A2 – TRANSFORMADORES E REATORES DE POTÊNCIA
TP 3: CONFIABILIDADE E DESEMPENHO EM CAMPO DE TRANSFORMADORES

GT A2-06: estudo sobre a evolução histórica das normas técnicas sobre buchas de alta tensão

Leonardo do Nascimento Pereira[1], Vagner Vasconcellos[1], Daniel Carrijo Polonio Araujo[2], Santhiago Guedes Montenegro[3]
CPFL Energia[1], USP – Universidade de São Paulo[2], CHESF[3]
Brasil

RESUMO

O GT A2-06 – Análise do Desempenho de Buchas está em andamento e com previsão de conclusão do seu relatório final em breve. Neste cenário, uma das primeiras etapas do GT foi a realização de uma extensa revisão bibliográfica sobre buchas – em especial, as buchas de transformadores e autotransformadores - nas principais bases de dados existentes. Esta revisão bibliográfica possibilitou a criação do primeiro capítulo da brochura ("Introdução") e é o foco central deste trabalho.

Para isso, realiza-se uma análise comparativa detalhada sobre a evolução dos aspectos técnicos das buchas nas normas IEEE e IEC ao longo do tempo. Nesta secção, são apresentados os anos de publicação de cada uma das principais normas e as contribuições significativas que cada norma trouxe em relação à sua edição anterior. Este ponto é fundamental para compreender o desenvolvimento tecnológico deste equipamento, proporcionando uma visão clara de como chegamos aos tipos de buchas atuais. Além disso, são discutidas as principais características e especificidades de cada tipo de bucha. A análise dessas características permite entender as suas vantagens e limitações, bem como suas aplicações específicas e o impacto que tiveram no avanço tecnológico do setor.

Em seguida, é analisado como os critérios de especificação de buchas evoluíram ao longo do tempo. Por exemplo, são comentadas as revisões sobre a recomendação de temperatura ambiente mínima e máxima de operação, a definição de condições severas de operação, por exemplo: altura em relação ao nível do mar e a presença de poluição atmosférica (vapores, particulados), umidade excessiva, gotejamento, vibrações, inclinação, condições de armazenamento etc. Neste contexto, entender as causas da evolução desses critérios é muito importante pois eles refletem os avanços na compreensão dos desafios enfrentados pelas buchas elétricas em ambientes variados, bem como a evolução na busca por maior padronização, confiabilidade e desempenho.

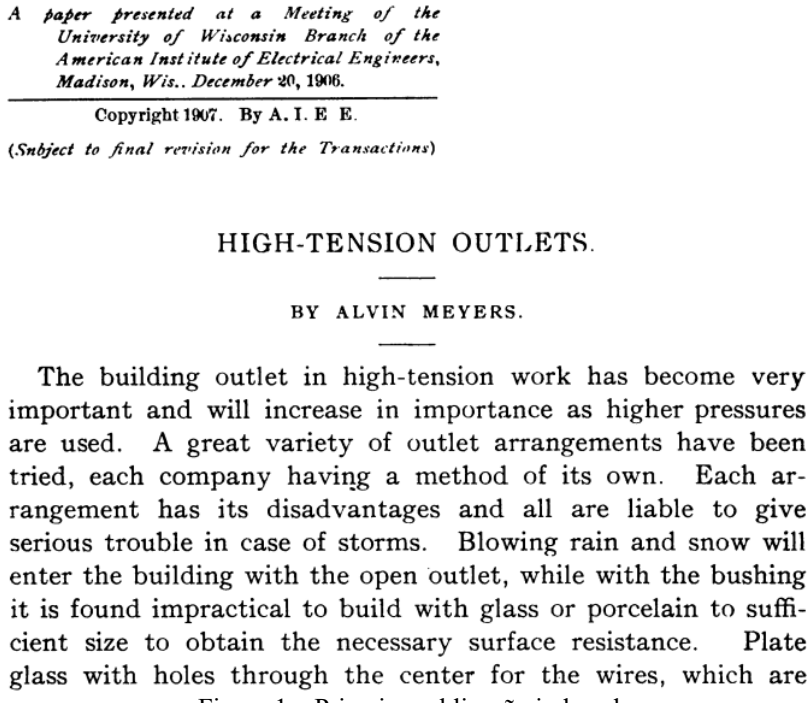
Finalmente, são analisados os parâmetros elétricos da bucha como a tensão nominal de operação, corrente nominal máxima, nível básico de isolamento, tensão de manobra, tangente delta, capacitância (C1/C2), análise de óleo e as descargas parciais. As dimensões das buchas, especialmente à distância de escoamento, também são discutidas. A compreensão da evolução dessas características é essencial para a gestão do ciclo de vida deste ativo, desde a especificação técnica até a operação e manutenção.

PALAVRAS-CHAVE
Bucha, Transformador de Potência, Especificação Técnica, Norma Técnica, Evolução Histórica.

1. INTRODUÇÃO – HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS BUCHAS.

Buchas são um dos componentes estruturais de equipamentos de alta tensão e desempenham um papel fundamental na integridade e eficiência dos sistemas elétricos. Estes componentes possuem uma estrutura isolante com um condutor central que permite a passagem de corrente elétrica entre um objeto aterrado, por exemplo, o tanque de um transformador, sem que ocorra o contato elétrico entre o condutor e objeto aterrado.

A primeira publicação indexada sobre buchas obtida durante a revisão bibliográfica desta brochura trata de um artigo de 1907, [1], publicado por Alvin Meyers para o *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE, atual IEEE) onde o autor descreve os desafios e as soluções encontradas, na época, para conectar um sistema elétrico de 44kV a um edifício na cidade de Nunns, nos Estados Unidos. No artigo, o autor justifica o desenvolvimento da bucha de parede como necessário para permitir a entrada do cabo elétrico energizado ao edifício e impedir a entrada de água da chuva ou neve, selando o interior do edifício das intempéries externas, o que não acontecia com o método anterior (para tensões menores) de apenas realizar um buraco na parede do edifício.



A paper presented at a Meeting of the University of Wisconsin Branch of the American Institute of Electrical Engineers, Madison, Wis., December 20, 1906.

Copyright 1907. By A. I. E. E.

(Subject to final revision for the Transactions)

HIGH-TENSION OUTLETS.

BY ALVIN MEYERS.

The building outlet in high-tension work has become very important and will increase in importance as higher pressures are used. A great variety of outlet arrangements have been tried, each company having a method of its own. Each arrangement has its disadvantages and all are liable to give serious trouble in case of storms. Blowing rain and snow will enter the building with the open outlet, while with the bushing it is found impractical to build with glass or porcelain to sufficient size to obtain the necessary surface resistance. Plate glass with holes through the center for the wires, which are

Figura 1 – Primeira publicação indexada

No artigo, o autor afirma que a utilização de porcelana ou vidro (dois materiais com alta rigidez dielétrica) foi impraticável. Como solução, o autor apresenta um projeto de bucha construído em madeira (carvalho). Esta bucha possuía 10 centímetros de diâmetro externo, com um buraco interno de 2.5 centímetros de diâmetro para a passagem do condutor e 183 centímetros de comprimento. Com o objetivo de dificultar a entrada de umidade no sistema, a madeira foi tratada com parafina.

Desta forma, pode-se observar que as buchas possuem três características principais: fornecer isolamento elétrico, suporte mecânico e condução de energia. A função primária das buchas é fornecer isolamento elétrico entre partes condutoras do equipamento. Isso é essencial para evitar curto-circuitos e garantir a segurança operacional. Além do isolamento elétrico, as buchas também permitem que o lado interior esteja isolado do lado exterior, evitando a contaminação do interior por agentes externos, por exemplo, umidade. Além disso, as buchas também oferecem suporte mecânico para os condutores

elétricos. Elas ajudam a manter a posição correta dos elementos condutores, resistindo a forças mecânicas e vibrações que possam ocorrer durante a operação. Finalmente, as buchas facilitam a condução segura da energia elétrica entre as partes internas e externas do equipamento. Elas permitem a passagem controlada da corrente elétrica, evitando perdas excessivas de energia e garantindo uma transferência eficiente de calor para o ambiente externo.

Existem diversos tipos de buchas, cada uma projetada para atender às necessidades específicas de diferentes equipamentos elétricos. Por exemplo, buchas de transformadores diferem das buchas de disjuntores em termos de design e requisitos técnicos. O foco deste trabalho são as buchas para transformadores de potência de alta tensão.

2. METODOLOGIA:
2.1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – NORMAS TÉCNICAS.

Ao longo dos últimos 100 anos, foram publicadas diversas normas, guias, brochuras, manuais técnicos e artigos tratando sobre aspectos de projeto, especificação, manutenção e monitoramento de buchas de alta tensão. Neste sentido, esta secção apresenta as principais publicações sobre buchas e introduz os conceitos que serão mais bem detalhados na brochura. A secção subdivide-se em normas (IEEE/IEC), publicações técnicas do CIGRÉ e artigos da bienal de Paris do CIGRÉ.

As normas técnicas de buchas de alta tensão visam estabelecer critérios e requisitos padronizados para a produção, utilização e avaliação deste equipamento. Ao analisar a evolução dessas normas ao longo dos últimos 80 anos, é possível observar uma evolução dos critérios de definição de condição severa de operação e requisitos mínimos de dados de placa obrigatórios. Ao longo dos anos, houve também uma evolução nas especificações de buchas de alta tensão sob o aspecto de dimensões físicas e estanqueidade. Além disso, as normas padronizam os ensaios de rotina e ensaios de tipo a serem realizados e padronizaram os limites aceitáveis de cada ensaio. Estas evoluções nas normas refletem o amadurecimento tecnológico deste equipamento.

As principais normas técnicas de buchas de alta tensão estão apresentadas na tabela 1, onde estão resumidos também as principais contribuições de cada norma. Em seguida, é realizado uma breve descrição dos principais pontos tratados em cada norma e como as contribuições de cada norma evoluíram ao longo do tempo.

TABELA 1- Principais normas técnicas sobre buchas de alta tensão

Código	Ano	Título	Contribuição
IEEE C57.19.00	2023	*Standard for General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings*	Melhor especifica os limites para o teste de estanqueidade
IEEE C57.12.200	2022	*IEEE Guide for the Dielectric Frequency Response Measurement of Bushings*	Diretrizes para a utilização da técnica de medição de resposta em frequência para o diagnóstico da isolação dielétrica da bucha
IEEE C57.19.01	2017	*IEEE Standard for Performance Characteristics and Dimensions for Power Transformer and Reactor Bushings*	Definição dos limites atuais: capacitância (C1) e do fator de potência (FP%)
IEEE 1861	2014	*IEEE Guide for On-Site Acceptance Tests of Electrical Equipment and System Commissioning of 1000 kV AC*	Definições e especificações acerca de buchas de extra-alta tensão

		and Above	
IEC/IEEE 65700-19-03	2014	*IEC/IEEE International Standard -- Bushings for DC application*	Definições e especificações acerca de buchas utilizadas em corrente contínua.
IEEE C57.152	2013	*IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors*	Procedimentos e orientações acerca dos principais ensaios de campo em buchas e definição dos limites de gases no ensaio de cromatografia de buchas a óleo.
IEEE C57.19.100	1995	*IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings*	Modelagem térmica das buchas Riscos de operação em sobrecarga Melhores práticas de manutenção
IEEE 21	1976	*IEEE General Requirements and Test Procedure for Outdoor Apparatus Bushings*	Atualização das condições severas de operação Requisitos de dados de placas Procedimentos de realização de ensaios
IEEE 21	1964	*American Standards Requirements and Test Code for Outdoor Apparatus Bushings*	Atualização das condições severas de operação e do ensaio de elevação de temperatura Definição de diferentes tipos de buchas, especificação dos limites de FP% e C1, dimensões físicas mínimas e da capacidade de suportar pressão interna
IEEE 21	1941	*AIEE Apparatus Bushings and Proposed Test Code*	Especificação de condições ambientais severas Especificação do limite máximo no teste de elevação de temperatura

A primeira norma sobre buchas data de 1941 [2] (*AIEE Apparatus Bushings and Proposed Test Code*) e apresenta as condições consideradas normais e especiais (acima de 1000 metros de altitude e temperatura do meio externo acima de 40°C ou 30°C em média durante qualquer período de vinte e quatro horas) para operação deste componente. A norma específica também condições severas do ambiente em que a bucha irá operar (Exposição a fumos, vapores, umidade excessiva, gotejamento de água, poeira excessiva, poeira abrasiva, poeira magnética, maresia, vibrações anormais, inclinações, transporte/armazenamento incomum, vapores de óleo). Além disso, a norma especifica um limite máximo de 30°C de aumento de temperatura para qualquer parte acessível do equipamento para o ensaio de elevação de temperatura com corrente nominal e define como variáveis de nominais de buchas as seguintes variáveis: nível básico de isolamento, tensão, corrente e frequência nominal de operação. A norma especifica também os ensaios especiais, de rotina e de projeto de buchas.

Em 1964, a norma [2] foi atualizada para a [3] (*American Standards Requirements and Test Code for* Outdoor Apparatus Bushings). Nesta edição foram definidos alguns conceitos, como:

- Buchas condensivas: buchas onde camadas condutoras cilíndricas são dispostas coaxialmente com o condutor dentro do material isolante.
- Capacitância da bucha: a capacitância principal da bucha é denominada C1 e mede o valor entre o condutor de alta tensão e o tap de potencial sendo, este último, uma conexão isolada de uma das camadas isolantes, atuando como um divisor de tensão que mede a tensão aplicada a

bucha. A capacitância C2 mede o valor entre o tap principal e a terra. A capacitância total da bucha é medida entre o condutor de alta tensão e a terra.

- Fator de Potência (FP%): A divisão de potência dissipada no isolamento, em watts, pelo produto da tensão e corrente aplicados por uma onda senoidal com condições pré-definidas.

A norma também atualiza a sua versão anterior sobre condição severa de operação, com a adição de limites de temperatura para o óleo e para o terminal externo. Para o ensaio de elevação de temperatura por corrente nominal em transformadores, a norma atualiza o limite de elevação da bucha com o máximo ponto-quente permitido de 65°C quando o lado inferior da bucha está imerso em óleo e com um aumento de até 55°C em relação a temperatura ambiente. Além disso, a temperatura máxima permitida de qualquer parte metálica da bucha é definida em 105°C.

São também definidos os limites aceitáveis de variação de fator de potência (FP%) e capacitância (C1 e C2), para os diferentes tipos de buchas. Para buchas imersas em óleo, a norma define um limite máximo de FP% de 1% e com um aumento máximo de 0,2% em relação a medição inicial. Já para a capacitância C1, o limite máximo aceitável é de 1% de variação em relação a medição inicial. Em seguida, com o objetivo de evitar vazamento de óleo pela bucha, é definido o requisito mínimo de capacidade de suportar pressão interna.

Finalmente, são definidas as dimensões físicas mínimas da bucha para cada classe de tensão.

Em 1976, a norma[3] foi atualizada para a [4] (*IEEE General Requirements and Test Procedure for Outdoor Apparatus Bushings*). Nesta edição foram atualizados alguns conceitos, como:

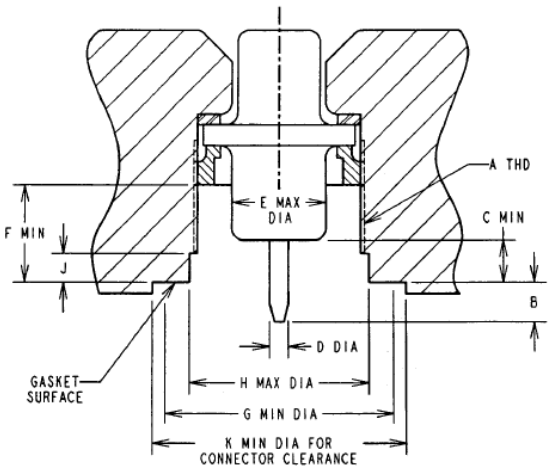
- Foi adicionado um limite inferior de temperatura ambiente para a condição normal de operação de -30°C.

- Foram adicionados novos critérios para a classificação como condição severa de operação como: limite de 20° para o ângulo máximo de inclinação para em relação à vertical.

A norma também traz requisitos de dados de placa e instruções dos procedimentos de ensaios.

Dando continuidade à evolução tecnológica das buchas, em 1995, o comitê de estudos de transformadores da *Power Engineering Society* do IEEE publicou um guia sobre buchas (*IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings*),[5]. Nele, são apresentados parâmetros relacionados ao envelhecimento da bucha, riscos relacionados a sobrecarga (como por exemplo, aumento da pressão interna na bucha, o que aumenta a probabilidade de vazamentos).

Neste contexto, o guia recomenda que buchas que foram expostas a condições de sobrecarga sejam ensaiadas com uma maior frequência e apresenta um modelamento matemático para estimação do ponto quente de buchas baseado no carregamento do transformador. Finalmente, no contexto de manutenção, o guia apresenta recomendações de manutenção e inspeção de buchas.



A. (2.25)-12 UNF 2B
B. 9.53 MIN - 19.05 MAX (0.375 MIN - 0.750 MAX)
C. 7.87 (0.310)
D. 7.95 ± 0.08 (0.313 ± 0.003)
E. 44.45 (1.75)
F. 25.4 (1.0)
G. 74.68 (2.94)
H. 57.56 ± 0.08 (2.266 ± 0.003)
J. 3.18 MIN - 7.37 MAX (0.125 MIN - 0.290 MAX)
K. 76.96 (3.030)

NOTE—PRIMARY UNITS FOR DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS FOLLOWED BY INCH UNITS IN PARENTHESES.

Figura 2 – Dimensões para um Tap de Tensão, conforme IEEE Std C57.19.01-2000Em 2013, foi publicado um guia para diagnóstico em campo de transformadores, [6]. Nele, é detalhado que as buchas representam financeiramente um percentual baixo em relação ao valor total dos transformadores, porém, a falha dela pode resultar na condenação total do transformador. Portanto, o diagnóstico antecipado de falhas neste equipamento contribui para a geração de valor em concessionárias de energia. Neste sentido, a norma detalha com profundidade o procedimento de medição dos ensaios de capacitância, descargas parciais, infravermelho e do fator de potência das buchas. Em seu anexo, o guia também define limites dos gases no ensaio de cromatografia do óleo em buchas a óleo.

Em 2014, o IEEE publicou normas específicas para buchas que operam em corrente contínua,[7], e buchas de extra-alta tensão em corrente alternada,[8]. Em ambas são definidos condições específicas em que a bucha apresenta condições operativas diferentes de buchas comuns, como temperatura de operação maior devido a temperatura ambiente maior da sala de válvulas de circuitos HVDC. Além disso, são definidos limites específicos para os ensaios nestes equipamentos em relação ao nível básico de isolamento e a compatibilidade eletromagnética. Em relação aos ensaios de rotina - medição da capacitância (C1) e do fator de potência (FP%) – as normas são mais restritivas, definindo, por exemplo, um limite máximo de desvio de C1 como 1% e um desvio máximo de FP% para buchas OIP de 0,0002.

Em 2022, foi publicado guia para medição da resposta em frequência dielétrica de buchas,[9]. Nele, os autores justificam a importância de se medir a resposta em frequência da capacitância da bucha como um método efetivo para identificar degradação da isolação dielétrica. Por isso, são definidas as diretrizes para a realização deste ensaio tanto em fábrica quanto em campo: técnica de medição, requisitos do equipamento de medição e interpretação dos resultados.

Em 2023, foi publicada a última norma sobre buchas (C57.19.00-2023),[10]. Nela, são atualizados os termos técnicos, condições de serviço, classificação, requisitos gerais e procedimentos de teste para

buchas de transformadores ou reatores imersos em óleo isolante. Por exemplo, é especificado como condição usual de operação um limite máximo de 20° em relação à perpendicular, são definidos os testes especiais em buchas (ensaios que não são mandatórios para o ensaio de tipo do equipamento e não são ensaios de rotina), estes ensaios devem ser feitos de comum acordo entre fabricante e comprador. Em relação aos ensaios de rotina, a norma utiliza os limites definidos na IEEE Std C57.19.01-2017 para os limites de capacitância (C1) e fator de potência (FP%). Finalmente, são definidas as diretrizes para o ensaio de estanqueidade das buchas.

2.2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – PUBLICAÇÕES DO CIGRÉ

Ao longo dos seus mais de 100 anos de existência, o CIGRE tem atuado ativamente na disseminação de documentos técnicos sobre transformadores e buchas. Estes documentos buscam apresentar tendências regionais e globais acerca da experiência das concessionárias com a confiabilidade e a manutenção das buchas. Na tabela 2, abaixo, é possível observar as principais publicações sobre o tema feitas pelo CIGRE e pelo CIGRE Brasil.

TABELA 2 – Principais publicações do CIGRE sobre buchas

Número	Ano	Título	Contribuição
755	2019	"Transformer bushing reliability"	Apresenta profunda revisão sobre o funcionamento de buchas, taxas de falha, modos de falhas, técnicas de monitoramento e diagnóstico e aspectos sobre armazenagem de buchasTransformadores Imersos em Líquidos Isolantes – Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade
642	2015	"*Transformer reliability survey*"	Apresenta um estudo global sobre confiabilidade de transformadores e, nesse contexto, apresenta o impacto das buchas na confiabilidade do transformador
015	2013	"Guia de Manutenção para Transformadores de Potência"	Contribuição do sistema de monitoramento online de buchas para o processo de manutenção
005	2007	"Transformadores Imersos em Líquidos Isolantes – Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade"	Apresenta a bucha como um sistema de conexão do transformador e boas práticas de manutenção deste sistema
088	1983	"*An international survey on failures in large power transformers*"	Apresenta as primeiras estatísticas de falhas em buchas ainda para um grupo pequeno de países (13)

O CIGRÉ possui a boa prática de compilar dados reais de falhas em equipamentos entre as concessionárias do mundo. O primeiro trabalho de transformadores deste tipo data de 1983 e até hoje é uma referência para estudos sobre falhas em transformadores,[11]. Neste estudo, realizado por 13 países (Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Tchecoslováquia, França, Finlândia, Itália, Japão, Suíça, Reino Unido, Estados Unidos e União Soviética), foi identificado que 19,17% das falhas em transformadores de potência eram acarretadas por falhas em buchas.

No Brasil, em 2007, o CIGRÉ Brasil publicou um guia de manutenção centrada na confiabilidade para transformadores imersos em líquido isolantes,[12]. Nele, o CIGRÉ apresenta a bucha como o componente principal do sistema de conexão do transformador e os modos de falha deste sistema. Para este sistema, a brochura recomenda como boa prática a realização de inspeção termográfica, a inspeção visual e o controle de carregamento do equipamento.

Em 2013, O CIGRE Brasil publicou um guia de manutenção para transformadores de potência,[13]. Nele, são detalhados os modelos de monitoramento online de buchas condensivas e como o monitoramento online pode ser utilizado para melhorar o processo de manutenção de transformadores.

Em 2015, foi publicado o último estudo global do CIGRÉ acerca da confiabilidade de transformadores,[14]. Nesta brochura (642), é apresentado que a bucha é um dos principais locais de falha em transformadores, aumentando a proporção no histórico de falhas conforme o nível de tensão. Para transformadores com nível de tensão entre 500 ≤ kV ≤700, a bucha representa aproximadamente 30% do total de falhas de transformadores. A brochura enfatiza também que falhas em buchas possuem um agravante de estarem relacionadas com incêndios e explosões nos transformadores.

Em 2019, o CIGRE publicou a brochura 755, dedicada exclusivamente ao estudo da confiabilidade de buchas, [15]. Esta brochura apresenta uma profunda revisão sobre o funcionamento das buchas, em especial as buchas condensivas e apresenta taxas de falha, modos de falhas, técnicas de monitoramento e diagnóstico e aspectos sobre armazenagem de buchas

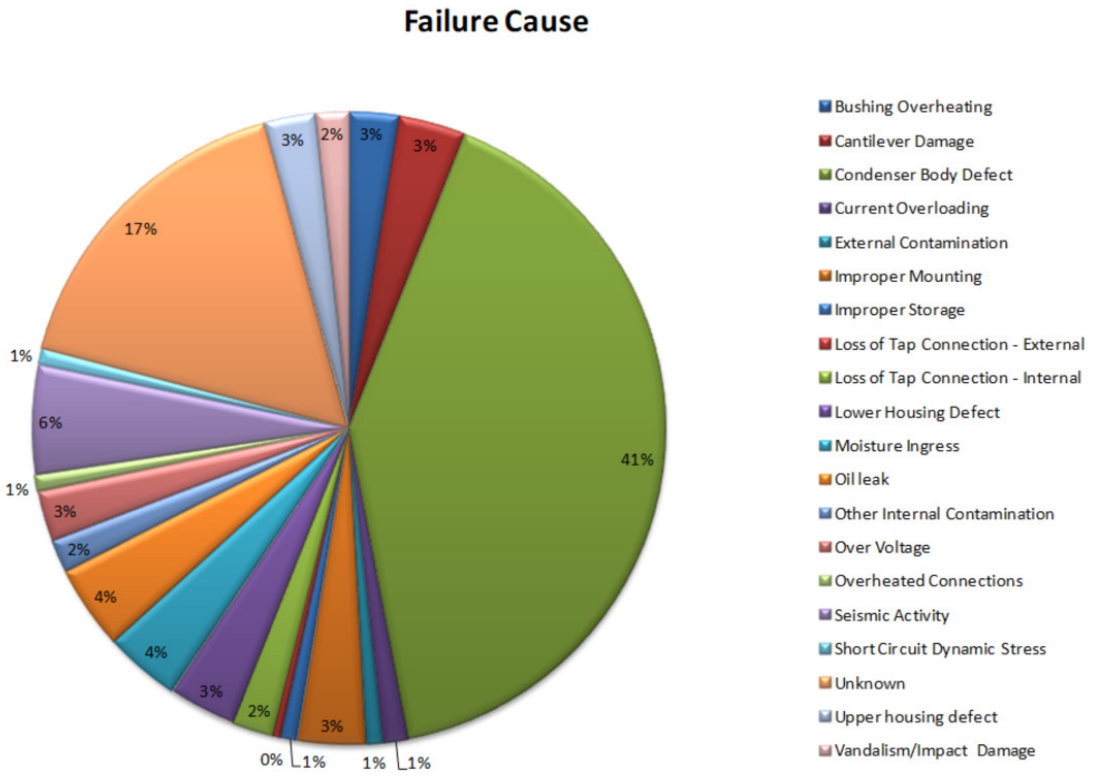


Figura 3 – Apresentação dos dados de razão da falha de buchas trazido pela brochura 755 do Cigre. A contribuição desta brochura foi extremamente relevante para o tema.**3 RESULTADOS:**

Os resultados deste estudo aprofundam a compreensão de como a evolução das normas técnicas sobre buchas de alta tensão tem sido essencial para o avanço tecnológico desse componente, desde seu projeto até sua operação em sistemas elétricos de potência. A análise histórica das normas IEEE e IEC revelou que as primeiras regulamentações se concentravam principalmente nos aspectos básicos de isolamento e resistência mecânica, enquanto as versões mais recentes incorporaram parâmetros técnicos mais avançados, como capacidades de suportar tensões mais elevadas, melhoria no desempenho dielétrico e maior resistência a esforços térmicos e ambientais. Essa evolução normativa refletiu as necessidades de um setor elétrico cada vez mais exigente, que demandava soluções mais

robustas e eficientes para garantir a confiabilidade dos sistemas de transmissão e distribuição de energia.

No contexto da especificação técnica, as normas passaram a definir com maior precisão os requisitos elétricos, como o fator de dissipação (tangente delta) e as correntes de fuga permitidas, além de introduzir limites mais restritos para capacitâncias e perdas elétricas. Essas mudanças promoveram o uso de materiais inovadores, como polímeros e novos compostos cerâmicos, que ofereceram vantagens em termos de durabilidade e isolamento, substituindo as tradicionais buchas de porcelana em várias aplicações. No que se refere à manutenção, as normas evoluíram para incluir protocolos detalhados de inspeção e monitoramento contínuo, recomendando o uso de sistemas de diagnóstico online, como a medição de descargas parciais e a análise de gases dissolvidos. Essas ferramentas de diagnóstico tornaram-se cruciais para identificar falhas incipientes e permitir ações corretivas antes que ocorressem interrupções graves no sistema.

Ademais, a padronização dos ensaios de tipo, de rotina e especiais foi outro aspecto relevante destacado nos resultados. As normas mais recentes estipulam critérios rigorosos para os ensaios dielétricos em corrente alternada (CA), em corrente contínua (CC) e os ensaios de impulso atmosférico e de manobra, com o objetivo de garantir que as buchas suportem condições operacionais adversas e transitórias. A harmonização desses requisitos a nível global facilitou a comparação de equipamentos entre diferentes fabricantes e garantiu que os produtos atendessem a critérios de segurança e confiabilidade uniformes. Em última análise, o estudo demonstra que a contínua revisão das normas técnicas foi decisiva não só para o aprimoramento da qualidade e da eficiência das buchas de alta tensão, mas também para o aumento da vida útil e a redução dos custos operacionais associados à manutenção e falhas, consolidando-as como componentes essenciais para a robustez dos sistemas de energia modernos.

4 CONCLUSÃO:

Portanto, este estudo sobre a evolução histórica das normas técnicas de buchas de alta tensão destaca a importância vital dessas regulamentações no desenvolvimento tecnológico desse equipamento ao longo do último século. A análise das normas IEEE e IEC demonstrou que a adaptação contínua às necessidades de um sistema elétrico em constante transformação foi fundamental para aprimorar não apenas o desempenho elétrico e mecânico das buchas, mas também para garantir maior segurança e confiabilidade em sua operação.

O estudo revelou que as atualizações das normas influenciaram diretamente o design e a especificação técnica das buchas, promovendo o uso de materiais e tecnologias mais avançadas, como a substituição progressiva das buchas de porcelana por materiais compostos de maior resistência e durabilidade. Essas inovações tecnológicas, acompanhadas por ensaios mais rigorosos e critérios de manutenção detalhados, resultaram em equipamentos com maior longevidade e menor incidência de falhas, contribuindo para a redução dos custos de operação e manutenção.

Além disso, a padronização dos ensaios de tipo e de rotina proporcionou uma maior uniformidade de qualidade entre fabricantes e regiões, estabelecendo padrões globais que facilitaram a interoperabilidade e a troca de informações técnicas. As normas mais recentes também fortaleceram o papel da manutenção preditiva e preventiva, introduzindo ferramentas de monitoramento e diagnóstico que possibilitaram intervenções mais precisas e eficazes.

Em suma, a evolução das normas técnicas de buchas de alta tensão não apenas impulsionou o desenvolvimento de equipamentos mais robustos e eficientes, como também estabeleceu diretrizes essenciais para a manutenção e operação segura dos sistemas elétricos de potência. Com base nesses resultados, é possível afirmar que o contínuo aprimoramento das normas é indispensável para acompanhar as demandas futuras de sistemas de energia cada vez mais complexos e interconectados, garantindo a confiabilidade e a sustentabilidade desses sistemas.

Desta forma, esta primeira etapa da brochura técnica de confiabilidade de buchas de transformadores - condensada neste trabalho para o Workspot 2024 - permite entender como este equipamento se desenvolveu até chegar na forma e condições que o encontramos hoje. Esta tarefa é crucial pois forma o alicerce técnico e histórico para as demais etapas da brochura.

BIBLIOGRAFIA

[1] A. Meyers, "High-tension outlets," in Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 26, no. 2, pp. 167-182, Feb. 1907, doi: 10.1109/PAIEE.1907.6742207.

[2] "AIEE Apparatus Bushings and Proposed Test Code," in AIEE No 21-1941 , vol., no., pp.1-14, 28 Feb. 1941, doi: 10.1109/IEEESTD.1941.7370870.

[3] "American Standards Requirements and Test Code for Outdoor Apparatus Bushings," in IEEE No21-1964(ASAC76.1-1964),vol.,no.,pp.1-20,31 July 1964, doi: 10.1109/ IEEESTD. 1964.7370858.

[4] "IEEE General Requirements and Test Procedure for Outdoor Apparatus Bushings," in ANSI/IEEE Std: Outdoor Apparatus Bushings , vol., no., pp.1-15, 30 Nov. 1976, doi: 10.1109/IEEESTD.1976.120671.

[5] "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings," in IEEE Std C57.19.100-1995 , vol., no., pp.1-32, 1 Dec. 1995, doi: 10.1109/IEEESTD.1995.79071.

[6] "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors," in IEEE Std C57.152-2013 , vol., no., pp.1-121, 21 June 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6544533.

[7] "IEC/IEEE International Standard -- Bushings for DC application," in IEC/IEEE 65700-19-03 Edition 1.0 2014-07 , vol., no., pp.1-56, 10 July 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6853297.

[8] "IEEE Guide for On-Site Acceptance Tests of Electrical Equipment and System Commissioning of 1000 kV AC and Above," in IEEE P1861/D5.2, April 2014 , vol., no., pp.1-63, 1 Aug. 2014.

[9] "IEEE Guide for the Dielectric Frequency Response Measurement of Bushings," in IEEE Std C57.12.200-2022 , vol., no., pp.1-84, 27 Jan. 2023, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.10026269.

[10] "IEEE Standard for General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings," in IEEE Std C57.19.00-2023 (Revision of IEEE Std C57.19.00-2004) , vol., no., pp.1-32, 15 May 2023, doi: 10.1109/IEEESTD.2023.10123335.

[11] An international survey on failures in large power transformers - Reference: ELT_088_1 - 1983. URL: https://www.e-cigre.org/publications/detail/elt-088-1-an-international-survey-on-failures-in-large-power-transformers.html

[12] BT 005 - “Transformadores Imersos em Líquidos Isolantes – Guia de Manutenção Centrada na Confiabilidade”, CIGRÉ Brasil, URL: https://cigre.org.br/ce-a2/

[13] BT 015 - “Guia de Manutenção para Transformadores de Potência”, CIGRÉ Brasil, URL: https://cigre.org.br/ce-a2/

[14] Transformer reliability survey - Reference: 642 – 2015. URL: https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html

[15] Transformer bushing reliability - Reference: ELT_303_3 – 2019. URL: https://www.e-cigre.org/publications/detail/elt-303-3-transformer-bushing-reliability.html