



GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

ENSAIO DE TENSÃO APLICADA NO CAMPO: EXPERIÊNCIA CHESF EM MÓDULOS HÍBRIDOS COMPACTOS – MOTIVAÇÃO, ACOMPANHAMENTO E RESULTADOS

**RENATO DE SOUSA NASCIMENTO*(1); FABIO NEPOMUCENO FRAGA(2); LUCIANO RIBEIRO DO VALE
JARDELINO DA COSTA(3); MARCOS ANTÔNIO ROLIM VILLA VERDE(4); MARCELO AUGUSTO BASTOS
DA SILVA(5);
COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO**

RESUMO

Devido ao registro de falhas com os módulos híbridos compactos existentes nas instalações da Chesf, solicitou-se ao fornecedor a inclusão de ensaios mais rigorosos, em campo, como condicionante para a aceitação dos equipamentos reparados, incluindo a realização do ensaio de tensão aplicada à frequência industrial, com valores similares aos aplicados em fábrica. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a experiência da Chesf com a realização do ensaio de tensão aplicada em campo nestes equipamentos, a fim de detalhar motivação, desafios para realização, resultados obtidos durante os respectivos ensaios bem como os ganhos em segurança às instalações associados.

PALAVRAS-CHAVE

Módulo híbrido compacto, tensão aplicada à frequência industrial.

1.0 INTRODUÇÃO

A tecnologia de conjuntos de manobra compactos (conforme IEC 62271-205 *compact switchgear assemblies*), ou conforme comumente referida de Módulos Híbridos Compactos, implica na adoção de equipamentos constituídos por componentes isolados a ar (apenas *Air Insulated Switchgear – AIS*), ou envolvendo também dispositivos isolados a gás (*Gas Insulated Switchgear – GIS*) – sendo o SF₆ até o momento o principal meio isolante empregado em conjunto com a isolamento a ar em aplicações no Brasil – constituindo dessa forma a tecnologia híbrida.

A concepção de uma subestação a partir de módulos híbridos compactos possui uma série de vantagens em relação à solução convencional – que emprega equipamentos distintos para a mesma funcionalidade –, tais como baixa taxa de falhas, implicando em reduzida necessidade de manutenção ao longo da vida útil do equipamento e custos associados, ganho de prazo de execução, por envolver menor necessidade de construção de fundações e montagem de suportes, logística otimizada e instalação mais rápida por concentrar vários equipamentos em mesmo conjunto, além de ser uma solução bastante adequada para regiões de pouca disponibilidade de espaço físico.

Como desvantagens em relação à concepção de projeto com aplicação de módulos híbridos compactos temos o maior preço associado ao equipamento comparado à aquisição dos equipamentos necessários para a solução convencional, bem como o fato de que a indisponibilidade de qualquer componente implica na indisponibilidade da função de transmissão associada durante os eventuais reparos necessários.

A fim de incorporar a tecnologia às suas instalações e visando aos ganhos de prazo associados, a engenharia de subestação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – Chesf – decidiu, durante o desenvolvimento dos projetos básicos das subestações dos empreendimentos arrematados pela mesma referentes aos leilões de transmissão 06/2011-ANEEL e 03/2012-ANEEL, aplicar módulos híbridos compactos na concepção das novas subestações a serem implantadas, em parceria com tradicional e renomado fabricante.

Em virtude desta parceria, elaboraram-se projetos para 09 (nove) subestações, todos com a aplicação da tecnologia de módulos híbridos compactos, totalizando 86 (oitenta e seis) módulos híbridos adquiridos, sendo 43 (quarenta e três) na tensão nominal de 245 kV, aplicados ao setor 230 kV, 06 (seis) na tensão nominal de 145 kV, aplicados ao setor 138 kV e 37 (trinta e sete) na tensão nominal de 72,5 kV, aplicados ao setor 69 kV. Desta forma, a Chesf tornou-se a transmissora do Brasil com o maior número de módulos híbridos em operação comercial, com destaque para o nível de 230 kV, para o qual, até aquele momento, a Chesf não possuía qualquer solução diferente da convencional. A Figura 1 evidencia módulos híbridos compactos em diferentes aplicações instalados no sistema Chesf.



Figura 1 – Subestação projetada com a tecnologia de módulos híbridos compactos

Como resultado da absorção da tecnologia, podemos apontar, por exemplo, a aplicação de módulos híbridos compactos em soluções de seccionamento de barras em subestações de pouca disponibilidade de terreno, algo viabilizado também pelo fato de a engenharia da Chesf já possuir experiência com esta tecnologia. A Figura 2 exemplifica a importância da solução para esta aplicação, onde observamos que toda a função de seccionamento é realizada com a utilização de pouco espaço físico graças à tecnologia de módulos híbridos compactos. Neste caso, o equipamento possui seccionadores, disjuntor e transformadores de corrente. Com a solução convencional, todos estes equipamentos estariam instalados de maneira individual, com bases e suportes próprios, demandando espaço físico não disponível para este caso.



Figura 2 – Tecnologia de Módulos Híbridos Compactos aplicada a seccionamento de barras

Porém, outro desafio também enfrentado ao longo dos anos com a tecnologia de módulos híbridos compactos se trata da tomada de decisão para a aceitação de equipamentos para os quais foi detectado algum problema que demandasse um reparo, como os casos de falhas durante a energização ocorridas em algumas ocasiões com equipamentos adquiridos pela Chesf.

Considerando-se que para efetuar qualquer intervenção interna ao equipamento é necessária sua desmontagem e substituição por um equipamento reserva de mesmas funcionalidades, é fundamental que requisitos mais rigorosos sejam solicitados a fim de garantir a eficácia de todo o processo de reparo, transporte e manuseio realizados na peça defeituosa.

Portanto, a fim de assegurar um maior nível de confiança para aceitação de equipamentos eventualmente retrabalhados, a Chesf passou a exigir, além dos demais ensaios tradicionalmente executados num comissionamento, a realização do ensaio de tensão aplicada à frequência industrial, em alta tensão, em níveis similares aos aplicados durante os ensaios de rotina em fábrica.

2.0 REQUISITOS DE NORMA QUANTO A ENSAIOS DE ROTINA

A norma que versa os requisitos para ensaios de rotina de módulos híbridos compactos se trata da IEC 62271-205, que define, dentro do escopo de ensaios, a realização do ensaio de tensão aplicada à frequência industrial no circuito principal.

O ensaio consiste na aplicação de tensão alternada nos terminais do equipamento, durante intervalo especificado, de modo que o potencial entre condutor principal e massa (aterrada) esteja conforme o valor eficaz definido pela norma. Para este caso, por exemplo, temos, para equipamentos adquiridos pela Chesf, os valores de tensão aplicada conforme conta na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores nominais de tensão aplicada de Módulos Híbridos Compactos do Sistema Chesf

Tensão Nominal	Tensão Suportável à Frequência Industrial
72,5 kV	140 kV
145 kV	275 kV
245 kV	460 kV

Conforme observado na Tabela 1, os valores são de magnitude relevante. Por consequência, diferentemente dos laboratórios dos fabricantes mais tradicionais, que são adequadamente projetados para executar os ensaios com relativa facilidade, obter tais valores num ensaio realizado em campo consiste em um desafio considerável, seja pela necessidade de transporte de equipamentos específicos para realização do ensaio, seja pelas dificuldades em planejar a execução do ensaio concomitante a intervenções no sistema elétrico e eventuais condições climáticas desfavoráveis, pois os ensaios são realizados ao tempo.

Para a realização do ensaio de tensão aplicada nos módulos híbridos compactos dentro das instalações da Chesf, foi adotado o procedimento de verificação com tensão reduzida, conforme procedimento determinado pela IEC 62271-203 – *High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*, cujos valores recomendados constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores para ensaios de campo de tensão aplicada de Módulos Híbridos Compactos do Sistema Chesf

Tensão Nominal	Tensão Suportável à Frequência Industrial
72,5 kV	120 kV
145 kV	235 kV
245 kV	380 kV

Apesar de reduzidos, tais valores demandam igual infraestrutura conforme valores aplicados durante os ensaios de rotina em fábrica, a saber, fonte, sistema de medição, distâncias elétricas adequadas para partes vivas e em potencial de terra (*clearances*) além de que as condições de logística e ambientais trazem uma dificuldade adicional para a realização dos ensaios.

3.0 PROCEDIMENTOS E ESQUEMAS DE ENSAIOS

Considerando-se que todas as aplicações em campo foram realizadas para módulos híbridos compactos de tensão nominal 245 kV, doravante iremos tratar apenas de valores de ensaio relativos a este nível de tensão nominal.

Antes de apresentar o circuito e detalhamento de ensaios, faz-se necessária uma breve introdução ao esquema de montagem de um módulo híbrido compacto monopolar (padrão da Chesf para disjuntores aplicados no setor 230 kV), evidenciada no esquema unifilar da Figura 3.

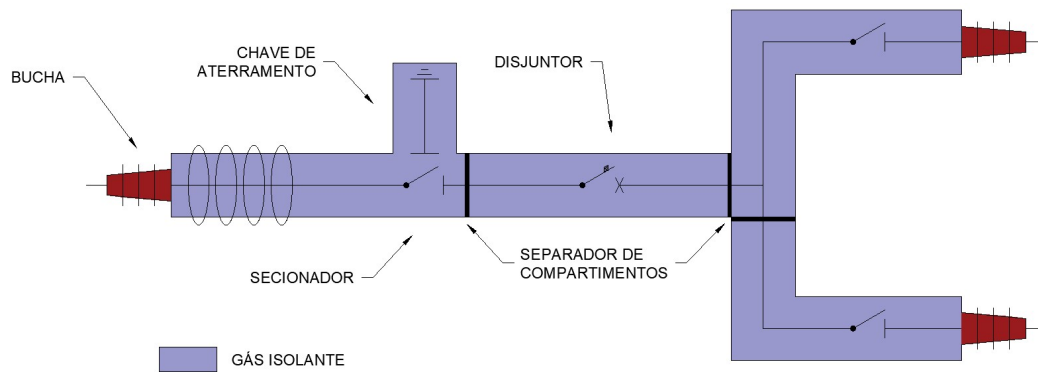


Figura 3 – Módulo Híbrido Compacto Convencional

No esquema são indicados os principais componentes de um módulo híbrido compacto monopolar, onde podem ser visualizados compartimentos estanques, para os quais cada elemento inerente ao módulo híbrido compacto esta localizado, a saber, compartimento do disjuntor e compartimentos dos seccionadores e lâminas de aterramento, sendo, por exemplo, o compartimento do disjuntor estanque em relação ao compartimento do seccionador com chave de aterramento. Ainda, os transformadores de corrente são do tipo TCs de Bucha. Por fim, há a presença de um gás isolante, para o qual a Chesf especifica a aplicação do SF₆.

Considerando-se os valores da Tabela 2, seria aplicado o valor de 380 kV nos terminais de cada polo, durante 1 min. Porém, a fim de evitar contratempos em relação a eventuais problemas de montagem, proximidade com elementos metálicos dispostos no pátio da subestação, problemas com a própria fonte ou demais elementos do circuito de ensaio, inseriu-se no procedimento de ensaio a elevação da tensão aplicada em *steps*, conforme valores indicados na Figura 4. Tal procedimento tornou o ensaio mais seguro, evitando problemas na elevação abrupta ao valor de tensão máximo a ser aplicado, o que poderia, por exemplo, provocar uma nova necessidade de aplicação desnecessária em virtude de problemas alheios ao equipamento objeto de ensaio.

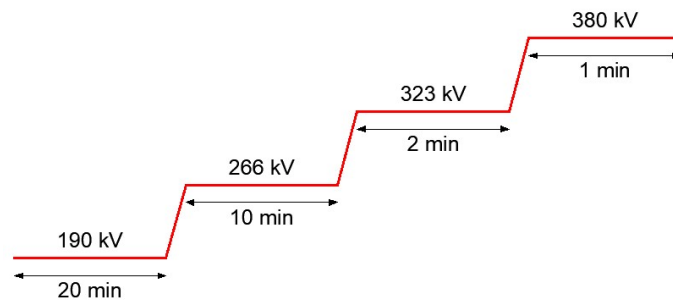


Figura 4 – Valores adotados para realização do ensaio de tensão aplicada

Cada polo é submetido ao ensaio individualmente, onde toda a sequência da Figura 4 é aplicada com os valores de tensão e intervalos especificados. Para a realização dos ensaios, seccionadores e disjuntores são dispostos em posição fechada, de modo que a aplicação de tensão em um dos terminais seja suficiente para energizar o conjunto completo. A massa do equipamento é aterrada em pontos de aterramento disponíveis no pátio da subestação.

Para obtenção dos valores especificados, circuitos de ensaio mais robustos do que os normalmente aplicados em campo fizeram-se necessários, pois malas de teste convencionais não são aptas a aplicar valores de tensão tão elevados quanto os requeridos para este ensaio.

Inicialmente, os ensaios foram realizados com auxílio de um transformador elevador. O circuito elétrico do ensaio pode ser visualizado na Figura 5. A linha vermelha no esquema unifilar do polo do módulo híbrido compacto indica os pontos onde o potencial disponibilizado pela fonte está sendo aplicado. Reforça-se que a carcaça do equipamento está aterrada em todas as aplicações, externamente.

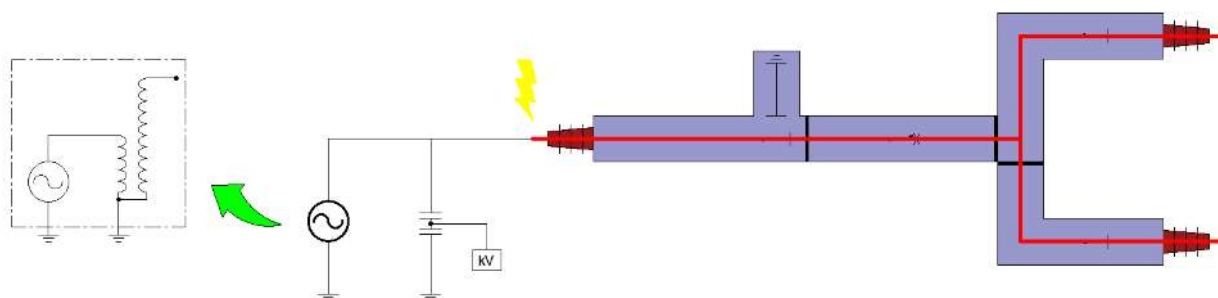


Figura 5 – Circuito para realização do ensaio de tensão aplicada com transformador elevador

Conforme observado, para viabilizar a realização do ensaio, além do transformador elevador, temos a necessidade de um divisor de potencial para a medição da tensão em alta tensão, além de fonte em baixa tensão (grupo motorizador), com potência nominal suficiente para fornecer a tensão de pico especificada para o ensaio. A Figura 6 evidencia a disposição dos equipamentos em campo.

Considerando-se a necessidade de pelo menos dois equipamentos (fonte e medição), uma infraestrutura maior é necessária para esta configuração, pois há também a necessidade de aterrar ambos os equipamentos, bem como conectar os cabos de controle associados (fonte e divisor).



Figura 6 – Equipamentos dispostos em campo para realização de tensão aplicada com transformador elevador

Posteriormente, os ensaios passaram a ser realizados com auxílio de fonte ressonante. A Figura 7 detalha o circuito de ensaio utilizado.

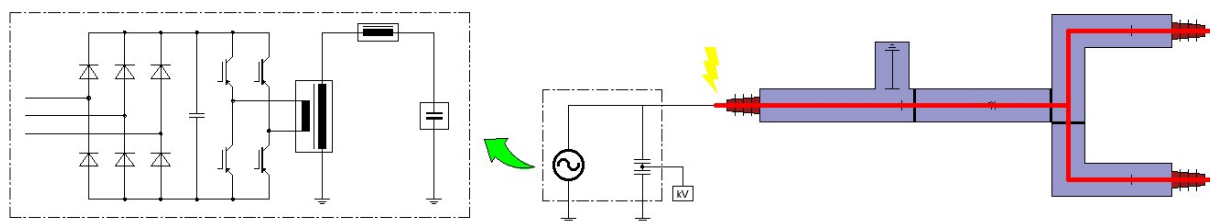


Figura 7 – Circuito para realização do ensaio de tensão aplicada com fonte ressonante

Nesta configuração, a fonte ressonante já dispõe dos elementos necessários para aplicação dos valores especificados de tensão, dispondo ainda de tape capacitivo na bucha de alta tensão, que é utilizado como divisor de tensão para medição dos valores aplicados, reduzindo a quantidade de componentes necessários para realização do ensaio. A Figura 8 ilustra a realização do ensaio de tensão aplicada com fonte ressonante em campo.

Na Figura 8, pode ser visualizado ainda que as condições ambientais estavam desfavoráveis para o ensaio, pois havia risco de chuva, tratando-se este de um dos riscos associados à realização do ensaio em campo. Considerando-se que a realização completa do ensaio é de 33 minutos (ver Figura 4), em períodos em que o clima evidencie grande possibilidade de chuvas, há a necessidade aguardar uma melhora nas condições ambiente, de modo que o resultado do ensaio não seja insatisfatório em virtude de fatores como umidade.



Figura 8 – Fonte ressonante disposta em campo para realização de tensão aplicada

4.0 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A Figura 9 ilustra os resultados obtidos no ensaio desde o início da utilização do ensaio de tensão aplicada nos módulos híbridos compactos como critério de aceitação de unidades retrabalhadas. Conforme observa-se, a maioria das aplicações teve resultado satisfatório, algo esperado dada a qualidade da tecnologia associada aos módulos híbridos compactos. Porém, em 17% dos casos tivemos resultados não satisfatórios.

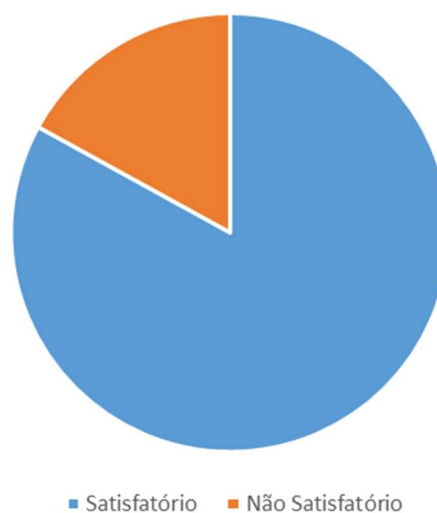


Figura 9 – Resultado obtidos para o ensaio de tensão aplicada em campo

Os resultados consideram a rejeição de fato após o ensaio, pois em algumas oportunidades houve a rejeição em uma primeira tentativa, com resultado satisfatório após uma segunda tentativa sem necessidade de retrabalho no equipamento. Evidentemente, antes de uma nova tentativa, é necessária uma investigação para garantir que a causa não foi uma falha no equipamento sob ensaio. Portanto, apenas após a verificação da integridade do equipamento, uma nova tentativa é realizada.

Este índice de resultados não satisfatórios é bastante relevante pois implica em equipamentos que, caso fossem energizados, causariam distúrbios no sistema elétrico de potência, podendo trazer danos à segurança das instalações e riscos de acidentes associados. Em números absolutos, tivemos um total de 09 unidades com resultado não satisfatório no ensaio de tensão aplicada em campo, que demandaram necessariamente uma atividade de reparo e a realização de novo ensaio, em campo, para aceitação dos equipamentos por parte da Chesf.

Isto posto, podemos concluir que o ensaio de tensão aplicada à frequência industrial em campo, apesar de implicar em maiores prazos para energização, assegura resultados mais concretos para a tomada de decisão quanto à aceitação de módulos híbridos compactos porventura retrabalhados, auxiliando no impedimento de energização de equipamentos com necessidade de intervenção, bem como evitando a instalação de equipamentos que possam causar prejuízos às instalações da Chesf e ao Sistema Elétrico de Potência.

Por fim, apesar dos desafios observados, seja de logística, seja de maior tempo para a energização de um equipamento e mesmo dos maiores custos associados pela exigência do ensaio, o aumento na segurança para a energização dos equipamentos retrabalhados está evidenciado, implicando em maior garantia da continuidade do serviço de transmissão de energia elétrica com a qualidade e confiabilidade, além do menor risco de pagamento de parcela variável por parte da transmissora concessionária em virtude da indisponibilidade de funções de transmissão associadas, bem como evitando interrupções de fornecimento de energia elétrica à sociedade.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) IEC 62271-203. High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV; IEC - Suíça.
- (2) IEC 62271-205. High-voltage switchgear and controlgear – Part 205: Compact switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV; IEC - Suíça.
- (3) IEC 62271-1. High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications; IEC - Suíça.
- (4) RODRIGUES, D. S. F. Análise da aplicação de equipamentos híbridos de proteção e seccionamento em subestações elétricas; UFMG - Brasil.

DADOS BIOGRÁFICOS



Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará no ano de 2012. Atua como Engenheiro Eletricista na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, desde 2013, nas áreas de Inspeção Técnica de Equipamentos e Materiais de 2013 a 2016, e de Projeto Eletromecânico de Subestações desde 2017.

(2) **FABIO NEPOMUCENO FRAGA**
Formado em Engenharia Elétrica em 1998 e Mestre em 2008 pela UFPE. Trabalhou no ONS atuando na normatização. Em 2002 ingressou Chesf na área de projetos básico, executivo e equipamentos de subestações. Em 2012 assumiu assessoria do Departamento de Projeto e Construção de Subestações. Em 2013 assumiu divisão de projeto de subestações. Em 2017 assumiu Departamento de Engenharia de Subestações. Hoje, gerencia a Superintendência de Engenharia de Transmissão. Entre 2012 e 2018 coordenou o CE-B3 do Cigré-Brasil. Em 2015 assumiu posição no Strategic Advisory Group do SC-B3 como Brazilian Member. É coautor do livro CIGRE Substation Reference Book (Green Book).

(3) **LUCIANO RIBEIRO DO VALE JARDELINO DA COSTA**
Engenheiro Eletricista, graduado pela UFCG, ocupa atualmente o cargo de Gerente do Departamento de Estudo e Concepção de Engenharia da CHESF, tendo experiência em projeto de subestações de energia elétrica e equipamentos de alta tensão.

(4) **MARCOS ANTÔNIO ROLIM VILLA VERDE**
Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Processamento de Energia, concluído em setembro de 2008 na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Pernambuco e graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco no ano de 1979. Atuou como Engenheiro Eletricista na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco de 1979 a 2019, com experiência nos setores de Manutenção de Usinas Hidrelétricas, Inspeção Técnica de Equipamentos e Materiais e Projeto de Equipamentos e Subestações de Alta Tensão.

(5) **MARCELO AUGUSTO BASTOS DA SILVA**
Engenheiro Eletricista, formado pela Universidade Federal de Pernambuco, com Mestrado em Sistemas de Energia pela Universidade Federal de Campina Grande. Em 2008 trabalhou com comissionamento de sistemas de Usinas. De 2009 a 2016 em inspeção técnica de sistemas e equipamentos de Subestações. Experiência como Gestor de Empreendimentos de Transmissão em 2017. De 2018 a 2020 esteve como Gerente de Divisão Regional de Manutenção da Transmissão. Atualmente Gerente do Normativo de Manutenção de Subestações na Chesf.