geralmente, de tensão e corrente diferente do sistema original com a mesma frequência e com propósito de transmissão de energia elétrica. (IEC 60076,2000, p13)

Os transformadores de potência podem ser divididos em dois grandes grupos: Transformadores de potência trifásicos e transformadores de potência monofásicos, conforme Figura 2.10 à esquerda e direita, respectivamente.

Figura 2.10 – Ligações transformadores de potência



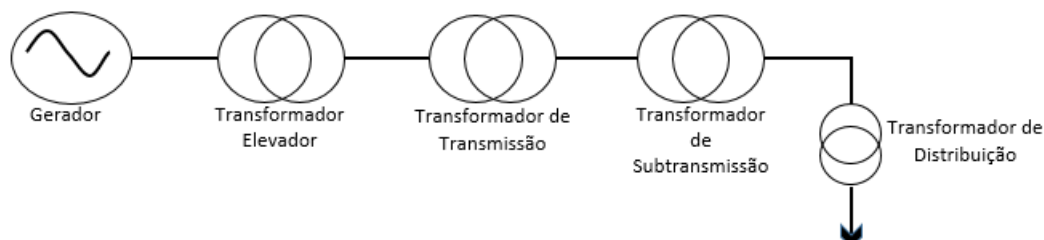
Fonte: Do autor, 2017.

A norma brasileira NBR 5356 (1993), define o transformador de potência como “transformador cuja finalidade principal é transportar energia elétrica entre as partes de um sistema de potência”.

Como já descrito anteriormente, os transformadores estão presentes em todas as etapas que percorre a energia elétrica até a sua chegada aos consumidores. Eles são empregados nos sistemas de geração, transmissão, subtransmissão e distribuição, podem ser classificados como: transformadores elevadores, transformadores de transmissão, transformador de subtransmissão e transformador de distribuição. (BECHARA, 2010)

Basicamente na saída dos geradores nas usinas há um transformador elevador para adequar os níveis de tensão e corrente para o serviço de transmissão, Nesta etapa todas as fontes de energia se conectam e formam um grande anel, os sistemas de transmissão derivam deste anel a energia através de transformadores transmissão afim de ajustar os níveis de tensão para atender aos grandes consumidores e ou os sistemas de subtransmissão, conforme Figura 2.11. (D'AJUZ, 2013). E é justamente nesta etapa em que se encontram os transformadores que o nosso trabalho trata.

Figura 2.11 – Esquemático simplificado do SIN

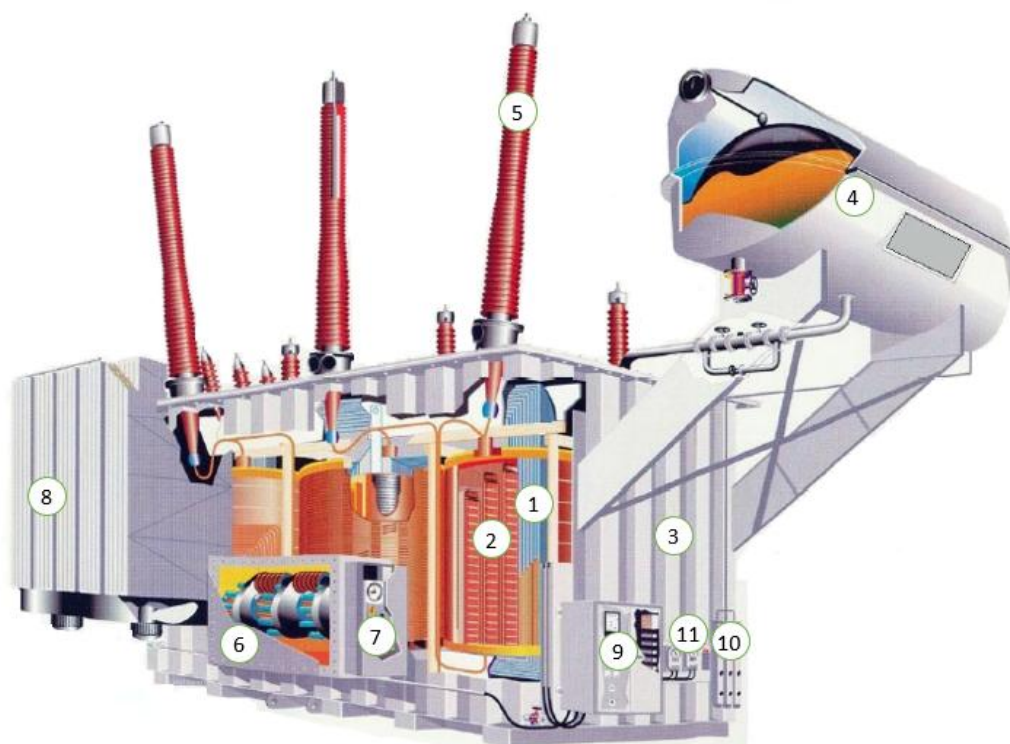


Fonte: Baseado em D'Ajuz, 2013.

2.3.1 Elementos associados a transformadores de potência

Com o intuito de exemplificar com mais detalhes os dispositivos periféricos intrínsecos ao transformador de potência, estratificou-se os componentes conforme Figura 2.12.

Figura 2.12 – Elementos componentes de transformadores de potência

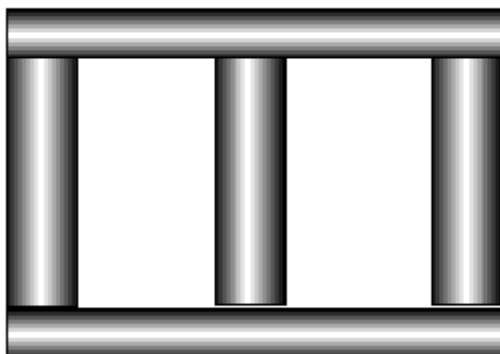


Fonte: Baseado Manual de transformadores WEG, 2018.

A seguir detalhamento das partes componentes do transformador de força, conforme Figura 2.12.

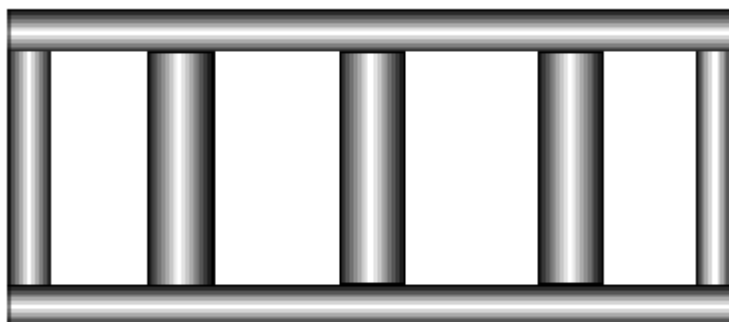
1 – Núcleo: é construído por um feixe de lâminas para minimizar os efeitos das perdas no ferro, já apresentado anteriormente. O núcleo dos transformadores de potência é construído com colunas verticais, onde as principais são envolvidas pelos blocos de bobinas, e as colunas periféricas são denominadas de retorno, para o fechamento do circuito magnético. As Figura 2.13 e Figura 2.14 a seguir, ilustram os principais tipos de núcleos de transformadores de potência.

Figura 2.13 – Núcleo de Transformador de potência com três colunas principais



Fonte: WEG, 2018.

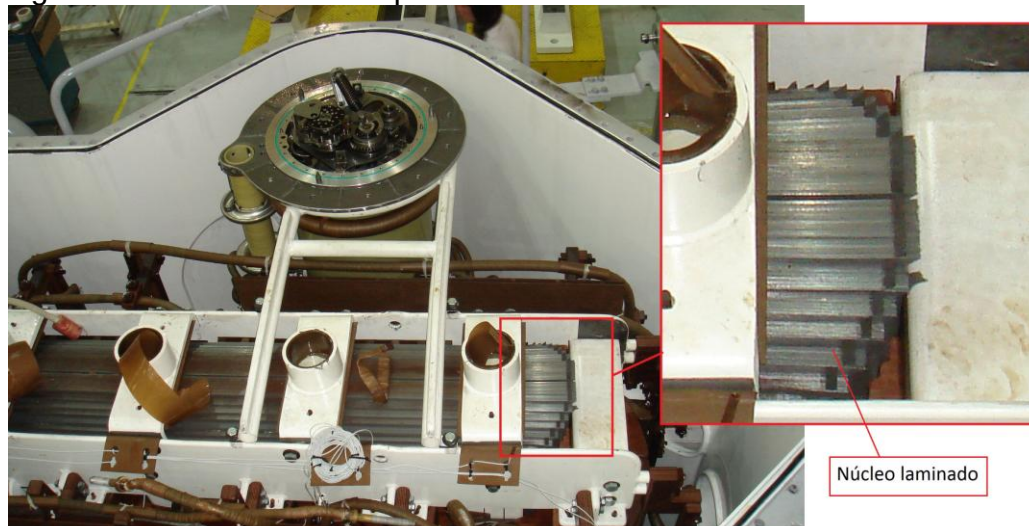
Figura 2.14 – Núcleo de Transformador de potência com três colunas principais e duas de retorno



Fonte: WEG, 2018.

Na Figura 2.15 destaca-se a montagem do núcleo dentro de um transformador de potência real, com a tampa superior removida para inspeção.

Figura 2.15 – Vista das chapas de um núcleo real



Fonte: Do autor, 2012.

2 – Enrolamentos: são um conjunto espiras formadas por condutores de cobre, podendo ser isolados com papel ou envernizados, formando bobinas cilíndricas. As bobinas podem ser construídas em arranjos físicos do tipo helicoidal, em camadas, discos contínuos ou discos entrelaçados. A relação do número de espiras dos enrolamentos do transformador, define os seus níveis de operação, havendo a possibilidade de haver derivações intermediárias das bobinas com terminais denominados taps, que podem ser empregados em sistemas em que é obrigatório o desligamento do transformador para a sua mudança (sistema de comutação sem tensão), ou sistemas automáticos de comutação como os comutadores de derivação em carga. A Figura 2.16 ilustra o enrolamento de um transformador de potência real.

Figura 2.16 – Enrolamento real de um transformador de potência



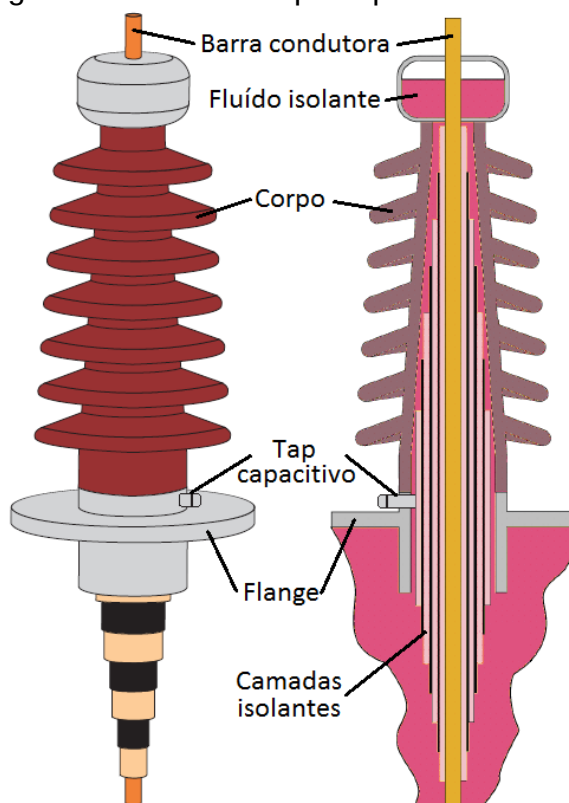
Fonte: Do autor, 2012.

3 – Tanque principal: o tanque principal é uma caixa de aço, que tem a função de abrigar a parte ativa, conjunto composto pelas bobinas e o núcleo, e o líquido isolante ou óleo isolante. O óleo por sua vez desempenha um papel importantíssimo na operação do transformador de potência, como a de refrigeração, e a de isolamento entre as partes energizadas das não energizadas.

4 – Tanque de expansão de óleo: trata-se de um tanque que serve como reservatório do líquido isolante que preenche o transformador. Devido a variação de temperatura a que o transformador de potência é submetido, tanto a temperatura atmosférica como a temperatura gerada pelas perdas, o líquido isolante também denominado óleo isolante, sofre o efeito de dilatação volumétrica, e necessita de um espaço para a sua expansão.

5 – Buchas: as buchas são equipamentos responsáveis por conduzir o fluxo de energia para os enrolamentos. Basicamente fazem a ligação da parte interna do transformador com o meio externo para as conexões elétricas dos circuitos em que o transformador está inserido. Normalmente as buchas com tensão superior a 13,8 kV são do tipo condensivas, onde, no seu interior de porcelana, há uma envoltória de papel e filme metálico imersos em óleo isolante, que formam um capacitor, conectado a um terminal, como ilustrado na Figura 2.17. Por este terminal é possível executar testes para certificar o estado de isolamento da bucha, e também é possível monitorar on-line o estado da bucha quanto a degradação do seu isolamento.

Figura 2.17 – Bucha tipo capacitiva



Fonte: Manual de Transformadores WEG, 2018.

6 – Comutador sob carga: é um dispositivo eletromecânico que propicia a variação dos níveis de tensão através da mudança dos terminais de derivação do transformador, sem a necessidade de desligamento do mesmo. Este elemento será abordado com mais detalhes, devido a sua importância no conjunto de equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

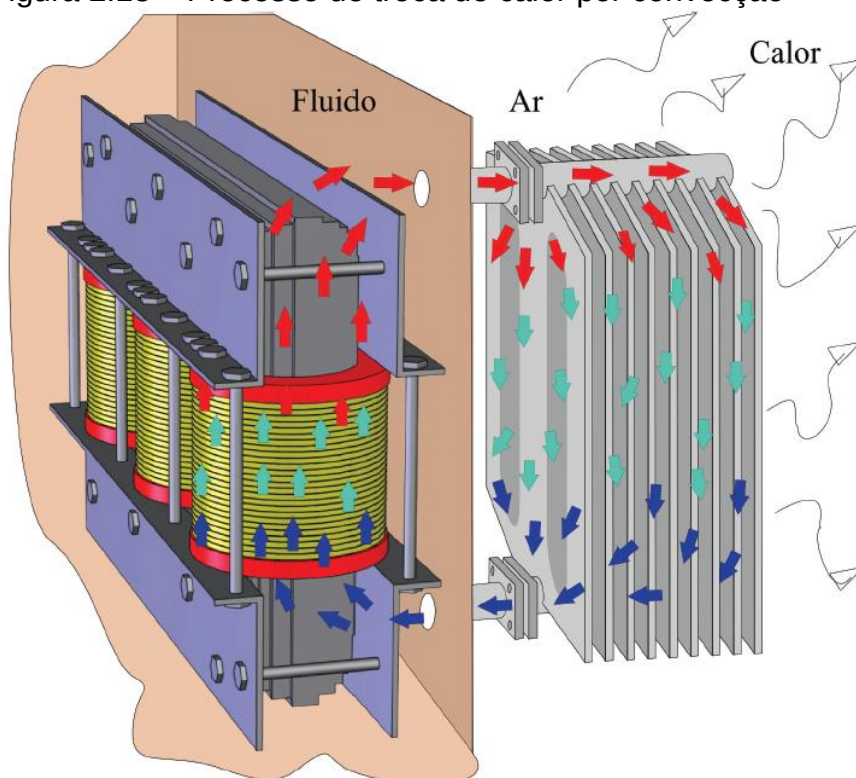
7 – Acionamento do comutador sob carga: é o responsável pela transmissão mecânica para o comutador executar a mudança de taps. É através do acionamento que é possível conhecer em qual tap, conseqüentemente em qual relação está operando o transformador. Quando o transformador é montado, o acionamento e o comutador são sincronizados, e este ajuste jamais poderá ser alterado, para conservar o bom estado de funcionamento do conjunto do transformador.

8 – Radiadores/trocadores de calor: são instalados na parte externa do tanque principal interligando os níveis mais baixos aos níveis mais altos do tanque, e fazem a circulação do óleo isolante através de aletas que, em contato com o ar ambiente, perdem calor e assim resfriam o óleo, como ilustra a Figura 2.18. De acordo com a norma IEC 60076, a circulação do óleo pode ser do tipo natural (ONAN – óleo natural, ar natural), com o ar forçado através de moto ventiladores nos radiadores (ONAF – óleo natural, ar forçado), com moto bombas para aumentar a velocidade de circulação do óleo (OFAF – óleo forçado, ar forçado), com sistema de óleo dirigido (ODAF – óleo dirigido, ar forçado) e também com trocadores de calor que utilizam água como meio refrigerante ao invés de ar ambiente (OFWF – óleo forçado, água forçada).

9 – Painel de controle: é composto por uma caixa metálica com índice de proteção no mínimo IP 55, onde estão instalados os dispositivos que permitem a interface com os controles e monitoramento dos acessórios e equipamentos do transformador de potência.

10 – Secador de ar: é um elemento, que força a passagem do ar que entra no tanque de expansão, pelo elemento secante, quando da retração volumétrica do óleo devido a diminuição da temperatura. O elemento secante é composto de sílica gel e retém a umidade, melhorando a qualidade do ar que entra no tanque principal do transformador. Esta etapa é importante, pois a umidade é um fator que degrada o isolamento do óleo mineral, diminuindo a vida útil do transformador.

Figura 2.18 – Processo de troca de calor por convecção



Fonte: Aguiar, 2007.

11 – Termômetros: são instrumentos que fazem a leitura da temperatura do transformador, entregam a temperatura medida em interface analógica e ou digital, controlam a entrada da operação dos moto ventiladores de acordo com a temperatura ajustada e também disparam alarmes e ou comandos de desligamento quando o transformador atinge temperaturas danosas para a sua operação normal.

Todos estes acessórios descritos anteriormente contemplam o transformador de força. Em algumas empresas o nível de exigência pode solicitar mais ou menos componentes, redundância, especificações mais detalhadas, que acarretam em mais qualidade no controle e monitoração do transformador.

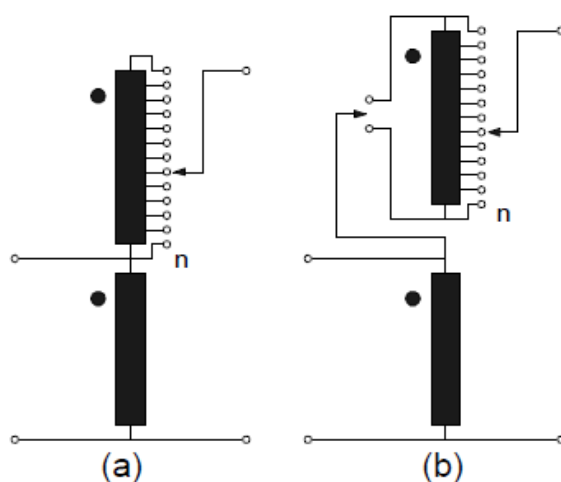
2.4 COMUTADOR DE DERIVAÇÃO EM CARGA

O primeiro comutador de derivação em carga foi construído em 1926, pelo Dr. Bernhard Jansen, que inventou uma chave capaz de alterar a relação de transformação de um transformador de uma serraria. O problema de variação de tensão era percebido toda vez que alguma tora de madeira era serrada, oscilando os

níveis de tensão acarretando em problemas de funcionamento aos outros equipamentos elétricos conectados na rede. Devido este grande problema o Dr. Bernherd criou o primeiro protótipo, e o instalou na serraria contornando o problema com a sua invenção. Este equipamento ficou conhecido mundialmente como “*REINHAUSEN tap changer*” e a partir do final da segunda guerra a demanda por este produto cresceu muito no mundo todo, sendo instalado pelos principais fabricantes de transformadores de potência para atender os seus consumidores. (MASCHINENFABRIK REINHAUSEN, 2018)

O esquema físico da representação de um transformador de potência com comutador em carga para controle de tensão, é mostrado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Esquema de ligação de comutador de derivação em carga



Fonte: Maschinenfabrik Reinhausen, 2003.

A estrutura básica é a de um autotransformador sendo que em geral há dois tipos básicos de técnicas para efetuar a mudança de taps de um transformador. (NBR 5356, 1923).

- Variação linear, representado pela Figura 2.19-(a), que faz a mudança em um único sentido de forma linear a partir da posição neutra;
- Reversão de polaridade (Fluxo) representado pela letra Figura 2.19-(b) que conta com um arranjo que percorre os dois sentidos a partir da posição neutra.

Estes equipamentos são chaves com características construtivas complexas, cujas manobras são realizadas automaticamente, com o transformador

energizado e conectado a carga. A operação destes comutadores abrange os seguintes componentes:

- **Sistema de acionamento motorizado:** Montado externamente ao transformador é responsável pela transmissão mecânica de energia para execução da manobra por parte do comutador.
- **Chave de carga:** composta por resistores é a parte mais solicitada da chave comutadora, chaveando os circuitos realizando a transição de um tap para o outro sem que haja interrupção do fluxo de potência. Fica acondicionada dentro do tanque principal do transformador, em um compartimento próprio com óleo próprio que não entra em contato com o óleo do transformador.
- **Chave seletora:** é a parte do comutador sob carga, que fica imersa dentro do tanque do principal e em contato com o óleo do transformador. A mudança de passagem dos contatos, taps, ocorre sem a interrupção do circuito onde o chaveamento é feito pela chave de carga.

A Figura 2.20 ilustra a composição do comutador, com a chave seletora na parte inferior, e a chave de carga que se encontra dentro do cilindro na parte superior.

As duas partes da chave, a que fica dentro do cilindro na parte superior e a parte de baixo, devem operar de forma sincronizada, afim de garantir o perfeito funcionamento do sistema, podendo ocorrer acidentes que tornam irreparáveis os danos ao transformador, na ocorrência de problemas devido à falta de sincronismo destes dispositivos.

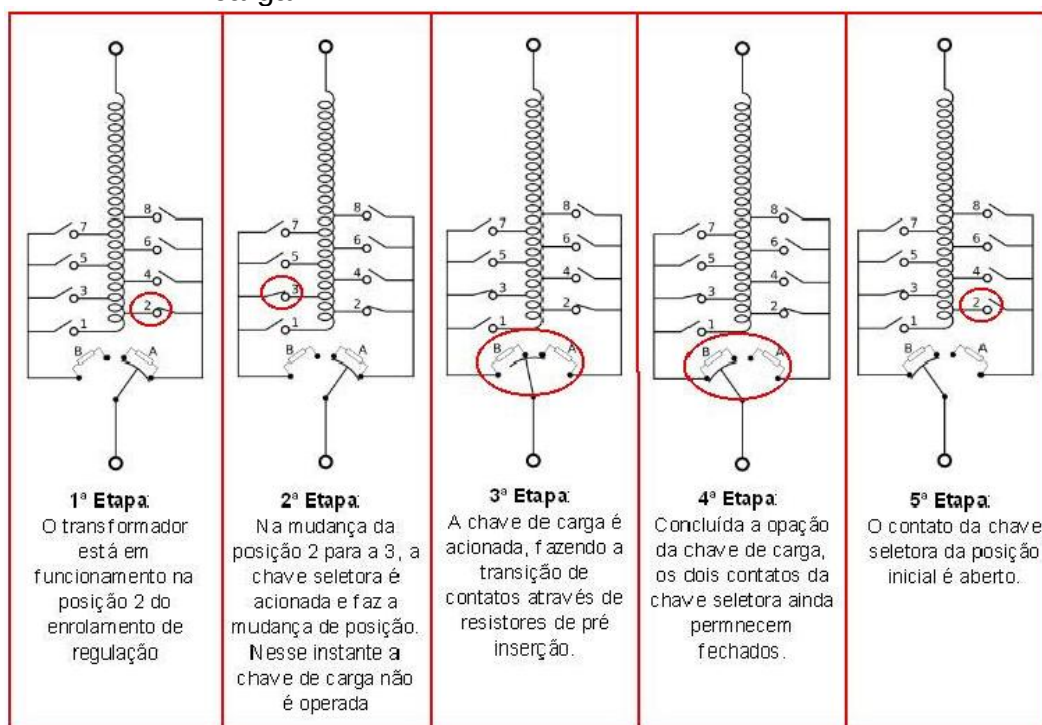
Na Figura 2.21 é ilustrado o funcionamento de um comutador sob carga, em cinco importantes etapas, para a troca de tap do enrolamento do transformador.

Figura 2.20 – Comutador de derivação em carga Tipo M



Fonte: Maschinefabrik Reinhausen, 2003.

Figura 2.21 – Esquema de funcionamento do comutador de derivação em carga



Fonte: Maschinenfabrik Reinhausen, 2003.

Desta maneira a mudança de relação, e conseqüentemente o ajuste de tensão, é realizado sem que o consumidor final perceba. O ponto crítico da mudança ocorre entre a terceira e quarta etapas, em aproximadamente 16 milissegundos. O breve tempo é necessário para evitar a deterioração dos resistores de transição, devido a elevada corrente a que são submetidos. O tempo total de comutação, entre a primeira e quinta etapa, é de aproximadamente 6 segundos. (Reinhausen, 2013)

Existem outros modelos de chaves, de outros fabricantes consagrados como: ABB, Mitsubishi, Hitachi Line, Westinghouse, entre outros. Porém as chaves da fabricante Maschinenfabrik Reinhausen, ou MR, são extremamente populares, e as principais companhias de energia elétrica contam com estes equipamentos instalados em seus parques.

O comutador de derivação por estar conectado diretamente no circuito das bobinas do transformador, torna-se parte inseparável deste, impedindo o seu funcionamento em casos de contingência. Em outras palavras, se houver um problema no funcionamento do comutador, o transformador é desligado automaticamente, e fica fora de serviço, até que o problema seja resolvido.

Contudo o comutador está em uma posição delicada da operação e por se tratar de uma peça com elevada complexidade mecânica sujeita a desgaste, a degradação das partes isolantes elétricas ao longo do tempo, e a grande solicitação de manobras, este equipamento precisa de um plano de manutenção que permita um grau de confiabilidade para a correta operação do sistema.

2.4.1 Manutenção do comutador de derivação em carga

A manutenção do comutador, está restrita a chave de carga localizada na parte interna do cilindro e ao acionamento motorizado localizado na parte externa do transformador. Os demais componentes como chave pré-seletora e seletor que encontram-se dentro do transformador, e em contato com o óleo isolante do mesmo, não necessitam de intervenção de manutenção podendo ser acompanhado através de ensaios elétricos para certificar a sua integridade ao longo do tempo. Estes ensaios são realizados juntamente com as manutenções programadas dos comutadores, em aproveitamento do desligamento do transformador. (MILASCH, 1984)

As datas de intervenções nos comutadores, são definidas pela equipe de manutenção, baseado nas recomendações do fabricante. Cada modelo de chave de cada fabricante possui uma determinação de manutenção por quantidades de manobras ou por tempo de operação. Nas distribuidoras de energia, em geral, o tempo de operação ocorre primeiro, e as manutenções são programadas levando em consideração este fator que contempla modelos que sofrem manutenção a cada três, cinco e sete anos de operação, sendo que as chaves mais modernas chegam a 20 anos de operação sem a necessidade de manutenção. (MILASCH, Maschinenfabrik Reinhausen, 2013)

As equipes que realizam a manutenção nestes equipamentos, necessitam de um treinamento específico e de conhecimento detalhado acerca do equipamento, tendo em vista que o tempo de desligamento que o transformador fica disponível para manutenção, deve ser criteriosamente respeitado, obedecendo os horários de início e fim da intervenção, para não prejudicar o sistema de distribuição e consequentemente os consumidores. As manutenções são realizadas em normalmente oito horas e tem por finalidade verificar:

- A existência de vazamento de óleo nos flanges com o transformador, e com o cilindro do comutador;
- Verificação da vedação da caixa do mecanismo do acionamento motorizado;
- Verificação do sistema de calefação da caixa de comando do acionamento motorizado;
- Verificação dos componentes internos da caixa de comando do acionamento motorizado e lubrificação;
- Retirada da chave comutadora do interior do cilindro, ilustrada na Figura 2.22;
- Retirada de todo óleo contido no interior do cilindro, bem como o excedente contido no tanque de expansão do comutador;
- Revisão e medição dos contatos fixos e móveis da chave, substituindo quando os valores forem inferiores aos indicados;
- Limpeza da chave, removendo todas as impurezas provenientes do processo de comutação;
- Revisão e medição dos resistores de transição, substituindo quando a medição estiver fora da especificação;
- Troca do óleo isolante.

Figura 2.22 – Chave didática do comutador de derivação em carga



Fonte: Maschinenfabrik Reinhausen, 2003.

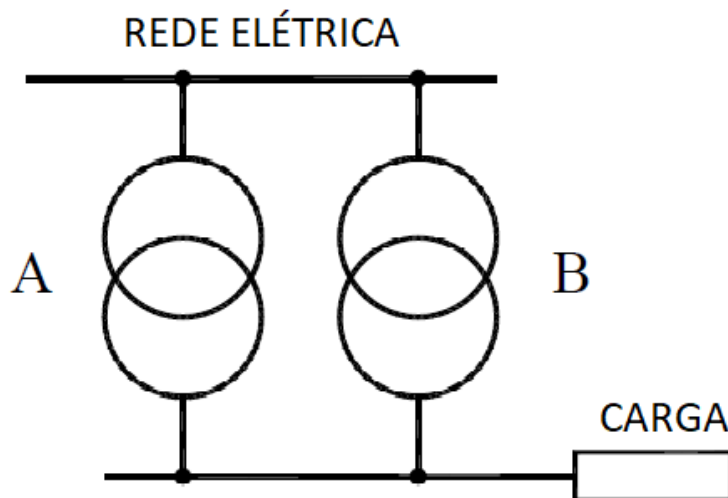
A Figura 2.22 ilustra a chave do comutador em uma apresentação didática, com o cilindro transparente onde na parte externa há as conexões com os enrolamentos do transformador e na parte interna é possível visualizar a chave, que ao movimentar-se muda as ligações de acordo com o esquema da Figura 2.21.

Após todo o processo de manutenção, as equipes realizam ensaios de rotina no transformador a fim de certificar que a chave foi posicionada corretamente, e o funcionamento do transformador esteja adequado para o retorno à operação.

2.5 OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM PARALELO

A operação de transformadores em paralelo é um recurso muito usado por companhias tanto no âmbito industrial, como para fins de distribuição de energia elétrica. De acordo com as definições usuais: “Transformadores estão em paralelo quando estão submetidos a mesma rede de alimentação elétrica, e conjuntamente fornecem energia para a mesma carga”, como ilustra a Figura 2.23. (LEMOZY, 2010)

Figura 2.23 – Representação de associação de transformadores “A” e “B” em Paralelo



Fonte: Lemozy, 2010.

Este recurso visa alcançar objetivos técnico-financeiros vantajosos como segue:

- Aumentar a capacidade de fornecimento de energia elétrica instalando uma unidade em paralelo quando a potência da unidade existente está superada. Em geral, é mais econômico agregar uma unidade em paralelo a substituir o transformador existente por uma unidade de maior potência;
- Se a demanda por energia for variável de acordo com a sazonalidade por exemplo, é vantajoso conectar unidades em paralelo à medida que a demanda aumenta e desliga-las quando ocorre o contrário, pois é menos eficiente usar um transformador que esteja dimensionado para a maior potência, nos períodos de baixa demanda. Associando transformadores em paralelo de acordo com a variação da demanda, mantém o carregamento nos transformadores mais estabilizados mantendo uma operação mais eficiente. (LEMOZY, 2010)

Todavia, para executar um projeto de transformadores em paralelo exige das empresas um investimento em equipamentos adicionais para manter o nível de segurança e de operacionalidade adequados onde algumas condições devem ser observadas:

- 1º. Os transformadores devem pertencer ao mesmo grupo de ligação trifásico;

- 2º. As tensões secundárias dos transformadores devem ter o mesmo valor nominal;
- 3º. As relações de transformação devem ser iguais aos dois transformadores;
- 4º. As tensões e impedâncias de curto-circuito devem ser iguais nos dois transformadores.
- 5º. Os dois transformadores devem ser instalados com dispositivos de manobra para os enrolamentos primário e secundário, permitindo a entrada em modo paralelo, ou desconectar o modo paralelo sem interrupções aos consumidores.

A primeira consideração é *sine qua nom*, ou seja, se não atende a este parâmetro a operação em paralelo não pode ser realizada. Devido ao defasamento produzido nas ligações trifásicas, diferenças angulares podem inviabilizar a conexão em paralelo.

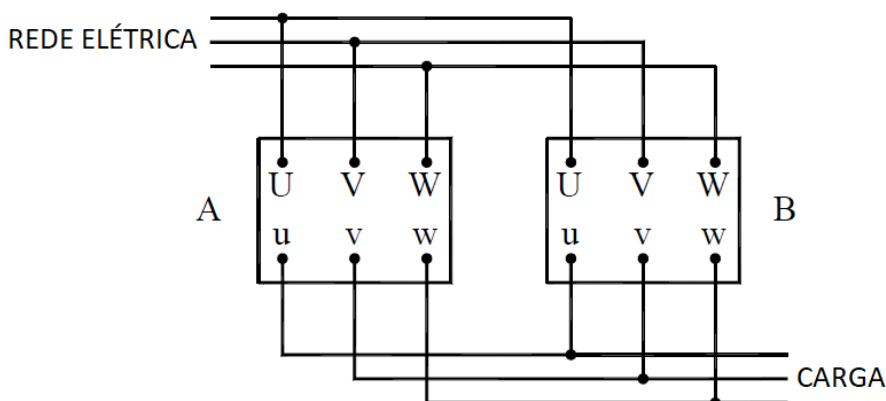
As demais considerações ao serem seguidas, tornam a operação em paralelo totalmente eficiente, tendo em vista que os parâmetros físicos dos transformadores permanecem inalterados durante a operação, de forma que a carga é distribuída igualmente entre os transformadores que por sua vez tem o seu desempenho térmico similar em função da variação da carga conectada aos seus terminais. (LEMOZY, 2010)

Torna-se uma condição deficitária do ponto de vista de eficiência, quando transformadores são submetidos a uma configuração em paralelo que não satisfazem alguma das considerações da 2º à 4º, de forma que a potência não é distribuída igualmente ocorrendo o equilíbrio do sistema através de uma corrente reativa circulante nos secundários dos transformadores. Devido a circulação desta corrente, há um aquecimento desnecessário proveniente das perdas intrínsecas ao transformador e a ocupação de uma parte da potência, limitando a sua capacidade de fornecimento.

Nas aplicações em subestações de distribuição de energia, a configuração do paralelismo de transformadores ocorre sempre com sistemas trifásicos. Nestas instalações os transformadores compartilham a mesma fonte e a mesma carga, para tanto a sequência de fase que é conectada ao enrolamento primário obrigatoriamente deve ser a mesma para os dois transformadores, bem

como a sequência de fases conectadas no enrolamento secundário e carga, conforme Figura 2.24. (LEMOZY, 2010)

Figura 2.24 – Representação de associação de transformadores trifásicos “A” e “B” em Paralelo



Fonte: LEMOZY, 2010.

Como já mencionado anteriormente as concessionárias de energia tem um compromisso pela qualidade do fornecimento aos seus consumidores. Para tanto, utilizam ligações de transformadores em paralelo com regulação automática de tensão eficaz. De acordo com o item 2.4, a regulação automática dos taps do transformador, altera o valor da relação de transformação ajustando os valores de saída de acordo com os níveis pré-estabelecidos. Pelo fato de estarem conectados em paralelo, os dois transformadores devem variar as posições de Tap em conjunto a fim de permanecerem na mesma relação, mantendo as condições de paralelismo eficiente. A falta de sincronismo entre os taps de transformadores em paralelo acarreta em circulação de corrente tornando o sistema ineficiente, pelos motivos já apresentados neste item. (LEMOZY, 2010)

Em geral os sistemas de paralelismo de transformadores dotados de sistema de regulação automática, são mantidos de acordo com a filosofia de operação de “Mestre” e “Escravo”, onde o transformador definido como mestre ao receber um sinal para mudança de Tap, dispara um comando para a mesma ordem ser reproduzida pelo(s) Escravo(s), e o(s) monitora para certificar que a ordem fora executada corretamente através da leitura de posição de cada transformador. Desta maneira os dois ou mais transformadores alteram os valores de relação de transformação ao mesmo tempo corrigindo o valor de tensão eficaz e mantendo a

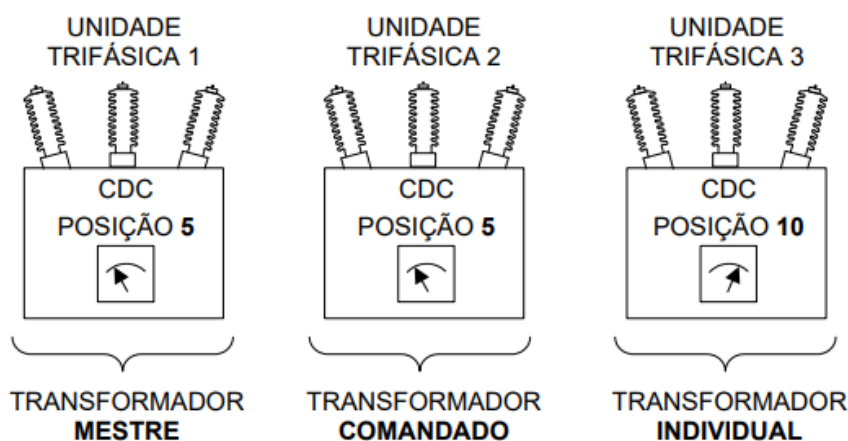
corrente de circulação entre eles com valor desprezível, próximo de zero. Esta operação necessita de um controlador que execute a operação e o monitoramento do sistema de paralelismo de modo que na ocorrência de qualquer problema, possa enviar um alarme para que seja tomada uma decisão por parte do centro de operações.

2.6 SUPERVISOR DE PARALELISMO

De acordo com o discorrido no item anterior a operação e supervisão da operação em paralelo de transformadores trifásicos, é executada pelo módulo de supervisão de paralelismo. Abordaremos um modelo utilizado na supervisão de grande parte dos transformadores de força instalados nos sistemas de distribuição de energia elétrica nacional.

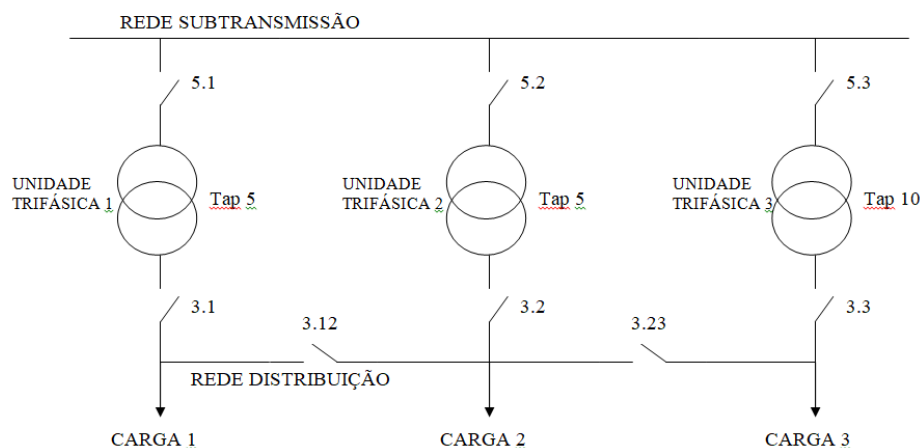
Os supervisores de paralelismo operam com a filosofia de Mestre e Escravo, para transformadores em paralelo, tendo a possibilidade de operar em modo “Individual”, quando a situação de paralelismo é desfeita conforme as Figuras 2.25 e 2.26.

Figura 2.25 – Sistema de paralelismo de transformadores trifásicos



Fonte: Tretech, 2013.

Figura 2.26 – Diagrama unifilar do sistema de paralelismo



Fonte: Baseado em LEMOZY, 2010.

Para satisfazer a condição do sistema representada pelas Figuras 2.25 e 2.26, as chaves 5.1, 5.2 e 5.3 da Figura 2.26, correspondem a alimentação dos enrolamentos primários dos transformadores, e devem ser consideradas fechadas. As chaves 3.1, 3.2 e 3.3 representam as chaves de saída dos transformadores conectando os enrolamentos secundários com as respectivas cargas, e devem ser consideradas fechadas. As chaves 3.12 e 3.23 representam as chaves de interligação de barras que amplia as possibilidades de redundâncias de suprimento das cargas pelos transformadores, bem como faz o paralelismo dos mesmos interligando as cargas e os secundários dos transformadores. Para estas chaves no exemplo apresentado considera-se a chave 3.12 fechada, configurando o paralelismo entre as unidades trifásicas 1 e 2, sendo estas unidades operando em Mestre e Escravo. A chave 3.23 permanece aberta, sendo a carga 3 atendida somente pela unidade trifásica 3, e por isso na filosofia de funcionamento do sistema opera em modo individual, regulando a tensão eficaz somente da sua respectiva carga.

Qualquer transformador pode ser selecionado como Mestre, Escravo ou Individual, de modo a satisfazer a necessidade da operação, ou por questões de manutenção, ou em caso de contingências operacionais. Porém deve-se respeitar a premissa de que não haja mais do que um Mestre e que não haja Escravos sem a presença de um Mestre, para que o sistema possa funcionar de modo adequado.

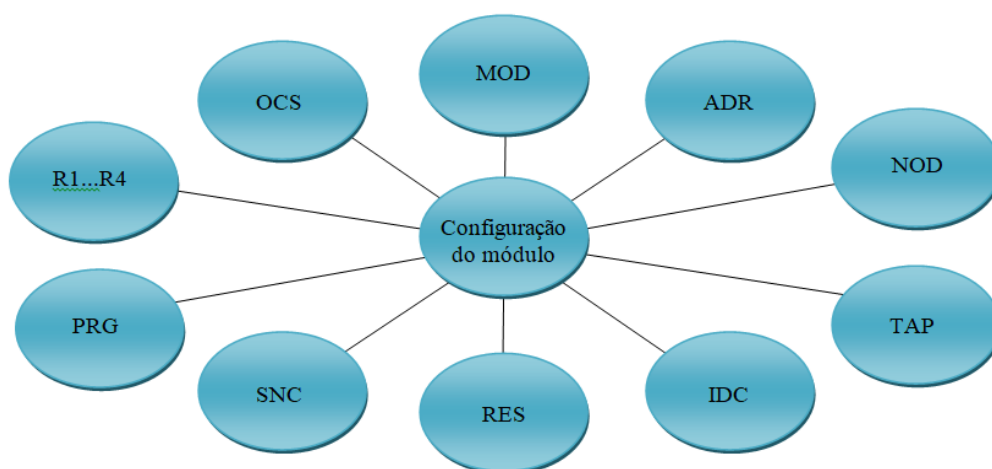
Os supervisores de paralelismo basicamente são dispositivos digitais, que controlam a operação de paralelismo entre transformadores baseado uma filosofia,

citada anteriormente, juntamente com a interação das configurações do módulo e entradas e saídas digitais e analógicas.

2.6.1 Configuração do módulo

A configuração do(s) módulo(s) deve obedecer os critérios para satisfazer as condições de paralelismo, onde os parâmetros do sistema elétrico e dos equipamentos devem ser informados para que o módulo possa fazer a supervisão do sistema corretamente. Estes parâmetros dizem respeito a seleção do modo de operação, quantidade de transformadores, endereço na rede de comunicação, quantidade de Taps de regulação do transformador e valor da resistência por Tap para medição da posição entre outros, conforme esquema apresentado na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Diagrama de configuração do módulo de paralelismo.



Fonte: Do autor, 2018.

Conforme a Figura 2.27 cada parâmetro de configuração será descrito como segue:

- **MOD** é o parâmetro que seleciona o modo de funcionamento ao qual pode ser “0” para operação individual ou sem paralelismo, e “1” para operação com outros transformadores em paralelo;
- **ADR** é o parâmetro que diz respeito ao endereço de cada módulo dentro da rede de comunicação. Como os módulos trocam informações de *status* e comandos, é imprescindível que cada módulo seja particularizado através de

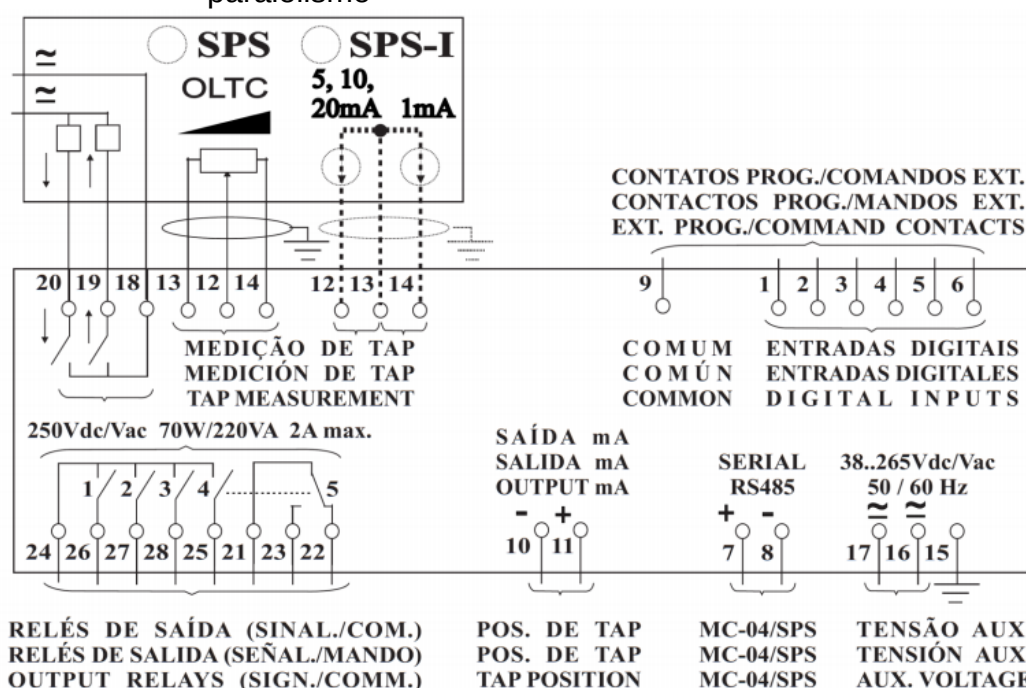
um endereço único. Quando um módulo é parametrizado com endereço incorreto o sistema não funciona, e a operação em paralelo não é realizada. Os endereços válidos são “3”, “6”, “9”... até o limite de 6 transformadores em paralelo;

- **NOD** é a configuração do número de transformadores que potencialmente operarão em paralelo, onde “6” é o limite.
- **TAP** é o parâmetro que informa a quantidade de tap de relação que possui o transformador. Em empresas de distribuição é comum transformadores com variação de “17” ou “23” taps, porém há transformadores que apresentam número de taps diferente destes;
- **IDC** é a escolha da apresentação dos taps, que pode ser sequencial a partir de “1” até o TAP final, “17” ou “23” que é o mais usado. Também há a opção de representação de “-8”... “0”... “+8” e “8L”... “0”... “8R” para 17 taps, ou “-11”... “0”... “+11” e “11L”... “0”... “11R” para 23 taps.
- **RES** é o valor nominal da resistência por tap. Este parâmetro serve para calibrar a leitura de posição gerada através de uma coroa potenciométrica.
- **SNC** é o parâmetro de tempo que o sistema deve aguardar para sinalizar um alarme de falha de paralelismo, tendo em vista que o tempo de regulação de um transformador para o outro pode ser diferente, o que ocasionaria alarmes falsos de falha;
- **PRG** é o parâmetro de tempo que o sistema deve aguardar para sinalizar um alarme de falha de programação, tendo em vista que a operação pode trocar as posições de Mestre e Escravo entre os transformadores, e nesta fração de tempo a filosofia de paralelismo percebe uma condição de falha pela presença de dois Mestres, ou Escravo sem Mestre;
- **R1...R4** é a programação de cada relé de saída, sobre qual alarme cada um deve atuar. Pode ser atribuído a qualquer relé, um dos alarmes do sistema como falha de programação, falha de paralelismo, falha na leitura da coroa potenciométrica, falha na comunicação, entre outros.
- **OCS** é a programação do tipo de sinal analógico que informará a posição exata do tap do transformador ao centro de operações.

2.6.2 Entradas e saídas digitais e analógicas

Para o funcionamento do sistema de paralelismo, o equipamento interage com o sistema recebendo parâmetros de informação e enviando comandos e sinais que permitem a operação de forma automatizada e monitorada. A interface entre o sistema e o equipamento se dá através das entradas e saídas digitais e analógicas as quais são ilustradas na Figura 2.28.

Figura 2.28 – Diagrama esquemático do módulo de supervisão de paralelismo



Fonte: Tretech, 2013.

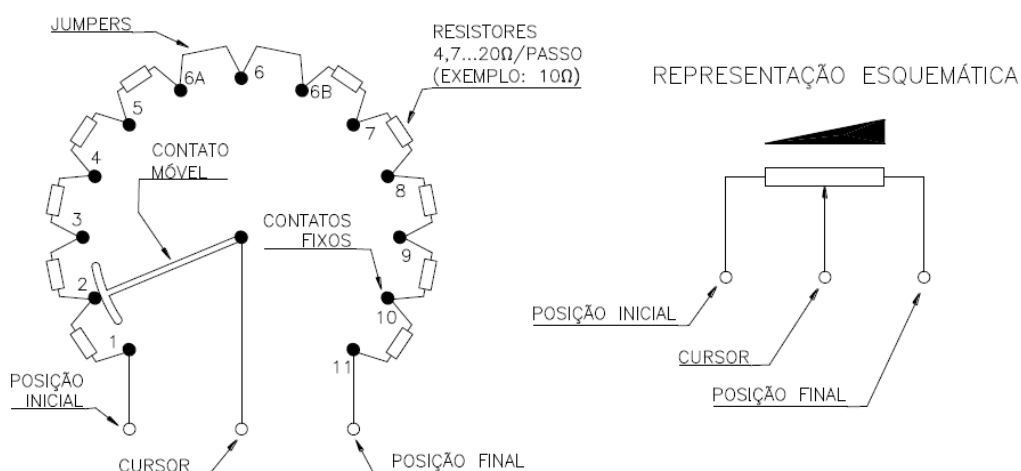
As **Entradas digitais** são através dos bornes “1”, “2”, “3”, “4”, “5”, “6” e “9” onde o ponto “9” é o borne comum que ao entrar em contato elétrico com os demais produzira uma informação conforme segue:

- “1”, “2” e “3” são os bornes que ao estarem em contato elétrico com o borne “9” farão a seleção das posições “Mestre”, “Escravo” e “Individual” respectivamente. Este contato elétrico deve ser permanente para assumir a posição desejada, e pode ser através de chave de painel, ou através de relés controlados a distância;
- “4” é o borne que ao receber um pulso elétricos conectando com o borne “9”, altera a posição de “Manual” para “Automático” e vice-versa.

- “5” e “6” são os bornes que ao receberem um pulso os conectando eletricamente com o borne “9”, recebem um sinal que ordena a mudança de posição de tap para elevar ou baixar tensão respectivamente.

A **entrada analógica** refere-se a um ponto de medição de três vias aos quais são conectados os pontos inicial e final de uma ligação em série de resistores, e um ponto móvel que percorre todos os resistores, referindo uma leitura ôhmica variável à entrada analógica. Esta leitura é produzida por um componente chamado coroa potenciométrica, que é mecanicamente acoplada ao acionamento motorizado fazendo a conversão da posição de tap do transformador em valores ôhmicos. A cada posição de tap é atribuída um valor de resistência que a entrada analógica é responsável pela leitura. A Figura 2.29 ilustra uma coroa potenciométrica de um transformador com “11” posições de tap, neste exemplo utilizou-se resistores de 10 Ω , o módulo supervisor recebe a informação de que o tap que encontra-se o transformador é o tap “2”, pois o valor de resistência medido é 10 Ω . Quando o tap do transformador está na posição “1” a entrada analógica do módulo interpreta esta posição lendo o valor de resistência de 0 Ω (zero), ao passo que na posição “11” o valor de resistência será 100 Ω que refere-se a soma de todos os resistores em série.

Figura 2.29 – Diagrama esquemático da coroa potenciométrica



Fonte: Tretech, 2013.

As **Saídas digitais** são através dos bornes “18”, “19”, “20”, “21”, “22”, “23”, “24”, “25”, “26”, “27” e “28” que funcionam com o chaveamento de contatos como segue:

- “19”, “20” e “18” são os bornes enviam a ordem de subir ou baixar tensão ao acionamento motorizado do comutador de tap, onde o borne “18” é o ponto comum;
- “21”, “22” e “23”, são os bornes que alternam as posições em modo Automático e Manual, servindo de intertravamento para comandos externos;
- “24”, “25”, “26”, “27” e “28” são os bornes relacionados com as saídas dos relés de alarme, disponíveis para sinalizações remotas.

3 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Este capítulo descreverá a solução adotada para a implementação de um sistema de simulação de testes de módulos de supervisão de paralelismo de transformadores trifásicos, utilizados em empresas de distribuição de energia elétrica, conectada ao sistema interligado nacional.

3.1 PROPOSTA DE SOLUÇÃO DE HARDWARE

Com base na solução proposta, o funcionamento do sistema de testes segue uma sequência para avaliação das funcionalidades dos módulos supervisores. Esta sequência estabelece uma série de passos simulando as condições próximas dos reais quando o sistema opera em conjunto com os transformadores, configurando a operação em paralelo. A Figura 3.1 apresenta um diagrama em blocos referente a solução para os testes em laboratório do módulo supervisor a ser realizado pela solução de hardware proposta.

Figura 3.1 – Diagrama em blocos da execução dos testes



Fonte: Do autor, 2018.

Exemplificando com mais detalhes o diagrama de blocos da Figura 3.1, os procedimentos adotados são:

1. **Montagem dos módulos no dispositivo:** o dispositivo foi concebido com duas posições para inserção dos módulos supervisores, nesta etapa os módulos são acomodados nos seus respectivos nichos;
2. **Alimentação elétrica auxiliar:** o dispositivo conta com um cabo de alimentação que pode ser conectado a uma rede de 85 a 265 VCA ou VCC;
3. **Configuração módulo 1 e 2:** os módulos devem ser configurados de acordo com os parâmetros descritos em 2.6.1;
4. **Selecionar “Mestre” módulo 1 e “Escravo” módulo 2:** através da chave de seleção de operação, posiciona-se o módulo 1 em Mestre e o Módulo 2 em Escravo;
5. **Parear os módulos nas mesmas posições:** conexão com o circuito auxiliar de resistências, um valor é escolhido para os dois módulos representarem a mesma posição de Tap;
6. **Teste subir tensão em modo Manual:** através do botão pulsador, com os módulos em modo manual, efetua-se um pulso ordenando ao módulo 1 (Mestre) o comando de subir tensão, mede-se na saída do módulo 1 se o comando foi efetuado corretamente;

7. **Observar e Medir o comando no módulo 2:** nesta etapa, em conjunto com a etapa 6, observa-se no display do módulo 2 (Escravo) a ordem de subir tensão enviada pelo módulo 1, mede-se na saída do módulo 2 se o comando foi efetuado corretamente;
8. **Teste baixar tensão em modo Manual:** através do botão pulsador, com os módulos em modo manual, efetua-se um comando ordenando ao módulo para baixar a tensão, mede-se na saída do módulo 1 se o comando foi efetuado corretamente;
9. **Observar e Medir o comando no módulo 2:** nesta etapa, em conjunto com a etapa 8, observa-se no display do módulo 2 a ordem de subir tensão enviada pelo módulo 1, mede-se na saída do módulo 2 se o comando foi efetuado corretamente;
10. **Teste subir tensão em modo Automático:** através do botão pulsador, com os módulos em modo automático, efetua-se um comando ordenando ao módulo para subir a tensão, mede-se na saída do módulo 1 se o comando foi efetuado corretamente;
11. **Observar e Medir o comando no módulo 2:** nesta etapa, em conjunto com a etapa 10, observa-se no display do módulo 2 a ordem de subir tensão enviada pelo módulo 1, mede-se na saída do módulo 2 se o comando foi efetuado corretamente;
12. **Teste baixar tensão em modo Automático:** através do botão pulsador, com os módulos em modo automático, efetua-se um comando ordenando ao módulo para baixar a tensão, mede-se na saída do módulo 1 se o comando foi efetuado corretamente;
13. **Observar e Medir o comando no módulo 2:** nesta etapa, em conjunto com a etapa 12, observa-se no display do módulo 2 a ordem de subir tensão enviada pelo módulo 1, mede-se na saída do módulo 2 se o comando foi efetuado corretamente;
14. **Selecionar Mestre módulo 2, Escravo módulo 1:** através da chave de seleção de operação, posiciona-se o módulo 2 em Mestre e o Módulo 1 em Escravo;
15. **Repetir itens 6 a 13:** repete-se no módulo 2 (Mestre) as mesmas sequencias de teste efetuadas com o módulo 1 (Escravo), simulando os comandos no módulo 2 e observando e medindo as operações no módulo 1;

16. **Simular falha de paralelismo:** na conexão com o circuito auxiliar de resistências, um valor é escolhido para o módulo 1 diferente do escolhido para o módulo 2, as posições de tap são diferentes;
17. **Observar e medir Alarme nos módulos 1 e 2:** como a condição do item 16 não satisfaz a condição ideal de paralelismo, espera-se um alarme indicando anormalidade o qual é medido na saída correspondente dos módulos;
18. **Variar as posições de Tap:** na conexão com o circuito auxiliar de resistências, é simulado todas as posições de Tap conforme programação 2.6.2;
19. **Observar no display o Tap correspondente:** conforme operação no item 18, as posições de Tap devem variar conforme o valor das resistências do circuito auxiliar. Esta informação deve ser coerente no display;
20. **Medir saída analógica correspondente ao Tap:** conforme operação no item 18, as posições de Tap devem variar conforme o valor das resistências do circuito auxiliar. Esta informação deve ser coerente coma corrente na saída dos módulos dentro de uma escala de 4 - 20mA;
21. **Teste módulos 1 e 2 em individual:** através da chave de seleção de operação, posiciona-se o módulo 1 e o 2 em Individual;
22. **Teste aumentar e baixar tensão em manual módulos 1 e 2:** através do botão pulsador, com os módulos em modo manual, efetua-se um comando ordenando ao módulo para baixar e aumentar a tensão, mede-se na saída dos módulos se os comandos foram efetuados corretamente;
23. **Teste aumentar e baixar tensão em automático, módulos 1 e 2:** através do botão pulsador, com os módulos em modo automático, efetua-se um comando ordenando ao módulo para baixar e aumentar a tensão, mede-se na saída dos módulos se os comandos foram efetuados corretamente;
24. **Avaliação Geral e conclusão dos testes:** avalia-se as condições gerais do módulo quanto a inconsistências nas medidas efetuadas nas etapas de 3 a 23, ou nas informações do display. Se os resultados forem satisfatórios os módulos são considerados aptos para operarem no sistema.

3.2 PROTOTIPO DA SOLUÇÃO

Para possibilitar as condições necessárias para execução dos testes dos sistemas de paralelismo de transformadores trifásicos, é necessário as conexões das entradas e saídas digitais e analógicas como segue:

- Circuito de alimentação elétrica;
- Entradas digitais para seleção de operação “Mestre”, “Escravo” e “individual”;
- Entrada digital para seleção do modo “Automático” e “Manual”;
- Entrada digital para comando “Aumenta” e “Diminui tensão” por parte do comando manual;
- Entrada digital para comando “Aumenta” e “Diminui tensão” por parte do comando automático;
- Entrada analógica de leitura da posição através de um circuito semelhante a coroa potenciométrica;
- Conexão do circuito de comunicação com Módulo de comunicação (MC) e o outro Módulo de paralelismo;
- Saída digital para medição do sinal “Aumenta” e “Diminui tensão” para envio ao acionamento motorizado;
- Saída analógica para medição do sinal de informação de posição do TAP.

A partir destes requisitos idealizou-se maneiras de substituir os componentes existentes nos painéis dos transformadores, por dispositivos simples como chaves e circuitos auxiliares capazes de configurar uma situação próxima a real, afim de validar os testes e consequentemente a eficácia dos módulos supervisores. Idealmente optou-se por uma montagem simplificada e de pequeno porte para facilitar o manuseio e a logística empregada na atividade. Também para atingir o objetivo de conceber uma solução de baixo custo, utilizou-se materiais que foram desmontados de equipamentos sucateados. Destes equipamentos, basicamente detectores de alta tensão sucateados, foram retirados chaves e botões em bom estado para utilização da montagem do sistema de testes.

O dispositivo advém de um protótipo que centraliza as condições necessárias para a simulação de operação em paralelo de transformadores de potência equipados com CDC. A Figura 3.2 ilustra a parte frontal do dispositivo com

os seus componentes que foram numerados para exemplificar, de acordo com a Figura 3.1, as suas funções.

Figura 3.2 – Dispositivo de teste completo em funcionamento



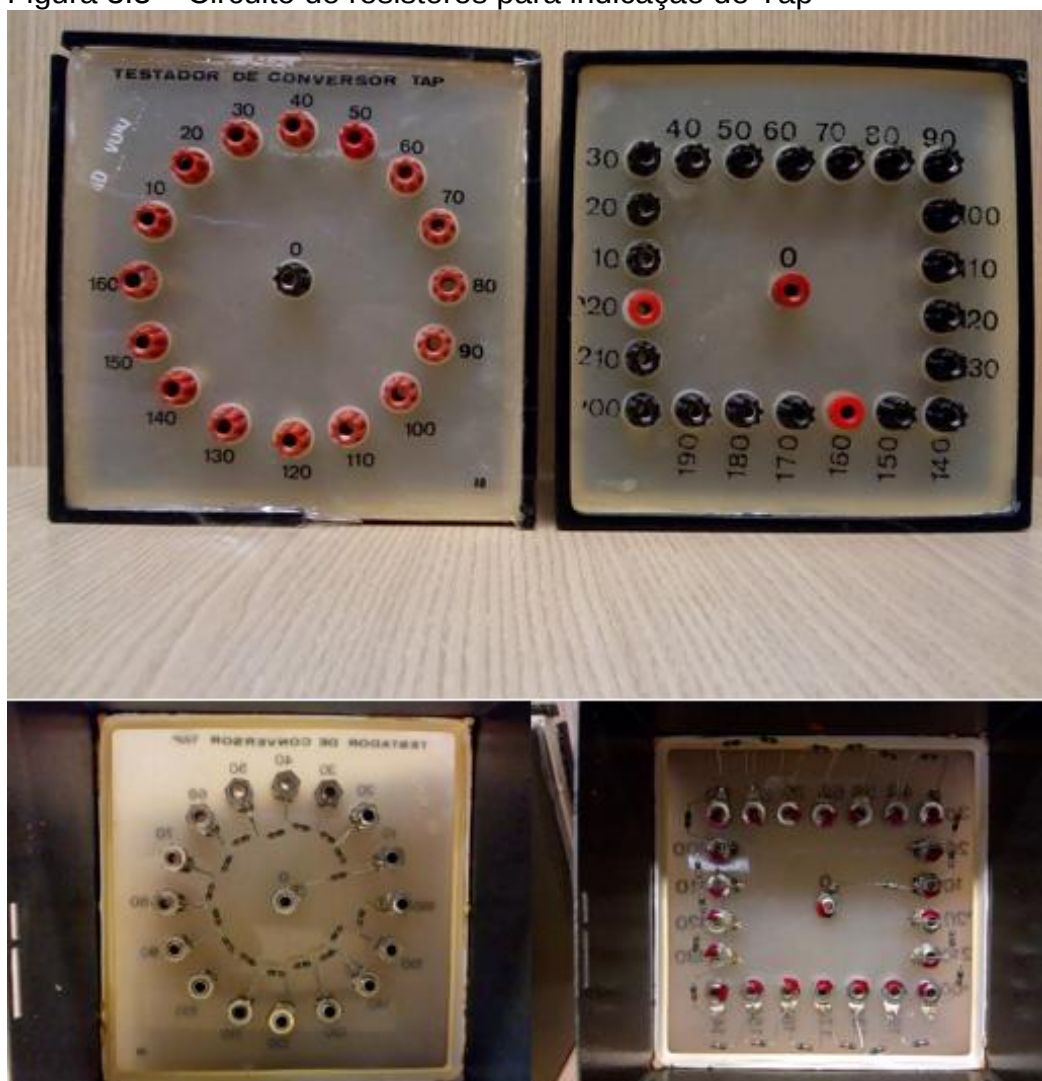
Fonte: Do autor, 2018.

1. Circuito auxiliar de resistores: estes circuitos auxiliares simulam a posição de tap informada aos módulos. Foram construídos a partir de caixas de medidores (Voltímetro), descartados. Partem da ligação em série de resistores de 10Ω . Foi concebido juntamente com a montagem do dispositivo 02 circuitos: um de 16 resistores de 10Ω para simular transformador até 17 Taps e um de 22 resistores de 10Ω para simular transformador de 23 Taps. Usados nas etapas 5, 16 e 18 da Figura 3.1. A Figura 3.3 ilustra mais os detalhes dos circuitos de resistores;
2. Módulo de paralelismo sob teste, posição 1;
3. Módulo de paralelismo sob teste, posição 2;
4. Botão pulsador seleciona Automático/Manual para módulo 1 à esquerda. À direita chave de seleção modos Mestre, Escravo e individual para módulo 1. Utilizados nas etapas de 6 a 15 e 22 e 23 da Figura 3.1;

5. Botão pulsador seleciona Automático/Manual para módulo 2 à esquerda. À direita chave de seleção modos Mestre, Escravo e individual para módulo 2. Utilizados nas etapas de 6 a 15 e 22 e 23 da Figura 3.1;
6. Par de botões pulsador para comando subir e baixar tensão em manual à esquerda. À direita par de botões pulsador para comando subir e baixar tensão em Automático módulo 1. Utilizado nas etapas de 6 a 15 e 22 e 23 da Figura 3.1;
7. Par de botões pulsador para comando subir e baixar tensão em manual à esquerda. À direita par de botões pulsador para comando subir e baixar tensão em Automático módulo 2. Utilizado nas etapas de 6 a 15 e 22 e 23 da Figura 3.1;
8. Saída digital do comando subir e baixar tensão à esquerda. À direita entrada analógica da posição dos Taps módulo 1. Utilizado nas etapas 7, 9, 11, 13 15 5, 16 e 18 da Figura 3.1;
9. Saída digital do comando subir e baixar tensão à esquerda. À direita entrada analógica da posição dos Taps módulo 2. Utilizado nas etapas 7, 9, 11, 13 15 5, 16 e 18 da Figura 3.1.

A Figura 3.3 ilustra as conexões internas dos circuitos de resistores, para melhor entendimento da sua construção. Foi utilizado caixas de medidores sucateados para abrigar o conjunto, e uma chapa de material isolante para fixação dos bornes e componentes.

Figura 3.3 – Circuito de resistores para indicação de Tap



Fonte: Do autor, 2018.

A Figura 3.4 ilustra o módulo supervisor, identificado na Figura 3.2 através dos números 2 e 3, o qual é submetido aos testes no protótipo da solução.

Figura 3.4 – Módulo supervisor de paralelismo



Fonte: Do autor, 2018.

Para permitir as conexões de alimentação elétrica, e as conexões para mudança de tap, foram necessárias a confecção de cabos com as devidas terminações. Estas permitem a execução dos testes com agilidade e segurança no manuseio. Os cabos são ilustrados na Figura 3.5.

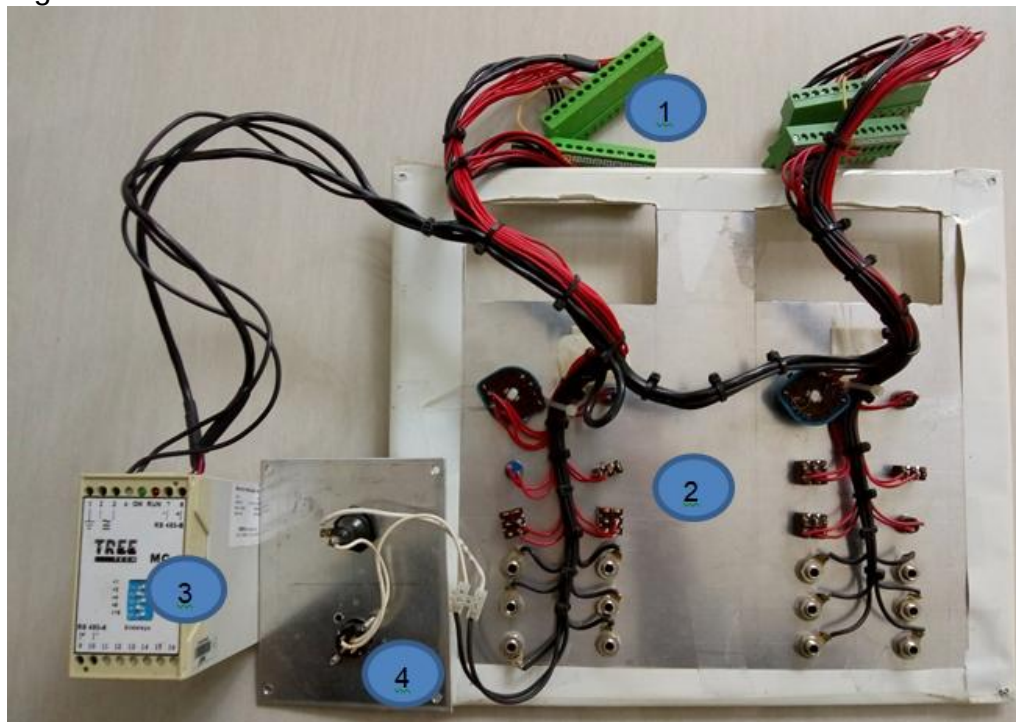
Figura 3.5 – Cabos para conexões



Fonte: Do autor, 2018.

As ligações da parte interna do dispositivo de testes, são ilustradas na Figura 3.6, e o esquema de ligação utilizado no protótipo é ilustrado conforme diagrama funcional do dispositivo de testes no Anexo.

Figura 3.6 – Conexões internas sistema de testes



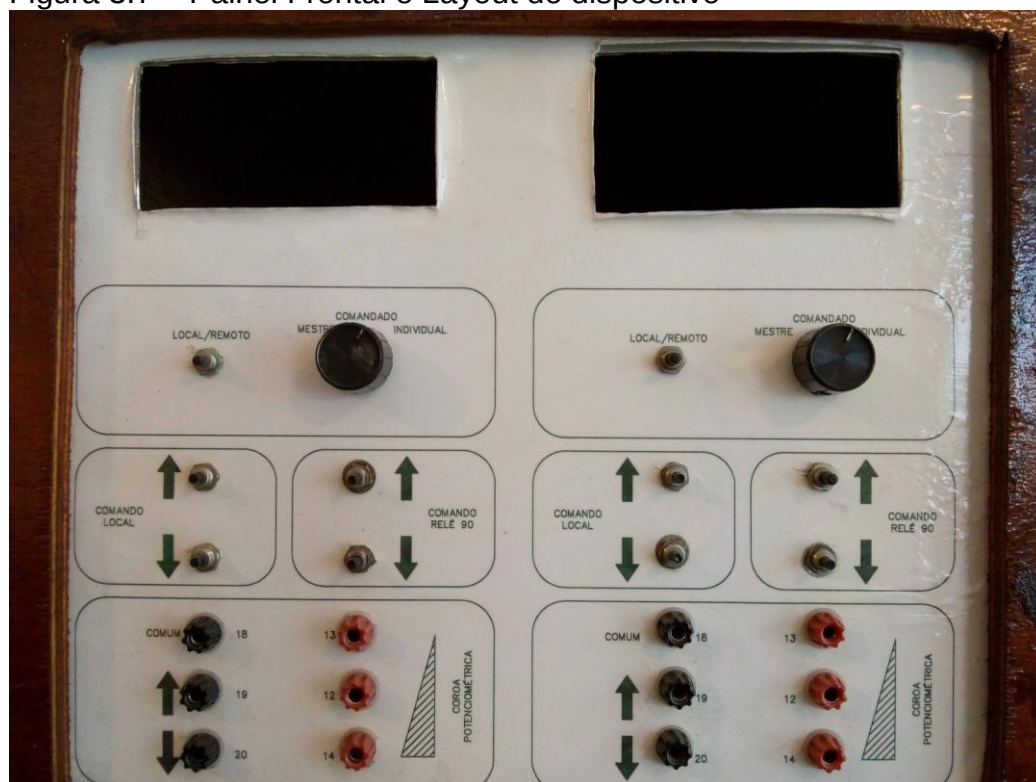
Fonte: Do autor, 2018.

Conforme a Figura 3.6, os componentes numerados correspondem à:

1. Bornes de conexão com os módulos supervisores;
2. Placa de montagem principal;
3. Módulo de comunicação serial RS485;
4. Placa de alimentação auxiliar.

A parte frontal do módulo é ilustrada na Figura 3.7. Para facilitar a execução dos testes, foi necessário plotar o Layout de acordo com as conexões elétricas e os aspectos funcionais. Os botões e chaves do sistema de testes substituem os equipamentos instalados nos painéis dos transformadores localizados nas subestações de distribuição.

Figura 3.7 – Painel Frontal e Layout do dispositivo



Fonte: Do autor, 2018.

3.3 VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO

Para validação da solução proposta, efetuou-se o procedimento de testes em um módulo que foi enviado por uma das equipes regionais. Tão logo recebido, executou-se os testes conforme descrito no diagrama de blocos da Figura 3.1, utilizando-se o protótipo descrito no item 3.2 e um módulo adicional para completar a configuração de paralelismo. Durante a execução dos testes verificou-se que o módulo apresentava inconsistência quando da leitura de posição de tap, indicando no seu display “E08”, quando deveria indicar a posição de tap “03” como no módulo auxiliar. Para o correto funcionamento do sistema de paralelismo, é imprescindível que os módulos supervisores identifiquem as posições de tap dos dois transformadores através da informação de resistência da coroa potenciométrica, sendo que os transformadores devem estar na mesma posição para configurar condição ideal para paralelismo.

Na execução do teste verificou-se que o módulo não era capaz de realizar a leitura da resistência, concluindo-se que a sua entrada analógica estava

danificada, e o mesmo não estava apto para operar corretamente, no sistema. A Figura 3.8 ilustra o registro do erro no momento do teste.

Figura 3.8 – Módulo em teste



Fonte: Do autor, 2018.

Com o objetivo de validar o diagnóstico do problema encontrado, a equipe de manutenção geral deslocou-se até uma subestação onde fosse possível a instalação do referido módulo, a fim de executar os testes e avaliar o diagnóstico encontrado nos testes em laboratório. Procurou-se escolher uma subestação, em um horário adequado para não interferir nos controles de tensão do sistema elétrico, uma vez que os transformadores da subestação escolhida encontram-se em operação. Após a instalação do módulo em substituição ao existente (em operação) em um dos transformadores da subestação, iniciou-se os testes conforme descrito no diagrama de blocos da Figura 3.1, utilizando a rede de comunicação com o outro módulo existente, e os recursos do painel do transformador em questão. Com a conclusão dos testes verificou-se que o diagnóstico encontrado foi idêntico ao do laboratório, tornando satisfatório o resultado obtido com o protótipo.

4 CONCLUSÕES

Os sistemas de paralelismo entre transformadores de força, juntamente com todos os equipamentos do sistema elétrico são fundamentais para o bom funcionamento de todo o sistema de distribuição de energia elétrica. O mau funcionamento destes equipamentos, bem como os sistemas de paralelismo, acarreta em prejuízos técnicos e financeiros, não apenas para as concessionárias de distribuição de energia, mas também para os consumidores conectados aos seus sistemas. Neste contexto, as equipes de engenharia de manutenção das empresas concessionárias de energia elétrica, assumem um papel de extrema importância na busca por soluções que contemplem a agilidade, operacionalização e otimização dos custos das atividades de manutenção dos sistemas em operação. Este trabalho concentrou-se em detalhar os procedimentos adotados em situações de contingência dos sistemas de operação de transformadores em paralelo e os defeitos decorrentes em seus módulos de paralelismo.

De acordo com o primeiro objetivo específico, a solução foi concebida com baixíssimo custo, aplicando componentes reutilizados de outros equipamentos danificados e em processo de descarte. Basicamente os custos envolvidos foram as horas aplicadas em estudos bibliográficos e de projeto para a concepção da solução.

Na proposta de solução, pôde-se discorrer sobre a eficiência da nova abordagem acerca dos problemas em sistema de paralelismo, com a introdução do sistema de testes proposto e a alteração na logística da execução das ações de operação e manutenção em campo. Os resultados obtidos atenderam às expectativas tendo em vista que o sistema mostrou-se funcional e foi devidamente validado, através das simulações das condições operativas dos transformadores e dos testes e diagnósticos possíveis através dele.

A medida que o sistema de testes foi sendo utilizado pela equipe de manutenção geral nas ocorrências de defeitos de paralelismo, identificou-se uma outra finalidade para o sistema de testes, a de ferramenta didática. Uma vez que pode-se testar as condições operacionais em laboratório, introduzir situações anormais simulando falhas sem a necessidade de executar tais testes com transformadores conectados ao sistema elétrico, passou-se a utilizar o sistema de testes como ferramenta didática, em treinamentos das demais equipes envolvidas com a operação e manutenção destes sistemas. Esta ação permitiu o

compartilhamento das informações às equipes regionais e do centro de operações, melhorando o conhecimento acerca dos equipamentos e do sistema, permitindo uma intimidade maior com os aspectos técnicos da operação em paralelo e a agilidade na resolução dos problemas que atingem estes equipamentos.

Como forma de continuidade deste trabalho, sugere-se o aproveitamento da ideia da solução proposta, na utilização de outras soluções de baixo custo para desenvolvimento de sistemas de testes visando aferir o funcionamento dos demais equipamentos intrínsecos ao transformador de Força como: Termômetros, Indicadores de Nível de Óleo e Imagem Térmica.

Finalmente, os resultados obtidos com a elaboração da solução abordada neste trabalho, atingiram as expectativas reduzindo significativamente o impacto técnico e econômico causado, quando os sistemas de paralelismo deixam de operar adequadamente. A aplicação direta da solução na execução dos testes e a mudança no modo de atendimento nas ocorrências de problemas de paralelismo, permitiram um ganho, otimizando o tempo de atendimento e reduzindo os recursos financeiros no deslocamento das equipes.

4.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como forma de continuidade deste trabalho, sugere-se o aproveitamento da ideia da solução proposta, na utilização de outras soluções de baixo custo para desenvolvimento de sistemas de testes visando aferir o funcionamento dos demais equipamentos intrínsecos ao transformador de Força como: Termômetros, Indicadores de Nível de Óleo e Imagem Térmica.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Ezequiel Rabelo de. **Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformador de potência: especificação. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 8667**: Comutador de derivações em carga. Rio de Janeiro, 1994.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para Engenharia**: Estática e Quase Estática. 3. Ed. Ver. – Florianópolis: UFSC, 2012.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas em transformadores de potência**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CARVALHO, Antônio Carlos C. de. **Equipamentos Elétricos**: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Brasília: Aneel, 2013

D'AJUZ, Ary et al. **Equipamentos Elétricos**: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Brasília: Aneel, 2013.

DIAS, Valéria Silva; MARTINS, Roberto de Andrade. Michael Faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p.517-530, 2004.

IEC. **The strategic importance of eletrification**. Disponível em:<<http://www.iec.ch/smartenergy/importance> IEC>. Acesso em 23 Abril 2018

ELETOBRAS. **A importância da energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.eletobras.com/elb/natrilhadaenergia/energia-eletrica/main.asp?View>>. Acesso em: Abril 2018.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas:** com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HARLOW, JAMES H. **Electric power transformer engineering.** CRC Press, Florida, 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60076:** Power transformers: Part 1: General. Geneva, 2000.

LEMOZY, Norberto A. **Circuitos Magnéticos y Transformadores.** Ed Reverté, 2010

MASCHINENFABRIK REINHAUSEN, **History.** Disponível em <<https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1455/>>. Acesso em: Maio 2018.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores.** 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.

MARCONI, Marina de Andrade, LAKATOS, EVA Maria. **Fundamentos de metodologia científica.** 7. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MASCHINENFABRIK REINHAUSEN. Manual chaves de comutação em carga, 2003.

MILASCH, Milan. **Manutenção de transformadores em liquido isolante.** Itajubá: Edgard Blucher, 1984.

NASCIMENTO, Geraldo Carvalho. **Máquinas Elétricas:** teoria e ensaios. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

ONS. **Carga de energia.** Disponível em :<http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/carga_energia.aspx>. Acesso em 22 abril de 2018.

TREETECH. Manual supervisor de paralelismo. 2013.

WEG. Manual de transformadores de potência. 2018.

ANEXO

Diagrama de Ligações do sistema de testes de Módulos Supervisores

