



UNIVERSIDADE APOLITÉCNICA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉCTRICA

da

Instituto Superior de Ciências, Tecnologias e Gestão

Tema:

**ANÁLISE DAS CAUSAS E CONSEQUÊNCIA DAS AVARIAS BRUSCAS NOS
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

CASO DE ESTUDO

SUBESTAÇÃO DO FOMENTO - Período 2015 a 2019

Autor : Francisco Célio Matola

Supervisor: Engº Eugênio Fernando Mandlate

MAPUTO

2021

FRANCISCO CÉLIO MATOLA

**ANÁLISE DAS CAUSAS E CONSEQUÊNCIA DAS AVARIAS BRUSCAS NOS
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**CASO DE ESTUDO
SUBESTAÇÃO DO FOMENTO – Período 2015 À 2019**

Monografia apresentada a área científica de engenharia eléctrica do Instituto Superior de Gestão e Tecnologias da Universidade Apolitécnica como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Eléctrica.

Supervisor: _____

Engº. Eugénio Fernando Mandlate

Maputo

Mai 2021

Aprovação do Júri

Este trabalho foi aprovado com _____ valores no dia ____ **de** _____ de 2021 por nós membros de júri Instituto Superior de Gestão, Ciências e Tecnologia da Universidade Apolitécnica.

(Presidente do Júri)

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho à minha esposa **Samira Jorge Machai** por ter-me apoiado durante o percurso estudantil, a minha filha Natália que seguiu o ramo de electricidade e nunca abandonou o seu sonho como uma profissional, também aos meus filhos Cheron e Larry para que este possa guiar os seus caminhos no ramo académico e sirva de exemplo como futuros engenheiros.

RESUMO

Os transformadores de potência são máquinas estáticas de elevada importância no Sistema Elétrico de Energia (SEE) uma vez que são máquinas que possibilitam a interligação dos diferentes níveis de tensão à rede, de tensão e corrente alternada (AC).

Alguns defeitos em transformadores não são fáceis de detectar pelas técnicas conhecidas e rotineiras aplicadas no sector eléctrico, resultando como consequência, falhas catastróficas, muitas vezes inexplicáveis e de difícil identificação de suas causas.

A subestação de Fomento é uma das primárias na rede de transmissão que fornece energia eléctrica a zona Sul de Moçambique, através de dois transformadores 275/66 kV-160 MVA cada, com avaria do TR2 no mês de Março de 2015 registou uma redução de 50% da capacidade e o TR1 no mês de Setembro de mesmo ano causou apagão na zona Sul.

De ponto de vista económico com avaria dos dois transformadores de potência a concessionária EDM caracterizou-se por contratação de várias empresas multi-sectoriais, desde aos eléctricos, civis, transporte, e outros auxiliares, o que causou custos onerosos à empresa e restrições no fornecimento de energia eléctrica.

As avarias esporádicas nos transformadores de potência são difíceis de controlar, tal que acontece inesperadamente nas subestações muitas das vezes com o equipamento em bom estado de funcionamento causando custo elevado ao fornecedor tanto à concessionária de energia eléctrica EDM por reparação ou reposição de novo transformador.

Como forma de resolver ou mitigar o problema, vai-se reproduzir uma investigação das possíveis causas de avarias que mais comumente acontece nos transformadores de potência nas Subestações da concessionária EDM e propor uma solução de manutenção preventiva rigorosa para se reduzir falhas bruscas, também usar metodologias de fornecimento de energia eléctrica através de outras vias alternativas em caso de avarias.

Palavras chave: Transformadores de potência, avarias esporádicas, ensaios técnicos, curto-circuito, manutenção de circuito eléctrico, vias alternativas de fornecimento de energia eléctrica.

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O problema de pesquisa.....	2
1.2 Pergunta a Investigar.....	2
1.3 Hipóteses.....	2
1.4 Constrangimentos Previstos na Investigação.....	2
1.4.1 Limitações do trabalho.....	2
1.4.2 Delimitações do trabalho.....	3
1.5 Cronograma do Trabalho de Investigação.....	3
1.6 Justificação da pesquisa.....	4
1.7 Objectivos da Pesquisa.....	5
1.8 Estrutura do trabalho.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 Transformador.....	6
2.1.2 Funcionamento dos transformadores.....	6
2.2 Transformador Real.....	8
2.2.1 Classificações comuns de transformadores.....	13
2.2.1.2 Transformador de corrente.....	14
2.2.1.3 Transformador de isolamento.....	15
2.2.1.5 Transformador de distribuição.....	16
2.2.1.6 Transformadores de Força.....	16
2.2.1.7 Transformador de Transmissão.....	16
2.2.1.8 Transformador de Subtransmissão.....	16
2.2.2 Características construtivas dos transformadores.....	17
2.2.2.2 Características dos radiadores.....	18
2.2.2.3 Características dos enrolamentos.....	19
2.2.2.4 Características do núcleo magnético.....	19
2.2.2.5 Características do óleo isolante.....	20
2.2.2.6 Características do Papel isolante.....	20
2.2.2.7 Características dos Isoladores de Travesias.....	21
2.2.3 Análise de Ensaios nos Transformadores Potência.....	22
2.2.3.1 Análise em circuito aberto (ensaio em vazio).....	22
2.2.3.2 Análise em curto-circuito.....	23
2.2.3.3 Análise dos parâmetros de transformador em carga (ensaio em carga).....	24
CAPÍTULO III.....	25
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Tipos de pesquisa.....	25

3.2 Métodos de abordagem	26
3.3 Técnicas de recolha de dados	26
CAPÍTULO IV	28
4 TIPOS DE AVARIAS NOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	28
4.1 Avarias bruscas	28
4.2 Avarias típicas em transformadores de potência.....	28
4.2.1 Principais causa das avarias nos tranformadores de potência.....	29
4.2.2 Caracterização das avarias nos enrolamentos	29
4.2.2.1 Características de avarias nos isoladores de travessias	30
4.2.2.3 Características de avarias nos RTEC	30
4.2.2.4 Desgaste do óleo isolante	30
4.2.2.5 Degradação do papel “Kraft”	31
4.3 Descrição dos métodos de diagnóstico de avarias	31
4.3.1 Métodos de diagnóstico.....	31
4.3.2 Método de supervisão preventiva.....	31
4.3.2.1 Análise de óleo mineral isolante	32
4.3.2.2 Análise dos gases Dissolvidos no óleo (DGA)	32
4.3.3 Método de inspeção visual interna.....	34
4.3.3.1 Medição do grau de polimerização do papel isolante (GP)	34
4.3.4 Métodos de controle de avarias.....	35
CAPÍTULO V	41
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADO.....	41
5.2 Métodos alternativos de redundância no caso de avarias	43
5.3 Análise de pesquisa de avarias bruscas	46
5.3.1 Análise de estimativa de custo com avaria de dois transformadores	46
5.3.2 Primeiro Caso: Custos por aluguer de maquinaria	47
5.3.3 Segundo Caso: Custo por manutenção de dois transformadores	48
5.3.4 Análise comparativa dos dois casos acima apresentados.....	49
CAPÍTULO VI.....	51
6. CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
APÊNDICE	56
ANEXOS 1.....	58
ANEXOS 2.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transformador Real.....	8
Figura 2: Transformador com enrolamentos primário e secundário.....	9
Figura 3: Campo Magnetico num solinoide.....	11
Figura 4: Transformador.....	13
Figura 5: Transformador de corrente.....	14
Figura 6: Exemplo de um transformador de isolamento.....	15
Figura 7: Transformador de potência.....	15
Figura 8: Constituição de um transformador de potência.....	17
Figura 9: Sistema de refrigeração.....	18
Figura 10: Configuração das bobinas no transformador de potência.....	19
Figura 11: Constituição de bobinas dum transformador trifásico.....	20
Figura 12: Ilustração de isolador de travessia de AT.....	21
Figura 13: Exemplo de um comutador de derrivação em carga.....	21
Figura 14: Ensaio em vazio.....	22
Figura 15: Análise em curto-circuito.....	23
Figura 16: Ensaio em carga.....	24
Figura 17: Cumutador de tomadas avariado dum transformador de 66/11 kV.....	30
Figura 18: Analisador FRA.....	36
Figura 19: Esquema unifilar de uma rede Radial com Recurso.....	44
Figura 20: Esquema unifilar numa rede em anel.....	45
Figura 21: Esquema unifilar de uma rede em “Spot-Network”.....	46
Figura 22: Análise grafica de viabilidade.....	49

ÍNDICE TABELA

Tabela 1: Cronograma do Trabalho.	3
Tabela 2: Critério de identificação de avarias de Doernenburg.	33
Tabela 3: Valores de concentração máxima de gases segundo Doernenburg.....	33
Tabela 4: Valores de concentração máxima de gases segundo IEEE.	33
Tabela 5: Correlação com uso da norma IEEE C 57.104.....	34
Tabela 6: Valores obtidos de resistência de isolamento.....	40
Tabela 7: Custos por aluguer de maquinaria durante o período de emergência.	47
Tabela 8: Materias para manutenção dos transformadores.	48

LISTA DE ABREVIATURAS

AT	Alta tensão
SE	Subestação Eléctrica
PS	Posto de Seccionamento
BT	Baixa tensão
AC	Corrente Alternada
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FRA	Análise da Resposta em Frequência
SIN	Sistema Interligado Nacional
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Rèseaux Electriques</i>
DGA	Análise de Gases Dissolvidos
EDP	Energias de Portugal
EDM	Electricidade de Moçambique, EP
GP	Grau de Polimerização
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MT	Média tensão
TR1	Trasnformador 1
TR2	Transfprmador 2
OFAF	Óleo Forçado Ar Forçado
OFWF	Óleo Forçado Água Forçada
ONAN	Óleo Natural Ar Natural
ONAF	Óleo Natural Ar Forçado
RTEC	Regulador de Tensão em Carga
SEE	Sistemas Electricos de Energia
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potência

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Em vários países a nível Mundial particularmente em Moçambique, o sector eléctrico tem sofrido alterações no sistema energético, com aumento de competitividade entre as empresas de transporte e distribuição de electricidade, vem-se confrontadas com elevados níveis de exigências, tanto dos consumidores como dos reguladores, sendo estes obrigados a garantir elevados níveis de fiabilidade e de qualidade do serviço prestado bem como reduzir os correspondentes custos para que o sistema possa operar a níveis de eficiência mais elevado.

Do ponto de vista técnico podemos dizer que com a avaria de transformadores pode consequentemente causar interrupção no fornecimento de energia eléctrica, resultar em apagões nas residências, empresas, escolas até mesmo nos hospitais fazer com que alguns equipamentos coloquem a vida dos pacientes em riscos.

Os sistemas de energia enfrentam hoje grandes desafios, a crescente integração de energia renováveis e penetração de cargas eléctricas controláveis, a electrificação do sector do transporte, entre outras, coloca novos desafios sobre a capacidade de operação dos sistemas e, consequentemente sobre as estratégias de manutenção adoptados em cada sistema.

Os transformadores de potências são máquinas estáticas usadas comumente nos sistemas de transporte de energia, representando um dos equipamentos de maior valor nas redes eléctricas. A sua função é de proporcionar o nível de tensão adequado ao transporte/distribuição de energia eléctrica ou pelo contrário, o nível de tensão adequado à alimentação dos equipamentos de utilização de energia eléctrica. São geralmente, as máquinas mais frágeis do sistema de transporte de energia.

1.1 O problema de pesquisa

Avárias bruscas de transformadores de potência, resultam em interrupções no fornecimento de energia eléctrica na Subestação de Fomento causando custos onerosos à concessionária EDM por reparação e aquisição de um novo transformador para reposição do sistema. Situação que podia ser acautelada com medidas preventivas e estratégias alternativas de protecção dos equipamentos e fornecimento da corrente eléctrica para os consumidores, minimizando os custos.

1.2 Pergunta a Investigar

Como são vistas as avarias bruscas de transformadores de potência na Subestação do Fomento (Subestação Matola 275) no que diz respeito as causas e consequências?

1.3 Hipóteses

Hipótese 0

As avarias bruscas de transformadores de potência na Subestação Matola 275 são normais e a empresa está preparada para reparar-las.

Hipótese 1

As avarias bruscas de transformadores de potência na Subestação Matola 275 são causadas por deficiências na manutenção preventiva e criam prejuízos financeiros avultados para a EDM assim como para os seus clientes.

1.4 Constrangimentos Previstos na Investigação

1.4.1 Limitações do trabalho

Durante a realização ou materialização deste trabalho de investigação o autor deparou com os seguintes constrangimentos:

- Aquisição dos mapas de diagramas da rede de transporte de energia da EDM.
- Cálculo das vantagens a ter na realização dos ensaios e mostrar os dados adquiridos durante o período estipulado da investigação.
- Dificuldades de realizar certas medições dada a funcionalidade do sistema.

1.4.2 Delimitações do trabalho

O processo de investigação realizou-se na Autarquia da Matola, na Subestação do Fomento, Departamento de Equipamento de Potência e Departamento de Subestações da EDM-DTSU.

O trabalho foi iniciado no mês de Janeiro de 2020 e será concluído em Maio do ano em curso.

1.5 Cronograma do Trabalho de Investigação

Tabela 1: Cronograma do Trabalho.

CRONOGRAMA DO TRABALHO DE FIM DO CURSO NO ANO 2020 Á 2021																		
Ítem	Actividades	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	A
1	Escolha do tema	■	■															
2	Análise do problema		■	■														
3	Levantamento da literatura		■	■	■	■												
4	Escolha da solução a doptar						■	■										
5	Recolha dos dados						■	■	■	■								
6	Tratamento dos dados									■	■	■	■					
7	Entrevista com responsável da subestação do Fomento												■					
8	Especificações técnicas												■	■	■	■		
9	Revisão e entrega													■	■	■	■	■

1.6 Justificação da pesquisa

A energia eléctrica é tida como fonte de desenvolvimento da indústria no Mundo, é produzida em centrais eléctricas através de geradores eléctricos, por meio de água, gás, sol, vento, etc.

O uso de transformadores de potência permite que a energia chegue até os lugares bem distantes ao consumidor com nível de tensão desejável, por meios de técnicas utilizadas e pode ser usada à energia nos nossos aparelhos eléctricos, como é caso de ferro de engomar, máquina de lavar, Ar-condicionados, motores eléctricos até mesmo iluminação de residências.

Geralmente, estas máquinas são de grandes dimensões e de elevado nível de complexidade construtivo. Caracterizam por possuir período de vida útil elevado comparativamente a outras máquinas eléctricas e preços muito elevados, o que conduz a nível de exigência de fiabilidade muito elevada.

No entanto a gestão de sua vida útil é extremamente complexa na medida em que esta máquina tem vários componentes cruciais e suscetíveis de originar falhas.

No presente trabalho, pretende-se analisar as avarias nos transformadores de transmissão na EDM, concretamente na subestação de Fomento, as metodologias e as normas de manutenção preventiva e corretiva usadas para diagnosticar o estado do equipamento sem precisar abrir o seu interior e evitar cortes não programadas. Ainda vai-se propor trabalhos futuros para garantir melhoria na rede, criar-se alternativas de redundância reduzindo assim a falta no fornecimento de energia eléctrica no caso de avarias.

O estudo, de ponto de vista social é de extrema relevância, pois muitos clientes têm sofrido prejuízos incalculáveis e difíceis de repor por causa das avarias bruscas nos transformadores de potência.

De ponto de vista económico, muitas famílias têm visto seus produtos de primeira necessidade ficar deteriorados, por falta de energia para conservação do mesmo o que cria uma descompensação no plano mensal das famílias, muitos aparelhos domésticos tem ficado danificados e a empresa EDM vem registar um grande fluxo de clientes a apresentarem reclamações o que demonstra de forma clara que os prejuízos são avultados para a empresa.

O trabalho é importante porque permite conciliar o conhecimento teórico aprendido nas aulas do curso de engenharia eléctrica com a realidade prática vivida na EDM Subestação Matola 275.

1.7 Objectivos da Pesquisa

Objectivo Geral

Analisar o impacto técnico, económico e social de avarias bruscas do transformador de potência em relação as causa e consequências ocorridas na subestação de Fomento.

Objectivos Específicos

- Identificar as causas das avarias bruscas do transformador de potência na subestação de Fomento;
- Enumerar as consequências das avarias bruscas do transformador de potência na subestação de Fomento;
- Desenhar mecanismos de manutenção preventiva rigorosa dos transformadores de potência na subestação, baseando-se na análise das avarias;
- Minimizar as avarias bruscas do transformador de potência na subestação de Fomento e os danos causados para empresa assim como para os clientes.
- Propor mecanismo de fornecimento de energia eléctrica usando vias alternativas para o caso de avarias bruscas de transformadores de potência na Subestação Matola 275.

1.8 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos distintos, nomeadamente:

Capítulo I: Introdução ao tema onde apresentamos os principais objectivos do trabalho.

Capítulo II: Princípio de funcionamento dos transformadores de potência, suas principais aplicações e características construtivas.

Capítulo III: Tipos de avarias que mais comumente tomam lugar neste tipo de máquinas.

Capítulo IV: Métodos de diagnóstico mas em casos de avarias.

Capítulo V: Estratégias de manutenção e monitorização dos transformadores de potência.

Por último, no sexto capítulo, serão apresentadas as principais conclusões, bem como elencadas, um conjunto de sugestões para possíveis trabalhos de desenvolvimento futuro neste mesmo domínio.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Transformador

Segundo (Soares Manoel, 2010). O transformador é uma máquina elétrica estática que tem como finalidade transferir e isolar energia elétrica de um circuito para outro, com tensões e correntes diferentes, mantendo a mesma frequência e aproximadamente a mesma potência .

Transformadores são dispositivos usados para abaixar ou aumentar a tensão e a corrente elétricas. Os transformadores consistem em dois enrolamentos de fios, primário e secundário, envolvidos em um núcleo metálico. A passagem de uma corrente elétrica alternada no enrolamento primário induz à formação de uma corrente elétrica alternada no enrolamento secundário. A proporção entre as correntes primária e secundária depende da relação entre o número de voltas em cada um dos enrolamentos.

A Comissão Electrotécnica Internacional (CEI) define transformador de potência como um equipamento, com dois ou mais enrolamento, que, por indução eletromagnética, converte um sistema de tensão e corrente em outro sistema sendo este geralmente, de tensão e corrente diferentes do sistema original, mantida a frequência.

2.1.2 Funcionamento dos transformadores

ROCHA (2020). Os transformadores funcionam através das leis de indução eletromagnéticas em que uma fonte alternada é ligada ao enrolamento primário e esta induzirá uma corrente que vai produzir fluxo mútuo (\emptyset), a força eletromotriz no primário (V_1) oposto ao secundário e por sua vez criará fluxo desmagnetizante contrária ao fluxo mútuo¹.

No caso do transformador esteja em vazio ou a carga com impedância infinita, a corrente (i_2) será nula e uma corrente de regime permanente (i_0), conhecido como corrente de excitação, circulará para produzir o fluxo alternado no circuito magnético que por sua vez induzirá uma f.e.m no enrolamento primário de acordo com as leis de FARADAY.

¹ file:///D:/Nova%20pasta%20(2)/isaa/ALLEN/R2020/Organizacao/Maquinas. Acesso em 5 de Março de 2021 pelas 00 horas e 33 minutos.

De acordo com HELERBROCK demonstra através da fórmula como pode ser a força electromotriz induzida no enrolamento primário dum transformador²:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \times \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

λ_1 – fluxo associado pelo enrolamento primário;

N_1 – numero de espira no enrolamento primario

$$\phi(t) = \phi_{max} \times \text{sen } \omega t$$

Como o valor da tensão de alimentação é senoidal o fluxo instantâneo é representado pela equação anterior, e pode se obter o valor da f.e.m induzida no primário como mostra a equação asseguir (NOGUEIRA, 2020 p.7).

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_{max} \quad (2)$$

ϕ_{max} – valor máximo do fluxo

$\omega = 2\pi f$ – velocidade angular [rad/s]

Como se trata de um transformador ideal não ha queda de tensão no enrolamento primário em vertude da consideração da resistência dispresivel e reatância da dispersão nula, a força contra electromotriz é igual a tensão aplicada e pode se mostrar que o fluxo gerado no núcleo é soneidal e o seu valor máximo depende da tensão da fonte (V_1), sua frequência e o número de espira do enrolamento primário. Esta relação é mostrada pela equação³:

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2} \pi f . N_1} \quad (3)$$

(HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador")

² HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos

³ HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos

Da seguinte forma como no primário, o fluxo do núcleo também induz no enrolamento secundário e cria uma força electromotriz, (e_2) que está em fase com (e_1), ambos são produzido pelo mesmo fluxo (Φ), logo chega se as seguintes equações⁴ (HELERBROCK, 2020).

$$V_2 = e_2 N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

$$E_2 = \sqrt{2}\pi f N_2 \times \Phi_{max} \quad (5)$$

2.2 Transformador Real

O transformador real apresenta uma particularidade relativamente aos outros que vimos anteriormente por possuir perdas no núcleo devido as correntes parasitas criadas pela variação do fluxo mútuo no tempo e elas são proporcionais a f.e.m induzida. Vai se analisar o ensaio do transformador em vazio, curto-circuito e em carga para determinar os parâmetros eléctricos de modo a compreender os processos transitórios durante a operação deste tipo de máquinas. O esquema a seguir mostra o circuito equivalente de um transformador e os valores dos parâmetros refletidos com objetivo de calcular no estudo sobre a operação do equipamento.

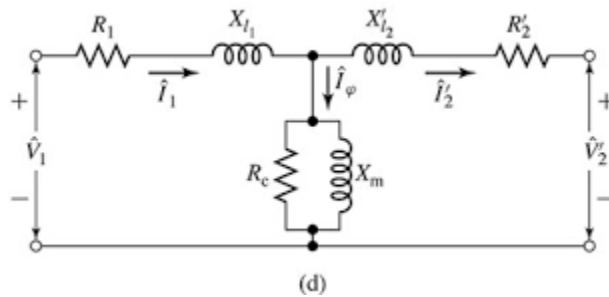


Figura 1: Transformador Real.
(HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador")

Por questões de eficiência, a transmissão de energia eléctrica em grandes distâncias sempre ocorre em alta tensão e com baixa corrente eléctrica, em resposta às perdas de energia ocasionadas pelo efeito Joule, uma vez que a energia dissipada nos fios é proporcional à corrente eléctrica.

⁴ HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos

Para os circuitos de consumo de energia, como as residências, são utilizados baixos valores de tensão eléctrica, por questões de segurança — potenciais eléctricos muito elevados podem produzir descargas eléctricas. É por essa razão que encontramos grandes transformadores nos postes, cuja função é a de abaixar o potencial eléctrico da corrente que é conduzida pelos fios, levando-a para as residências com tensões de 110 V ou 220 V.

Os transformadores comuns são construídos com dois enrolamentos de fios de cobre, chamados de primário e secundário. Esses enrolamentos sempre contam com diferentes números de voltas e encontram-se então torcidos em volta de um núcleo de ferro, sem que haja contacto entre eles. Observe a figura a seguir:

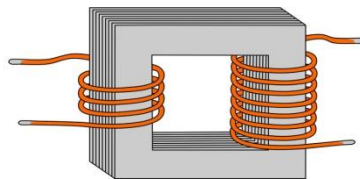


Figura 2: Transformador com enrolamentos primário e secundário.
(NOGUEIRA, 2020).

O enrolamento primário é ligado directamente a um gerador de força electromotriz alternada (transformadores não funcionam com corrente directa), ou seja, nele, forma-se uma corrente eléctrica de intensidade e sentido variável, levando à geração de um campo magnético com as mesmas características.

Esse campo magnético é então concentrado e amplificado pelo núcleo de ferro em direcção ao enrolamento secundário. O campo magnético variável induz ao surgimento de uma corrente eléctrica no secundário. A relação entre os potenciais eléctricos entre os enrolamentos do primário e do secundário é dada pela fórmula seguinte⁵:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (7)$$

(HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador")

V_P — tensão no enrolamento primário;

V_S — tensão no enrolamento secundário;

N_P — número de espiras no enrolamento primário;

⁵ HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos.

N_S — número de espiras no enrolamento secundário.

Como sabemos a tensão e a corrente eléctricas são inversamente proporcionais, portanto, a relação para as correntes eléctricas dos enrolamentos primário e secundário é invertida⁶:

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{V_S}{V_P} \quad (8)$$

(HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador")

I_P — corrente eléctrica no enrolamento primário

I_S — corrente eléctrica no enrolamento secundário

N_P — número de espiras no enrolamento primário

N_S — número de espiras no enrolamento secundário

O fenómeno físico por trás do funcionamento dos transformadores é chamado de indução electromagnética e é descrito pela lei de Faraday-Lenz. Essa lei informa que, ao produzirmos uma variação do fluxo magnético por alguma região do espaço, um campo magnético deverá surgir de modo a opor-se a essa variação⁷.

I - Os transformadores só funcionam com correntes alternadas, uma vez que é necessário que surjam variações de fluxo de campo magnético para que se induzam correntes eléctricas no enrolamento secundário.

II - A fórmula que relaciona as tensões de saída e o número de enrolamentos confirma essa afirmação.

III - Para os transformadores ideais, ou seja, que não dissipem energia eléctrica, essa afirmação é verdadeira.

IV - O fenómeno que explica o funcionamento dos transformadores é o princípio da indução electromagnética.

Dado, ainda, o princípio de conservação de energia, é óbvio que se mantém a potência ($P = W/t$) igual, dum lado e doutro do transformador, o que faz com que alterações em termos de tensão,

⁶ HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos.

⁷ HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos.

provoquem alterações em termos de corrente, mantendo-se a energia que “entra” igual à energia que “sai”⁸.

O transformador é um dos equipamentos eléctricos de enorme utilização, dado que permite ajustar tensões e correntes às necessidades existentes. De facto se pensarmos na nossa forma de abastecimento de energia eléctrica, desde logo concluímos que, face à enorme quantidade de utilizadores, a potência necessária é também enorme. Também o facto de as fontes de produção terem que estar concentradas – economias de escala – introduz, salvo raras excepções, distâncias elevadas entre a produção da energia eléctrica e o seu consumo. Concluindo, temos uma enorme potência eléctrica a transportar a uma elevada distância, o que, à luz do nossos conhecimentos, introduzirá elevadas perdas de Joule – energia dissipada em forma de calor [Pjoule = RI²] – o que não é, nitidamente, o objectivo pretendido⁹.

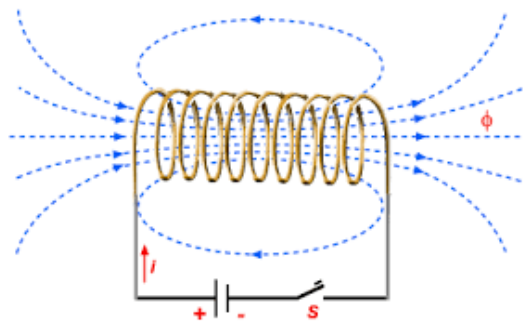


Figura 3: Campo Magnético num solenoide.
(NOGUEIRA, Silva "transformador de potência").

De acordo com a figura apresentado, ilustra o campo magnético criado num enrolamento quando o condutor estiver em forma de espira, o campo magnético é de maior dimensão e assim descreve desta forma um percurso fechado com intensidade proporcional a corrente consoante o número de espira. Como forma de esclarecer, usou se as seguintes formulas (Silva Miguel, 2016)¹⁰:

$$H = \frac{N \times I}{l} \quad (9)$$

Fonte: (Silva Miguel, 2016)

Onde:

⁸ <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/transformadoresEduPaiva.pdf> consultado aos 23 de Abril de 2020 pelas 20 horas e 45 minutos

⁹ <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/transformadoresEduPaiva.pdf> consultado aos 23 de Abril de 2020 pelas 20 horas e 45 minutos

¹⁰ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016.

H - é a intensidade do campo magnético [A.e/m];

N - é o número de espira desse enrolamento;

I - é a corrente que circula no condutor [A];

l - é o comprimento médio do circuito magnético [m];

A densidade do fluxo magnético entende-se como a quantidade do fluxo magnético no condutor que é percorrido pelo campo magnético e determina-se com ajuda da seguinte fórmula¹¹:

$$B = \mu \times H \quad (10)$$

Fonte: (Silva Miguel, 2016")

Onde:

B - é densidade do fluxo magnético [Wb/m²];

μ - é a permeabilidade magnética [H/m];

Outra grandeza importante na análise do funcionamento de transformador é o fluxo magnético mencionado anteriormente como o produto da densidade do campo que atravessa uma determinada superfície¹².

$$\phi = B \times A \quad (11)$$

Fonte: (Silva Miguel, 2016)

Onde:

ϕ - é o fluxo magnético [Wb];

A - é superfície percorrido pelo campo magnético [m²];

Na lei de LENZ a f.e.m induzida num condutor é traduzido como que se opõe a causa que lhe deu origem, pelo que a expressão anterior deverá ser modificada dando a seguinte fórmula¹³:

$$e = -N \times \frac{d\phi}{dt} \quad (12)$$

(NOGUEIRA, Silva 2020).

Como forma de interpretar este dois teorema chegou-se a conclusão que num transformador, ao aplicar uma tensão alternada e sinusoidal ao enrolamento primário esta dará origem a uma corrente, a qual, por sua vez vai criar um fluxo magnético variável no tempo com a mesma frequência da fonte que lhe deu origem. Desta forma o fluxo magnético induzirá uma tensão

¹¹ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

¹² Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

¹³ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

(e_1) proporcional ao número de espira (N_1), e com sentido contrário ao de tensão no primário. Da mesma forma, o fluxo magnético fará surgir no enrolamento secundário uma tensão (e_2), a qual será proporcional a (N_2).

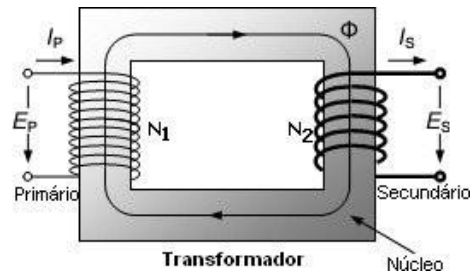


Figura 4: Transformador.
(NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020).

2.2.1 Classificações comuns de transformadores

➤ De acordo com a disposição das bobinas no núcleo¹⁴:

a) Núcleo envolvido;

b) Núcleo envolvente, mais utilizado por apresentar menores perdas por dispersão de fluxo;

➤ De acordo com a relação entre as tensões primárias e secundárias¹⁵:

a) Elevadores, quando a tensão do secundário é maior que a do primário;

b) Abaixadores, quando a tensão do primário é maior que a do secundário

➤ De acordo com o tipo de resfriamento¹⁶:

a) A seco, com ventilação natural ou forçada;

b) A óleo, com ou sem radiadores; -

➤ De acordo com o número de fases:

a) Monofásicos - Esse tipo de transformador é próprio para alimentação de circuitos de comando ou de uso industrial. O transformador usado em casas também é o monofásico, ele transforma 127 V em 220 V ou 220 V em 127 V.

b) Polifásico – Possui eficiência relativamente alta, fornece a tensão para sistemas que necessitam de mais fases através do sistema trifásico. Esse tipo de transformador varia de 3 a 6

¹⁴ Soares, Manoel B. & Soares Gabriel Gutierrez P. Transformadores Teoria e Projeto Instituto Federal de Educação Ciencia e Tecnologia Paraíba campus João Pessoa 2010

¹⁵ Soares, Manoel B. & Soares Gabriel Gutierrez P. Transformadores Teoria e Projeto Instituto Federal de Educação Ciencia e Tecnologia Paraíba campus João Pessoa 2010

¹⁶ Soares, Manoel B. & Soares Gabriel Gutierrez P. Transformadores Teoria e Projeto Instituto Federal de Educação Ciencia e Tecnologia Paraíba campus João Pessoa 2010

fases. Esses sistemas que necessitam de mais fases são especialmente para rectificação de medida de onda completa devido aos seus componentes.

c) Trifásico – Esse é o tipo de transformador que vemos nas ruas, ele recebe a tensão da subestação de distribuição em um nível de tensão de 13800 V e transforma em 127V ou 220V.

➤ De acordo com a tensão:

- a) Extra-baixa tensão, menor que 50V;
- b) Baixa tensão, entre 50V e 1kV;
- c) Média tensão, entre 1kV e 35kV;
- d) Alta tensão, maior que 35kV;
- e) Muito Alta tensão, superior a 65 kV.

2.2.1.2 Transformador de corrente

Transformador de corrente, ou TC, tem por finalidade detectar ou medir a corrente eléctrica que circula em um cabo ou barra de alimentação, e transformá-la em outra corrente de valor menor, para ser transmitida a um instrumento de medição ou circuito electrónico. O TC é muito usado para abaixar a corrente eléctrica da rede para alimentar dispositivos electrónicos que não suportam grandes níveis de corrente (NOGUEIRA, 2020).



Figura 5: Transformador de corrente.
Fonte: (Autor).

2.2.1.3 Transformador de isolamento

Segundo NARAH (2013, p. 1) o transformador de isolamento caracteriza-se por apresentar uma tensão de entrada igual a tensão de saída, em uma relação de transformação de 1:1 ou seja o número de espira do enrolamento primário é igual ao do enrolamento secundário sem que haja conexão física entre as bobinas.



Figura 6: Exemplo de um transformador de isolamento.
Fonte: (NARAH, 2013).

2.2.1.4 Transformador de potência (Objecto da pesquisa)

Os transformadores de potência constituem um dos principais equipamentos dentro de subestações e usinas, a sua função é essencial no fornecimento de energia elétrica (BECHARA, BRANDÃO, 2009, p. 1). Podem ser instalados em subestações externas, isto é, instalados ao tempo, ou instalados em subestações internas, ou seja, abrigados. Neste trabalho o alvo de estudo são os transformadores instalados em subestações externas e, portanto, sob a influência das mais diversas condições climáticas.



Figura 7: Transformador de potência.
Fonte: (Autor).

A perda da função do transformador gera grandes “transtornos operacionais”, pois são equipamentos que interrompem, quando de seu desligamento por falha ou defeito, grande quantidade de consumidores. Muitas vezes sua substituição é dificultosa e custosa financeiramente (BECHARA, BRANDÃO, 2009, p. 1).

2.2.1.5 Transformador de distribuição

Esse tipo de transformador é empregue principalmente pelas concessionárias distribuidoras de energia e em usinas geradoras de energia. São usados para distribuir a energia gerada até os consumidores, com valores diferentes do que o gerado, adequado a cada tipo de consumidor. Podem ser auto-protegidos contra sobrecargas e curto circuitos.

2.2.1.6 Transformadores de Força

São usados para geração e distribuição de energia por concessionárias, usinas, subestações de distribuição de energia eléctrica, e subestações de grandes indústrias, incluindo aplicações especiais como fornos de indução a arco, e rectificadores.

2.2.1.7 Transformador de Transmissão¹⁷

São transformadores utilizados para interligação geral dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN) adequando diferente nível de tensão. São equipamentos construtivamente mais complexos em comparação aos transformadores elevadores. Os transformadores de transmissão apresentam regulação sob carga, isto é, são dotados de comutador de "tap change" operado sob carga. Apresentam tensões usuais primárias de 230 kV e secundárias de 69 kV ou 138 kV (além do terciário de 13,8 kV).

2.2.1.8 Transformador de Subtransmissão¹⁸

São transformadores utilizados para reduzir o nível de tensão a níveis utilizados em sistemas de distribuição. São também denominados de transformador de carga e podem apresentar dois ou três enrolamentos. As tensões primárias usuais deste tipo de transformador são 138 kV ou 69 kV e apresentam o secundário, usualmente, em 34,5 kV ou 13,8 kV. Podem apresentar sistema de comutação a vazio e sob carga.

¹⁷ http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3072/1/CT_COELE_2014_1_16.pdf

¹⁸ http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3072/1/CT_COELE_2014_1_16.pdf

2.2.2 Características construtivas dos transformadores

O transformador de potência para que possa operar com vários níveis de tensão é necessário que este esteja equipado na sua construção, de materiais isolantes de elevada rigidez dielétrica. Na sua construção é necessário que se tome em conta o dimensionamento dos condutores, pois estes suportam elevadas correntes no enrolamento de BT.

O mecanismo de dissipação de calor do transformador constitui outro elemento de importância vital no projeto deste tipo de máquina, visto que a potência máxima que a mesma pode suportar é limitada pela temperatura máxima admissível pelos diferentes materiais constituintes das máquinas.

Os esforços eletromagnéticos a que os transformadores de potência estão sujeitos são outro aspecto a ter em conta, devido à interação dos campos magnéticos criados pela circulação das correntes nos enrolamentos.

Para se fazer entender a tese estão descritos os componentes que constituem um transformador de potência na figura abaixo indicada.

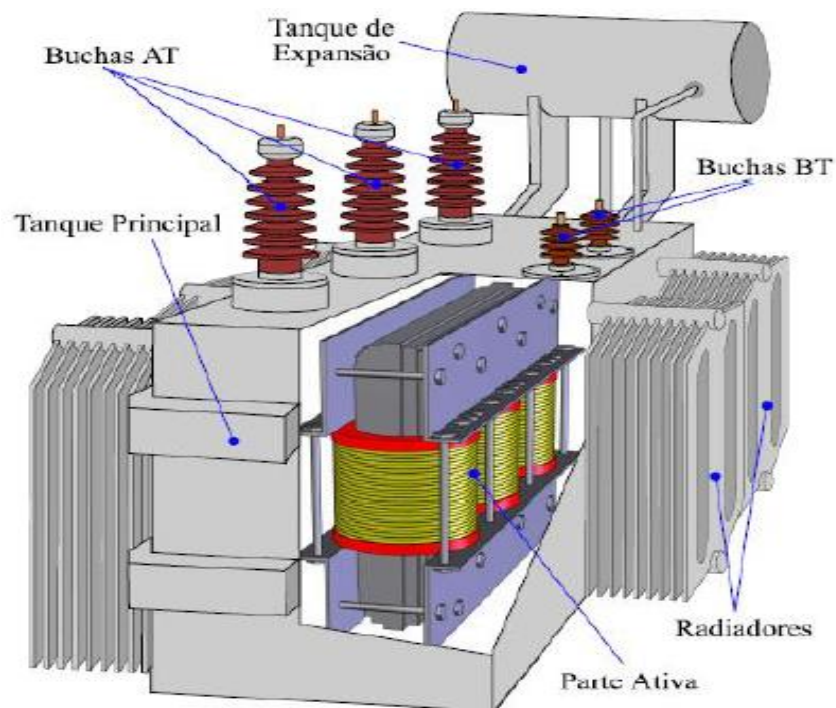


Figura 8: Constituição de um transformador de potência.
(Silva Miguel, 2016).

2.2.2.1 Características da cuba

principal função da cuba é a de armazenar todo fluido dielétrico na parte activa do transformador, mantendo-a imersa em óleo mineral. A cuba representa também a estrutura que sustenta todos os outros componentes, radiadores, tanque de expansão, buchas e outros devendo, para tal, ser dimensionada para suportar os esforços electromagnéticos daí resultante.

Além disso a cuba deverá ser estanque, ou seja, não deverá permitir o contacto com o meio externo, devido a humidade, poeiras entre outro que são agentes externos capaz de contaminar o fluido existente reduzindo assim a regidez dielétrica.

2.2.2.2 Características dos radiadores

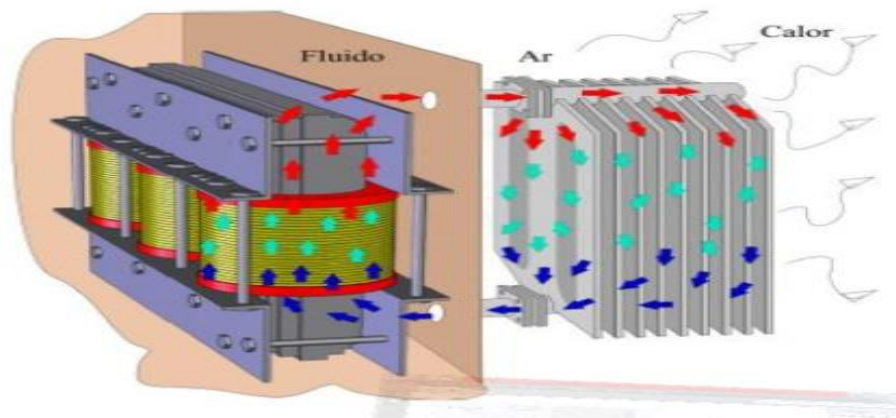


Figura 9: Sistema de refrigeração.
(Silva Miguel, 2016).

A função dos radiadores ou permutadores de calor é de proporcionar uma grande superfície de contacto com o ar externo, para permitir uma refrigeração mais rápida e eficiente. Normalmente para transformadores de transmissão o sistema de refrigeração é OFWF ou mesmo poderá se usar ONAF, este último utilizado em subestações móveis, e nos transformadores de distribuição é comum usar ONAN.

É importante referir que o aumento da eficiência de refrigeração possibilita o aumento da potência do transformador. O uso da prática de ventilação forçada permite obter um aumento da potência nominal, a qual poderá ser acrescida em cerca de 15 a 30%.

2.2.2.3 Características dos enrolamentos

Os enrolamentos devem ser compostos por materiais de elevada condutibilidade, com elevadas propriedades mecânicas para diminuir espaços e conseqüentemente minimizar perdas. Utiliza-se cobre electrolítico recozido de alta condutividade, ou ligas de cobre, sob forma de barras, normalmente em feixe de condutores em paralelo.

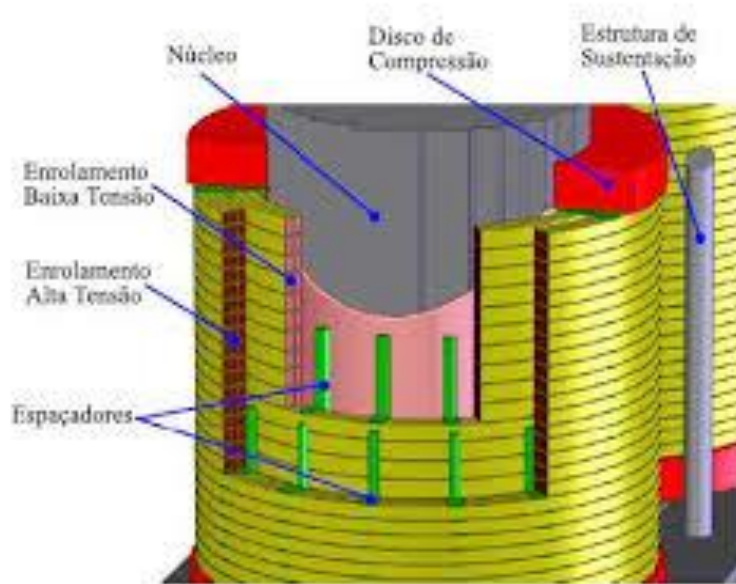


Figura 10: Configuração das bobinas no transformador de potência.
(Silva Miguel, 2016).

2.2.2.4 Características do núcleo magnético

Para constituição do circuito magnético são utilizados filas de lâminas de aço silício de cristais orientados com uma espessura que varia entre 0,014 e 0,024 polegadas para permitir limitação de valores das perdas no ferro e este material deverá ter maior permeabilidade magnética, para permitir que a corrente de excitação seja a mais reduzida possível. Usa-se a dopagem do silício para melhorar os índices de resistividade do ferro, visando a diminuição de perdas e a longividade das características magnéticas.

As perdas no núcleo, causadas pelo efeito das correntes de Foucault e histerese, representam uma fonte de calor que contribui para o aquecimento do transformador.

2.2.2.5 Características do óleo isolante

O óleo isolante tem a função de isolamento e refrigeração da parte activa do transformador e este deve possuir regidéz deieléctrica e adequada viscosidade, para permitir que o calor gerado no interior do transformador possa ser reduzido para o exterior.

Para melhor garantir o bom uso de óleo mineral é necessário que este esteja isento de humidade, pois, esta diminui fortemente as características dieléctricas do óleo, ao ponto de provocar descargas dos enrolamentos, massa até mesmo entre as espiras.

Os transformadores para evitar contacto no seu interior com o ar, estão equipado de reservatório que possibilita controlar humidade automaticamente. O contacto do óleo com o oxigênio de ar levará a uma contaminação lenta a qual origina resíduo nas paredes de refrigeração e consequentemente, o aumento da temperatura do transformador, encurtando desta forma o seu tempo de vida útil. A cada aumento de 10 °C de temperatura, corresponderá a uma redução de 50% no tempo de vida útil do transformador.

2.2.2.6 Características do Papel isolante

O papel como isolante nos transformadores, provem da madeira e é produzido normalmente pelo processo "kraft". Principal constituinte deste papel (40% a 50%) é a celulose, a qual se encontra associada a hemicelulose de 10 a 30% e, a lenhite com cerca 20 a 30%.

O papel isolante torna um componente fundamental para isolamento das espiras no enrolamento, sendo também utilizado para calços ou suportes mecânicos das bobinas e separadores, visando a criação de espaçamento nas bobinas, para que o óleo possa circular e desta forma possibilitar o arrefecimento e exercer excelente capacidade dieléctrica.



Figura 11: Constituição de bobinas dum transformador trifásico.
(Silva Miguel, 2016).

2.2.2.7 Características dos Isoladores de Travesias

Os isoladores de travessias são o elo de ligação entre os enrolamentos do transformador e a carga (enrolamento secundário) ou alimentação (enrolamento primário). As travessias formam uma barreira estanque capaz de assegurar o isolamento eléctrico em todas as condições de operação, tais como, chuva, gelo, e o nevoeiro. A travessia é composto por uma haste central condutora normalmente em cobre, sendo o isolamento composto por porcelana e o óleo mineral.

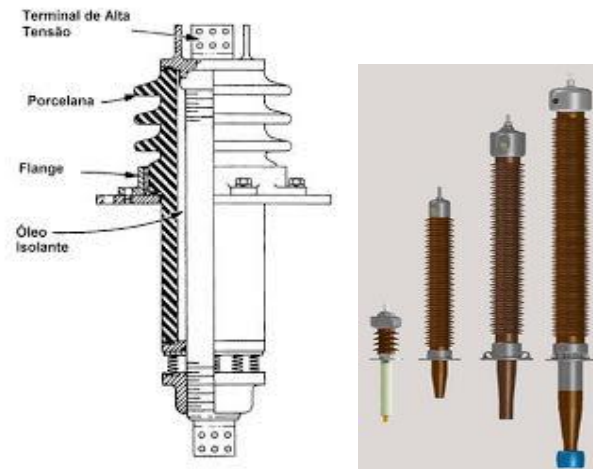


Figura 12: Ilustração de isolador de travessia de AT.
(Silva Miguel, 2016).

2.2.2.8 Características do Regulador de tensão

O regulador de tensão é o equipamento usado para assegurar a razão de transformação, através de redução ou adição de espiras, a partir do enrolamento primário ou secundário. Para os transformadores de transmissão usa se geralmente reguladores em carga (RTEC), sempre realizado no lado da AT devido a valores menores de corrente, permitindo um menor desgaste dos contactos.



Figura 13: Exemplo de um comutador de derivação em carga.
(Silva Miguel, 2016).

2.2.3 Análise de Ensaio nos Transformadores Potência

2.2.3.1 Análise em circuito aberto (ensaio em vazio)

Segundo (NOGUEIRA, 2020, p 30). O ensaio em vazio é realizado normalmente com o enrolamento aberto no lado secundário de transformador enquanto a tensão nominal é aplicada no outro enrolamento. O objectivo deste ensaio como representado na figura abaixo, é obter os módulos de corrente de excitação, da relação de transformação do transformador e das perdas no núcleo através de resistência (R_c) e da reactância de circuito de magnetização¹⁹.

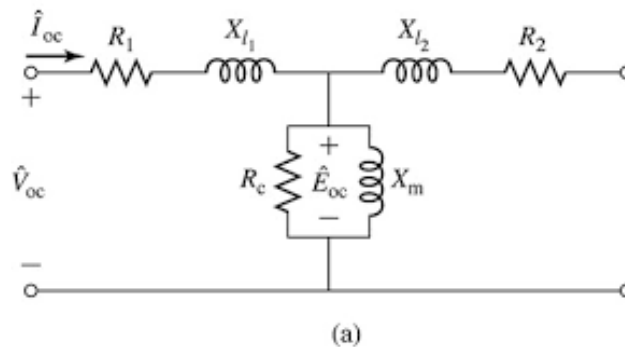


Figura 14: Ensaio em vazio.
(NOGUEIRA, 2020).

Como forma de determinar os seus parâmetros no circuito de magnetização, visto que os valores de R_c e X_m são muito superior à impedância do primária ($R_1 + jX_{l1}$), a queda de tensão no primário é desprezada e FEM induzida é quase idêntica à tensão aplicada.

Logo pode se concluir que²⁰:

$$R_c = \frac{V_{ca}}{P_{ca}}; \quad Z_\varphi = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (13)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_\varphi|}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_c}\right)^2}} \quad (14)$$

$$P_c = \frac{E_{ca}^2}{R_c} \quad (15)$$

As perdas na resistência (fórmula 15) do enrolamento primário causadas pela corrente de excitação são também desprezíveis, a potência de entrada é considerada igual às perdas no núcleo²¹.

¹⁹ NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020.01.pdf consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 14 horas e 28 minuto.

²⁰ NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020.01.pdf consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 14 horas e 28 minuto.

2.2.3.2 Análise em curto-circuito²²

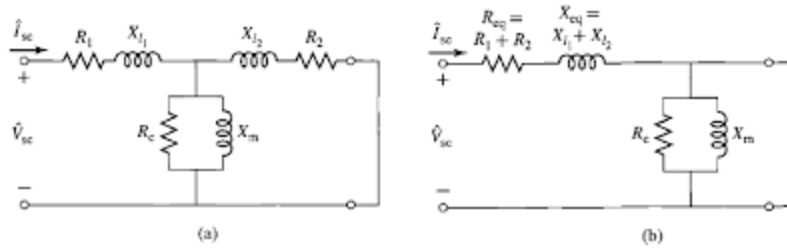


Figura 15: Análise em curto-circuito.
(NOGUEIRA, Silva 2020).

O objectivo neste ensaio é determinar a impedância equivalente em série conforme ilustra na equação, as perdas no cobre da resistência do enrolamento (R_1 e R_2), a reatância de dispersão (X_{d1} e X_{d2}) e a queda de tensão nos enrolamentos. Neste ensaio, a impedância equivalente em série é baixa, o valor da tensão aplicada deve ser na ordem de 10% a 15% para fazer circular a corrente.

$$Z_{cc} = R_1 + jX_{L1} + \frac{Z\phi \times (R_1 + jX_{L2})}{Z\phi + R_1 + jX_{L2}} \quad (16)$$

(NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020, p 27)

Neste caso, é recomendável que se ligue a tensão de alimentação no lado de AT como as corrente são menores. No ensaio em curto-circuito mede se a tensão aplicada, corrente de curto-circuito I_{cc} e a potência P_{cc} .

Para determinar os parâmetros é necessário considerar as equações seguintes:

$$R_1 = R_2 = 0.5 \times R_{eq} \quad ; \quad X_{L1} = X_{L2} = 0.5 \times X_{eq} \quad (16)$$

$$Z_{eq} = Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad ; \quad R_{eq} = R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}} \quad (17)$$

$$X_{eq} = X_{cc} = \sqrt{|Z_{cc}|^2 - R_{cc}^2} \quad (18)$$

(NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020, p 29).

²¹ <file:///C:/Users/isaa/Documents/R2020/Organizacao/REDES%20apostila.01.pdf> consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 14 horas e 28 minuto.

²² [NOGUEIRA, Silva "transformador de potência", 2020.01.pdf](#) consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 14 horas e 28 minuto.

2.2.3.3 Análise dos parâmetros de transformador em carga (ensaio em carga)

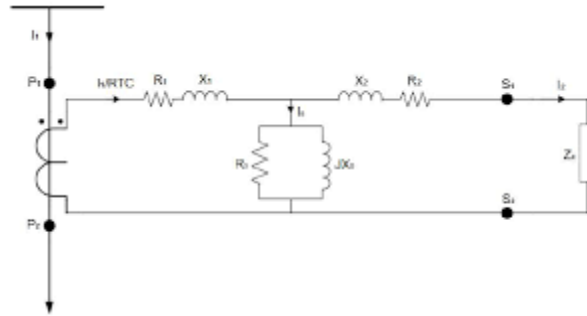


Figura 16: Ensaio em carga.
(NOGUEIRA, Silva, 2020).

Nesta abordagem vai se fazer uma simulação através de cálculos matemáticos para analisar caso o transformador estiver a alimentar uma carga resistiva de modo a conhecer o comportamento das perdas no circuito magnético e nos enrolamentos.

Dados

$V_1 = 224 V$	$I_1 = 4.91 A$	$P_1 = 1.09 KW$	$S_1 = 1.09 KVA$
$V_2 = 218 V$	$I_2 = 4.87 A$	$P_2 = 1.05 KW$	$S_2 = 1.05 KVA$

Como se trata de um circuito em que a carga é resistiva despreza se o fator de potência, logo a potência reativa é igual a zero e $R_c = 3453 \Omega$ logo:

$$\hat{I}_1 = \frac{S_1}{\tilde{V}_1} = \frac{P_1 + jQ_1}{\tilde{V}_1} = \frac{1.09 + 0}{224 \angle 0^\circ} = 4.86 [A]$$

$$S_{perdas} = |\hat{I}|^2 \times (R_1 + jX_{d1}) = |4.86|^2 \times (0.6 + j0.172) = 14.35 + j2.7 [VA]$$

$$\tilde{E}_1 = \tilde{V}_1 - \hat{I}_1 \times (R_1 + jX_1)$$

$$\tilde{E}_1 = 224 - 4.86 \times (0.634 + j0.172) = 220.8 \angle -15.2 [V]$$

$$P_c = \frac{|\tilde{E}|^2}{R_c} = \frac{|220.86|^2}{3453} = 14.13 [W]$$

CAPÍTULO III

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

A pesquisa sob o ponto de vista dos seus objectivos neste trabalho será exploratória, segundo (PRODANOV, 2013, p. 51) na medida em que tem como finalidade proporcionar mais informação sobre o assunto que se vai investigar, possibilitando a sua definição e o seu delineamento, facilitar a delimitação do tema de pesquisa, orientar a fixação dos objectivos e a formulação de hipóteses ou descobrir um novo enfoque para o assunto, assume, em geral, as formas de pesquisa bibliográfica e estudos de caso.

A pesquisa exploratória envolve:

- Levantamento bibliográfico
- Entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado
- Análise de exemplos que estimulem a compreensão (PRODANOV; FREITAS, 2013, p.51-52).

Para a matéria dessa forma de pesquisa foi privilegiada a entrevista com o responsável da subestação Matola 275 em concordância com os técnicos da manutenção efectiva na EDM, como uma fonte primária de colecta de dados e o relatório produzido em 2017 como uma fonte secundária, a este juntaram outros documentos com interesse para a pesquisa.

A pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos, jornais, boletins, monografias, dissertação, teses, material cartográfico, internet, com o objectivo de colocar o pesquisador em contacto directo com todo material já escrito sobre o assunto da pesquisa (PRODANOV; FREITAS, 2013, p.53). Neste contexto serão privilegiados livros e manuais que versam sobre avarias mecânicas, eléctricas, transformadores de potência, subestações de electricidade, relatórios de EDM.

3.2 Métodos de abordagem

Este trabalho usará o método de abordagem hipotético-dedutivo, no qual será identificado o problema de pesquisa através da formulações de possíveis soluções para o problema.

Este método inicia se com a formulação de um problema ou lacuna no conhecimento científico, passando pela formulação de hipóteses e por um processo de inferência dedutiva, a qual testa a predição de ocorrência de fenómenos abrangidos pela referida hipótese.

A pesquisa científica com a abordagem hipotético dedutivo, inicia se com a formulação de um problema e com a sua descrição clara e precisa, a fim de facilitar a obtenção de um modelo simplificado e a identificação de outros conhecimentos e instrumentos, relevantes ao problema, que auxiliarão o pesquisador em seu trabalho.

Após esse estudo preparatório, o pesquisador passa para a fase de observação, que é a fase de teste de modelo simplificado, uma fase meticulosa em que é observado determinado aspecto do universo, objecto da pesquisa, a fase seguinte e a formulação de hipóteses, ou descrições tentativa, consistentes com o que foi observado, estas hipóteses são utilizadas para fazer o prognóstico, os quais serão comprovados ou não por meio de testes, experimentos ou observações mais detalhadas (PRODANOV; FREITAS,2013, p.32-33).

Este método de abordagem tornou-se aplicável na medida em que o problema foi formulado a partir de factos reais, que reflectem na empresa assim como na vida dos clientes, mas os verdadeiros prejuizos não resultam de possiveis deduções, pois acredita-se que não seja possível a empresa e os clientes não terem prejuizos em casos de avarias.

3.3 Técnicas de recolha de dados

Entrevista

Constitui uma técnica de levantamento de dados primário que é sempre realizada face a face (entrevistador e entrevistado); tem como pré-requisito a elaboração de um impresso próprio com questões a serem formuladas na mesma sequência para todos os informantes. A entrevista é

obtenção de informações de um entrevistado sobre determinado assunto ou problema. (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 105-106).

Para a colecta dos dados serão realizadas entrevistas com os responsáveis na EDM subestação Matola 275 e profissionais responsáveis pela manutenção dos transformadores de potência, no sentido de perceber como tem analisados as avarias dos transformadores de potência e como tem sido vistas as causas e consequências das mesmas. Para tal será elaborado um guia de entrevista que consta nos apêndice.

CAPÍTULO IV

4 TIPOS DE AVARIAS NOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

4.1 Avarias bruscas

O conceito de avarias para Santos (1968, p.354) tem duas direções, qual seja "avaria toma-se em dois sentidos: ora, em geral, significa todo dano parcial acontecido ao navio ou carregação; ora se entende pela contribuição ao mesmo dano".

4.2 Avarias típicas em transformadores de potência

Os transformadores de potência são equipamento que tem uma vida útil entre 30 a 50 anos de operação embora existe transformadores que funcionam até aproximadamente 90 anos. No entanto devido as avarias bruscas que ocorrem num período de vida muito precoce, com garantia alguns transformadores de potência ficam fora de serviço ou mesmo no estado de destruição num período entre 2 a 10 anos.

Para alinhar com esta adversidade, é fundamental conhecer com detalhe o tipo de avarias que mais ocorrem em transformadores, assim como as suas principais causas, para melhor mitigar as avarias e aumentar o seu tempo de vida útil.

- Avaria precoce: neste período a taxa de avaria pode ser elevada, mas num período habitualmente curto, principalmente no primeiro ano da energização, sendo que as avarias podem ter origem em defeito de fabrico, montagem, deficiente controlo de qualidade, etc.
- Vida útil: neste período a taxa de avarias é quase constante e ocorre devido a factores externos ao transformador, tais como, erro de manobra, descargas atmosféricas, erros de manutenção entre outros.
- Envelhecimento: neste período a taxa de avaria é crescente, principalmente a partir dos 20 anos de operação, devido ao desgaste e a fadiga dos seus componentes.

Refira-se que as avarias mais comuns estão relacionadas com enrolamentos, regulador de tensão em carga (RTEC) e com os isoladores de travessias. As avarias nos enrolamentos associam-se por períodos de maior indisponibilidade, podem conduzir a destruição do transformador, ademais podemos afirmar que as avarias provocadas por defeito de isolamento são as mais dispendiosas como também a falta de manutenção regular (predetiva e preventiva).

4.2.1 Principais causa das avarias nos tranformadores de potência

Em relação as pressumíveis causa de avarias parece ser possível afirmar que são maioritariamente relacionados com defeitos de fabrico, projecto, materias e manutenção dificiêntes.

As avarias com origem no deficiente projecto e construção estão relacionados com a difeciênte actualização dos processos de fabrico, e a não implimentação de um plano rigoroso de teste de operação em fábrica, há também a deficiência escolha de materias na concessão dos componentes.

Um das causas de avaria mais comuns resulta da deficiente manutenção predetiva e preventiva realizada aos equipamentos , ou porque não se realizam acções de manutenção adequadas ao transformador.

É também importante o conhecimento específico de cada componente por parte dos operadores que efectuam trabalhos de manutenção, para que as operações de manutenção se realiza em da melhor forma.

4.2.2 Caracterização das avarias nos enrolamentos

De acordo com (Silva Miguel, 2000 p.39) As causas maioritariamente de avarias nos enrolamentos são de origem térmicas, mecânicas e eléctricas, e possível falta de controle de carga. Devido aos processos de oxidação e hidrólise, aumentam graficamente a temperatura nas paredes de refrigeração do trasformador degradar o sistema de isolamento. Com aumento da temperatura superior ao funcionamento do transformador, reduz drasticamente a resistência mecânica do papel isolante.

Um aumento de 5.5° de temperatura, duplica a velocidade de degradação do papel isolante reduzindo desta forma a vida útil do transformador para metade, isto porque quando sobreaquecido, o papel isolante perde elasticidade tornando se quebradiço, diminuindo desta forma, a sua rizedéz e tornando-o suscetível a rotura²³.

²³ Kindermann, Geraldo, “Proteção de Sistemas Eléctricos de Potência”, 2º Volume, 2006.

4.2.2.1 Características de avarias nos isoladores de travessias

Os isoladores de travessia “(*buching*)” como dispositivos que interliga a parte externa com o interior de transformador, desta forma são mais vulneráveis as agressões em caso de explosões ou até incêndio servido como ponto de ruptura.

4.2.2.3 Características de avarias nos RTEC

Os reguladores de tensão em carga, permite assegurar os níveis de tensão sem necessidade de retirar o funcionamento do transformador, cuja acção requer movimento mecânico, logo sujeito ao desgaste. As avarias comuns nos RTEC são de origem elétrica, térmica e mecânica. Durante uma comutação, a formação do arco elétrico provoca a oxidação do óleo e a consequente formação do carbono. Existe parte nos contactos que sofrem desgaste libertando partículas sólidas no seio de óleo isolante.



Figura 17: Cumutador de tomadas avariado dum transformador de 66/11 kV.

Fonte: (Autor).

4.2.2.4 Desgaste do óleo isolante

A principal causa que influencia no desgaste de óleo mineral isolante é a oxidação dos hidrocarbonetos. Os factores que influencia a oxidação são as já mencionado anteriormente, como o caso da composição de óleo mineral, a concentração do oxigênio dissolvido, a temperatura, a presença de catalizadores metálicos e outros.

Na fase incipiente de oxidação do óleo, gera-se produtos polares, como os álcoois, aldeídos e cetonas, porém, à medida que a oxidação avança forma-se aos ácidos, produtos sólidos como a formação de lama e consequentemente diminuição da rigidez dielétrica e viscosidade do óleo.

4.2.2.5 Degradação do papel “Kraft”

O principal factor no envelhecimento do papel isolante “kraft” está associado aos processos de oxidação, presença de partículas de água e pirólise, temperaturas superiores a 150°, contribuindo desta forma para a redução do grau de polimerização(GP)²⁴.

Pode-se através da equação calcular tempo de vida útil da celulose, (Silva Miguel 2019,p. 44).

$$T_{vidCel} = \frac{0,004}{A} e^{\frac{13600}{T+273}} \text{ horas} \quad (19)$$

Fonte: (Silva Miguel, 2016")

Onde:

A – é uma constante que depende das condições de operação e dos materias envolvidos ($1,07 \times 10^8$), para papel "kraft" seco em óleo;

T – valor da temperatura em Kelvin.

4.3 Descrição dos métodos de diagnóstico de avarias

4.3.1 Métodos de diagnóstico

Os métodos comuns utilizados para diagnóstico que permite avaliar o estado e identificação da integridade do transformador são:

- Método de supervisão preventiva;
- Método de inspeção visual interna;
- Métodos de análise do papel isolante;
- Método de análise de parâmetros eléctricos.

4.3.2 Método de supervisão preventiva

No método de supervisão preventiva, destaca-se a inspeção de rotina, teste de regidéz dieléctrica e análise de gases dissolvidos (DGA), ensaio de termografia e medição de ruidos.

²⁴ CIGRE Working group, “The Impact of Insulation Monitoring and Diagnostics on Reliability and Exploitation of Service Life”, 2006

4.3.2.1 Análise de óleo mineral isolante

O desempenho e tempo de vida útil do transformador depende maioritariamente do estado que o óleo se apresenta. Para este tipo de análise é fundamental que se faça a recolha de amostra para realização de análise físico-químico de óleo mineral, tendo como objetivo análise de gases dissolvidos, a regidéz dieléctrica, o índice de acidez, humidade relativa, cor, lama, sedimentos e teor das partícolas²⁵.

4.3.2.2 Análise dos gases Dissolvidos no óleo (DGA)

A determinação dos defeitos internos de origem eléctrica assim como térmica é realizado com ajuda no teste de análise de gases dissolvidos através de um processo que se chama cromatografia em fase gasosa. Neste teste detecta-se gases proveniente da decomposição dos materiais isolante tais como o óleo e o papel isolante, por acção térmica ou eléctrica, sendo que os resultados permitem estimar o estado do transformador.

Nos teste realizados os gases obtidos em forma de hidrocarbonetos e óxidos produzidos num transformador em operação são:

- Metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2) e hidrogénio (H_2);
- Monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2);
- Oxigénio (O_2) e nitrogénio (N_2).

Segundo Silva Miguel (2016), as concentrações de gases no óleo, suas proporções relativas gradeintes de consetrações, são utilizadas para estimar o estado de um transformador. Existe para tal, vários critérios que relacionam estes parâmetros com tipo de avarias, sendo os mais utilizados de *Rogers*, *Deornengurg*, *Duval*, IEEE C 57.104-1991 e IEC 60599²⁶.

Para diagnóstico de consetração de gases no óleo, o método de *Deornengurg*, utiliza duas relações principais e duas auxiliares de gases, baseando se para tal em cinco gases.

Neste contexto, a tabela 1 apresenta os dados em função das relações de gases e respetivo diagnóstico. A tabela 2 apresenta os valores de concentração máxima individual dos gases para validação deste método.

²⁵ Martins, Maria Augusta, “Manutenção de Transformadores de Potência. Tratamentos do óleo e do Papel dos Enrolamentos”, 2001.

²⁶ Siemens, “Transforming Regeneration Into System Reliability”, 2011.

Tabela 2: Critério de identificação de avarias de Doernenburg²⁷.

Tipo de Avarias	Relações Principais		Relações Auxiliares	
	CH_4 / H_2	C_2H_2 / C_2H_4	C_2H_6 / C_2H_2	C_2H_2 / CH_4
Ponto Quente	>1	< 0.7	>0.4	< 0.3
Descarga parcial	< 0.1	Nao significativo	> 0.4	< 0.3
Outros tipos de discargas	< 1 e > 0,1	> 0.7	<0.4	> 0.3

Fonte: Norma IEEE C 57.104 (1991)

Tabela 3: Valores de concetração máxima de gases segundo Doernenburg²⁸

Tipos de gás	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
Concentração ppm (v/v)	200	50	15	60	15

Fonte: Norma IEEE C 57.104 (1991)

A norma IEEE C 57.104 (1991) recomenda a utilização deste método, mas com valores de concentração de gases diferentes, conforme a tabela 3²⁹.

Tabela 4: Valores de concetração maxima de gases segundo IEEE³⁰.

Tipo de gás	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
Concentraçao ppm (v/v)	100	120	65	50	35

Fonte: Norma IEEE C 57.104 (1991)

O método de *Rogers* utiliza a mesma filosofia, mas utilizando para o efeito quatro relações de concentrações de gases com os respetivos limites de variação para as relações.

Para este caso a norma IEEE C 57.104 (1991) aconselha utilização deste método mas utilizando somente três relações de concentração de gases eliminando correlação C_2H_6 / CH_4 .

²⁷ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

²⁸ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

²⁹ EDP, “Transformadores Trifásicos 60kV/MT, Caracterização e Ensaio”, 2014

³⁰ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

Tabela 5: Correlação com uso da norma IEEE C 57.104³¹.

Casos	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6	Diagnostico de Avarias Sugeridos
0	< 0.1	>0.1 e <1.0	<1.0	Condições normais
1	<0.1	<0.1	<1.0	Arco de baixa energia / descargas parciais
2	0.1 a 3.0	0.1 a 1.0	>3.0	Arco-descarga de alta energia
3	<0.1	>0.1 e <1.0	1.0 a 3.0	Sobreaquecimento-baixas temperaturas
4	<0.1	>0.1	1.0 a 3.0	Sobreaquecimento temperatura <700°C
5	<0.1	>0.1	>3.0	Sobreaquecimento temperatura >700°C

Fonte: Norma IEEE C 57.104 (1991)

A aplicação de metodologia do triângulo de *Duval* encontra-se generalizada e bastante defundida em outros diagnosticos especiais, tais como a análise DGA ao óleo dos RTEC³².

Esta metodologia basea se em rácios de Metano, Etileno e Acetileno para a representação de um ponto no triângulo, mas a sua utilização é viável se forem encontrados através dos métodos acima indicados (*Rogers* ou *Doernenburg*) valores de gases que o justifiquem³³.

4.3.3 Método de inspeção visual interna

Este método é utilizado depois de se realizar os teste eléctricos e chegar se a conclusão que o transformador apresenta uma avaria, assegurar faz se a abertura do mesmo para avaliar diretamente os possíveis danos principalmente no enrolamento e núcleo.

4.3.3.1 Medição do grau de polimerização do papel isolante (GP)

Para melhor conhecer o estado do papel isolante só é possível com ajuda do ensaio de grau de polimerização. O valor inicial de GP da celulose é de cerca se 1200, sendo que no processo de secagem e condicionamento dos condutores os valores de GP baixam para valores que podem variar entre 1000 a 900. Para valores de GP superiores a 500, a resistência mecânica mantém

³¹ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

³² Martins, Maria Augusta, “Envelhecimento Térmico do Papel Isolante de Transformadores. Investigação Experimental. Modelos de Degradação”, 2010

³³ Martins, Maria Augusta, “Envelhecimento Térmico do Papel Isolante de Transformadores. Investigação Experimental. Modelos de Degradação”, 2010

se constante , mas quando estes valores baixam de 500 para 200, a sua resistência mecânica desce para valores de cerca de 50% dos valores originais e para baixo de 200 o papel "kraft" deixa de ter resistência mecânica³⁴.

4.3.4 Métodos de controle de avarias

4.3.4.1 Método de ensaios eléctricos

Sempre que pretende se conhecer as características do funcionamento do transformador é necessário fazer uma avaliação dos seus parâmetros eléctricos, em que destaca-se os seguintes ensaios:

- Medição da razão de transformação, com objectivo de conhecer os problemas eléctricos como por exemplo, curto circuitos entre as espiras, ou problema no mecanismo de regulação em carga;
- Análise da resposta em frequência, com o objectivo de detectar distorções mecânica dos enrolamentos;
- Medição da resistência dos enrolamentos, com objetivo de detectar a descontinuidade nos condutores, problema nos contactos no regulador de tensão em carga e nas ligações das travessias;
- Medição da resistência do isolamento, com objectivo de detectar os defeitos de isolamento nos enrolamentos;
- Medição da capacitância com objetivo de detectar deslocamento nos enrolamento;
- Medição de corrente de excitação serve para a detecção de avarias no circuito magnético e nos enrolamento de transformador , seja eles monofásico ou trifásico;
- Medição das descargas parciais, visando medição do nível de descargas parciais num determinado equipamento, para uma dada tensão ;
- Medição do factor de dissipação dieléctrica no enrolamento e travessia constitui um parâmetro dieléctrico muito importante para avaliação do estado geral de um sistema de isolamento, referindo se as perdas dieléctricas dos materiais isolantes.

³⁴ CIGRE, "DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria", 2010.

4.3.4.2 Análise da resposta em frequência (FRA)

A análise da resposta em frequência é uma técnica usada nas empresas de electricidade para conhecer os parâmetros internos em função da frequência, como a resistência , indutância e capacitância. Com auxilio da análise da resposta em resposta, mede se a razão de transformação , utilizando uma vasta faixa de frequência, geralmente compreendida entre os 10 Hz e os 20MHz, consiste na medição da impedância , admitância ou amplitude de tensão dos enrolamentos.

As medições efetuadas aos transformadores em bom estado fornecem um diagrama de resposta em frequência de referência. A obtenção destes valores de referência é bastante importante, porque é com elas que serão comparados as futuras medições de resposta em frequência, depois a ocorrência dos eventos no sistema .

Atualmente encontra se no mercado dispositivos portateis que permitem efetuar o ensaio no local onde o transformador se encontra instalado, tal como apresentado na figura 17³⁵ .



Figura 18: Analisador FRA.

Fonte: (Silva Miguel, 2016).

4.3.4.3 Medição de corrente de excitação

A corrente de excitação é uma corrente que flui nos enrolamentos quando é mantida a uma tensão de entrada e o outra extremidade mantida aberto. A medição da corrente de excitação , efetua se através da realização de um ensaio monofásico em vazio.

³⁵ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

Este ensaio serve para detectar avarias no circuito magnético e nos enrolamento do transformador, sejam eles monofásico ou trifásico. Nos transformadores trifásicos, com grupo de ligação estrela-triângulo ou vice-versa os valores da corrente de excitação será maior nas fases dos extremos do que na fase do meio, geralmente os resultados obtidos são comparados com os valores dos outros transformadores com as mesmas características, a diferença entre as fase extremos deve ser de apenas 5%³⁶.

4.3.4.4 Medição da Razão de transformação

A medição da razão de transformação é utilizada para detecção de espiras em curto-circuito ou para detectar circuitos abertos nos enrolamento do transformador que pode ser causado por falta de isolamento. Este ensaio é utilizado para verificar a polarizadade do enrolamento e, comparar o número de espira do enrolamento primário com o número de espira do enrolamento secundário em cada ponto do regulador de tensão. A medição é feita através de um aparelho chamado Analisador FRA, aplicando se uma tensão alternada de 220V ao enrolamento de AT, medindo se a tensão induzida no enrolamento de BT correspondente, comparando com os resultados obtidos com a razão de transformação obtido nos cálculos realizado ou na chapa de característica do fabricante.

A razão de transformação não deverá ultrapassar os 0,5% da razão entre as tensões nominais dos enrolamento, obedecendo aos padrões do fabricante.

A medição da polaridade de um transformador é fundamental para efetuar o paralelo entre os transformadores, apartir da fórmula de ralação de transformação vai se efectuar uma simulação para determinar o valor da razão de transformação com auxilio da chapa de característica (considerar o anexo 2) para vários casos diferentes, o que pode ser uma ferramenta de apoio no caso de trabalhos de manutenção.

³⁶ Silva Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016

1° Caso

Ligação Estrela/ Estrela Y - Y

$$R_{16} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{316020 V}{66000 V} = 4.7881818$$

$$R_{15} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{312770 V}{66000 V} = 4.738939393$$

$$R_4 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{234090 V}{66000 V} = 3.5468181$$

2° Caso

No caso de ligação em estrela $U_L \neq U_f$ e $I_L = I_f$, enquanto na ligação em triângulo $U_L = U_f$ e $I_L \neq I_f$.

Ligação Estrela/ Triângulo Y - Δ

$$R_{16} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} \times 316020 V}{33000 V} = 16.58674837$$

$$R_{15} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} \times 312770 V}{33000 V} = 16.416167609$$

$$R_4 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} \times 234090 V}{33000 V} = 12.286538592$$

3° Caso

Ligação Triângulo / Estrela Δ - Y

$$R_{16} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{316020 V}{\sqrt{3} \times 66000 V} = 2.7644580617$$

$$R_{15} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{312770 V}{\sqrt{3} \times 66000 V} = 2.7360279348$$

$$R_4 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{234090 V}{\sqrt{3} \times 66000 V} = 2.047756432$$

4.3.4.5 Medição da resistência de enrolamento

O ensaio de medição da resistência dos enrolamentos nos transformadores é feito com ajuda de um equipamento chamado MEGA ohmímetro que tem como objetivo de detectar anomalias nos contactos, condutores partidos e resistência de contacto nos reguladores de tensão. Este teste possibilita uma análise ao comportamento dos processos transitório na mudança de tomada do regulador de tensão.

Visto que a resistência varia com a temperatura, torna se necessário que em cada período de manutenção faça se a medição da resistência para que possa possibilitar as futuras comparações com os outros ensaio.

Para a correção dos valores de temperatura da resistência é descrito conforme a seguinte expressão, (Silva Miguel, 2016, p. 68):

$$R_S = R_m \frac{T_K + T_S}{T_K + T_m} \quad (20)$$

fonte: (Silva Miguel, 2016" p. 68).

Onde :

R_m - é a medida da resistência;

T_S - é a temperatura de referência pretendida;

T_m - é a temperatura à qual a resistência foi medida;

R_S - é a medida de resistência à temperatura T_S ;

T_K - é o valor da temperatura para o cobre (234 °C) e para alumínio (225 °C).

A medição de resistência do enrolamento do transformador é feito através do método de injeção de uma corrente que varia dos 1000 A a 5000 A durante um segundo.

4.3.4.6 Medição da resistência de isolamento

Devido a presença de particulas que se encontram suspensas no seio de óleo mineral e humidade tem necessidade de realizar a medição de resistência de isolamento para conhecer a qualidade do isolamento de cada enrolamento em relação a outra.

O ensaio consiste na aplicação de alta tensão continua que varia entre 1,5 a 10 kV num intervalo de cerca de um segundo, sendo que esses valores encontram descritos nas normas do

fabricantes. Este teste deve ser realizado antes e após o comissionamento, reparação ou durante uma acção de manutenção ao transformador, devendo os resultados obtidos serem guardadas para as comparações futuras.

Na tabela abaixo mostra o teste de medição de resistência do isolamento no transformador 2 em 2015 na Subestação do Fomento, que posterior faz comparação de valores obtidos.

Tabela 6: Valores obtidos de resistência de isolamento.

Medição de Resistência de isolamento a 30°C 5kV [GΩ] TR 66/33 kV			
	R [15 seg]	R [60seg]	R [10min]
LV-HV+Gr	1.9	2.4	2.66
HV-Gr+LV	1.6	1.72	10.3

Fonte: (Relatório do TR5 na SE Matola 275, EDM,2019)

Feito as medições é importante verificar o índice de ionização e índice de polimerização para conhecer o estado de isolamento de papel “kraft”. Para tal é necessário achar a razão entre a resistência final com a resistência anterior, isto é, $I_p \geq 1$ e $I_l \geq 1$.

CAPÍTULO V

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADO

De acordo com MONCHY (1987, P.3), " o termo manutenção tem sua origem no vocábulo militar, cujo sentido era manter nas unidades de combate o efetivo e o material num nível constante de aceitação."

KARDEC &NASCIF (2009, P.23) define o acto de manter ou a manutenção industrial como " garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e preservação do meio ambiente com confiabilidade, segurança e custo adequados".

A linha de transmissão (LT) de energia elétrica é um componente fundamental da infraestrutura e um elemento de vital importância para o cenário energético de um país, pois possibilita o transporte de energia das fontes geradoras até os centros de consumo.

5.1 Manutenções em transformadores de potência

O monitoramento do estado geral do transformador e seus acessórios, assim como o acompanhamento de suas condições operacionais são actividades importantes que visam garantir o bom funcionamento e a não interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Os principais tipos de manutenções são classificados em corretivas, preditivas e preventivas.

a). A manutenção corretiva é "um serviço programado ou não, executado em equipamento ou linha de transmissão com a finalidade de corrigir defeitos para restabelecer sua condição satisfatória de operação" (FRONTIN, 2013). Segundo Viana (2002, p. 10), a manutenção corretiva é a intervenção imediata realizada de forma aleatória e sem definições anteriores. É o tipo de manutenção que apresenta maior custo.

b). A manutenção preventiva é "um serviço programado executado em equipamento ou linhas de transmissão para manter sua condição satisfatória de operação" (FRONTIN, 2013). De acordo com Viana (2002, p. 10), a manutenção preventiva consiste na intervenção realizada em intervalos predeterminados em equipamentos que não estejam em falhas ou com defeitos, ou seja, em plenas condições operacionais. Esta manutenção é realizada em períodos pré-definidos de tempo. Tais períodos são baseados em dados estatísticos, condições do equipamento e local de instalação. Sua função é prevenir a ocorrência de falhas ou defeitos e também é comumente denominada de manutenção sistemática.

c). **A manutenção preditiva** é realizada por meio do monitoramento de parâmetros realizados ao longo da vida do equipamento. Este acompanhamento fornece dados para uma análise probabilística que permite a execução da intervenção em momento adequado. Segundo Viana (2002, p. 12), a manutenção preditiva objetiva, por meio do monitoramento, determinar o tempo correto da necessidade da intervenção. Dessa forma, o equipamento não precisa ser desmontado para inspeções e sua vida útil é maximizada.

Existem diversas técnicas de manutenção aplicadas aos transformadores de potência. Isto se deve principalmente, ao valor financeiro do transformador, que constitui um dos mais caros do sistema elétrico de potência (ARANTES, 2005). Algumas destas técnicas empregadas são apresentadas a seguir.

5.1.1 Análise Cromatográfica

O óleo mineral isolante do transformador sofre desgaste contínuo enquanto o transformador está em operação. A operação do transformador causa pequenas descargas elétricas que promovem a deterioração do óleo isolante, isto é, o óleo passa a apresentar produtos resultantes de sua oxidação. Assim, o termo “deteriorado” é aplicado ao óleo isolante que apresenta esses produtos resultantes da oxidação. Diferentemente, o termo “contaminado” é atribuído ao óleo mineral que contém água ou outros componentes estranhos à sua decomposição (ARANTES, 2005).

5.1.2 Análise Físico-Química

O óleo mineral isolante novo utilizado em transformadores deve apresentar características físico-químicas de acordo com especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BECHARA, 2010). Estas características sofrem alterações ao longo da operação do transformador e devem ser periodicamente avaliadas para programação de manutenções preventivas a fim de ampliar a vida útil do equipamento.

5.1.3 Contagem de Partículas

Esta técnica é utilizada especialmente em transformadores com classe de tensão igual ou superior a 230 kV (BECHARA, 2010) para avaliação do óleo mineral isolante. A operação do transformador tem como consequência natural o surgimento de partículas como ferro, alumínio, cobre e outros elementos constituintes dos componentes do transformador. Porém, essas partículas, por sua natureza condutiva, representam uma ameaça de falha ao equipamento. Para quantificação destas partículas, deve ser realizada, periodicamente, uma coleta de amostra de óleo para, além da quantificação, mensurar o tamanho destas partículas.

5.2 Métodos alternativos de redundância no caso de avarias

Uma forma de garantir a continuidade no fornecimento de energia eléctrica ao consumidor no caso de avarias, as empresas concessionárias de energia eléctrica devem na construção de linhas de transporte de energia optar em criar vários sistemas radiais para garantir redundância.

5.2.1 Sistema Eléctrico Radial com Recurso

Os sistemas eléctricos radiais com recurso deverão ser utilizados em áreas que demandam maiores densidades de cargas ou requerem maior grau de fiabilidade, devido as suas particularidades como o caso dos hospitais, centro de computação.

Este sistema caracteriza-se pelos seguintes aspectos:

- Existência de interligações normalmente abertas, entre alimentadores adjacentes da mesma ou de subestações diferentes ;
- Ser projetado de forma que exista certa reserva de capacidade em cada circuito, para a absorção de carga de outro na eventualidade de defeito;
- Limita o número de clientes interrompidos por defeito e diminui o tempo de interrupção em relação ao sistema radial simples;

Neste sistema instala-se num mesmo circuito ou entre circuitos diferentes , chaves que operam abertas, que podem ser fechadas em manobras de transferência de carga.

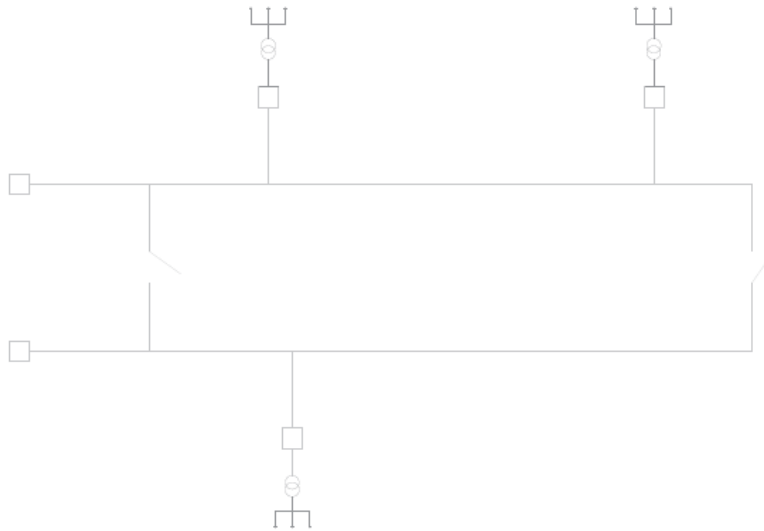


Figura 19: Esquema unifilar de uma rede Radial com Recurso.

Fonte: (Autor).

O critério usual para a fixação do carregamento de circuitos, em regime normal de operação, é o de se definir o número de circuitos que irão receber a carga a ser transferida. Usualmente dois circuitos que socorrem um terceiro e estabelece que o circuito que receberá a carga não exceda o correspondente ao limite térmico, razão que estabeleceu-se a seguinte formula³⁷:

$$S_{term} = S_{reg} + \frac{S_{reg}}{n} \quad (21)$$

Fonte: Eletropaulo – Sistema Radial

Onde:

n - numero de circuitos que irão absorver carga do circuito em contingência;

S_{term} – carregamento correspondente ao limite térmico do circuitos;

S_{reg} - carregamento de circuito para operações em condições normais.

O carregamento do circuito é dado por³⁸ :

$$S_{reg} = \frac{n}{n+1} S_{term} \quad (22)$$

Fonte: Eletropaulo – Sistema Radial.

No caso de dois circuitos de socorro, corresponde a 67% da capacidade de limite térmico.

³⁷ file:///C:/Users/isaa/Documents/R2020/Organizacao/REDES%20apostila_sdee_01.pdf

³⁸ file:///C:/Users/isaa/Documents/R2020/Organizacao/REDES%20apostila_sdee_01.pdf

5.2.2 Sistema Eléctrico em Anel (Loop)

No sistema eléctrico em anel, o circuito alimentador retorna à mesma fonte. Tem maior flexibilidade e permite melhor continuidade do fornecimento, dependendo do tipo do esquema adotado. O custo é mais elevado que o radial, não só pela maior capacidade dos cabos, que devem ter folga para atender às emergências quando a alimentação passa a ser feita de uma só extremidade, como também, pela multiplicidade de disjuntores e o conjunto de relés necessários para dar flexibilidade ao sistema³⁹.

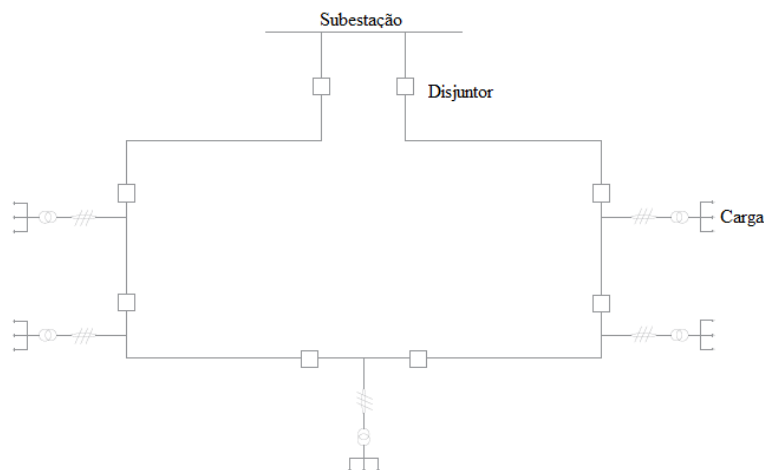


Figura 20: Esquema unifilar duma rede em anel.

Fonte: (Autor).

5.2.3 Sistema “Spot-Network”

Um “spot-network” nada mais é do que um pequeno reticulado em que as unidades transformadoras alimentam um ou mais barramentos de um prédio ou um conjunto de prédios. Um sistema reticulado pode ser iniciado com a instalação de alguns “spot-networks”, alimentando cargas concentradas distantes entre si. Com a construção de novos prédios adjacêntes e conseqüente aproximação dos “spot-networks”, estes passam a ser interligados, formando o sistema reticulado propriamente. Outras aplicações de “spot-networks”, originam de estudos feitos por diversas empresas, mostrando haver apreciável economia no uso de tensão mais elevada para alimentar blocos de cargas dos grandes edifícios comerciais. Geralmente os “spotnetworks” servem para o suprimento de energia eléctrica a prédios com demanda de 1500 kVA a 6000 kVA, sendo que este critério varia de concessionária para concessionária. A

³⁹ <https://www.passeidireto.com/arquivo/44681316/sistema-primario-seletivo>

confiabilidade deste sistema é muito alta, porém o custo das redes em “spotnetworks” é muito elevado, justificando sua utilização somente em áreas de grande densidade de carga.

Esse arranjo, assim como o reticulado generalizado, têm alta confiabilidade, pois devido à quantidade de alimentadores primários, obtêm-se um barramento quase sem desligamentos. Da mesma maneira que um sistema secundário reticulado, esse sistema trabalha com as entradas primárias continuamente em paralelo. Porém, em caso de falhas no barramento secundário, há comprometimento no atendimento de toda a sua carga⁴⁰.

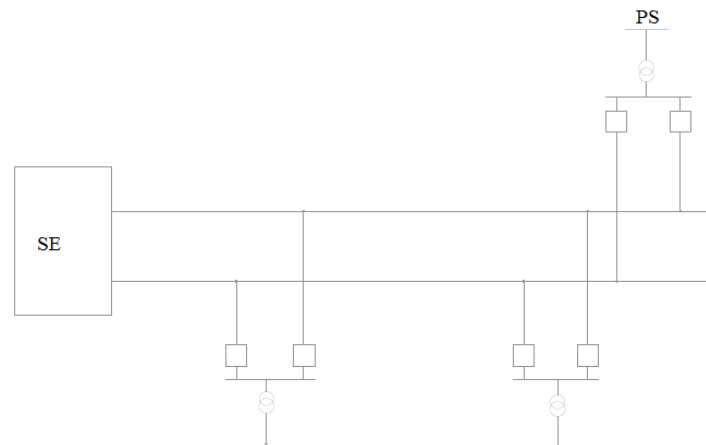


Figura 21: Esquema unifilar de uma rede em “Spot-Network”.
Fonte: (Autor).

5.3 Análise de pesquisa de avarias bruscas

5.3.1 Análise de estimativa de custo com avaria de dois transformadores

A análise de estimativa de custo no presente trabalho, vai se fazer uma avaliação em termos de viabilidade apartir dos dados obtidos no relatório (2017) em que mostra tabela dos contratos celebrados durante o período de emergência por aluguer de maquinaria e contratação de várias empresas de electricidade, Aggreko e Eskom, no que diz respeito as avarias de dois transformadores na subestação do Fomento (1º caso), e também através do plano orçamental das actividade no ano 2017 para aquisição de materias, ferramenta na EDM para realização das manutenções de modo a mitigar avarias bruscas de transformadores (2º caso).

⁴⁰ AZEVEDO, F.H. Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Subterrânea Reticulada através de Algoritmos Genéticos. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

5.3.2 Primeiro Caso: Custos por aluguer de maquinaria

A tabela 6 indica os contratos celebrados durante o período de emergência com avaria de dois transformador de potência na Subestação de Fomento.

Tabela 7: Custos por aluguer de maquinaria durante o período de emergência.

Item	Firma contratada	Descrição do contrato	Custo do contrato (USD)
1	EFACEC	Primeira reparação do TR2	890 662.5
2	Aggreko	Aluguer de transformadores para SE Matola 275	130 109.58
3	Eskom	Fornecimento de 2 transformadores (275/132kV, 125MVA e 132/66kV,80MVA)	518 432.64
4	Rotek	Reabilitação, Transporte, Supervisão de montagem e comissionamento do TR de 275/132kV	68 934.37
5	Powertech	Transporte, montagem e comissionamento do TR de 132/66kV	25 551.07
6	Transcrane	Aluguer de grua para descarregamento e montagem do TR de 275/132kV	10 895.62
7	Adenda Transcrane	Aluguer de grua para montagem de equipamentos de potência	16 087.5
8	Comac Construções	Construção de Fundações para suporte de Equipamento na Subestação da Matola 275kV	-----
9	Noor Consult	Consultoria para reparação dos TRs da Matola	-----
10	Diversos pela DTSU	Prestação de serviços de carregamento, descarregamento e transporte de transformadores da EDM para SE Matola 275 e devolução dos mesmos aos locais de origem, aquisição de materiais, ferramentas e acessórios	92 708.3
		Valor global estimado em Meticais	4 315 379.28

Fonte: (Relatório EDM, 2017)

5.3.3 Segundo Caso: Custo por manutenção de dois transformadores

A seguir apresenta-se o quadro de resumo dos preços estipulados com base nos dados actuais avaliados no ano 2017 de materias e ferramentas necessárias para realizar manutenção preventiva nos transformadores de potência, considerando que a EDM dispõe ferramentas e técnicos qualificados para realizar vários ensaio durante as manutenções.

Tabela 8: Materias para manutenção dos transformadores.

Descrição dos materias para manutenção de transformadores					
Data:					Março 2015
Subestação do Fomento					
itens	Designação	unidade	Qty	Valor unt (USD)	Valorização (USD)
01	Aquisição de lubrificantes diversos	Kg	40.00	187.5	7 500
02	Silicagel	kg	500.00	7.29	3 645.83
03	Tambores de óleo isolante	Un	75.00	687.5	51 562.5
04	Kits de Vedantes para reguladores de tensão tipo M	Un	3.00	30 729.16	92 187.5
05	Kits de Vedantes para reguladores de tensão tipo V	Un	3.00	30 729.16	92 187.5
06	Indicadores de nível de óleo de Transformadores	Un	5.00	1 562.5	7 812.5
07	Motor de ventilador dos TR's para spare TR1 (4), TR3 (1) (Inf); TR's Alsthon (2)	Un	7.00	2 083.3	14 583.33
08	Indicador de temperatura de óleo	Un	3.00	1 250	3 750
09	Indicador de temperatura de enrolamento	Un	2.00	1 666.66	3 333.33

10	Medidor de razão de transformação	Un	1.00	52 083.33	52 083.33
11	Detector de deslocamento das bobinagem de um transformador (SFRA)	Un	1.00	79 166.66	79 166.66
13	Medidor de capacitância (Tam Delta)	Un	1.00	85 416.66	85 416.66
14	Medidor de resistência de isolamento-Megger	Un	1.00	9 375	9 375
				Valor total	499 270.83

Fonte: (Plano orçamental. EDM 2017)

5.3.4 Análise comparativa dos dois casos acima apresentados

Em conformidade com as tabelas apresentadas (1º e 2º casos) respectivamente, mostra-se o valor que EDM pode gastar em caso de avaria de dois transformadores de potência na subestação do Fomento com as alternativas de emergência para fornecimento de energia eléctrica, e também o uso das técnicas disponíveis para realizar manutenções rigorosas num período aproximadamente três anos.

Conforme pode-se notar o uso das técnicas nas manutenções preventiva é uma forma mais ideal em termos de análise de viabilidade de custo e a EDM pode reduzir desta forma gastos avultados em reparações ou aluguer de equipamentos para desta forma reduzir o risco das avarias esporádicas, conforme ilustrado na análise gráfica.

5.4.4.1 Análise Gráfica

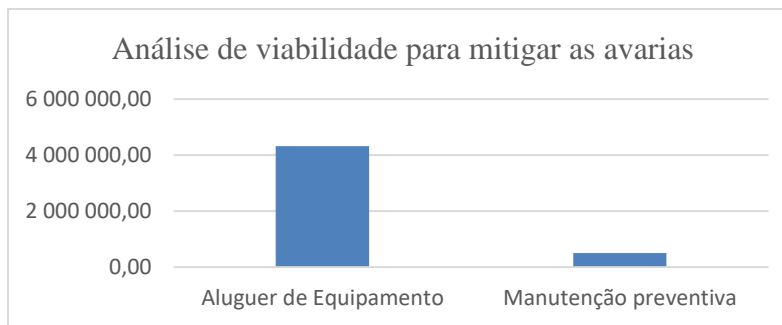


Figura 22: Análise grafica de viabilidade.

Fonte: (Autor).

5.5 Subestação Matola 275

A rede eléctrica de transmissão na região Sul (anexo 2) é constituído por 36 subestações que interliga Maputo, Gaza e Inhambane e tem no total 60 transformadores de potência até o ano 2019, que este operam sem redundância, apenas a subestação Matola 275, tem redundância efectiva com a subestação do Infulene e subestação de Maputo.

A subestação Matola 275 situa-se na província de Maputo no Bairro do Fomento como ilustra no diagrama unifilar em anexo, junto com as Subestações de Infulene e Maputo (Motraco), fornece energia eléctrica à Região Sul do País. Esta Subestação recebe energia eléctrica através de duas linhas de transmissão de 275kV designadamente BL1 e BL3 e fornece energia as diversas subestações através das linhas de 66 kV.

Segundo o relatório da EDM (2017), nas condições normais de funcionamento independente, o TR1 já atingiu uma ponta de 167.01MVA e o TR2 uma ponta de 147.37MVA. No regime de operação em períodos de ponta, os dois transformadores eram associados em paralelo proporcionando uma capacidade instalada de 320MVA. Juntamente com a SE Infulene e fontes alternativas da Central Termoeléctrica de Maputo, esta subestação é responsável pelo fornecimento de energia às várias subestações secundárias na região. A avaria dos dois transformadores criou um défice energético que culminou com restrições no fornecimento de energia e consequentes baixas na produtividade e na facturação. Importa referir que a ponta máxima no sistema de transmissão Sul antes do registo de avaria dos dois transformadores rondava-nos 499MW.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Concluí-se que as consequências das avarias dos transformadores de potência, com base no estudo e na pesquisa deste trabalho, em concordância com o tema “Análise das causas e consequência das avarias bruscas nos transformadores de potência”, vários transformadores avariaram com poucos anos depois da sua instalação, causando curto-circuito violentos entre as espiras principalmente nos enrolamento da alta tensão. Segundo o relatório de 2017 na Subestação de Fomento, a avaria dos transformadores nas investigações constatado na pesquisa, concluiu-se que o fenómeno resultava de um curto circuito entre os enrolamento do transformador e obrigou a EDM a comprar enrolamento para substituir, e numa primeira fase não ter havido resultado satisfatório, o que provocou descarga nos outros enrolamento durante a energização. A Efacec como empresa que comprometeu a reparar o transformador sentiu-se obrigado a fornecer novos enrolamentos para poder repor o transformador, isso criou um desdobramento em termos de custo, o que a luz do nosso conhecimento mostra que, com avaria dos transformadores tanto a concessionaria como o fornecedor tornou muito dispendioso e oneroso com as avarias bruscas dos transformadores de potência.

Em relação as causas e consequencia das avarias dos transformadores de potência podemos notar que com o uso das técnicas nas manutenções preventivas pode-se reduzir de forma bastante significativa. Dai que, a forma mais ideal em termos de análise de viabilidade de custo é o uso das manutenções rigorosas.

Entretanto, do ponto de vista económico e social muitos clientes tem sofrido prejuízos incalculáveis devido às avarias bruscas nos transformadores de potência.

No futuro, a curto prazo com desenvolvimento e integração dos sistemas radiais com recurso e uso de redes em anel no Sistema Nacional em todos os projectos de construção de subestação irá se reduzir o tempo de indisponibilidade no fornecimento de energia eléctrica, o que desta forma garante aos clientes a continuidade de fornecimento de energia eléctrica.

6.2 Recomendações

Como complemento deste trabalho, seria indispensável o desenvolvimento de um estudo baseado nos seguintes pressupostos:

- i. Estudo para migração das manutenção preventivas (baseada na disponibilidade do equipamento) para manutenção condicionada;
- ii. Desenvolver técnicas de criação de redes Alternativas;
- iii. Em termos de modernização nos sistemas de controle e operação de transformadores na subestação Matola 275;
- iv. Formação contínua e actualização dos técnicos ligados a subestação.
- v. Controle rigoroso no equilíbrio de cargas nos clientes

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. SOARES, Manoel B. & Soares Gabriel Gutierrez P. Transformadores Teoria e Projeto Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Paraíba campus João Pessoa 2010.
- [2]. HELERBROCK, Rafael. "O que é um transformador?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. Acesso em 21 de Agosto de 2020 pelas 10 horas e 20 minutos.
- [3]. <https://www.coursehero.com/file/43041968/Apostila-de-transformadorespdf/> consultado aos 12 de Julho de 2020 pelas 9 horas e 23 minutos.
- [4]. <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/transformadoresEduPaiva.pdf> consultado aos 23 de Abril de 2020 pelas 20 horas e 45 minutos.
- [5]. ALVES, Mário Ferreira, "ABC das Máquinas Elétricas", Março 2003.
- [6]. <https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-transformadores/> consultado aos 1 de Julho de 2020 pelas 13 horas e 34 minutos.
- [7]. KINDERMANN, Geraldo, "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", 2º Volume, 2006.
- [8]. CIGRE Working group, "The Impact of Insulation Monitoring and Diagnostics on Reliability and Exploitation of Service Life", 2006
- [9]. H. Bartley, William P.E., "Failure Analysis of Transformers", 2003.
- [10]. MARTINS, Maria Augusta, "Manutenção de Transformadores de Potência. Tratamentos do óleo e do Papel dos Enrolamentos", 2001.
- [11]. SIEMENS, "Transforming Regeneration Into System Reliability", 2011.
- [12]. EDP, "Transformadores Trifásicos 60kV/MT, Caracterização e Ensaios", 2014.
- [13]. MARTINS, Maria Augusta, "Envelhecimento Térmico do Papel Isolante de Transformadores. Investigação Experimental. Modelos de Degradação", 2010.
- [14]. AZEVEDO, F.H. Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Subterrânea Reticulada através de Algoritmos Genéticos. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [15]. Online:<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A5BNFT/1/283.pdf> consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 13 horas e 23 minutos.
- [16]. ANJOS, J. Haroldo dos; GOMES, Carlos R. Caminha. Curso de direito marítimo. Rio de Janeiro: Renovar, 1992.

- [17]. CABRAL, Martín, Daher, Jorge, “Técnicas de Diagnóstico para Mantenimiento Preventivo de Transformadores y Equipamiento de Subestaciones”, 2010.
- [18]. CARDOSO, A. J. M.; Oliveira, L. M. R.; Gameiro, N. S. e Veloso, P. M. M. G.: "Diagnóstico de Avarias em Transformadores Trifásicos", Anais da Engenharia e Tecnologia Electrotécnica, Nº. 6, pp. 9-12, Março 1998.
- [19]. CIGRE, “Aplicação de Uma Nova Metodologia Para Detecção de Descargas Parciais em Transformadores de Potência”, Abril 2010.
- [20]. EDM Distribuição, “Guia de Coordenação de Isolamento” - Regras de Execução e de Montagem, Nov. 2007.
- [21]. EDM Transmissao, “Relatorio da avaria do transformador 2”, Subestação da Matola, Setembro 2017.
- [22]. MARTINS, Maria Augusta, “Manutenção de Transformadores de Potência. Tratamentos do óleo e do Papel dos Enrolamentos”, 2001.
- [23]. NEMÉSIO Sousa, J. Material Didático da Disciplina de Manutenção de Equipamentos e Instalações Elétricas – Isolação de Equipamentos. UFRJ – 2013.
- [24]. Online: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A5BNFT/1/283.pdf> consultado aos 12 de abril de 2020 pelas 13 horas e 23 minutos
- [25]. RUAS João, Metodologia de Investigação para trabalhos acadêmicos, Guia de Apoio as aulas – 2018
- [26]. SILVA, Miguel Filipe Castanheira, Diagnóstico de avarias em transformadores de potência 2016
- [27]. ARANTES, José G. Diagnóstico de Transformadores de Potência pela Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante Através de Redes Neurais. 2005. 115 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- [28]. BECHARA, Ricardo. Análise de Falhas em Transformadores de Potência. 2010. 118 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [29]. BECHARA, Ricardo; BRANDÃO JR, A. F. Análise de falhas em transformadores de potência e seus mecanismos de ocorrência. XIII Encontro Regional Ibero Americano de Cigré. 24 a 28 de Maio de 2009. Puerto Iguazu. Argentina.

- [30]. SOUZA, Denise C. P. Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso. 2008. 102 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2008.
- [31]. Zirbes, Roberto, "Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral", 2005.
- [32]. FRONTIN, Sergio O. Equipamentos de alta de tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações tecnológicas. 1ª Edição. Brasília: Teixeira, 2013.
- [33]. EDM Transmissão, "Relatório da avaria do transformador 2, 66/33 kV", Subestação da Matola 275, Fevereiro 2019.
- [34]. Online:file:///C:/Users/isaa/Documents/R2020/Organizacao/REDES%20apostila.01.pdf consultado aos 5 de abril de 2020 pelas 14 horas e 28 minuto.

APÊNDICE

Entrevista com o responsável da Subestação do Fomento (EDM)

Causas de avarias bruscas nos transformadores de potência

1. Quais são as principais avarias que acontecem na Subestação da Província de Maputo?

R: As principais avarias que aconteceram no período que compreende 2015 à 2019 são as seguintes: queima de enrolamentos nos transformadores provocados por falta de isolamento, curto-circuito no enrolamento de AT, avarias nos reguladores de tensão RTEC, avarias nos isoladores de travessia.

2. Quais são as principais causas de avarias nos transformadores de potência?

R: As principais causas de avarias nos transformadores de potência é a falha nas manobras e falta de manutenção rigorosa no equipamento no tempo útil devido sua indisponibilidade, qualidade dos trabalhos feito pelo empreiteiro contratados, uso de material com baixa qualidade, exemplo óleo mineral e outros acessórios, ou falha nos projecto.

A estas causas juntam-se as que constam no relatório da EDM em 2019 a saber: Danos visíveis na bobinagem da fase U; Perfuração da estrutura isolante do enrolamento de 275kV da fase U; Descarga eléctrica entre a parte superior do enrolamento de 275kV, do lado da MT e as partes metálicas à massa mais próximas; Carbonização do óleo isolante provocada pela descarga eléctrica; e Contaminação com pérolas de cobre de corrente da fusão do cobre nas primeiras espiras do enrolamento de 275kV.

3. Os transformadores de potência têm avarias antes do tempo médio de vida? O que se pode fazer para evitar que isso aconteça?

R: Os transformadores podem apresentar avarias antes do tempo útil de vida essa é uma das situações mais preocupantes, pois todo investimento é feito no sentido de garantir que o material atinja o seu tempo médio de vida util, quando isso não acontece a EDM fica prejudicada. De acordo com as dissertações idicam os transformadores de potências são equipamento que tem uma vida util entre 30 a 50 anos de operação embora existe transformadores que funcionam com mais anos. Os transformadores da EDM em muitos casos avariavam muito antes desse periodo. Para evitar esse cenário a

EDM procura fazer manutenções constantes dos seus transformadores, contudo isso tem sido difícil por causa da sobre carga dos transformadores e linhas de fornecimento de corrente eléctrica. As manutenções surtiriam os desejados efeitos se existessem fontes alternativas para o fornecimento de corrente sem sobre carga nos períodos de manutenção.

Consequências das avarias bruscas do transformador de potência

4. Quais são as consequências das avarias bruscas nos transformadores na subestação da Matola 275?

R: Com as avarias bruscas de dois transformadores na Subestação da Matola 275, resultou em maior parte da zona Sul sem energia eléctrica, respectivamente a cidade Maputo, baixa da cidade e Maputo província e consequentemente restrições no fornecimento de energia eléctrica na zona Sul do país.

A maioria das empresas na província de Maputo depende somente da Subestação da Matola 275, como o caso de Cimentos de Moçambique, porto de Maputo, Boane e Namaacha;

Com avaria de um dos transformadores provoca sobrecarga em outro transformador na Subestação.

5. Como a EDM tem feita gestão das avarias no que tange as consequências para a empresa assim como para os clientes?

R: A EDM para responder avarias tem feito o plano de manutenção anual assim como trimestral para fazer manutenção em todos os equipamentos das suas subestações, tanto equipamento de potência, linhas e equipamento de protecção e para caso de uma avaria brusca, imediatamente aloca técnicos de várias especialidades para intervir.

ANEXOS 1

Chapa de característica de transformador 2 na subestação Matola 275





Transformador trifásico tipo core Número

Normas Frequência Ano

	AT	MT	T	
Potência Nominal ONAN/ONAF (MVA)	112 / 150	112 / 150	1 00	
Tensão nominal (V)	275050	66000	33000	
Corrente nominal (A)	235.1 / 335.9	979.7 / 1400	17.50	
Nível de isolamento (kV)				
(Choque - Freqüência Industrial)	Linha 1050 - 460	Neutro 95 - 36	Linha 350 - 140	Neutro 65 - 33
Tensão de curto circuito AT/MT (base 150 MVA)			15.9 %	
Grupo de ligação			Yyn0d11	
Aquecimento do óleo			55 °C	
Modo de arrefecimento			ONAN/ONAF	

(1) - Dimensionado para 53 MVA como enrolamento de compensação.

Regulação de tensão em carga na AT MR - M III 600 Y - 120 D - 14.27.3W

Pos.	Cont. realizados	Tensão (V)	Corrente (A)		Pos.	Cont. realizados	Tensão (V)	Corrente (A)	
			ONAN	ONAF				ONAN	ONAF
1	2-16	316020	204.6	292.3	14	2-16	271480	235.2	340.3
2	2-15	312770	206.7	295.3	15	2-14	267500	231.1	344.8
3	2-14	309520	208.9	298.4	16	2-13	263500	227.4	349.1
4	2-13	306270	211.4	301.9	17	2-12	259500	223.4	353.4
5	2-12	303020	213.9	306.5	18	2-11	255500	219.8	358.2
6	2-11	299770	216.2	308.8	19	2-10	251500	216.3	363.3
7	2-10	296520	218.6	312.2	20	2-9	247500	212.6	368.0
8	2-9	293270	221.2	316.0	21	2-8	243500	208.0	372.9
9	2-8	289970	224.0	320.0	22	2-7	240000	204.8	378.3
10	2-7	286720	226.5	323.6	23	2-6	236500	201.8	384.0
11	2-6	283470	229.1	327.3	24	2-5	233000	199.5	389.2
12	2-5	280220	232.1	331.5	25	2-4	229500	197.2	394.6
13	3-16	275050	235.1	335.9					

MASSAS

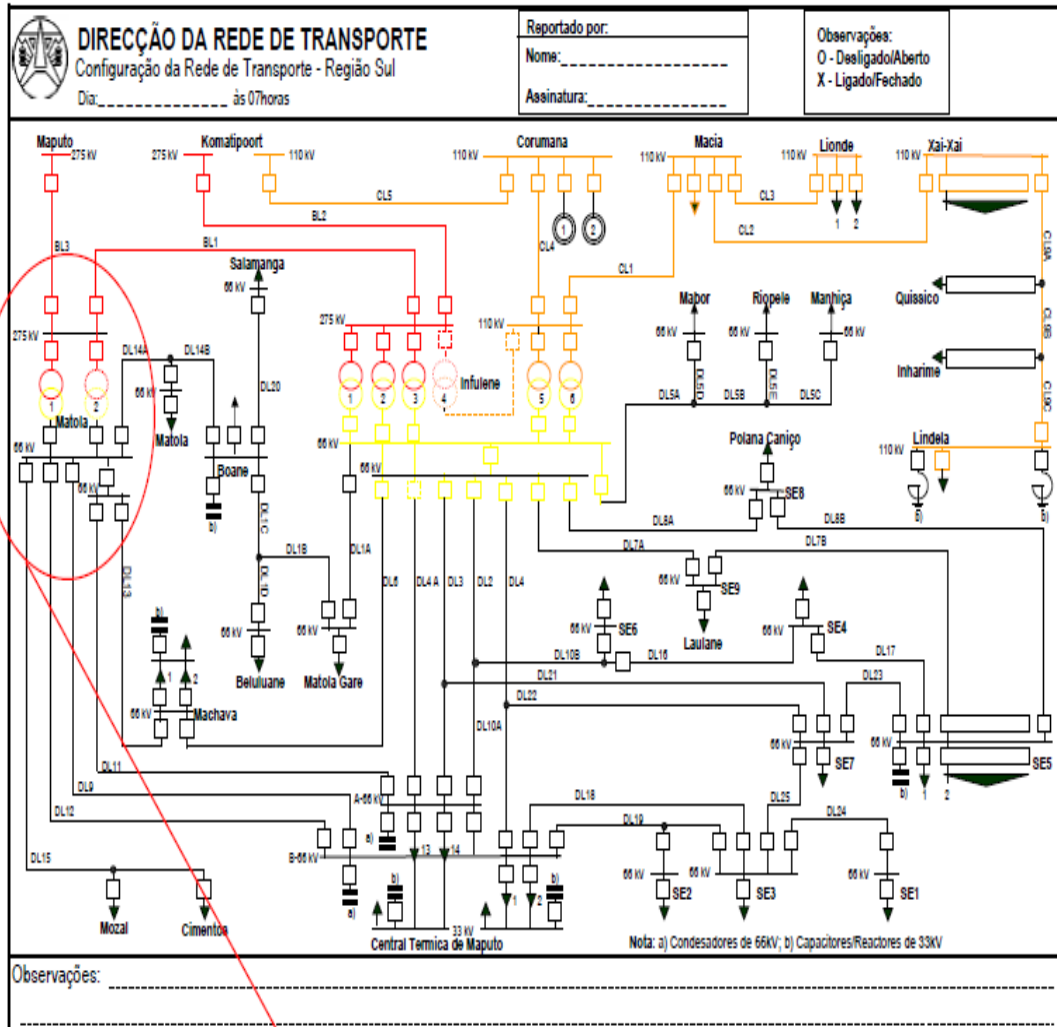
Total	<input type="text" value="205000 kg"/>	Óleo	<input type="text" value="46000 kg"/>
Descubagem	<input type="text" value="19000 kg"/>	Transporte	<input type="text" value="142000 kg"/>

Transformadores de corrente tipo TORO

Travessia	Características	Travessia	Características
1N	N1: 500/1000/A, 10 VA, cl. 0.5P20 (S1-S2)	2V	N1: 1700/2 A, 10 VA, cl. 10P2 (S1-S2)
2N	N1: 1500/1 A, 10 VA, cl. 0.5P20 (S1-S2)	3U-3V-3W	N1: 500/1000/A, 10 VA, cl. 0.5P20 (S1-S2)

ANEXOS 2

Diagrama unifilar da rede de Transporte da região Sul



Subestacao de Matola

Versão 04022005