

Capítulo V

Arcos internos em equipamentos de subestações

Por Sérgio Feitoza Costa*

Nesta série de fascículos, são apresentados conceitos de engenharia para projeto e especificação de equipamentos de subestações de transmissão e de distribuição. O primeiro capítulo da série cobriu aspectos dos estudos do sistema elétrico que servem de base para as especificações técnicas dos equipamentos. O segundo abordou conceitos sobre curtos-circuitos, ampacidades, sobrecargas e contatos elétricos. O terceiro artigo abordou o tema “Técnicas de ensaios de alta potência, laboratórios de ensaios e principais ensaios”. E o quarto capítulo tratou de estudos elétricos de sobretensões, coordenação de isolamento e impactos de campos elétricos e magnéticos.

Neste quinto capítulo, o tema abordado será “Arcos internos em equipamentos de subestações”, com ênfase na brochura Cigré 302 – Ferramentas para a simulação dos efeitos de arco interno na transmissão e distribuição. Este documento único foi publicado pelo Cigré Internacional em dezembro de 2014. O autor deste fascículo, Sérgio Feitoza Costa, participou desde o início dos grupos de trabalho dos grupos de trabalho Cigré WG A3-20 e WG A3-24, sendo um dos coautores da brochura.

ARCOS INTERNOS E QUALIFICAÇÃO DE PRODUTOS: QUAIS NORMAS TÉCNICAS UTILIZAR?

Nos últimos anos, vários artigos têm sido publicados no Brasil sobre arcos

internos em painéis de médias e baixas tensões. A ideia do texto a seguir não é ser mais uma repetição do tema, mas convém lembrar um aspecto das normas técnicas. Ensaio de arcos internos em painéis são ensaios de tipo para os painéis de média tensão (IEC 62271-200), mas infelizmente ainda não são ensaios de tipo para os painéis de baixa tensão (IEC 61439). O mercado comprador, entretanto, exige cada vez mais, com fundamento, que os fabricantes de painéis de baixa tensão comprovem que o equipamento foi testado e aprovado no ensaio da IEC TR 61641.

A norma IEC 61439-1:2009, publicada há seis anos, encontra-se, na ABNT, há dois anos em tradução e adaptação para o português. Seria bem-vindo e original se a comissão da ABNT aproveitasse a oportunidade para listar o ensaio de arco interno nos painéis com correntes de arco maiores que 40 kAef, como um ensaio de tipo. Se isso fosse realizado na norma brasileira, poderia se fazer o mesmo com a IEC, tendo uma boa chance de sucesso. Fica aqui a ideia!

Falando sobre normas, cabe lembrar que ninguém é obrigado a utilizar normas brasileiras de painéis e outros produtos pelo simples fato de serem normas brasileiras. Normas técnicas são instrumentos que servem de referência aos contratos entre comprador e vendedor e estes são livres para escolher as normas que bem entenderem. É mais razoável usar uma norma IEC recente do que usar uma antiga norma brasileira

traduzida de uma norma IEC já superada no mercado internacional.

As únicas exceções a isso são as normas atreladas a produtos de certificação compulsória. Tais produtos só podem ser comercializados no país se forem certificados pelo Inmetro e, como exemplo, temos os plugues e tomadas para uso doméstico, interruptores para instalações elétricas fixas domésticas, alguns cabos de potência de baixa tensão e equipamentos para atmosferas explosivas. No Inmetro, além da certificação compulsória, existe a possibilidade de certificar certos produtos nas modalidades de certificação voluntária (por exemplo, instalações de baixa tensão) e em programas de etiquetagem voluntária (como transformadores de distribuição em óleo) e compulsória (como certos motores elétricos e refrigeradores). Nenhuma dessas possibilidades se aplica a painéis elétricos de baixa ou média tensão.

FERRAMENTAS PARA A SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DE ARCO INTERNO EM EQUIPAMENTOS DE MANOBRA DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO (BROCHURA CIGRÉ 602)

Em dezembro de 2014, foi publicada a Brochura Cigré 602 (<http://www.e-cigre.org/Search/resultatREF.asp#>), único documento que foi publicado e detalhado sobre o assunto. Participaram de sua preparação 21 especialistas de 15 países, entre os quais o autor deste fascículo,

Sergio Feitoza Costa, que participou, desde o início, em 2007, dos grupos de trabalho Cigré WG A3-20 e WG A3-24. Em 2007, para se ter uma ideia, uma das reuniões do grupo de trabalho aconteceu no Rio de Janeiro por ocasião do evento internacional realizado pelo Cigré – SC A3 Technical Colloquium.

Reconhecendo o papel crescente do uso de simulações de alguns ensaios, o Cigré internacional estabeleceu o grupo de trabalho WG A3.20, que depois foi substituído pelo WG A3-24. As tarefas iniciais foram de avaliar ferramentas de simulação e em que medida poderiam ser usadas. Conclui-se que a simulação é uma ferramenta de desenvolvimento valiosa e que pode prever o desempenho de um equipamento, pelo menos quando se está comparando alguns resultados com outros resultados de um projeto já testado e simulado. O WG A3.24 continuou as análises com um foco específico em testes de arco interno em equipamentos de média

e alta tensão isolados a SF6 e a ar.

Há várias normas mundiais sobre equipamentos resistentes a arco interno. Algumas, como a IEC 62271-200, permitem que o SF6 seja substituído por ar durante o teste de arco interno. Outras, como a IEEE Std C37.20.7, não tratam de equipamentos isolados a SF6. Por último, existem normas, como a IEC 62271-203, que permitem a extensão de resultados dos testes por métodos de cálculo. A futura IEC 62271-307 tratará da extensão da validade de relatórios de ensaios feitos segundo a IEC 62271-200. Esta norma, atualmente em preparação, terá impacto no mercado de painéis de média tensão e será tratada em um capítulo desta série mais a frente.

Na brochura fica claro que a realização desses testes é muito importante do ponto de vista da segurança, embora seja econômico e ambientalmente proibitivo testar todas as variações de um determinado projeto de painel. Nesse sentido, o trabalho do WG e a brochura resultante dele foram

montados para analisar os efeitos do arco interno, pesquisar as ferramentas e modelos computacionais disponíveis e aconselhar que alguns testes possam ser substituídos por simulações de computador. Algumas motivações e resultados específicos foram:

- avaliar os métodos de cálculos de sobrepressão e fazer análises comparativas com resultados de testes realizados;
- reduzir o número de ensaios de arco interno por razões ambientais;
- verificar os impactos de modificações de projeto da por meio de simulações (interpolação de resultados de teste);
- verificar a validade da substituição de SF6 por ar durante os testes de arco interno.

O WG A3.24 começou o trabalho pela revisão da literatura existente (mais de 100 artigos e normas técnicas) e pela coleta de dados de teste a partir de inúmeros testes de arco interno. Os dados de teste foram coletados a partir de mais de 80 casos

diferentes com tamanhos de invólucros que vão desde volumes de menos de cinco litros até grandes tanques de GIS (1.200 litros). As correntes de falta variaram de 12 kA a 63 kA, com durações de falhas que vão desde 10 ms a 1,2 s.

Foram analisados desde invólucros simples até equipamentos com vários compartimentos isolados a SF6 e ar. Ao longo das análises, houve foco nos três efeitos principais de um arco interno que são: (a) o aumento de pressão; (b) as solicitações mecânicas no invólucro, instalações e paredes causadas pela sobrepressão interna; e (c) o efeito “burn-through” no sentido de furar o invólucro quando a corrente de arco estacionaria em um certo ponto.

No grupo de trabalho, as avaliações foram feitas com ferramentas de software que variaram desde as “feitas em casa” até ferramentas CFD complexas e caras. Do ponto de vista do cálculo da sobrepressão pode-se perceber que, mesmo com as ferramentas mais simples, o pico de pressão foi calculado dentro de 10% a 20% do pico medido, o que indicou que o uso da ferramenta mais simples deve ser explorado. Considerando esta conclusão, o WG desenvolveu um conjunto de “equações básicas” que validaram o modelo matemático para mais de 70 casos.

Verificou-se que o cálculo das curvas de pressão no interior do compartimento do arco durante uma falha de arco interno dá boa concordância entre o teste e a simulação, desde que a energia do arco seja conhecida. Estes resultados são descritos detalhadamente na brochura.

Entre os tópicos detalhadamente cobertos na brochura estão os seguintes:

- a)** Cálculo da pressão por modelo analítico incluindo as equações do modelo, parâmetros e limites da aplicação;
- b)** Aplicação do modelo para casos de teste selecionados em vários arranjos de ensaios, incluindo painéis de média tensão e alta tensão isolados a SF6 e a ar;

- c)** Cálculos de energia, evaporação de metais e ablação de isoladores;
- d)** Misturas de gases em compartimentos;
- e)** Uso de absorvedores de arco no fluxo de escape;
- f)** Velocidades de dispositivo de abertura de alívio;
- g)** Uso de CFD é utilizado para simulação de arco interno;
- h)** Análises de sensibilidade aos diversos parâmetros;
- i)** Comparação dos efeitos de um mesmo arco interno em ar ou no SF6;
- j)** Normalização técnica e interpretação de resultados de testes (diferenças ar e SF6);
- k)** GIS > 52 kV (IEC 62271-203) e cubículos ≤ 52 kV (IEC 62271-200, -201, IEEE C37.20.7);
- l)** Solicitações mecânicas devido às sobrepressões nos invólucros e nas paredes da sala;
- m)** Construção de paredes, parâmetro crítico no projeto civil e área de abertura da sala;
- n)** Critérios para avaliação de estresse da parede;
- o)** “Burn-through: avaliação da

- possibilidade de furar o invólucro e fórmulas;
- p)** Avaliação do tempo de queima em invólucros de alumínio e aço;
- q)** Avaliação de parâmetros de projeto;
- r)** Sensores de pressão e absorção do arco por indicadores;
- s)** Efeitos da ligação do neutro durante ensaios.

No que diz respeito aos modelos de cálculo utilizados, algumas observações são mostradas na tabela a seguir. Eles estariam em um ponto intermediário entre o modelo básico e o de alta complexidade.

Um exemplo de software que estaria em um ponto intermediário a estes dois é o software Switchgear Design desenvolvido pelo autor deste fascículo. Entretanto, este não se aplica apenas a simulações de ensaios de arco interno, mas permite também simulações de ensaios de elevação de temperatura e de forças eletrodinâmicas, assim como a avaliação de campos magnéticos e elétricos, tensões induzidas, etc. conforme pode ser observado em http://www.cognitor.com.br/TR_071_ENG_ValidationSwitchgear.pdf

TABELA 1 – COMPARAÇÕES DOS MODELOS DE CÁLCULOS UTILIZADOS

	<i>Aplicação</i>	<i>Limitações</i>
Modelo básico (simplificado)	Para calcular rapidamente o aumento da pressão dentro de um compartimento de arco e no volume de escape em painel típico de média tensão e em aplicações GIS de alta tensão.	Não considera não uniformidade de parâmetros do gás (pressão, temperatura, densidade) no volume; Não aplicável se a área de abertura do alívio for muito grande em relação ao volume do compartimento; Os cálculos não se mostraram confiáveis, quando a temperatura do gás excede 2.000 K para SF6 e 6.000 K para o ar; Não considera misturas de gases no compartimento; Não aplicável a grandes salas de instalação (> 50 m ³).
Modelo CFD (alta complexidade)	Para calcular a distribuição de pressão espacial e fluxo de gás em formas de geometria complexas e em grandes salas.	Alto esforço para a modelagem e malhas para o equipamento e a sala; Requer grande capacidade computacional.

Os seguintes estudos de caso são detalhados na brochura para painéis de média tensão isolados a ar (dados de entrada).

TABELA 2 – DADOS DE ENTRADA DE PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO ISOLADOS A AR

Caso número	A22	B27	C70	D14	
Volume compartimento de arco (V_1)	0,509	0,509	0,648	0,27	m ³
Volume compartimento exaustão. (V_2)	>1.000	1.275	>1.000	0,58	m ³
Volume da sala de instalação (V_3)	n/a	>1.000	n/a	>1.000	m ³
Pressão inicial de enchimento do volume 1	150	160	100	120	kPa abs ar
Pressão inicial de enchimento do volume 2	100	100	100	100	kPa abs ar
Área de alívio de pressão entre volumes 1 e 2	0,00456	0,00456	0,0763	0,049	m ²
Atuação do dispositivo de alívio	276	285	35,3	220	kPa rel
Área de alívio de pressão entre volumes 2 e 3	0	0,010	0	0,195	m ²
Corrente de curto-circuito	14,5	14,5	14,5	38,8	kA ef
Número de fases	1	1	2	3	
Tensão média fase-terra	314	424	400	250	V
Fator KP	0,4	0,55	0,7	0,6	

Os seguintes casos são detalhados na brochura para painéis de media tensão isolados a SF6 (dados de entrada).

TABELA 3 – DADOS DE ENTRADA DE PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO ISOLADOS A SF6

Caso número	E24	F3	G13	
Volume compartimento de arco (V_1)	0,509	1.217	0,27	m ³
Volume compartimento exaustão. (V_2)	>1.000	>1.000	0,58	m ³
Volume da sala de instalação (V_3)	NA	NA	>1.000	m ³
Pressão inicial de enchimento do volume 1	150	166	120	kPa abs SF ₆
Pressão inicial de enchimento do volume 2	100	100	100	kPa abs arr
Área de alívio de pressão entre volumes 1 e 2	0,00456	0,062	0,049	m ²
Atuação do dispositivo de alívio	310	1.400	220	kPa rel
Área de alívio de pressão entre volumes 2 e 3	NA	NA	0,195	m ²
Corrente de curto-circuito	14,2	25	38	kA ef
Número de fases	1	3	3	
Tensão média fase-terra	350	1.700	400	V
Fator KP	0,75	0,7	0,76	

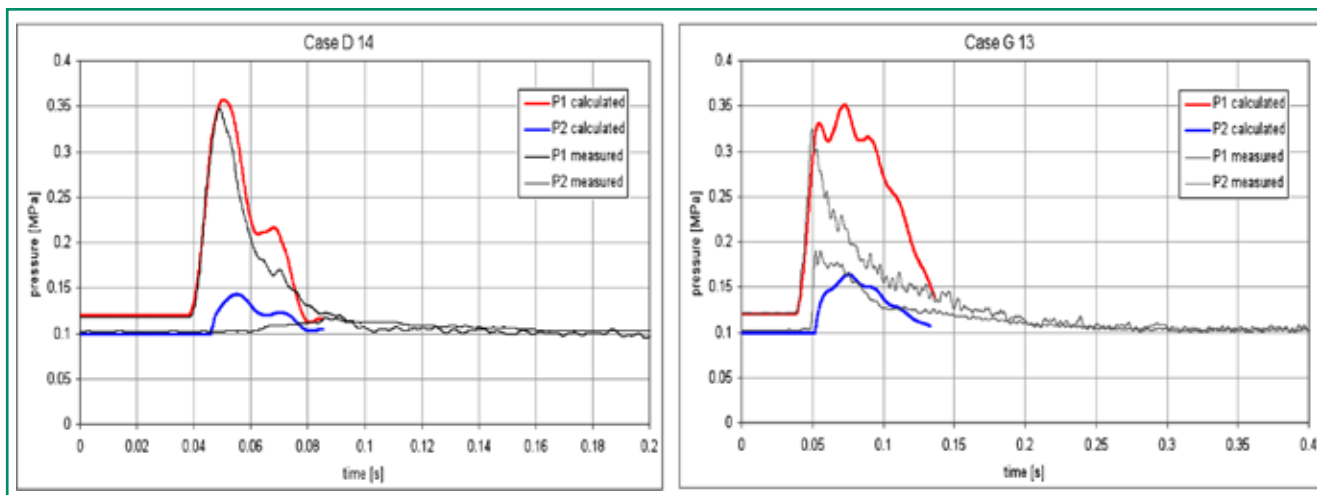


Figura 1 – Gráficos mostram os resultados das pressões V1 e V2 dos estudos de caso D14 e F3 referenciados nas Tabelas 2 e 3.

Na seção B.4 da brochura é referenciado o artigo "Guidelines for the use of simulations and calculations to replace some tests

specified in international standards", de autoria de Sérgio Feitoza. Este trabalho foi apresentado em 2010 ao CB-3 da ABNT

como uma proposta para a execução de uma nova norma ABNT chamada "Orientações para o uso de simulações

para extrapolar resultados de alguns ensaios de alta potência especificados nas normas ABNT”.

Por razões difíceis de entender, a ideia não foi aceita pela ABNT, embora tivesse o apoio de mais de 20 empresas que queriam participar das reuniões da comissão de estudos. Entre os interessados estavam 15 fabricantes de equipamentos de altas e baixas tensões, principalmente painéis, laboratórios de ensaios, certificadora, concessionárias de energia e grandes usuários de equipamentos para subestações.

No Brasil não se consegue perceber o erro estratégico que é levar anos para traduzir normas técnicas IEC que foram publicadas muitos e muitos anos antes. Enquanto isso continuamos a andar para trás na lista dos países em desenvolvimento. Há cerca de 15 anos, havia um entendimento bem melhor destes aspectos. No artigo “Como podem as normas IEC ajudar a reduzir o gap entre

os países em desenvolvimento”, que pode ser encontrado no site www.cognitor.com.br, há uma discussão sobre este tema. A proposta básica é trabalhar junto à IEC no sentido de que ela, ao publicar certas normas, também sejam publicadas em português, como já acontece na língua espanhola e alguns outros idiomas.

No caso do texto referenciado na seção B.4 da brochura, o escopo da norma seria apresentar orientações para a sistematização do uso de simulações e cálculos utilizáveis para substituir alguns ensaios de laboratório em situações em que o senso comum mostra ser razoável fazê-lo. O caso mais frequente é a extrapolação de resultados de ensaios feitos em laboratório, em um certo equipamento, para prever os resultados do mesmo ensaio em um equipamento com características próximas ao já testado, mas que não foi testado. O uso de simulações para substituir ensaios só é possível quando determinadas medições e registros são especificadas

nas normas relevantes de produtos e, em decorrência, estão disponíveis no relatório de ensaios. Neste sentido, a nova norma descreveria as medições mínimas e os registros fotográficos que devem ser feitos e registrados em relatórios de ensaios de laboratório especificados em normas de produtos.

Tais medições e registros fazem com que o ensaio seja reprodutível e seu relatório útil para o posterior uso em simulações. Estas medições e registros também ajudam os usuários a identificar se um produto comercializado é semelhante ao que foi efetivamente ensaiado em laboratório. Atualmente, existe uma falta de dados para a validação dos resultados de simulações em comparação com resultados de ensaios de laboratório. São todas medições e registros de baixo custo e de realização simples.

Não seria um objetivo da nova norma apresentar métodos de cálculo para a simulação de ensaios. Considera-se que um

modelo ou método é aceitável quando ele produz resultados que podem ser validados dentro das tolerâncias aceitáveis e, além disso, a validação possa ser demonstrada de forma objetiva e transparente aos usuários. Embora os conceitos apresentados sejam aplicáveis a qualquer equipamento elétrico, as aplicações mais visíveis são nos seguintes equipamentos de altas e baixas tensões: painéis e quadros, barramentos e dutos blindados, disjuntores, seccionadores, chaves, religadores automáticos, fusíveis e transformadores.

Seriam especificadas tolerâncias máximas para as diferenças obtidas entre os métodos de simulação e os resultados que ocorreriam no ensaio de laboratório especificado na norma do produto relevante. Os valores típicos de tolerâncias aceitáveis dos resultados obtidos nas simulações, quando comparados com os resultados do ensaio de laboratório, são mostrados na Tabela 4.

Para o caso dos ensaios de arco interno, os dados de entrada mínimos a serem registrados em relatórios de ensaios de arco interno emitidos por laboratórios são os seguintes:

TABELA 4 – VALORES TÍPICOS DE TOLERÂNCIAS ACEITÁVEIS

Tipo de ensaio	Parâmetro a comparar	Valores típicos de tolerâncias aceitáveis
Ensaio de elevação de temperatura	Elevações de temperaturas nas partes sólidas e fluidas	1% a 5%
Ensaio de arco interno	Sobrepresão no invólucro acima da pressão atmosférica (crista e duração)	5% a 10%
Ensaio de correntes suportáveis de curta duração e de crista	Forças eletrodinâmicas e tensões mecânicas	5% a 15%

- Corrente elétrica circulante;
- Materiais utilizados nos condutores e partes isolantes;
- Fluido que envolve os equipamentos dentro de um compartimento;
- Posição e geometria espacial dos condutores;
- Volume do fluido no interior dos compartimentos;
- Área dos dispositivos de alívio de sobrepresão e sua velocidade de abertura;
- Entrada e áreas de saída para ventilação, assim como a existência de dispositivos que as fechem no momento de um arco interno;
- Posição relativa dos equipamentos em relação às paredes e teto.

Por razões de reprodutibilidade do ensaio, a medição da sobrepresão ao longo do ensaio deve ser medida e registrada no relatório de ensaio de laboratório. Os valores dos dados que afetam o resultado do ensaio devem ser claramente registrados no relatório de ensaios através de fotografias e/ou desenhos.

Na Figura 2 a seguir, são mostradas impressões fotográficas da liberação de gases quentes, como resultado da formação de arco em SF6 (coluna da esquerda) e do ar (coluna da direita) para uma falha de 14,2 kA, Arc 1 s. As fotografias são tiradas com um intervalo de 0,2 s.



Figura 2 – Fotografias da liberação de gases quentes a partir de arco elétrico em SF6 (esquerda) e ar (direita).

**Sergio Feitoza Costa é engenheiro eletricista, com mestrado em sistemas de potência. É diretor da Cognitor, Consultoria, P&D e Treinamento.*

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudedeeditorial.com.br