



Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

Manutenção em linha energizada de corrente contínua ± 800 kV – avaliação experimental da distância de segurança

**JOSÉ ANTONIO DAFFONSECA SANTIAGO CARDOSO(1); CLERISSON MARCOS DA PAZ OLIVEIRA(2);
ARMANDO ISAAC NIGRI(3); RICARDO WESLEY SALLES GARCIA(4);
CEPEL(1); BELO MONTE TE(2); AINIGRI(3); CEPEL(4);**

RESUMO

Apresentar os resultados dos estudos elétricos realizados para o desenvolvimento de trabalhos de manutenção na linha de transmissão de corrente contínua ± 800 kV, com as instalações energizadas.

Nestes estudos estão apresentadas as distâncias mínimas de aproximação entre partes aterradas e cabos energizados e o número mínimo de isoladores em bom estado na cadeia de isoladores, determinados a partir de ensaios realizados, simulando as condições reais de operação, normas existentes para sistemas CA e experiência existente sobre o assunto.

PALAVRAS-CHAVE

Corrente contínua, UAT, ± 800 kV, ensaio, manutenção linha viva, pesquisa, laboratório.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Cepel com sua infraestrutura laboratorial vem participando dos projetos de corrente contínua (CC) desde sua fundação, não só na execução dos ensaios, mas também na pesquisa de métodos e especificações dos ensaios. Mais recentemente, de 2010 a 2012, realizou ensaios de tipo para o projeto do Rio Madeira e depois, de 2015 a 2017, realizou diversos ensaios de tipo para os sistemas de ± 800 kV CC.

O 1º bipolo de ± 800 kV CC iniciou sua operação em dezembro 2017. A Linha de Transmissão tem aproximadamente 2.076 km de extensão, atravessando 70 municípios de cinco estados: Pará, Tocantins, Goiás, Minas Gerais. Ao todo, o bipolo é constituído por 3803 torres, distribuídas em 16 tipos de estruturas, 25000 km de cabos condutores CA 1590 kcmil COREOPSIS, distribuídos em feixes de 6 cabos cada. Para atender a esta quantidade de estruturas e cabos, foi necessária a utilização de mais de 385.000 isoladores de vidro entre torres de suspensão e ancoragem.

Dessa forma surge a necessidade de a equipe de Engenharia de Manutenção se capacitar para executar os serviços de linha viva a fim de manter o índice de confiabilidade alto, evitando prejuízos financeiros, multas e acidentes, como também prejuízo social devido a desligamentos não programados.

Em sistemas de corrente alternada (CA), essas definições são fornecidas pela norma IEC 61472 [1] "*live working – minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV – a method of calculation*". Para sistemas CC, no entanto, não existem normas nacionais ou internacionais publicadas. No caso específico do sistema de transmissão de Itaipu, foram realizados ensaios de laboratório no Cepel para a definição de tais grandezas [2] e está sendo adotada metodologia similar para o novo sistema em ± 800 kV CC.



Os ensaios foram realizados em uma estrutura típica da linha de transmissão real com os principais materiais de trabalho instalados: berço, bastões de deslocamento, cadeira e boneco com roupa condutiva. A montagem teve o objetivo de simular as condições reais de trabalho para substituição de isoladores danificados em uma cadeia de suspensão do tipo "1", contendo 39 isoladores do tipo disco de vidro, com passo de 195mm.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados no laboratório de Ultra Alta Tensão (UAT) do Cepel, a distância de segurança e o número mínimo de isoladores em bom estado foram estabelecidos para este sistema de ± 800 kV CC. Na análise dos resultados foram considerados as máximas sobretensões transitórias possíveis de ocorrer, causadas por faltas no sistema ou por manobras, calculadas no projeto básico e também as informações obtidas nos estudos para o sistema de Itaipu [2]. Com os valores definidos e a experiência obtida durante os ensaios, foi possível preparar o procedimento de execução das atividades de linha viva com total segurança como também fazer algumas considerações sobre o uso em sistemas de corrente contínua da norma IEC, específica para corrente alternada.

2.0 - MANUTENÇÃO EM LINHA VIVA

Nos trabalhos em linhas energizadas envolvendo sistemas de transmissão de alta tensão de corrente alternada (ATCA) a segurança, tanto dos eletricitistas quanto da linha, é garantida considerando-se duas grandezas fundamentais, a distância mínima de aproximação e o número mínimo de isoladores em bom estado, que caracterizam a distância de segurança.

Nos sistemas de corrente alternada estas duas grandezas são dimensionadas a partir da máxima sobretensão que pode ocorrer na linha de transmissão em que estiver ocorrendo o serviço.

Tendo em vista que no Brasil praticamente todas as linhas CA estão interligadas, a ocorrência de uma alteração na operação em qualquer linha de transmissão pode se refletir numa sobretensão na linha em que está sendo executada a manutenção.

As alterações, durante a operação, em qualquer linha do sistema, podem ser causadas por curto-circuito na linha, abertura da linha, religamento automático, religamento acidental ou rejeição de carga.

Para limitar a sobretensão o religamento automático da linha é desativado.

Nos sistemas de transmissão de corrente contínua, os bipolos são desacoplados dos sistemas CA, em vista das estações conversoras, tanto a retificadora quanto a inversora, que funcionam como um isolamento dos sistemas. Desta forma as sobretensões CA não tem qualquer influência durante os trabalhos nas linhas CC. A distância de segurança e o número mínimo de isoladores em bom estado são determinados a partir da sobretensão máxima a qual a linha CC está submetida, originada devido à ocorrência de uma falta para a terra no meio do polo, que através do acoplamento eletrostático e eletromagnético com o outro polo, acarreta o aparecimento de degrau de tensão neste, no mesmo ponto. O maior valor encontrado na fase de estudos para este projeto foi de 1,76 pu [3].

3.0 - DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE APROXIMAÇÃO

A distância de mínima de aproximação é o espaçamento mínimo que deve ser respeitado entre as partes energizadas e aterradas da linha, suficientes para que não haja abertura de arco elétrico, considerando as restrições operativas e meteorológicas para trabalho em linhas energizadas, no decorrer dos trabalhos de manutenção.

Existem diversas formas de se determinar a distância mínima de aproximação, conforme identificadas abaixo.

3.1 Norma IEC



A norma IEC 61472 [1] apresenta toda a metodologia de cálculo da distância mínima de aproximação relativa à manutenção em linha viva para sistemas CA. Embora ela não contemple os sistemas de corrente contínua, em função da sua abrangência, é um importante balizador.

Alguns fatores influenciam diretamente no cálculo dessa distância. Dentre eles, pode-se citar o fator de desvio estatístico padrão, que é inerente à natureza estatística do processo de descarga, o fator de gap, que é o responsável pelo efeito da configuração do gap no esforço dielétrico do ar, o fator atmosférico, que é o responsável pelo efeito da variação da densidade do ar na suportabilidade do espaçamento, afetada diretamente pela altitude da linha, e o fator de objeto flutuante, que é o responsável pela existência de objetos metálicos flutuantes dentro do espaçamento de ar.

Usando a metodologia estabelecida na norma, e assumindo:

- sobretensão máxima de 1,76 p.u. no meio da linha com desligamento de um dos polos,
- religamento automático desativado,
- movimentos inadvertidos dos eletricitistas, cujo valor é de 0,5 m,
- umidade relativa do ar inferior a 80%, e
- ausência de ventos fortes, chuva e descargas atmosféricas,

O valor calculado para a distância mínima de aproximação foi de 6,7 m.

2.2 Experiência existente

No trabalho "Investigações sobre aspectos de segurança em manutenção de linhas de corrente contínua ± 600 kV", SNPTEE de 1987 em Belo Horizonte [2], foram apresentados os resultados dos ensaios realizados para definição da distância de segurança para trabalho em linha viva.

Baseado no valor adotado para o ± 600 kVCC de Itaipu, e assumindo a proporcionalidade da distância mínima de aproximação para o ± 800 kVCC, este valor seria de 6,67 m.

2.3 Ensaio de Laboratório

A partir da montagem das condições reais da linha em laboratório, é possível verificar experimentalmente os valores calculados.

Foi montada no laboratório de alta tensão externo uma estrutura típica de suspensão da linha de corrente contínua de ± 800 kV com as cadeias de isoladores de suspensão, ferragens, acessórios e cabos condutores instalados de acordo com projeto, conforme Figura 1.

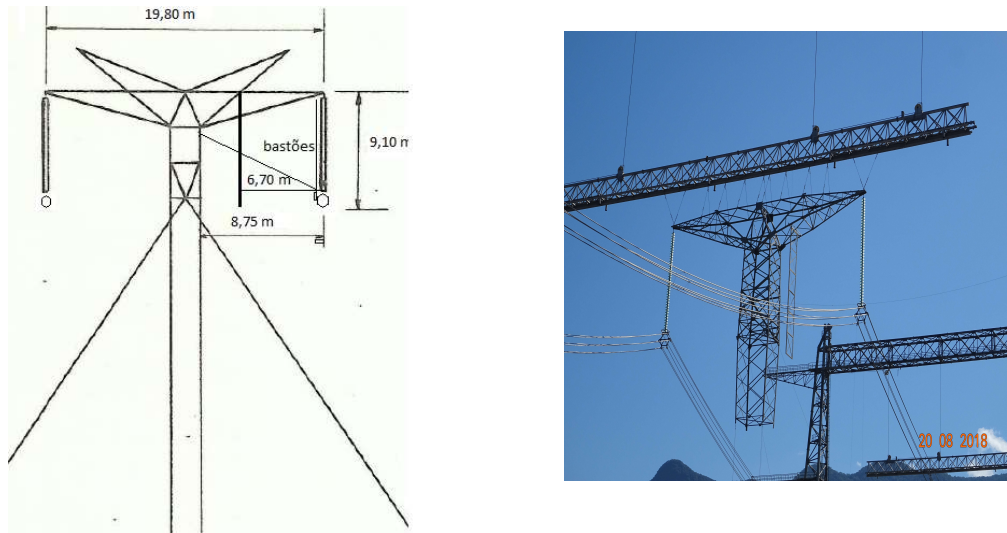


FIGURA 1 – Arranjo de ensaio

Na determinação da tensão crítica disruptiva (U_{50}), conforme determina a norma IEC 60060-1 [4], foi utilizado o método "up and down", com 30 aplicações.

Usando como referência o valor calculado pela norma, foram realizados dois ensaios de determinação da tensão disruptiva, com painel metálico fixado na mísula distante 6,70m e 6,20m do plano da cadeia de isoladores, simulando a presença de eletricitista, ver Figura 1. A distância de 6,20 m não considera o movimento inadvertido dos eletricitistas.

Os valores de tensão obtidos, corrigidos para as condições normalizadas, estão apresentados na Tabela 1. A partir desses valores, foram calculados os valores das tensões suportáveis (U_{10}) que indicam que as distâncias calculadas estão adequadas, já que são superiores ao valor máximo da sobretensão prevista.

Tabela 1 – Resultado dos ensaios com o painel metálico

Ensaio	Distância do painel	U_{50CN} [kV]	U_{10CN} [kV]
1	6,70 m	1837	1694
2	6,20 m	1706	1573

4.0 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE ISOLADORES EM BOM ESTADO

Uma das principais tarefas da manutenção de linhas, utilizando as técnicas de intervenção com as instalações energizadas, é a troca de isoladores danificados. Para isso, é fundamental identificar o número mínimo de isoladores em bom estado que ainda possibilita este tipo de manutenção em total segurança.

Um dos métodos utilizados para determinar o número mínimo de isoladores consiste em associar esse número ao espaçamento de ar que suporte o maior surto de manobra previsto.

Considerando a distância calculada, é possível estabelecer um mínimo de 33 isoladores em bom estado, ou 6 danificados na cadeia de suspensão.

O outro método é através de ensaios de laboratório com a simulação de casos reais durante as manutenções.

Utilizando as mesmas instalações do CEPEL, após a retirada do painel, utilizado para a determinação da distância de segurança, foram instalados alguns materiais de linha viva que por suas características interferem na suportabilidade elétrica dos espaçamentos do arranjo. Foi testado somente o arranjo em suspensão, que é o mais crítico.

Os materiais de linha energizada utilizados foram:

- Berço em volta da cadeia de isoladores,
- Bastões isolantes e cadeira para o transporte do eletricitista da estrutura até ao potencial,
- Manequim com a vestimenta condutiva na altura dos condutores.

A Figura 2 apresenta a montagem.



FIGURA 2 – Material de linha viva instalado na cadeia de isoladores

A partir da simulação com os materiais instalados e com o “eletricista” posicionado no potencial, foram realizados os ensaios descritos na Tabela 2, sendo os isoladores quebrados simulados por isoladores curto-circuitados.

Tabela 2 – Resultados com isoladores curto circuitados

Ensaio	condição	Posição na cadeia	U_{50CN} [kV]
1	4 isoladores curto-circuitados próximos ao condutor	4 a 7	1748
2	4 isoladores curto-circuitados no meio da cadeia	18 a 21	2041
3	6 isoladores curto-circuitados próximos ao condutor	4 a 9	1975

4	6 isoladores curto-circuitados no meio da cadeia	17 a 22	2052
5	8 isoladores curto-circuitados próximos ao condutor	4 a 11	1805
6	8 isoladores curto-circuitados no meio da cadeia	17 a 24	1976
7	7 isoladores curto-circuitados de forma alternada	4, 9, 14, 19, 24, 29 e 34	2043
8	6 isoladores curto-circuitados próximos ao lado terra	31 a 36	2092

5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados da tensão U50CN, obtidos nos ensaios de laboratório segundo a norma IEC 60060, foram determinadas as tensões suportáveis com desvio de 3 sigmas de 6%. Estes foram os valores adotados para a análise, conseqüentemente, a probabilidade de não ocorrer um desligamento na estrutura, sob manutenção, no caso de ocorrer a maior sobretensão prevista, seria superior a 99%.

Foi constatado que, para todos os casos ensaiados a suportabilidade permaneceu superior ao máximo valor da sobretensão calculada.

Em função dos resultados obtidos poderia ser realizada a atividade de substituição da cadeia com até 8 isoladores danificados, entretanto, para manter um alto grau de segurança, foi estabelecido um número máximo de 6 unidades danificadas.

6.0 - CONCLUSÕES

Tendo como base principal os ensaios realizados no CEPEL, complementando com a experiência existente e a norma IEC 61472, a distância mínima de aproximação determinada para a execução dos trabalhos com as instalações energizadas é de 6,70m incluindo movimentos inadvertidos dos eletricitistas (considerados como movimentos ergométricos).

O número mínimo de isoladores em bom estado obtido foi de 33 unidades, ou seja, 6 isoladores danificados nas cadeias de suspensão ou 7 nas cadeias de ancoragem, a fim de garantir a segurança do trabalhador e do sistema.

Os resultados dos ensaios foram muito importantes para confirmar o cálculo teórico da distância mínima de aproximação e como é o comportamento das descargas quando os materiais estão instalados para o serviço de manutenção. As atividades realizadas também permitiram entender na prática os procedimentos de deslocamento do eletricitista e a influência do material instalado no arranjo real da torre.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 61472:2013 - Live working - Minimum approach distances for AC systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV - A method of calculation.
- [2] R. W. S. Garcia, J. R. Fonseca, "Investigações sobre aspectos de segurança em manutenção de linhas de corrente contínua ± 600 kV", IX SNPTEE, 1987, Belo Horizonte.

- [3] M. C. Araújo *et. alli*, HVDC +/- 800 kV Transmission Line Associated to the Belo Monte Hydroelectric Power Plant – Studies and Definitions for the Basic Design – Innovation and challenges for a new Level of Voltage in Brazil – CIGRE 2016
- [4] IEC 60060-1:2010 – High Voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Antonio d’Affonseca Santiago Cardoso - Possui graduação em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2001) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, trabalhou também na Empresa de Pesquisa Energética - EPE entre 2011 e 2015, na superintendência de Transmissão de Energia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em técnica de ensaios de Alta Tensão e planejamento da expansão do sistema de transmissão. Atua principalmente nos seguintes temas: ensaios de equipamentos de alta tensão, corona em linhas de transmissão, monitoramento de equipamentos em subestações e estudos de transitórios eletromagnéticos de sistemas CA e CC.

Clerisson Marcos da Paz Oliveira, Graduado em Engenharia Elétrica- Eletrotécnica, Unilins, em 2008. Trabalha na Belo Monte Transmissora de Energia desde 2017

Armando Isaac Nigri, Graduação - PUC/RJ 1973

Ricardo Wesley Salles Garcia - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (1988) e graduação em Arquitetura e Urbanismo pelo Instituto Metodista Bennett (1995). É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CPEEL - desde 1985. Foi professor adjunto no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Severino Sombra entre 2002 e 2007. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: isolamento externo e manutenção de linhas. É coordenador do GT de isoladores do Cigré-Brasil e membro efetivo de diversos Working Groups do Cigré internacional.