

Validação laboratorial do dispositivo descarregador em forma de chifre para isolamento de cabos para-raios em linhas de transmissão

Rayssa de Aquino Gomes*. José Maurício de Barros Bezerra. *Márcio Severino da Silva*.

**Universidade Federal de Pernambuco, CEP 50670-901
BRASIL (Tel: 81-2126-8000; e-mail: marcio.ssilva@gmail.com e jmhb.ufpe@gmail.com).*

Abstract: The use of ground wire for insulated spokes is an alternative to reduce the induced currents existing in cables with multiple grounds. In order for this method to be applied, it is necessary to use horns coupled to the electrical insulators, isolating the system. In abnormal operating conditions, horns serve as a passage path for current when the voltage at their terminals reaches a value capable of ionizing the air in the spacing between the electrodes. In this paper, the electrical behavior for the equipment known as the horn unloader was analyzed. In this paper, the electrical behavior for the equipment known as the arcing horns was analyzed. It was found the relationship between the spacing length in the values obtained for disruptive voltage, as well as its geometry in the distribution of the electric field. A computational modeling and laboratory analysis of the equipment was carried out with very close results.

Resumo: O uso de cabos para-raios é de extrema importância para a proteção dos condutores de fase nas linhas de transmissão. O modo no qual ele é ligado à estrutura de suporte influenciará nos valores de perdas por efeito Joule. O uso de cabos para raios isolados é uma alternativa para reduzir as correntes induzidas existentes em cabos com múltiplos aterramentos. Para que esse método possa ser aplicado é necessário fazer uso de centelhadores acoplados com isoladores elétricos, isolando o sistema. Em condições anormais de operação, os centelhadores servem de caminho de passagem para a corrente quando a tensão em seus terminais atinge um valor capaz de ionizar o ar existente no espaçamento entre os eletrodos. Neste trabalho foi analisado o comportamento elétrico para o equipamento conhecido como descarregador de chifre. Constatou-se a relação existente entre o comprimento do espaçamento nos valores obtidos de tensão disruptivas, bem como a sua geometria na distribuição do campo elétrico. Foi realizada uma modelagem computacional e uma análise no laboratório do equipamento com resultados muito próximos.

Keywords: Arcing horns, modeling, analysis, testing, validation.

Palavras-chaves: Descarregador de chifre, modelagem, análise, testes, validação.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia elétrica possui um papel importante para o desenvolvimento socioeconômico dos países. O uso se faz necessário na realização de inúmeras atividades habituais, sejam elas de cunho pessoal ou aquelas de valor econômico. São vários os setores beneficiados pela sua utilização, quer sejam eles de pequeno, médio ou grande porte. Qualquer que seja o uso da energia, a sua utilização nos setores privados, públicos, comerciais e industriais, é imprescindível.

O sistema elétrico possui uma estrutura básica verticalizada composta pela geração ou produção, pelas redes de transmissão, subtransmissão e distribuição, além das linhas de interligação (Fuchs, 1977a). Na geração, primeira etapa do processo, existem várias fontes capazes de gerar energia elétrica através da transformação de outros tipos de energia, como: hidráulica, gás natural, nuclear, eólica, solar, entre

outras. No Brasil existe a predominância da geração a partir das usinas hidrelétricas. Em porcentagem, conforme o Banco de Informação de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dados atualizados em maio de 2019, citam a existência de 7.441 empreendimentos em operação, totalizando 164.821.404 kW de potência instalada, sendo cerca de 60,25% da geração proveniente de usinas hidrelétricas. A necessidade de uma rede elétrica com maior confiabilidade e continuidade no seu suprimento, propiciou a criação de um Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN contempla uma grande parte do território nacional, e de acordo com a Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), atualmente apenas 237 localidades são isoladas no Brasil, sendo a energia dessas regiões supridas principalmente por térmicas a óleo diesel.

Para que a energia possa chegar ao consumidor final, é necessária a existência de extensas linhas de transmissão, que cruzam o território nacional, sendo responsáveis por

desempenhar o papel de interligar os centros de geração às redes de distribuição. Para uma melhor qualidade no suprimento de energia, é preciso aumentar sua confiabilidade, minimizando a quantidade de interrupções no sistema, e para isso é indispensável a utilização de cabos para-raios sobre os condutores fases, evitando que descargas atmosféricas os atinjam de forma direta, o que acarretaria em um desligamento temporário ou danos na linha de transmissão.

Entretanto há um acoplamento eletromagnético entre os condutores principais (condutores fases) e os cabos para-raios.

A presença de correntes induzidas nos cabos para-raios, geram perdas por efeito joule ao sistema. Em uma linha de transmissão, para mitigar esses efeitos, pode se fazer o seccionamento dos cabos para-raios, eliminando os laços de corrente induzida ou modificar a posição dos condutores de blindagem para que existam perdas mínimas (Domingues et al., 2005).

Este trabalho tem como finalidade analisar o comportamento elétrico do descarregador de chifre que pode vir a fazer a função de assegurar o isolamento de cabos para-raios.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No sistema de transmissão de energia, as correntes e sobretensões transitórias podem surgir devido às operações de chaveamento, eliminação de faltas, por condições anormais de operação e na presença de descargas atmosféricas. Para garantir padrões de qualidade impostos com a finalidade de manter a continuidade e confiabilidade na entrega da energia elétrica aos consumidores, o uso de cabos para raios é necessário em toda a extensão da linha de transmissão para proteger de descargas diretas que venham a atingir os condutores fase (Nogueira, 2017).

Comumente, os cabos para-raios em linhas de transmissão, são instalados suspensos e interligados ao solo em todas as estruturas, quer seja utilizando a própria estrutura, no caso da mesma ser metálica, ou com condutores de aterramento (Fuchs,1979b).

Na forma de instalação na qual os cabos para-raios estão multiaterrados, criam-se malhas que são compostas pelos cabos para-raios, estruturas e o solo (Fuchs,1979a).

Uma alternativa possível para que se evite a correntes nas malhas formadas pelos cabos para-raios multiaterrados é instalar os mesmos suspensos por isoladores (Fuchs,2015).

Os equipamentos isoladores devem possuir, entretanto, uma tensão de disrupção suficientemente pequena e devem ser equipados com centelhadores (Fuchs,2015).

O centelhador, instalado em paralelo com o isolador ou cadeia de isoladores, será responsável pela descarga da corrente até o solo sem prejuízo portanto naquilo que é a sua função principal do isolador (Fuchs,2015).

O equipamento que pode cumprir de forma satisfatória esta função é o descarregador de chifre.

O descarregador de chifre é um equipamento formado por isoladores de disco ou porcelana, formando um único corpo rígido, e um dispositivo centelhador formado por eletrodos metálicos fixados nas extremidades do conjunto isolador (Mamede, 2013).

Em alguns casos, quando o equipamento está instalado na horizontal, para que se evite que um pássaro pouse sobre um dos eletrodos, e atinja o outro através da abertura das asas ou dos pés, provocando um curto-circuito fase e terra, é colocada uma chapa de ferro pontiaguda. A Fig. 1 mostra um descarregador de chifre comumente usado (Mamede, 2013):

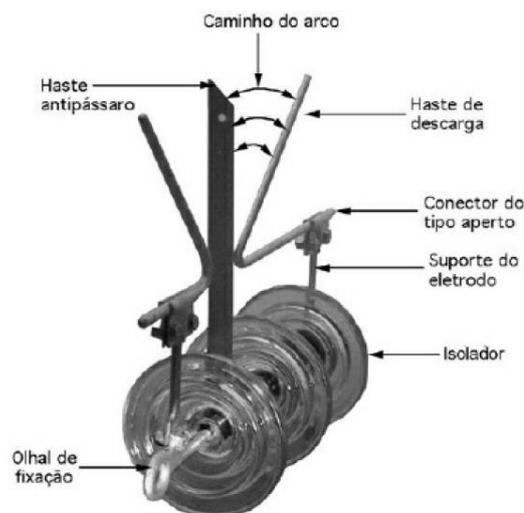


Fig. 1 Equipamento descarregador de chifre.

A maioria dos casos em que ocorre o insucesso dos descarregadores de chifre se deve ao ajuste incorreto das hastes de descarga que formam o “gap”. A instalação incorreta das hastes de descarga, com um espaçamento inadequado, muito próximas ou muito afastadas, implica na atuação indevida ou falta de atuação (Mamede, 2013).

No trabalho feito por (Gomes, 2019), foi proposta a modelagem do descarregador de chifres, com finalidade de prover isolamento dos cabos para-raios em uma linha de transmissão. A modelagem comprovou que o descarregador modelado possui suportabilidade adequada para a elevação da tensão na linha de transmissão estudada (Gomes, 2019), mas não apresentou testes laboratoriais para validação.

Daí a importância de se estudar os mecanismos de atuação deste equipamento, analisar como esses mecanismos se relacionam com a distância entre as hastes que formam o “gap” e aplicar testes em laboratório para validação.

2.1 COMSOL

Utilizado como ferramenta para modelagem e resolução de problemas na área da ciência e engenharia, o COMSOL fornece um ambiente computacional que proporciona uma ampla visão sobre o problema, com acesso a suas inúmeras funcionalidades, ampliando a capacidade de resolução ao fazer uso de um modelo com físicas acopladas de forma simultânea (Multiphysics, 2012).

O COMSOL utiliza-se do método de elementos finitos para resolução dos problemas, através de sistemas de multiprocessadores e computação via cluster. O software executa a análise em elementos finitos junto a geração adaptativa de malha e controle de erro, aproveitando-se de uma variedade considerável de solucionadores numéricos disponíveis. O COMSOL Multiphysics se baseia na resolução das leis de ciências naturais, solucionando as equações diferenciais que as regem, abrangendo fenômenos da engenharia e ciência (Multiphysics,2012). A página inicial do software é ilustrada na Fig. 2:

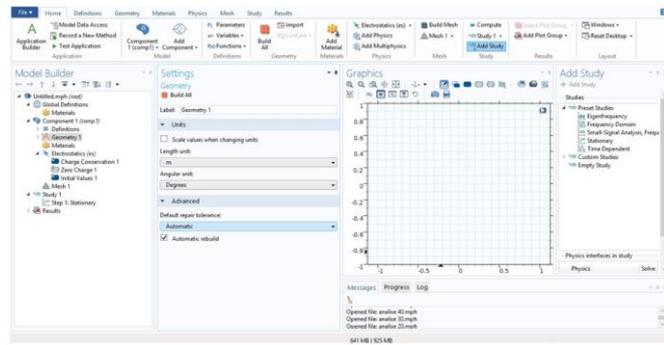


Fig. 2 Interface do Software COMSOL.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado foi um descarregador de chifre retirado de operação e a metodologia utilizada foi primeiramente a modelagem computacional do equipamento e depois a comparação com resultados experimentais. Para melhor compreensão, um melhor detalhamento é realizado nas subseções a seguir.

3.1 Descarregador de chifre

Para as avaliações realizadas neste trabalho foi utilizado um descarregador de chifre da classe de tensão de 15 kV. O descarregador em formato de chifre é formado por 2 elementos isoladores de vidro, de tensão nominal 15 kV. As hastes de descarga são de ferro galvanizado de seção circular e fixadas por dois suportes, também de ferro galvanizado, presos nas extremidades do conjunto de isoladores. As hastes de descarga possuem uma geometria em “V” para facilitar o alongamento do arco elétrico. A Fig. 3 mostra o descarregador de chifre utilizado para modelagem e ensaios.



Fig. 3 Descarregador de chifre.

3.1 Métodos

A metodologia utilizada foi primeiramente computacional e posteriormente laboratorial. Para melhor compreensão as subseções a seguir detalharão melhor os métodos.

3.1.1 Modelagem computacional

O descarregador de chifre foi modelado no software COMSOL Multiphysics. Antes da modelagem propriamente dita, foi necessário realizar a representação gráfica e computacional do equipamento mostrado na Fig.3, com levantamento das medidas dele através de um paquímetro e desenhado posteriormente no programa AutoCad. Uma vez o desenho feito no AutoCad, ele foi levado para o COMSOL. No COMSOL, uma vez o desenho já sido importado do AutoCad, foi preciso definir a permissividade dos materiais do equipamento e do meio ao redor. Os materiais foram vidro, cimento, ferro galvanizado e o ar.

Na Fig.4, com dimensões em milímetros, pode ser visualizado o descarregador de chifre modelado no COMSOL com o destaque, em azul, para a parte do equipamento que é de ferro galvanizado.

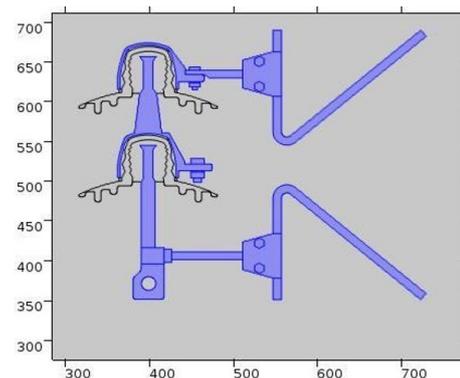


Fig. 4 Descarregador de chifre modelado no COMSOL.

A malha de elementos finitos usada foi gerada pela configuração do próprio COMSOL com um refinamento denominado pelo software de finer. A definição da malha, com dimensões em milímetros, pode ser observada na Fig. 5, formada por 33908 regiões triangulares.

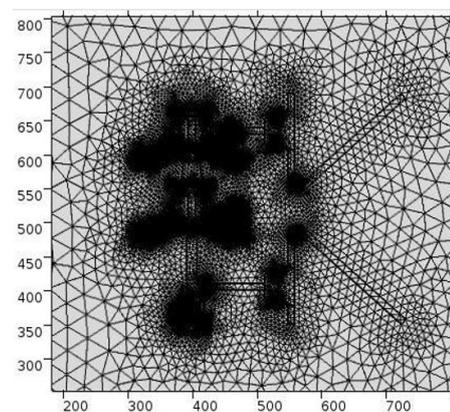


Fig. 5 Malha de elementos finitos.

3.1.2 Análise laboratorial

A parte experimental foi realizada no Laboratório de alta tensão (LAT) da Universidade Federal de Pernambuco. O LAT possui um Kit de Alta Tensão fabricado pela empresa Haefely, que possibilita obter valores de tensão na alta tensão de um transformador, a partir da medição de tensão sob um capacitor em um divisor capacitivo, e para isso, faz-se uso de uma bancada de controle, um transformador, cubículo de comutação e o divisor capacitivo.

Primeiramente, o descarregador de chifre foi colocado em suspensão através de um engate de ferro a uma barra. Com o auxílio de um fita de cobre aterrada e fixa na parede, o terminal superior do descarregador foi ligado à terra. Uma garra vermelha, que se encontra ligada a um capacitor de 100 pF, foi conectada à extremidade inferior do equipamento, onde foi aplicado e variado o valor do potencial elétrico. Na Fig.6 é apresentada esta montagem.



Fig. 6 Montagem experimental.

O controle de tensão é realizado pelo terminal de operação (equipamento OT276), capaz de variar a tensão de saída que será aplicada ao material em análise, e possibilitando variar a tensão elétrica de 0 a 100 kV. A tensão obtida pela leitura do equipamento OT276 do terminal de operação é a tensão aplicada sobre um capacitor de 68 nF ligado ao cubículo de comutação, responsável por aumentar a tensão primária, proporcionando um aumento na tensão secundária do transformador. O valor correspondente, em alta tensão, é obtido pelo o cálculo de um divisor capacitivo. A Fig.7 mostra, esquematicamente, a montagem do ensaio.

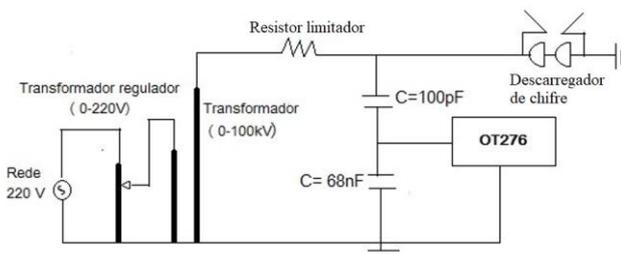


Fig. 7 Esquemático do ensaio realizado no descarregador de chifre.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados computacionais

Na análise elétrica do equipamento, no momento da formação do arco através do gap do equipamento, foram realizadas quatro simulações. O “gap”, ou afastamento, é o espaçamento entre as hastes de descarga no ponto mais próximo. A distribuição das linhas de campo no equipamento foi testada para os afastamentos de 2, 3, 4 e 5 cm. A Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 10, mostram resultados obtidos do campo elétrico e do potencial elétrico para o afastamento de 4 cm.

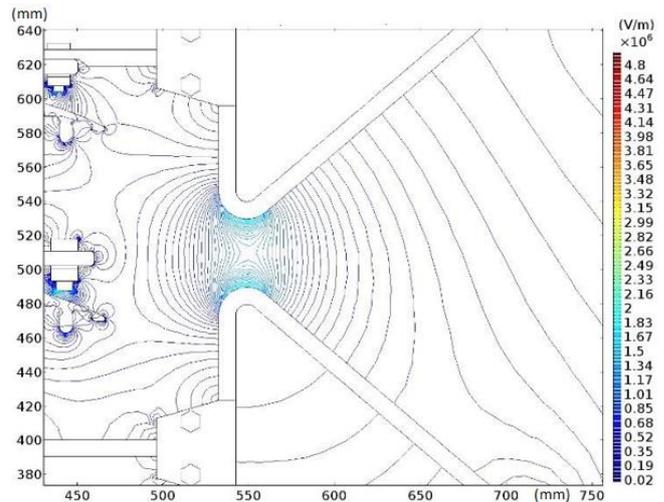


Fig. 8 Distribuição de campo elétrico para o afastamento de 4 cm de acordo com as dimensões do equipamento.

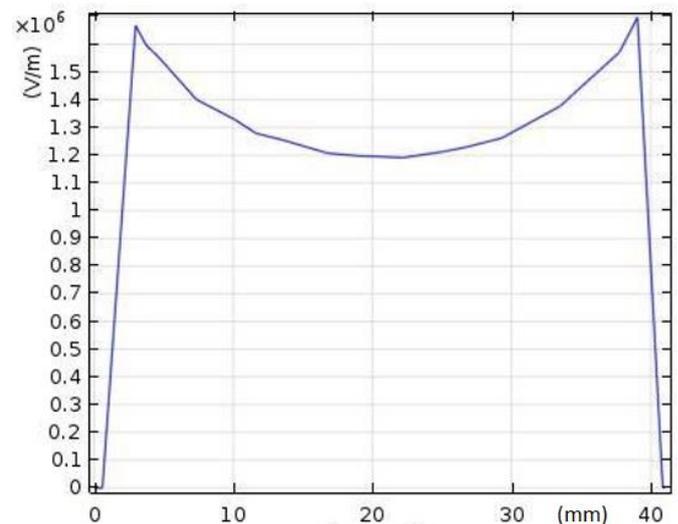


Fig. 9 Valores do campo elétrico ao longo do afastamento de 4 cm (40 mm).

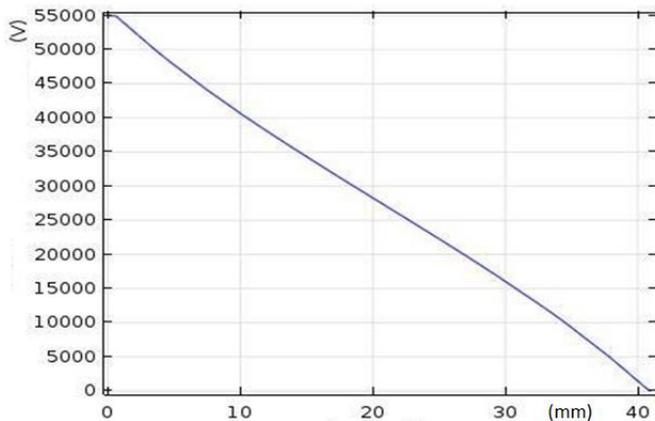


Fig. 10 Valores do potencial elétrico ao longo do afastamento de 4 cm (40 mm).

As simulações realizadas apresentaram uma distribuição de campo não homogênea concentrada nos terminais próximos aos eletrodos. Esse fenômeno ocorre devido ao poder das pontas, e depende do ângulo em sua extremidade. Também foi possível notar que as linhas de campo elétrico estão mais concentradas quanto menor for o espaçamento entre os eletrodos.

Os gráficos dos valores da rigidez dielétrica do material, como o da Fig. 9, para cada afastamento, capaz de dar início a formação do arco, quando de tensões disruptivas, obtidas em laboratório, são especificadas em termos de valores de contorno dos terminais do equipamento. Os valores mínimos observados no ponto central do espaçamento entre os eletrodos é o campo elétrico associado à tensão disruptiva.

Os gráficos dos valores do potencial elétrico, como o da Fig. 10, para cada afastamento, mostraram que o potencial entre os eletrodos possui uma variação entre o valor de tensão disruptiva, no ponto onde o potencial é aplicado, e alcança o valor de zero na sua extremidade aterrada. Ele decresce até esse valor pois a extremidade do equipamento encontra-se aterrada com potencial de zero volt. A Tabela 1, resume os valores obtidos dos gráficos, como o da Fig. 9, para cada espaçamento, no ponto médio.

Tabela 1 Campo elétrico no ponto médio

Afastamento	Campo elétrico
2 cm	$2,0 \times 10^6$ V/m
3 cm	$1,5 \times 10^6$ V/m
4 cm	$1,2 \times 10^6$ V/m
5 cm	$1,1 \times 10^6$ V/m

4.1 Resultados laboratoriais

Foram realizadas quatro medições para diferentes valores de afastamento entre os eletrodos, com o intuito de captar o momento de início da descarga disruptiva, e para isso a tensão aplicada sobre eles foi elevada gradativamente, sendo possível observar o valor de tensão capaz de estabelecer o arco em cada configuração. A Tabela 2 apresenta os dados coletados em laboratório.

Tabela 2. Relação entre o afastamento dos eletrodos e a tensão no capacitor de 68nF

Afastamento	Tensão no capacitor de 68 nF
2 cm	64,20 V
3 cm	74,00 V
4 cm	83,70 V
5 cm	93,20 V

A Fig. 11 apresenta um gráfico que relaciona a tensão medida no capacitor de 68 nF e a respectiva tensão total entre os terminais do divisor capacitivo, e conseqüentemente, no descarregador de chifre. Neste gráfico, observando o valor da tensão no capacitor de 68 nF do divisor de tensão capacitivo, pode-se verificar a tensão no lado de alta tensão do transformador, desprezando-se a queda de tensão no capacitor de 68 nF, que é muito menor que a tensão no capacitor de 100 pF.

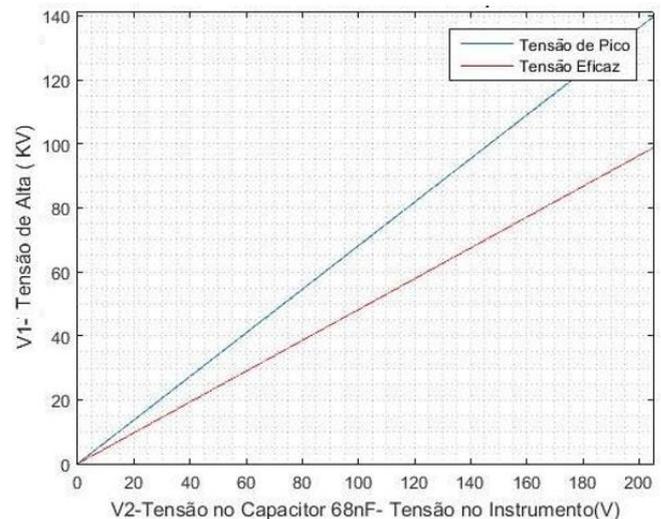


Fig. 11 Gráfico da relação de tensão no divisor capacitivo.

Fazendo uso do gráfico da Fig. 11, pôde-se verificar, pela respectiva correspondência entre os pontos dos eixos dos gráficos sobre as retas, os valores aproximados de tensão disruptivas, correspondentes no lado de alta tensão do transformador, para cada espaçamento entre os eletrodos, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 Relação entre a Tensão disruptiva e o afastamento entre os eletrodos

Afastamento	Tensão disruptiva
2 cm	45,00 kV
3 cm	50,00 kV
4 cm	55,00 kV
5 cm	61,00 kV

A Tabela 3 pode ser reescrita, em termos de campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva, pela divisão da tensão disruptiva e o respectivo espaçamento. A Tabela 4 apresenta os valores de campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva para cada espaçamento.

Tabela 4 Relação entre o campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva e o afastamento entre os eletrodos

Afastamento	Campo elétrico
2 cm	$2,25 \times 10^6$ V/m
3 cm	$1,67 \times 10^6$ V/m
4 cm	$1,37 \times 10^6$ V/m
5 cm	$1,22 \times 10^6$ V/m

4.2 Resultados comparativos

Ao serem comparados os resultados da modelagem do dispositivo descarregador de chifre e do ensaio em laboratório, nota-se que os valores obtidos para o campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva foram relativamente próximos. A Tabela 5 apresenta a diferença entre os valores obtidos de cada situação.

Tabela 5 Resultados comparativos da modelagem computacional e laboratorial

Afastamento	Campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva da análise computacional	Campo elétrico associado à ocorrência da descarga disruptiva da análise laboratorial	Diferença percentual
2 cm	$2,05 \times 10^6$ V/m	$2,2 \times 10^6$ V/m	6,82%
3 cm	$1,5 \times 10^6$ V/m	$1,6 \times 10^6$ V/m	6,25%
4 cm	$1,2 \times 10^6$ V/m	$1,37 \times 10^6$ V/m	12,41%
5 cm	$1,1 \times 10^6$ V/m	$1,22 \times 10^6$ V/m	9,84%

6. CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada uma análise do dispositivo descarregador de chifre, com aplicação para a isolação de cabos para-raios.

Foi realizado um estudo sobre o equipamento com vistas a obter uma modelagem computacional que simulasse o comportamento do “gap” em diversos afastamentos.

O equipamento foi modelado no COMSOL e realizadas simulações com o objetivo de verificar a distribuição do campo elétrico ao longo dele. Também foram verificados os valores do campo elétrico e do potencial elétrico ao longo do espaçamento para diversos valores.

Foram realizados também experimentos laboratoriais. Observou-se, como esperado, uma dependência entre a distância dos eletrodos do descarregador em forma de chifre e a tensão de ruptura do dielétrico, pois quanto maior o valor do espaçamento, maior será a tensão necessária para romper o ar e permitir a passagem de corrente e o aparecimento do arco elétrico.

Comparativamente, os resultados obtidos dos valores do potencial elétrico limite, capaz de causar a ruptura elétrica,

da simulação computacional e do ensaio laboratório foram próximos. A maior diferença encontrada foi de aproximadamente a 12%.

É importante observar que devido a sua geometria, o campo elétrico se concentrará em suas extremidades, direcionando a eventual abertura dos arcos, quando de transitórios na linha de transmissão (curtos-circuitos e descargas atmosféricas).

Apesar de requerer diversas validações adicionais, se vislumbra a possibilidade de se utilizar as ferramentas computacionais utilizadas com o propósito de rever/aprimorar o projeto de descarregadores em forma de chifre, viabilizando a redução das perdas sem comprometer a confiabilidade da linha de transmissão.

REFERÊNCIAS

- COMSOL. *Multiphysics User's Guide*. Boston, Estados Unidos, 2012.
- Domingues, L., Pinto, R. and Junior, O. (2005). *Desenvolvimento de Técnicas para Redução de Perdas em Cabos Para-raios OPGW*. In: Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica - CITENEL. Florianópolis, SC.
- Gomes, R. A. et al. (2019). *Estudo e modelagem computacional do dispositivo descarregador em forma de chifre para isolação de cabos para-raios*. In: 2019 Brazilian Technology Symposium. Campinas, SP.
- Filho, J. (2003). *Manual de equipamentos elétricos*. 4th ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC.
- Fuchs, R. (1979). *Transmissão de energia elétrica*. 1st ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos. p.V.1.
- Fuchs, R. (1979). *Transmissão de energia elétrica*. 1st ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos, p.V.2.
- Fuchs, R. (2015). *Transmissão de energia elétrica*. 3st ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos, p.V.2.
- Nogueira, H. (2017). *Sistema de Aterramento em Linhas de Transmissão Frente à Descargas Atmosféricas*. Revista on-line IPOG, 01(13ª), p.23.