

SISTEMA DE MONITORAMENTO ON-LINE EM BUCHAS CAPACITIVAS DE TRANSFORMADORES ELEVADORES

FREITAS, Antonio Mailson Monteiro¹

SILVA, Ailan Lemos²

DIAS Rodrigo³

RESUMO

As buchas do transformador são um dos componentes mais críticos de um transformador. Até 20% das falhas graves em transformadores de alta tensão hoje podem estar relacionadas a buchas. Quase metade dessas falhas resulta em falhas catastróficas, como explosões, incêndio ou derramamento de óleo. O custo desses danos e a oportunidade perdida de fornecer energia podem ser centenas de vezes mais altos do que o preço de uma bucha. O objetivo geral deste artigo é descrever como um sistema de monitoramento *on-line* em buchas capacitivas de transformadores elevadores pode melhorar a forma como se pode mitigar eventuais danos ao sistema elétrico. Os objetivos específicos são: revisar, na literatura, os principais conceitos referentes a monitoramento de buchas capacitivas e resiliência, descrever as principais ocorrências que podem ocasionar falhas no sistema e demonstrar como o monitoramento atua para mitigar eventuais falhas. A metodologia utilizada foi de revisão da literatura. Os resultados apontam que o monitoramento de buchas tem como objetivo detectar falhas incipientes e dar um alerta precoce, bem como utilizar as buchas até o seu final de vida real. Outro ponto importante é que os dois principais indicadores de integridade de uma bucha são o fator de potência e a capacitância. Conclui-se que realizar o monitoramento das buchas é um fator importante em busca da mitigação de possíveis danos causados aos transformadores, o que minimizaria perdas financeiras consideráveis em função de não funcionamento ou acidentes graves.

Palavras-chave: Buchas capacitivas. Monitoramento. Importância.

1 INTRODUÇÃO

As buchas do transformador são um dos componentes mais críticos de um

¹ Graduando do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNINTER

² Graduando do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNINTER

³ Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia, pela COPPE/UFRJ. Graduado em Engenharia Elétrica pelo CLARETIANO - CENTRO UNIVERSITÁRIO. Professor do curso Bacharelado em engenharia elétrica do Centro Universitário Internacional – UNINTER. E-mail: rodrigodias@coc.ufrj.br.

transformador. Até 20% das falhas graves em transformadores de alta tensão hoje podem estar relacionadas a buchas. Quase metade dessas falhas resulta em falhas catastróficas, como explosões, incêndio ou derramamento de óleo (TANG; WU, 2011).

O custo desses danos e a oportunidade perdida de fornecer energia podem ser centenas de vezes mais altos do que o preço de uma bucha. Mesmo uma bucha com defeito, que não levará a uma falha catastrófica, pode causar danos às pessoas devido ao rompimento dos isoladores de porcelana, catapultados pelo ar pela força do arco de ruptura (SUNÉ, 2013).

O monitoramento de buchas tem como objetivo detectar falhas incipientes e dar um alerta precoce, bem como utilizar as buchas até o seu final de vida real. Para ter um sistema de monitoramento confiável, a precisão da aquisição dos parâmetros monitorados precisa ser muito alta (PAULINO, 2019).

Por exemplo, mesmo que uma quantidade bastante relevante de umidade seja impregnada no núcleo da bucha, o ângulo perdido mostrará apenas uma ligeira mudança na temperatura ambiente. Os sistemas de monitoramento de buchas hoje não são capazes de capturar essas mudanças pequenas, mas importantes (ZHANG *et. al.*, 2020).

Esse pressuposto demonstra a importância de se monitorar em tempo real as condições de trabalho das buchas e como elas estão se comportando frente a possíveis falhas nos sistemas (ZHANG *et. al.*, 2020). Isto posto, o presente trabalho tem como tema a apresentação de um sistema de monitoramento *on-line* de buchas capacitivas dos transformadores elevadores de alta tensão.

O objetivo geral deste artigo é descrever como um sistema de monitoramento *on-line* em buchas capacitivas de transformadores elevadores pode melhorar a forma como se pode mitigar eventuais danos ao sistema elétrico. Os objetivos específicos são: revisar, na literatura, os principais conceitos referentes a monitoramento de buchas capacitivas e resiliência, descrever as principais ocorrências que podem ocasionar falhas no sistema e demonstrar como o monitoramento atua para mitigar eventuais falhas.

2 A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

O monitoramento e a análise com base em computador estão se tornando cada vez mais populares como uma ferramenta para avaliar equipamentos de alta tensão

(ALVES; VASCONCELLOS, 2017). É chamada de manutenção baseada na condição que determina quais procedimentos de teste e manutenção devem ser realizados de acordo com a condição do equipamento no sistema de potência (ALVES; VASCONCELLOS, 2017).

Isso quer dizer que tanto os procedimentos *on-line* quanto os *off-line* são realizados e os dados dos testes são coletados em um banco de dados informatizado para avaliá-los *on* ou *off-line*, respectivamente. Sistemas especialistas computadorizados modernos com seu *software* de sistema especialista implementado principalmente baseado na extração de recursos, comparação de banco de dados e recursos de reconhecimento de falhas por ferramentas estatísticas e de comparação simples ou métodos de análise complexos (ZHANG *et al.*, 2020).

Para a estimativa da condição de equipamentos de engenharia de alta tensão, o teste de descarga parcial é a ferramenta mais reconhecida para avaliar a condição de isolamento (ALVES; VASCONCELLOS, 2017). Defeitos de isolamento, como vazios internos, descolamentos de eletrodos, erosão de superfície ou outros processos de destruição de isolamento, sempre aparecem como descargas internas ou superficiais, corona ou fenômenos elétricos de árvore que podem ser detectados e medidos como sinais (ALVES; VASCONCELLOS, 2017). Consequentemente, os fabricantes de equipamentos, juntamente com a indústria de concessionárias de energia, têm um interesse vital no diagnóstico e monitoramento *on-site*, *off-line* e *on-line* de seus equipamentos de alta tensão (ALVES; VASCONCELLOS, 2017).

O transformador de energia é um equipamento fundamental no sistema de energia. O objetivo do seu monitoramento e diagnóstico é localizar, identificar e avaliar os problemas de isolamento, durante a inspeção do equipamento recém-produzido ou instalado e durante o teste periódico ou contínuo e estimativa de equipamentos envelhecidos em serviço (PAULINO, 2019).

2.1 BUCHAS ALTA TENSÃO

As buchas são acessórios aplicados em equipamentos de alta tensão que integram os grandes equipamentos presentes em todas as plantas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (MAMEDE FILHO, 2019). São equipamentos projetados para trabalhar ao tempo ou abrigados, submetidos às solicitações elétricas e mecânicas normais de regime permanentes ou anormais e

transitórias previstas de ocorrerem em serviço (MAMEDE FILHO, 2019).

Existem duas categorias de buchas que são classificadas como capacitivas e não capacitivas. O que definem os tipos de buchas de alta tensão é a tensão nominal de aplicação e o material juntamente com o meio isolante e do ambiente no qual será instalado (JORDÃO, 2008).

2.2 BUCHAS NÃO CAPACITIVAS

De uma forma simplificada, uma bucha não capacitiva é um condutor revestido por material isolante sólido tais como porcelana de vidro e papel. Estas são aplicadas em equipamentos que não ultrapassam 25Kv (JORDÃO, 2008).

2.2 BUCHAS CAPACITIVAS

As buchas capacitivas têm esse nome por possuir a característica capacitivas, pois ele é formado por diversas camadas de filme metálico, envolto por papel isolante impregnado e imerso em óleo isolante localizado entre o elemento condutor que fica na parte central da bucha e a parede interna do corpo de porcelana. O resultado da divisão destas diversas camadas funcionam como capacitores em série eletricamente (MAMEDE FILHO, 2019).

2.3 MONITORAMENTO DE BUCHAS CAPACITIVAS

Tem sido crescente o interesse das empresas por sistema de monitoramento e diagnóstico sobre o estado operativo de buchas capacitiva de alta tensão, de tal maneira que seja possível ter informações que auxiliam na tomada de decisão sobre a necessidade de retirada ou não do transformador elevador, antes que falhas de grandes proporções aconteçam evitando prejuízos e efeitos negativos ao sistema elétrico (DAMIÃO *et al.*, 2020).

São várias as técnicas de monitoramento e diagnóstico que podem ser aplicadas em buchas capacitivas para identificar seu estado de funcionamento e eventuais riscos de sinistros ao sistema no qual opera. O proposto neste trabalho é o monitoramento *on-line* como um método de manutenção preditiva do equipamento permitindo uma checagem regular das condições de operação dos equipamentos.

Pois é sabido que estes podem operar em condições adversas com a possibilidade de ocorrer falhas. Alves e Vasconcelos (2017) apontam que

Segundo ALVES e VASCONCELOS:

Este contexto tem levado a uma mudança nas filosofias de manutenção, acelerando a migração da manutenção preventiva para a preditiva, da manutenção baseada no tempo para a baseada no real estado do equipamento. Alguns dos primeiros equipamentos em que se opera essa mudança são os transformadores de potência, visto que, além de essenciais para as redes de transmissão e distribuição, são em geral os maiores ativos de uma subestação. Com isso, os sistemas de monitoração *on-line* têm sido adotados como uma das principais ferramentas para possibilitar essa mudança sem colocar em risco a segurança e confiabilidade da operação dos transformadores, permitindo conhecer sua condição e diagnosticando ou prognosticando eventuais problemas (ALVES; VASCONCELOS, 2017, p. 1).

O sistema de monitoramento *on-line* equivale a um processo de manutenção preditiva que permite a detecção de anormalidades, possibilitando o planejamento de uma ação corretiva em tempo adequando evitando prejuízos a bucha e ao transformador (KOCH; KRUGER, 2012).

2.3.1 Operação para monitoramento *on-line*

À medida que as concessionárias passam do tradicional teste de rotina *off-line* do transformador para o monitoramento contínuo *on-line*, muitos benefícios são percebidos. O monitoramento *on-line* aprimora a operação segura e confiável dos equipamentos de energia da subestação, mede o desempenho, reduz as taxas de falha e fornece informações mais consistentes e frequentes da frota existente. Além desses benefícios, o usuário final percebe uma integração aprimorada de informações relevantes para que os gerentes de operações estejam mais bem posicionados para tomar decisões mais informadas. Como resultado disso, o monitoramento *on-line* oferece às concessionárias a capacidade de redirecionar os recursos na forma de O&M e despesas de capital, o que leva à flexibilidade operacional com maior confiabilidade (PURKAIT; SAHA, 2018).

Eliminar ou, no mínimo, mitigar os cronogramas de manutenção/teste baseados no tempo típicos por meio do monitoramento *on-line* e avançar para um programa de manutenção mais direcionado ao diagnóstico permitirá um esforço mais focado, em oposição à resposta baseada no tempo típica do passado.

Para realizar o teste de fator de potência *off-line* em buchas, o transformador deve ser retirado de serviço, aterrado, desconectado e, em seguida, preparado para

o teste. As buchas, o transformador e, normalmente, os pára-raios também são testados durante esse tempo de inatividade. Em média, isso leva um dia inteiro de oito horas com um mínimo de dois funcionários e geralmente pode incluir um total de quatro funcionários para essa tarefa.

O custo disso apenas para a mão de obra pode chegar a 32 horas, sem falar no custo do equipamento na forma de ferramentas, veículos etc. O monitoramento do transformador via gás dissolvido *on-line* e monitoramento de bucha permitirá que as equipes encontrem muito melhor uso de seu tempo trabalhando para corrigir outras questões mais urgentes.

2.3.2 Segurança do sistema de monitoramento *on-line*

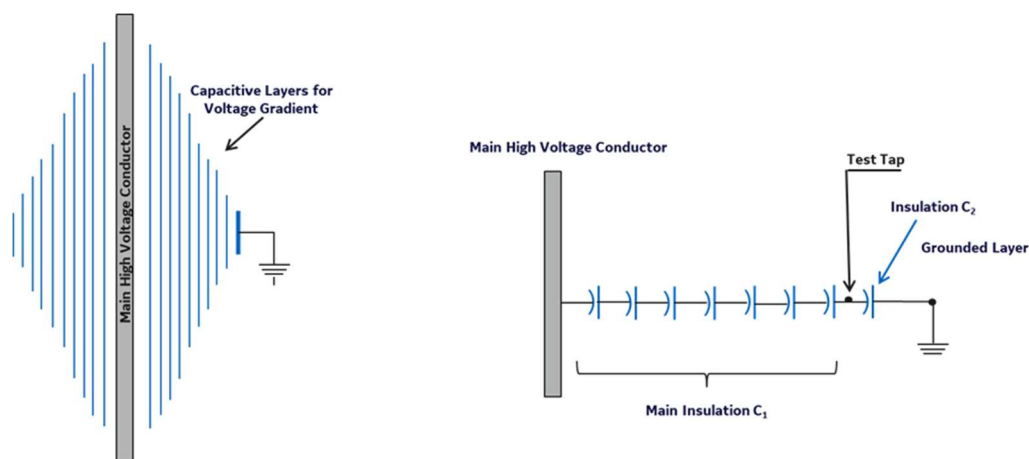
Um sistema de monitoramento de bucha é um sistema *on-line* que monitora continuamente a condição das buchas do transformador, monitorando a mudança de capacitância de C1 e a mudança relativa do fator de potência (tangente delta) de cada bucha.

As buchas do tipo condensador impregnado de óleo têm um condutor central enrolado com camadas alternadas de isolamento de papel e folha condutora conhecido como condensador ou camadas capacitivas (PURKAIT; SAHA, 2018). Essas camadas capacitivas são alojadas em um invólucro protetor contra intempéries (normalmente de porcelana) e preenchidas com óleo isolante. Existem duas capacitâncias principais em uma bucha, identificadas como C 1 e C 2 (ver Figura 1). C 1 é a capacitância total entre o condutor central e a derivação de teste. Onde a derivação de teste é conectada à camada mais externa capacitiva, este é o ponto em que as medições da bucha são feitas. C 2 representa a capacitância da torneira de teste para chão, em que C 2 não é parte do circuito durante o funcionamento normal da bucha.

As camadas são projetadas para fornecer quedas de tensão uniformes entre cada camada capacitiva, atuando efetivamente como um divisor de tensão. Quando uma camada capacitiva entra em curto, a voltagem em cada camada aumenta, aumentando a corrente de fuga proporcionalmente. A magnitude da corrente é uma medida da capacitância da bucha, e uma mudança na magnitude da corrente indica uma mudança na capacitância de C 1, que é uma indicação de que o dielétrico não é tão eficiente devido à contaminação interna do isolamento onde as camadas

capacitivas foram afetadas (PURKAIT; SAHA, 2018).

Figura 1 – Amostra de duas capacitâncias principais em uma bucha (C1 e C2).



Fonte: Purkait e Saha (2018).

Um sistema de monitoramento de bucha é um sistema *on-line* que monitora continuamente a condição das buchas do transformador, monitorando a mudança de capacitância de C_1 e a mudança relativa do fator de potência (tangente delta) (PURKAIT; SAHA, 2018), de cada bucha. Um sistema que tem a capacidade de detectar a atividade de PD (descarga parcial) (PURKAIT; SAHA, 2018), gerada no transformador utilizando os mesmos adaptadores de bucha (sensores) (PURKAIT; SAHA, 2018), conectados no ponto de derivação da bucha, sem qualquer hardware adicional montado no transformador, fornecerá mais informações vitais sobre a saúde no buchas e o transformador.

Monitores de buchas devem medir continuamente as correntes de fuga individuais de cada uma das buchas. Uma mudança na magnitude da corrente de fuga indica uma mudança na capacitância da bucha. A mudança na capacitância da bucha é então comparada à capacitância original da placa de identificação para determinar a condição da bucha (PURKAIT; SAHA, 2018). A capacitância inicial pode ser diferente de bucha para bucha. O que é interessante é o quanto essa capacitância mudou em comparação a quando era nova.

A umidade é inimiga da bucha. A entrada de umidade na bucha irá deteriorar o isolamento da bucha, o que fará com que as perdas dielétricas aumentem, levando a um aumento no fator de dissipação da bucha (fábrica de energia; tangente delta). Temperatura e transientes também são fatores importantes que também podem afetar

a isolação da bucha, aumentando assim o fator de potência.

A medição do fator de potência segundo PURKAIT; SAHA, (2018), relativo *on-line* tem as diferenças de tempo entre as três fases da corrente de fuga da bucha, o que se traduz em diferenças de ângulo de fase em relação umas às outras. Como uma mudança de atraso de fase equivale a uma mudança no fator de potência, podemos determinar para cada bucha a mudança relativa (em comparação com as outras) do fator de potência como uma porcentagem do valor da placa de identificação.

Eliminar ou, no mínimo, mitigar os cronogramas típicos de manutenção e teste baseados no tempo por meio do monitoramento *on-line* e avançar em direção a um programa de manutenção mais direcionado ao diagnóstico permitirá um esforço mais concentrado, em oposição à resposta típica do passado baseada no tempo. Afinal, por que trabalhar em algo que não tem problema?

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa fará uso de diferentes instrumentos, como a pesquisa bibliográfica que conforme os estudos de Lakatos e Marconi (2019 p. 70) “[...] não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras”. Dessa forma, se buscará com este estudo abranger o tema de monitoramento de buchas de transformadores e como isso propicia um melhor controle dos problemas advindos com falhas.

Serão usadas como fontes de consulta artigos disponíveis na IEEE Explorer, Google Scholar bem como livros em língua portuguesa e inglesa para que possam fundamentar de forma teórica e prática o presente trabalho. Os dados serão analisados e, após isso, interpretados para que possam gerar os resultados esperados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REQUISITOS TÍPICOS

A instalação do monitor de buchas requer informações que constam na placa

de identificação, além da tensão de operação do transformador. Essas informações consistem no aspecto mecânico do ponto de rosqueamento da bucha, onde o adaptador do monitor de bucha será inserido. Isso é para garantir uma instalação segura e um contato perfeito com a derivação de teste (Figura 2).

Com uma biblioteca expandida de tipos de buchas, o modelo de buchas geralmente é suficiente. No entanto, a disponibilidade de desenhos, que incluem o flange, pode ser benéfica. As características elétricas, como o fator de potência (tangente delta) e valores de capacitância C_1 localizados na placa de identificação, são usados para configurar o sistema de buchas (PURKAIT; SAHA, 2018).

Os valores da placa de identificação também servem como ponto de partida para a vida útil da bucha, em termos de sua capacitância e alteração relativa do fator de potência. Resumindo, os parâmetros mecânicos e elétricos de uma bucha são os principais elementos para uma instalação bem-sucedida de um monitor de bucha.

4.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BUCHAS

O sistema de monitoramento de buchas possui um conceito modular e é composto por três itens elementares, que estão apresentados no quadro 1, conforme Melo *et al.* (2017)

Quadro 1: Partes principais de um sistema de monitoramento *on-line*.

Elemento	Descrição
Adaptadores de derivação	fornece a conexão elétrica às derivações das buchas, garantindo também sua estanqueidade. Incorporam proteções redundantes contra ruptura acidental do circuito de medição, evitando que o tap permaneça aberto
Módulos de Medição	recebem as correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico, medem suas correntes e as processam matematicamente e estatisticamente, entregando ao módulo de interface os valores de capacitância de corrente e tangente delta através de uma porta de comunicação serial
Módulo de Interface	recebe informações por meio de módulos de medição e as disponibiliza localmente no display do aparelho e remotamente por meio de contatos de saída para alarmes, saídas analógicas (mA) e portas de comunicação serial. Opcionalmente, os Módulos de Interface também podem ser conectados à Intranet da empresa para acesso remoto às leituras

Fonte: Melo *et al.* (2017).

4.3 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO DE BUCHA

Os principais parâmetros da bucha, que são usados hoje para monitoramento *on-line* de bucha, são o fator de potência, a capacitância principal da bucha e a atividade de descarga parcial. O Fator de Potência segundo “USHAKOV (2021), e a Descarga parcial são os parâmetros mais poderosos, que têm a capacidade de revelar a maioria das falhas incipientes de buchas. O monitoramento da capacitância é um bom indicador para quebras parciais (quebra entre duas ou mais camadas com o resultado de um curto-circuito entre elas) e problemas de contato (a capacitância diminui ou está flutuando fortemente). Além disso, cada parâmetro será discutido em relação ao melhor uso para avaliação *on-line* da condição de saúde das buchas capacitivas (USHAKOV, 2021).

4.3.1 Fator de potência

O fator de potência reflete, como propriedade do material de isolamento, o estado e a saúde do próprio isolamento. Representa a relação entre a corrente capacitiva e a resistiva, que estão dando em sua soma a corrente de fuga.

A corrente capacitiva é o resultado do projeto da camada capacitiva e, com isso, prova um determinado valor. A corrente resistiva é definida pela resistividade do material de isolamento e é um parâmetro direto da qualidade do sistema de isolamento (PURKAIT; SAHA, 2018).

A medição do Fator de Potência em condições *on-line* requer uma alta precisão para detectar mudanças já pequenas e garantir a detecção do aumento do teor de umidade no sistema de isolamento, o que é difícil de alcançar em condições *on-line*. Influências externas como campos magnéticos de baixa frequência, ruído externo e harmônicos, bem como a falta de fontes de sinal de referência estáveis são os fatores que influenciam essas medições (ZHU; YANG, 2021).

4.3.2 Descarga parcial

Todos os defeitos da bucha podem ser detectados por descarga parcial, exceto umidade. Portanto, as medições de descarga parcial (PD) são muito importantes para a rotina e novos testes na fábrica ou no local. No entanto, a detecção da descarga parcial relacionada à bucha em condições *on-line* está enfrentando grandes problemas (USHAKOV, 2021).

O princípio de medição para monitoramento *on-line* de buchas PD usado hoje é baseado no método IEC 60270. A capacitância da bucha será usada como capacitor de acoplamento. Principalmente, este princípio de monitoramento PD é aplicado para monitorar o transformador, mas em alguns casos também para monitorar as buchas (ZHU; YANG, 2021).

A magnitude de PD de falhas incipientes na bucha está entre 5pC e 100pC. Maiores são possíveis em caso de problemas de contato. Os valores típicos geralmente estão abaixo de 50pC. Comparando isso com a atividade PD permitida e possível em linhas aéreas (alguns nC) e dentro do transformador, muito provavelmente a bucha PD será ocultada devido aos sinais externos mais elevados. Além disso, devido à alta capacitância do objeto de teste e ao ruído de fundo interno típico, a sensibilidade do monitoramento de PD usando a bucha como capacitor de acoplamento é bastante limitada (PURKAIT; SAHA, 2018).

Desafios para monitoramento *on-line* de PD de bucha ou mesmo em alguns casos impossível encontrar a origem do PD (linha aérea/conectores de linha/transformador/duto de alta corrente ou talvez até mesmo a bucha) sem

quaisquer medidas adicionais, o que pode exigir uma interrupção do transformador.

4.3.3 Parâmetro proposto para monitoramento *on-line*

Pode-se concluir que o monitoramento *on-line* de descarga parcial para buchas fornecerá informações limitadas sobre a saúde de uma bucha. Principalmente a descarga parcial de uma bucha será escondida por descargas / distúrbios externos. Além disso, a sensibilidade é limitada e é difícil alocar as descargas detectadas a um determinado componente ou mesmo distinguir entre as descargas internas e externas (USHAKOV, 2021).

Mais promissores são os parâmetros Capacitância e Fator de Potência. Eles podem ser monitorados para buchas especificamente pelo uso de diferentes métodos, que serão discutidos no próximo capítulo com mais detalhes.

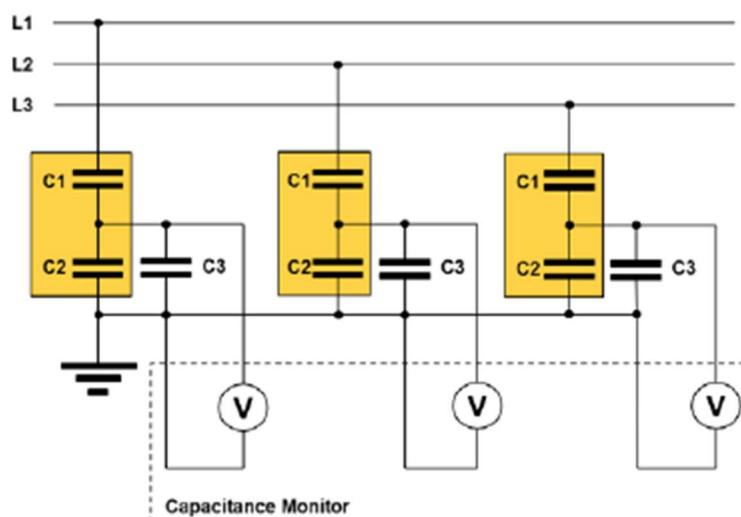
4.4 VISÃO GERAL SOBRE OS MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE BUCHAS USADOS ATUALMENTE

O método mais novo usado hoje para monitoramento de buchas é o método do sinal de referência, onde a mudança de fase da corrente de fuga de uma bucha e seu sinal de referência estável são medidos. Este método será discutido, mais abaixo com mais detalhes, mas primeiro os métodos usados hoje e suas vantagens e desvantagens serão descritos (ZHU; YANG, 2021).

4.4.1 Monitoramento de capacitância

O monitoramento da capacitância é um dos métodos mais fáceis de aplicar para fazer o monitoramento *on-line* de buchas. Este método visa principalmente detectar avarias parciais entre uma ou mais camadas capacitivas. Um capacitor secundário, principalmente denominado C3, será adicionado entre a derivação da bucha e o aterramento (USHAKOV, 2021), conforme apresentado na Figura 2:

Figura 2: Princípio de monitoramento de capacitância.



Fonte: Ushakov (2021).

Como pode ser observado a capacitância principal $C1$ e a capacitância de medição $C3$, nesse caso, representam um divisor capacitivo. Embora possa ser assumido que a tensão primária da rede de alta ou média tensão é relativamente estável, uma ruptura parcial pode ser detectada por um aumento da tensão no $C3$. Basicamente, um aumento permanente da tensão secundária (em $C3$) de 5 a 10% já indica uma ruptura parcial (USHAKOV, 2021).

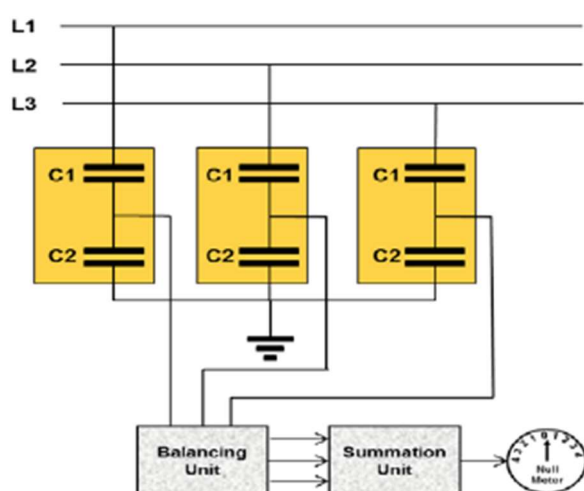
A desvantagem do método de capacitância é que apenas avarias parciais e problemas de contato no caminho da corrente principal podem ser detectados. Além disso, mesmo para os níveis de tensão mais elevados (420kV e acima), o número de camadas capacitivas está entre 60 e 100 camadas, dependendo do nível de tensão e do fornecedor da bucha. Se uma camada estiver faltando, o aumento de tensão ficará entre 1,6 e 1% (PURKAIT; SAHA, 2018).

Com flutuações de rede de alta tensão na magnitude da tensão de mais de 2%, é difícil detectar até mesmo uma quebra parcial entre duas camadas apenas. Para superar esta desvantagem, uma comparação direta da tensão secundária e da tensão primária pode ser usada, o que exigiria ter acesso à medição da tensão primária (por exemplo, VT ou CVT) ou via dados digitais dentro de um sistema ECS. No entanto, isso tornará o sistema mais complexo do que apenas uma medição da tensão secundária em um $C3$ (ZHU; YANG, 2021).

4.4.2 Método de corrente equilibrada

O método de corrente balanceada, também chamado de método de soma de correntes, é o método mais usado atualmente para monitoramento de buchas. O princípio é que, em circunstâncias perfeitas, os ângulos de fase de soma são zero. As circunstâncias perfeitas significam que a magnitude da tensão é absolutamente o mesmo, a mudança de fase entre as fases é de exatamente 120 graus e as buchas são todas do mesmo tipo e têm a mesma temperatura (USHAKOV, 2021). A figura 3 representa esse método:

Figura 3: Visão geral do princípio Método de corrente equilibrada.



Fonte: Ushakov (2021).

No mundo real, as redes elétricas estão carregando uma carga mais ou menos desequilibrada. As assimetrias de fase em relação à magnitude de tensão de 1 a 1,5% e 0,2 graus nas variações do ângulo de fase são muito comuns para redes estáveis conhecidas nas "velhas economias". Assimétrias muito maiores podem ser vistas em redes mais instáveis em outras partes do mundo. As assimetrias estão mudando com as condições de carga de forma diária, sazonal e imprevisível. Mudanças na capacitância de uma bucha (rupturas parciais) podem ser detectadas com mais precisão porque as flutuações gerais da magnitude da tensão em todas as três fases estão sendo melhor compensadas devido ao princípio do método em comparação com um monitoramento de capacidade puro descrito acima. Mas ainda assim, a detecção clara de uma quebra parcial para níveis de tensão de 500kV e acima permanece um desafio, mesmo se a assimetria da magnitude da tensão for de apenas 1,5%. Se a assimetria for ainda maior, será ainda mais difícil obter um resultado confiável também para níveis de tensão mais baixos (ZHU; YANG, 2021).

Outro desafio desse método é a assimetria de fase em relação ao ângulo de fase. Se o desequilíbrio do ângulo de fase for de apenas 0,2 graus, isso significaria já um desvio do Fator de Potência ($\cos f$, onde f é $90^\circ - 0,2^\circ = 89,8^\circ$) 0,349%. O fator de potência de uma bucha saudável OIP (papel impregnado de óleo) será de cerca de 0,250%. As pequenas mudanças do fator de potência, usado para detectar umidade, não podem ser detectadas (USHAKOV, 2021).

Os sistemas modernos de hoje estão usando sistemas de autoaprendizagem, que registram o comportamento diário e sazonal típico das buchas para prever as condições de carga. No entanto, a precisão alcançável em relação ao fator de potência medido é limitada. Devido ao descrito acima, a usabilidade deste método para transformador monofásico também é limitada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou demonstrar a importância de se monitorar em tempo real as condições de trabalho das buchas e como elas se comportam frente a possíveis falhas nos sistemas. O objetivo geral deste artigo era descrever como um sistema de monitoramento *on-line* em buchas capacitivas de transformadores elevadores pode melhorar a forma como se pode mitigar eventuais danos ao sistema elétrico. Os objetivos específicos foram: revisar, na literatura, os principais conceitos referentes a monitoramento de buchas capacitivas e resiliência, descrever as principais ocorrências que podem ocasionar falhas no sistema e demonstrar como o monitoramento atua para mitigar eventuais falhas.

Viu-se que até 20% das falhas graves em transformadores de alta tensão hoje podem estar relacionadas a buchas (TANG; WU, 2011). Quase metade dessas falhas resulta em falhas catastróficas, como explosões, incêndio ou derramamento de óleo.

Outro ponto importante foi apresentar que o custo dos danos resultantes de problemas que poderiam ser verificados com o monitoramento das buchas, além da oportunidade perdida de fornecer energia podem ser centenas de vezes mais altos do que o preço de uma bucha. Mesmo uma bucha com defeito, que não levará a uma falha catastrófica, pode causar danos às pessoas devido ao rompimento dos isoladores de porcelana, catapultados pelo ar pela força do arco de rompimento.

Foi apontado que os dois principais indicadores de integridade de uma bucha são o fator de potência e a capacitância. O fator de potência tem a capacidade de

revelar a maioria das falhas incipientes de buchas. O monitoramento da capacitância é um bom indicador para quebras parciais e problemas de contato

Conclui-se que realizar o monitoramento das buchas é um fator importante em busca da mitigação de possíveis danos causados aos transformadores, o que minimizaria perdas financeiras consideráveis em função de não funcionamento ou acidentes graves.

REFERÊNCIAS

ALVES, Marcos E. G.; VASCONCELLOS, Vagner. Especificação de Sistemas de Monitoração *On-line* para Transformadores de Potência Baseados em uma Arquitetura Descentralizada. **Cigré**, september 12-13, 2017.

DAMIÃO, Laerty et al. On-line Monitoring of Partial Discharges in Power Transformers Using Capacitive Coupling in the Tap of Condenser Bushings. **Energies** 2020, 13, 4351; doi:10.3390/en13174351.

JORDÃO, Rubens Guedes. Transformadores. São Paulo: Blucher, 2008.

KOCH, M.; KRUGER, M. A new method for on-line monitoring of bushings and a partial discharges of power transformers. **IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**. 23-27 September 2012, Bali, Indonesia.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

PAULINO, Marcelo. Capítulo XII - Uso de monitoramento on-line de transformadores para avaliação da condição do ativo. In: O Setor Elétrico. **Manutenção de transformadores**. Rio de Janeiro: O Setor Elétrico, 2019. p. 38-44. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2015/01/ed-107_Fasciculo_Cap-XII-Manutencao-de-transformadores.pdf. Acesso em 14 jul.

2021.

PURKAIT, Prithwiraj; SAHA, Tapan Kumar. **Transformer ageing**: monitoring and estimation techniques. 2018.

SUÑÉ, Jaime (coord.). **Guia de Manutenção para Transformadores de Potência**: Grupo de Trabalho A2.05. Rio de Janeiro: CIGRÉ, 2013. Disponível em: <https://cigre.org.br/brochuras/>

TANG, W. H.; WU, Q. H. **Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence**. Liverpool: Elsevier, 2011.

USHAKOV, Vasily Ya et al. **Transformer Condition Control**: Advanced and Traditional Technologies. London: Springer, 2021.

ZHANG, L. et al. Study on Multi-parameter On-line Monitoring System for Transformer Bushing. **2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)**, 2020, pp. 54-58, doi: 10.1109/AEEES48850.2020.9121465.

ZHU, Fang; YANG, Baitun. **Power Transformer Design Practices**. Boca Raton: CRC Press, 2021.