



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA, SEUS EFEITOS E AS RECOMENDAÇÕES ASSOCIADAS

CÍCERO MARIANO PIRES DOS SANTOS(1); WELLINGTON BEZERRA DE ARAUJO JUNIOR(1)
UFPE(1);

RESUMO

O artigo apresenta resultados de pesquisas no tocante às falhas em transformadores de potência imersos em líquidos isolantes, no sentido de contribuir para a gestão de seu ciclo de vida, através da análise dos modos de falha, de suas consequências e das ações que contribuem para o aumento da disponibilidade. A pesquisa considera ocorrências em 21 países, envolvendo uma população de cerca de 167.000 transformadores-ano, durante o período de 1996 a 2010, tendo-se registrado aproximadamente 1000 falhas principais, a classe de tensão foi limitada a valores ≥ 69 kV. Observando a melhoria de indicadores de manutenibilidade e de confiabilidade o artigo gera cerca de 30 recomendações para os 4 principais componentes do transformador, em conformidade com a pesquisa realizada e com base nas análises aqui apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Potência, Análise de Falhas, Confiabilidade, Manutenibilidade, Árvore de falhas.

1.0 - INTRODUÇÃO

O transformador de potência está presente nos diversos níveis de tensão do sistema elétrico, desde as subestações elevadoras de geração, transmissão e distribuição até as indústrias consumidoras. Sua falha pode gerar consequências graves como interrupções no fornecimento de energia, explosões e prejuízos financeiros. Sendo o ativo de maior valor agregado em uma instalação de transmissão e distribuição, o investimento em técnicas de manutenção e monitoramento de transformadores de potência merece realce, dado a importância deste atributo no gerenciamento da vida útil do transformador e no aumento de sua confiabilidade e manutenibilidade. Diante do exposto, este trabalho sintetiza informações sobre os modos de falha dos transformadores de potência que agregam ao desenvolvimento de ações de manutenção e gerenciamento de transformadores de potência imersos em líquido isolante através da construção de uma árvore de falhas.

2.0 - FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

A falha de um transformador de potência envolve um evento ou uma combinação de eventos que forcem o término de sua operação, falhas podem ser originadas a partir de eventos externos (faltas no sistema de potência, descargas atmosféricas) ou de causas internas (curto-circuito entre espiras, descargas parciais). As causas das falhas envolvem erros de fabricação, projeto, especificação, sobrecargas, degradação e contaminação durante manutenção. Os mecanismos de falha compreendem solicitações mecânicas, sobreaquecimento, condições elétricas severas e fenômenos químicos de degradação (12).

A nível internacional, o trabalho do Cigré (19) mostra uma pesquisa de confiabilidade de transformadores de potência no período de 1996 a 2010 abrangendo uma população de 167459 transformadores-ano. O grupo de

(*) Av. Prof. Moraes Rego, n° 1235. Departamento de Engenharia Elétrica, UFPE – CEP 50670-901 Recife, PE, –
Brasil

trabalho A2.37 do Cigré coletou 964 falhas em transformadores fabricados entre 1950 e 2009. A Figura 1 mostra a estratificação das falhas verificadas na pesquisa. Pode-se observar que 85% das falhas estão localizadas nos enrolamentos, comutadores e buchas.

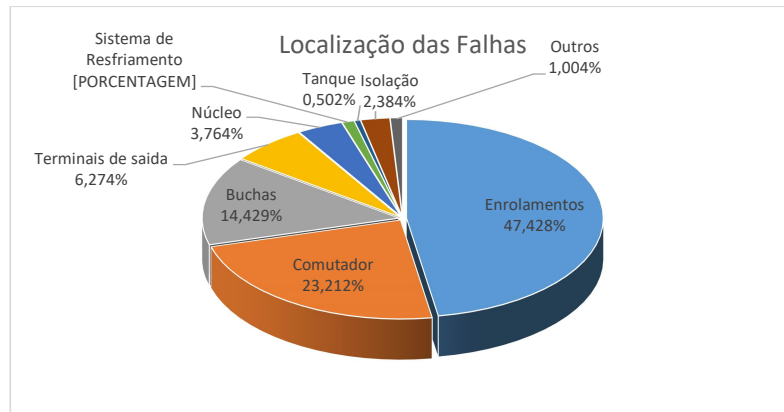


Figura 1 – Localização das falhas em transformadores de potência (19).

Entre as principais causas evidenciadas na pesquisa estão o Envelhecimento (12,34 %), Curto-circuito externo (11,62%), Falhas de projeto e fabricação (19,92%) e reparo inadequado (6,02%). Existe também um número elevado de causas ditas como indefinidas (29,05%) que pode ser associado a falta de sensores e monitoramento dos transformadores de potência.

2.1 Falhas de projeto, fabricação e transporte

A fase de projeto de um transformador envolve a análise de todas as solicitações impostas durante sua operação, seus requisitos nominais e a estimativa do tempo de vida útil. Esforços mecânicos, solicitações elétricas do sistema e ciclo de carregamento diário são estudos realizados durante a especificação do transformador (24). Os erros de projeto geralmente não são detectados durante o comissionamento e testes de fábrica, mas se manifestam logo nos primeiros anos após o início de sua operação e aceleram o processo de degradação da isolamento. O surgimento de bolhas no material isolante, presença de umidade, má distribuição do campo elétrico nas buchas isolantes, correntes de fulga devido à má distribuição do fluxo, contaminação do óleo e fixação inadequada das bobinas são falhas atribuídas ao o projeto e fabricação (4, 28). Durante o transporte, grandes distâncias podem submeter o transformador a vibrações mecânicas e impactos que comprometem sua estrutura física. Peças de isolamento, espaçadores e lâminas do núcleo e conexões podem se desprender (26).

2.2 Falhas devido a fenômenos transitórios

Os transformadores de potência estão sujeitos a diferentes tipos de transitórios eletromagnéticos durante sua operação. Sobretensões, tensões transitórias muito rápidas e faltas no sistema de potência são fenômenos que estressam a suportabilidade dielétrica do transformador, causam aquecimento e submetem o transformador a estresses mecânicos. O comportamento do transformador frente à sobretensões é agravado pelas características não lineares de seu circuito magnético. As características eletromagnéticas do transformador fazem surgir faixas de frequências de ressonância que amplificam a onda de sobretensão e causam sobreaquecimento do isolamento do transformador e falhas dielétricas (17, 28).

As faltas no sistema elétrico de potência produzem uma elevação rápida da corrente que atravessa as espiras dos enrolamentos, gerando forças eletromagnéticas e aquecimento dos condutores. Os esforços mecânicos, sobre os enrolamentos, podem descolar ou deformar as espiras, a isolamento sólida e as estruturas mecânicas de fixação (23).

2.3 Falhas incipientes e formação de gases

Alguns modos de falhas em transformadores de potência se caracterizam pelo seu desenvolvimento de forma gradual envolvendo a isolamento do transformador, as falhas incipientes podem ser originadas por falhas no núcleo, transitórios no sistema elétrico, sobrecarga, contaminação por umidade/partículas condutoras e defeitos de fabricação dos materiais que constituem a isolamento. As falhas internas geralmente são caracterizadas pela formação de gases oriundos de degradação térmica, arco elétrico e descargas parciais no meio isolante (7,26). Durante o processo de degradação da isolamento mais de uma falha incipiente pode se manifestar simultaneamente, dificultando o diagnóstico de falha e a mitigação de seus efeitos.

Falhas no circuito magnético estão relacionadas a formação de correntes parasitas induzidas pelo fluxo principal ou de dispersão do circuito magnético que produzem perdas elétricas, sobreaquecimento, vibrações e formação de gases. O surgimento de falhas no núcleo está associado ainda a folga dos componentes de fixação do núcleo,

curto circuito entre lâminas, ferrugens, folgas no núcleo e saturação (4, 28).

Descargas parciais são rupturas elétricas em regiões onde o isolamento apresenta-se vulnerável, em transformadores de potência estas ocorrem na isolação formada pela celulose (isolação sólida) e pelo óleo (isolação líquida). A presença contínua de descargas parciais no transformador leva a uma degradação acelerada do isolamento elétrico. As descargas parciais podem ocorrer entre os enrolamentos, o sistema de isolação e partículas imersas no óleo. Fontes de descargas parciais em transformadores de potência são originadas de não homogeneidade de materiais utilizados na isolação, erros na fase de projeto e contaminação por umidade ou partículas condutoras durante fabricação e montagem. Durante a operação podem surgir bolhas originadas de pontos quentes e perdas dielétricas, perda de rigidez dielétrica devido ao envelhecimento da isolação sólida, degradação do material isolante durante comutações, contaminação de partículas no óleo isolante e deformações de enrolamentos (21).

As condições de operação, o carregamento do transformador de potência aliadas a temperatura ambiente e o tipo de sistema de resfriamento determinam os esforços térmicos sob o transformador. As sobrecargas elevam a temperatura dos enrolamentos e do núcleo do transformador, provocando a formação de bolhas no óleo e acelerando o processo de degradação da isolação sólida (28). Durante significativas elevações de temperatura (acima de 150 °C), a celulose sofre uma redução de suas propriedades mecânicas e tende a se deformar, além da quebra de cadeias celulósicas acelerando o fim de vida da isolação. (20, 28). O processo de filtragem ou substituição do óleo faz parte das atividades de manutenção do transformador, porém devido à inviabilidade econômica, é impraticável a recuperação do transformador após o fim da vida da sua isolação sólida, portanto a celulose é utilizada como indicador de vida útil do transformador de potência (18). A Figura 2 mostra a curva de condição de vida do transformador de potência. Estresses impostos, durante a operação do transformador, aliados a contaminação e ao envelhecimento natural dos seus componentes reduzem a suportabilidade do transformador, em contrapartida, novas tecnologias como: sistemas de monitoramento, modificações no sistema de preservação e resfriamento do transformador, restauração do estado mecânico do núcleo e enrolamentos, substituição de buchas e comutadores contribuem para a extensão de vida (18). Os principais mecanismos de degradação do conjunto óleo mais celulose são a hidrólise, oxidação e pirólise, logo a temperatura, a umidade e o oxigênio são os três agentes determinantes para a suportabilidade do transformador (28).

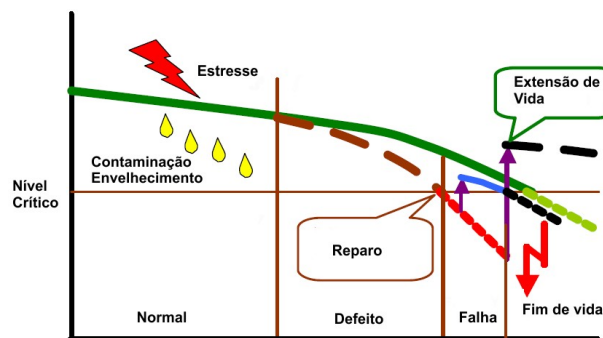


Figura 2 – Curva de condição de vida do transformador (18).

2.4 Falhas em buchas condensivas

Falhas em buchas estão associadas à degradação do seu material isolante e lâminas capacitivas. A penetração de umidade e poluição no interior da bucha degrada o isolamento e proporciona o surgimento de descargas parciais ou formação de arco elétrico. A energia dissipada durante a formação das descargas pode provocar a explosão da bucha. Curto-circuito entre placas capacitivas também pode ocorrer devido a degradação da isolação. As buchas apresentam ainda sobreaquecimento devido as perdas ôhmicas e o estresse dielétrico. (8, 4, 28). Tempestades, vandalismo e poluição danificam o corpo de porcelana da bucha e podem acarretar em perda de estanqueidade e curto-circuito. Falhas no processo de fabricação e montagem também contribuem para a formação de descargas parciais e degradação da isolação das buchas.

3.0 - ÁRVORE DE FALHAS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

A árvore de análise de falhas (Fault Tree Analysis – FTA) é um método de análise de falhas onde as combinações de eventos que resultam em causas de falha são representadas graficamente. A FTA se mostra útil para identificar falhas em sistemas complexos, incluir falhas humanas na análise de sistemas, localizar eventos mais relevantes para a falha de um sistema e realizar uma análise quantitativa da probabilidade de falha (25, 30). O método consiste determinação de um evento topo e na construção de um diagrama lógico usando portas lógicas (AND, OR) para associar eventos básicos ao evento topo. A construção da árvore de falhas de um transformador de potência é útil para a localização de componentes candidatos a monitoramento e variáveis importantes durante sua operação. Para definir os eventos básicos da árvore de falhas, foi utilizada a análise da causa raiz de falha, também conhecida como a metodologia do porquê (30). Como resultado obteve-se a árvore de falhas do transformador de potência representada através das Figuras 3 e 4. Foram encontrados 41 eventos básicos da árvore de falhas. A Tabela 5 indica a codificação dos eventos básicos da árvore de falhas.

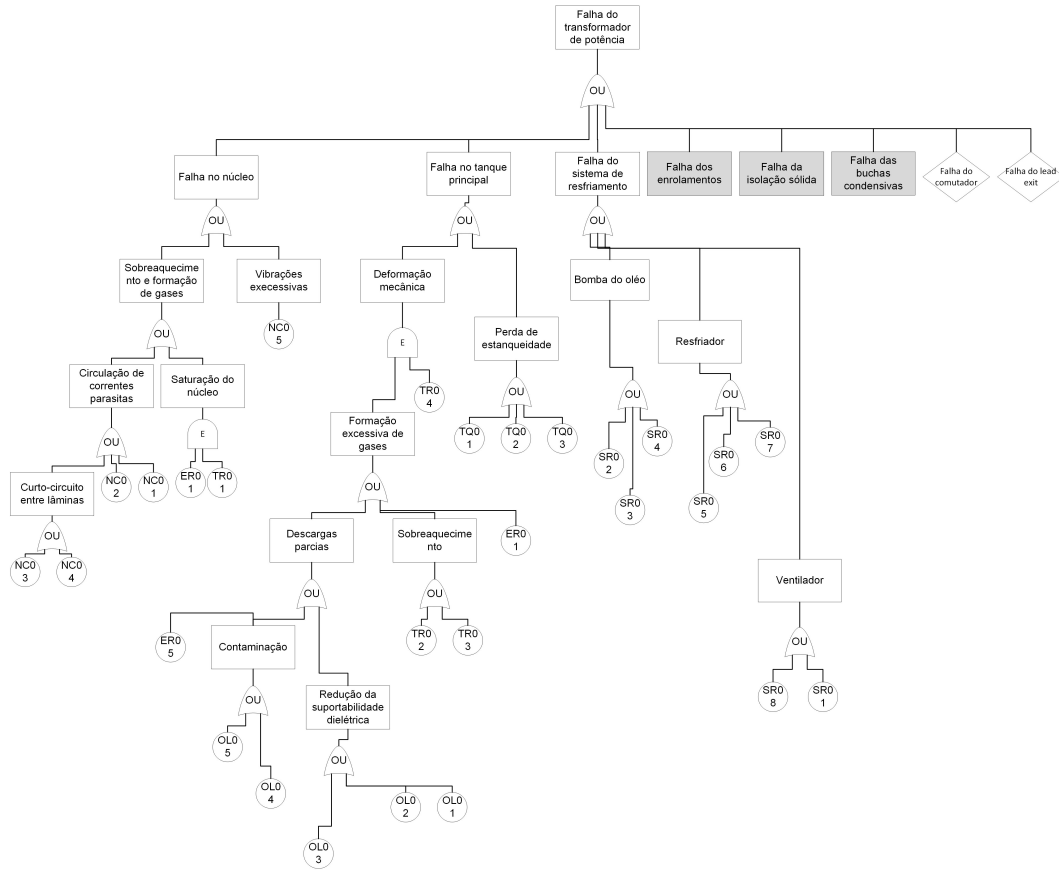


Figura 3 – Árvore de falhas do transformador de potência, parte 1.

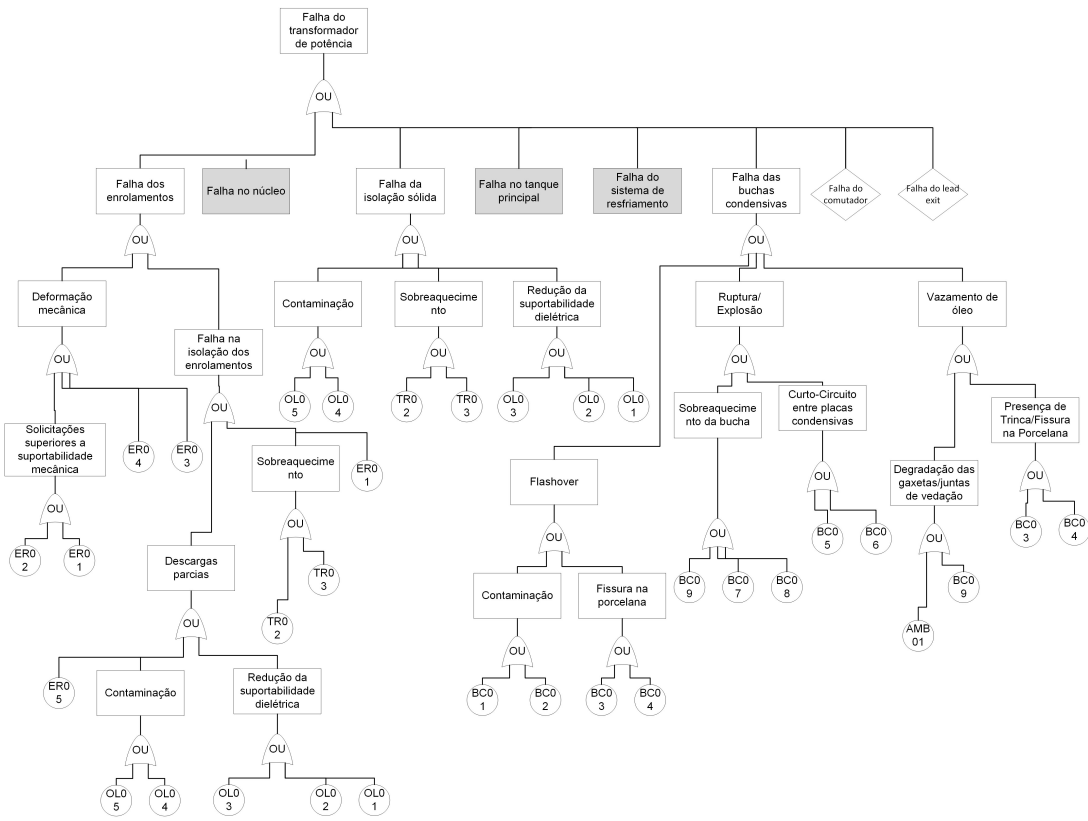


Figura 4 – Árvore de falhas do transformador de potência, parte 2.

A luz dos dados estatísticos apresentados em (19), causas básicas relacionadas a falhas nos enrolamentos e buchas são apresentadas como de alto risco devido a frequência elevada de ocorrência nos componentes associados e a severidade das consequências destas, tais como: explosão e destruição da parte ativa do transformador. A probabilidade de ocorrência dos eventos básicos propostos na árvore de falhas pode ser obtida através de uma abordagem especialista utilizando os dados estatísticos da pesquisa apresentada em (28), bem como o contexto associado a mesma, e os desdobramentos das causas até os eventos básicos através das portas lógicas. As probabilidades de ocorrência dos eventos de menor nível hierárquico, são obtidas atribuindo valor as probabilidades dos eventos de forma que sua combinação através das portas lógicas associadas resulte na probabilidade do evento de maior nível hierárquico. O processo inicia-se atribuindo probabilidade 1 para o evento topo, considera-se que as falhas nos subcomponentes são mutualmente exclusivas, conforme sugere a pesquisa realizada em (19), e atribui-se suas probabilidades conforme os dados da Figura 1. A título de exemplo, serão obtidas as probabilidades associadas a um ramo da sub árvore falha das buchas condensivas. Os eventos intermediários Ruptura/Explosão, Contaminação e Vazamento de óleo estão associados através de uma porta OU, logo será necessário atribuir valores as probabilidades de ocorrência de Flashover e Ruptura/Explosão, $P(A_1)$ e $P(A_2)$ respectivamente, e calcular o valor da probabilidade de Vazamento de óleo, $P(A_3)$, utilizando a Equação 1 (6).

$$P(A_3) = \frac{P(A_1 \cup A_2 \cup A_3) - P(A_1) - P(A_2) + P(A_1).P(A_2)}{1 + P(A_1).P(A_2) - (P(A_1) + P(A_2))} \quad (1)$$

A Tabela 1 mostra as probabilidades obtidas, considerando o valor da probabilidade de falha das buchas condensivas igual a 0.1442:

Tabela 1 – Probabilidade de ocorrência dos eventos.

Índice	Evento	Probabilidade
$P(A_1 \cup A_2 \cup A_3)$	Falha das buchas condensivas	0,1442
$P(A_1)$	Flashover	0,02886
$P(A_2)$	Ruptura/Explosão	0,08658
$P(A_3)$	Vazamento de óleo	0,03242

O evento Ruptura/Explosão está associado aos eventos Sobreaquecimento e Curto-Circuito entre placas condensivas, através da porta lógica ou, novamente considera-se que os eventos independentes e utiliza-se a Equação 2 (6):

$$P(A_5) = \frac{P(A_4 \cup A_5) - P(A_4)}{1 - P(A_4)} \quad (2)$$

Atribui-se valor a probabilidade de Sobreaquecimento, $P(A_4)$, e calcula-se a probabilidade do evento Curto-Circuito entre placas capacitivas, $P(A_5)$, os resultados estão na Tabela 2:

Tabela 2 – Probabilidade de ocorrência dos eventos.

Índice	Evento	Probabilidade
$P(A_4)$	Sobreaquecimento	0,05195
$P(A_5)$	Curto-Circuito entre placas capacitivas	0,0365

O evento sobreaquecimento envolve três eventos básicos ligados através de uma porta ou, atribui-se valor as probabilidades dos eventos básicos Operação em sobrecarga e Rugas/dobras no papel isolante, $P(TR02)$ e $P(BC09)$ respectivamente, e calcula-se o valor da probabilidade de Mau contato elétrico na bucha, $P(BC10)$, a Tabela 3 mostra os resultados.

$$P(BC10) = \frac{P(A_4) - P(TR02) - P(BC09) + P(TR02).P(BC09)}{1 + P(TR02).P(BC09) - (P(TR02) + P(BC09))} \quad (5)$$

Tabela 3 – Probabilidade de ocorrência dos eventos.

Índice	Evento	Probabilidade
$P(A_1 \cup A_2 \cup A_3)$	Sobreaquecimento	0,05195
$P(A_1)$	TR02- Operação em sobrecarga	0,04156
$P(A_2)$	BC09 -Rugas/dobras no papel isolante	0,005195
$P(A_3)$	BC10 - Mau contato elétrico na bucha	0,005675

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no cálculo do valor da probabilidade de ocorrência de todos os eventos básicos da árvore de falha da Figura 3.

Tabela 4 – Probabilidade de ocorrência dos eventos da árvore de falhas.

Código	Evento básico	Probabilidade	Código	Evento básico	Probabilidade
TR01	Falha de projeto/fabricação	0,08518	ER01	Transitórios eletromecânicos	0,125
TR02	Operação em sobrecarga	0,01	ER02	Curto-Circuito externo	0,20
TR03	Distorções Harmônicas	0,004347	ER03	Falha durante transporte/montagem	0,01
TR04	Falha do sistema de proteção	0,007094	ER04	Folga do enrolamento	0,0361
NC01	Deterioração da isolamento dos parafusos	0,0036	ER05	Enxofre corrosivo	0,0786
NC02	Aterramento inadequado	0,002	OL01	Eletrização estática no óleo	0,001018
NC03	Falha de fabricação das lâminas	0,002453	OL02	Contaminação por partículas condutoras	0,001016
NC04	Deterioração da isolamento entre lâminas	0,004	OL03	Envelhecimento natural da isolamento	0,000508
NC05	Folgas no núcleo	0,015366	OL04	Contaminação do óleo por oxigênio	0,003589
TQ01	Degradação das gaxetas de vedação	0,002	OL05	Contaminação do óleo por umidade	0,003576
TQ02	Corrosão	0,001018	BC01	Umidade externa excessiva	0,01146
TQ03	Ruptura da membrana do tubo de expansão	0,0005	BC02	Polição externa	0,0078
SR01	Deterioração do radiador	0,001	BC03	Vandalismo	0,00495
SR01	Falha no motor do ventilador	0,0005	BC04	Erro de fixação/armazenamento	0,005025
SR02	Desgaste do rolamento	0,001505	BC05	Degradação da isolamento entre placas	0,0219
SR03	Falha no motor	0,002	BC06	Contaminação por umidade	0,0149
SR04	Perda de potência	0,000501	BC07	Rugas/dobras no papel isolante	0,007194
SR05	Válvula danificada	0,0005	BC08	Mau contato elétrico na bucha	0,0259
SR06	Ruptura da tubulação	0,001	BC09	Operação da bucha em sobrecarga	0,01969
SR07	Contaminação	0,003	AMB01	Incidência de raios infravermelhos	0,00306
SR08	Ruído excessivo	0,001			

Os eventos básicos que apresentaram valor de probabilidade maior ou igual à 0,01 são classificados como eventos de maior importância, a saber: Falha de projeto/ fabricação, Operação em sobrecarga, folgas no núcleo, transitórios eletromecânicos, curto-circuito externo, falha durante transporte/montagem, folga dos enrolamentos, presença de enxofre corrosivo, umidade externa excessiva, degradação da isolamento entre placas nas buchas condensivas, contaminação por umidade, mau contato elétrico na bucha e operação da bucha em sobrecarga.

4.0 - MANUTENÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

A NBR 5462 define manutenção como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. No contexto do transformador de potência, a escolha de estratégias para o gerenciamento de seu ciclo de vida é uma tarefa difícil pois envolve um equipamento de custo elevado e de grande importância numa subestação ou instalação industrial, bem como os custos das ações de manutenção.

A avaliação da condição do equipamento faz parte da estratégia de manutenção de forma a prever falhas e quedas de desempenho. Alguns parâmetros são obtidos através de ensaios e comparados a valores referenciais a fim de assegurar padrões de confiabilidade e manutenibilidade ao longo do ciclo de vida útil da instalação. A Figura 5 ilustra uma metodologia utilizada na avaliação de desempenho de transformadores de potência.

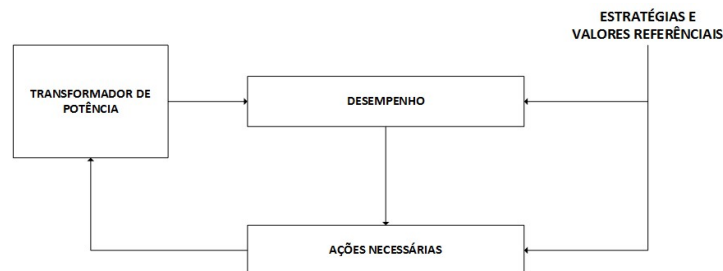


Figura 5 – Metodologia de avaliação de desempenho do equipamento (adaptado de (30)).

O desempenho do transformador de potência é acessado através de variáveis como temperatura, isolamento, gases dissolvidos no óleo, descargas parciais, deformação dos enrolamentos e eventos básicos que originam falhas. O bloco ações necessárias da Figura 4 representa reparos, recapitação, modernização, sucateamento e manter o estado operativo. As técnicas de manutenção preventiva em transformadores de potência são realizadas para avaliar a condição operativa através da inspeção visual e ensaios periódicos.

Algumas variáveis indicadoras da condição de vida do transformador de potência são coletadas e/ou medidas enquanto o equipamento está energizado, através de sensores e sistemas de medição online dando margem ao monitoramento online contínuo do transformador de potência. O registro de eventos de forma continua contribui

ainda mais para a confiabilidade do equipamento elétrico na detecção de defeitos incipientes e na obtenção de banco de dados para tratamento estatístico (16). Os dados monitorados são armazenados e processados para resultarem em um possível diagnóstico da condição de vida útil do transformador de potência. O gerenciamento da vida útil do transformador permite ainda o uso de sistemas especialistas para integrar as variáveis monitoradas com ensaios realizados periodicamente a fim de obter resultados sobre a condição de vida do transformador de potência.

5.0 - RECOMENDAÇÕES ASSOCIADAS AOS MODOS DE FALHA DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Utilizando a pesquisa literária referenciada neste trabalho, a Tabela 5 foi construída com o objetivo de reunir recomendações para evitar a ocorrência de falhas em transformadores de potência.

Tabela 5 – Recomendações Preventivas às falhas em transformadores.

Componente	Modos de falha	Probabilidade de ocorrência	Recomendações
Enrolamentos	Deformação mecânica	0,332	<ul style="list-style-type: none"> Integração de modelagem e simulação de transitórios de tensão ao processo de especificação e aquisição de novos transformadores Verificação da suportabilidade do sistema de prensagem do enrolamento ao nível de curto-circuito Verificação da integridade física dos enrolamentos durante a montagem e transporte do transformador Realizar ensaios sensíveis a geometria dos enrolamentos para detecção de possíveis deformações mecânicas nos enrolamentos
	Falha na isolamento dos enrolamentos	0,2130	<ul style="list-style-type: none"> Evitar sobrecargas no transformador de potência Realizar análise de gases dissolvidos no óleo antes e após o ensaio de aquecimento para detecção de possíveis falhas de projeto e fabricação Especificar sistemas de preservação fechados para novos transformadores Verificação da umidade na isolamento sólida através de ensaios Análise criteriosa do processo de fabricação da isolamento sólida utilizada nos enrolamentos Realizar ensaios para detecção de descargas parciais
Núcleo	Curto-circuito entre lâminas	0,006443	<ul style="list-style-type: none"> Análise criteriosa do processo de corte de chapa e empilhamento do núcleo Utilizar fibra de vidro na isolamento interna do núcleo
	Circulação de correntes parasitas	0,012	<ul style="list-style-type: none"> Verificar aterramento do núcleo Verificar folgas e parafusos passantes
	Sobreaquecimento	0,02252	<ul style="list-style-type: none"> Evitar sobrecargas no transformador de potência Evitar sobretensões no transformador de potência
Buchas	Contaminação por umidade	0,0149	<ul style="list-style-type: none"> Aplicar selante de silicone de cura neutra para proteger partes metálicas sujeitas a corrosão Realizar ensaios de fator de dissipação/capacitância
	Curto-Circuito entre placas capacitivas	0,0365	<ul style="list-style-type: none"> Verificação periódica da integridade da isolamento com ensaios de fator de potência/capacitância ou análise dos gases dissolvidos Realizar inspeção termográfica
	Vazamento de óleo	0,03242	<ul style="list-style-type: none"> Realizar inspeção periódica no indicador do nível de óleo da bucha
	Flashover	0,02886	<ul style="list-style-type: none"> Realizar limpeza periódica das saias das buchas
Tanque	Deformação mecânica	0,001511	<ul style="list-style-type: none"> Verificar a temperatura do transformador e a formação de gases Verificação da integridade física do tanque durante a montagem e transporte do transformador
	Perda de estanqueidade	0,003514	<ul style="list-style-type: none"> Inspeção periódica para detecção de corrosão Verificar o estado de conservação do material secante Durante ensaios em fábrica e após montagem em campo realizar ensaios físico-químicos do óleo para verificação do teor de umidade
	Vazamento de óleo	0,002	<ul style="list-style-type: none"> Verificar o nível de óleo do transformador de potência
	Corrosão	0,001018	<ul style="list-style-type: none"> Verificar o estado de pintura

6.0 - CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada neste artigo mostra o grau de complexidade dos fenômenos físicos associados à ocorrência de falhas em transformadores de potência. Um dos problemas relacionados a análise de falhas em transformadores de potência está na determinação da correlação entre os eventos básicos de falhas. Deficiências nas especificações e no projeto, voltadas para manutenibilidade e confiabilidade também contribuem a ocorrência de falhas no transformador. As recomendações da Tabela 5 associadas ao projeto, que podem trazer melhorias ao desempenho deste ativo, quando não devidamente contempladas no projeto, devem ser desenvolvidas no ambiente da manutenção, em que pese o efeito escala nos custos associados. Estas trajetórias evidentemente envolvem a questão de monitoramento e ensaios.

Os ensaios aplicados a transformadores de potência verificam a condição operativa do transformador de potência e podem diagnosticar defeitos e / ou falhas, auxiliando assim nas diversas etapas da vida transformador de potência, com repercussões nos procedimentos de manutenção e de tomada de decisão. Ensaio como a análise cromatográfica do óleo isolante são de extrema importância durante a vida do transformador e ajudam no diagnóstico de falhas nos enrolamentos, na isolação e no circuito magnético.

Entre as recomendações da Tabela 5, estão ações que devem ser realizadas durante a fase de projeto, especificação e operação do transformador de potência que podem diminuir a ocorrência de falhas, contribuindo assim para elevar a confiabilidade e a manutenibilidade deste importante ativo e conseqüentemente a sua disponibilidade.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- (2) ARAUJO, W. B. Modos de falha em transformadores de potência, seus efeitos e as recomendações associadas. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- (3) BARTLEY, W. H. Analysis of Transformer Failures. In: International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, 2003, Stockholm, Paper, Stockholm: The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance Co, 2003, p1-12.
- (4) BECHARA, R. Análise de falhas de transformadores de potência. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- (5) BERTAGNOLLI, G. The ABB approach to short-circuit duty of power transformers. 3. ed. Suíça: ABB, 2007.
- (6) BILLINTON, R., ALLAN, R.N. Reliability Evaluation of Engineering Systems. 2. ed. Nova York: Springer, 1992.
- (7) CIULAVU, C; HELEREA, E. Power Transformer incipient faults monitoring. In: Annals of the University of Craiova, 32, 2008, Roménia. Anais, Roménia: University of Craiova Faculty of Electrical Engineering, 2008, p 72-77.
- (8) CHAFAI, M. et al. Large power transformer reliability modeling. In: International Journal of System Assurance Engineering and Management, 7, 2016, India. Paper, India: Springer, 2016, p 9-17.
- (9) CHAKVARORTI, S. et al. Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers.- Theory, Implementation and Analysis. 1. ed. Springer, 2013.
- (10) CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- (11) CRAENENBROECK, T. V. et al. Detailed Study of Fast Transient Phenomena in Transformers and Substations Leading to an Improved System Design. In: 15th International Conference & Exhibition on Electric Power Distribution Engineering, 1999, Bélgica. Paper, Bélgica: Association of Engineers graduated from the Montefiore Electrical Institute, Université de Liège, 1999.
- (12) DING, H. et al. Why Transformers Fail. In: Euro TechCon, 2009. Paper, 2009.
- (13) DUPONT, C. J. Integração de análises de defeitos e definição de um grau de risco global para transformadores de potência. 2003. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- (14) FRANZÉN, A; Karlsson, S. Failure Modes and Effects Analysis of Transformers. Stockholm: Royal Institute of Technology, KTH School of Electrical Engineering, 2007.
- (15) FRONTIN, S. O. et al. Equipamentos de alta tensão – Prospecção e Hierarquização de inovações tecnológicas. 1 ed. Brasília: Taesa, 2013.
- (16) GRUPO DE TRABALHO A2.05. Guia de manutenção para transformadores de potência. Brasil: Cigré-Brasil, 2013.
- (17) GRUPO DE TRABALHO A2/C4.39. Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System PART 2: CASE STUDIES. Cigré, 2014.

- (18) GRUPO DE TRABALHO A2.18. Life management techniques for power transformers. Cigré, 2003.
- (19) GRUPO DE TRABALHO A2.37. Transformer Reliability Survey. Cigré, 2015.
- (20) GRUPO DE TRABALHO A2.24. Thermal Performance of Transformers. Cigré, 2009.
- (21) GRUPO DE TRABALHO D1.29. Partial Discharges in transformers. Cigré, 2017.
- (22) GUMILANG, H. et al. Condition assessment method for power transformer as a part of condition based maintenance program in PLN P3B JAWA Bali. In: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2012, Indonesia. Indonesia: IEEE, 2012, p 269-272.
- (23) GUTTEN, M. et al. Determination of the Electromagnetic Forces Caused by Short-Circuit Currents. In: 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2015, Latvia. Artigo, Latvia: IEEE, 2015.
- (24) HARLOW, J. H. Electric Power Transformer Engineering. 1. ed. Florida: CRC Press LCC, 2004.
- (25) KABIR, S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. In: Expert Systems with Applications, 77. Elsevier, 2017, p 114-135.
- (26) MILASCH, M. Manutenção de Transformadores em Líquidos Isolantes. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1984.
- (27) MURUGAN, R.; RAMASAMY, R. Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. In: Engineering Failure Analysis, 2015. Paper, Elsevier, 2015, p 182-192.
- (28) PENA, M. C. M. Falhas em transformadores de potência: Uma contribuição para análise, definições, causas e soluções. 2003. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
- (29) SAHA, T. K. Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10, 2003, pp 903-917.
- (30) SANTOS, C. M. P. Guia de Orientação – Disciplina Manutenibilidade – Notas de Aula. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Acessar: <http://gsemufpe.wordpress.com>.
- (31) WANG, Y. et al. Fault diagnosis of power transformer based on fault-tree analysis (FTA). In: International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 64, 2017, pp 1-7.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Cícero Mariano Pires dos Santos, Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1974), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1976) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1999). Por mais de 20 anos teve envolvimento direto com empresa do setor elétrico nacional, na área de geração e sistemas de energia elétrica, e mantém atualmente de forma indireta, há mais de 20 anos, estes envolvimento via projetos e pesquisas. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Áreas e temas de atuação: sistemas de energia elétrica, manutenção, confiabilidade, gestão da manutenção, manutenibilidade, modernização de usinas hidrelétricas, máquinas e equipamentos elétricos

Wellington Bezerra de Araujo Júnior, Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2017). Atualmente é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Pernambuco na área de Processamento de Energia. Atua na linha de pesquisa: Modelo Sistemático e integrado de manutenção.

