XI WORKSPOT- 11° Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais

RIO DE JANEIRO, RJ – 25 a 27 NOVEMBRO 2024

A3 – EQUIPAMENTOS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO
TP2 – APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO, MEDIÇÃO E CONFIABILIDADE DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS

Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTOs) em Buchas Capacitivas de GIS: Modelagem e Simulação com Método de Monte Carlo

Daniel Carrijo[1]
Gabriel de Souza Pereira Gomes[2]
Rafael Prux Fehlberg[3]
Rogério Andrade Flauzino[1]
Iony Patriota De Siqueira[4]

USP – Universidade de São Paulo[1]
Genesis Dataculture[2]
Treetech Tecnologia[3]
Tecnix Engenharia e Arquitetura[4]

Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada das Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (*VFTOs*) e seus efeitos nas buchas capacitivas de subestações isoladas a gás (*GIS*). Utilizando o método de Monte Carlo, foram simuladas variações nos parâmetros do modelo elétrico de alta frequência de uma bucha de 138 kV, permitindo uma avaliação estatística dos impactos das VFTOs sobre o isolamento capacitivo. Os resultados indicam que essas sobretensões podem induzir tensões elevadas e desiguais ao longo das camadas da bucha, sendo o comportamento mais crítico observado nas regiões próximas à entrada da bucha, onde os picos de tensão foram mais significativos, e nas camadas próximas à flange, onde a variação em relação aos valores de operação normais se mostrou maior, apesar das menores tensões absolutas. A análise revelou que o método de Monte Carlo é uma ferramenta eficaz para investigar fenômenos complexos, como as VFTOs, ao permitir a avaliação de múltiplos cenários e incertezas.

PALAVRAS-CHAVE

Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (*VFTO*); Buchas Capacitivas; Subestações Isoladas a Gás (*GIS*); Método de Monte Carlo; Sobretensões Transitórias; Descargas Parciais; Modelagem de Alta Frequência; Degradação de Isolamento; Transformadores de Potência.

1 INTRODUÇÃO

As Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (*VFTOs*) são fenômenos eletromagnéticos caracterizados por rápidas frentes de onda (alta frequência) e curtas durações [09], típicos de instalações de subestações isoladas a gás (*GIS*) [08]. Essas sobretensões ocorrem

[1]Autor Principal: Daniel Carrijo – carrijo@usp.br R:1.00

principalmente durante operações de manobras, como a abertura e fechamento de disjuntores, gerando transientes que podem comprometer a integridade dos equipamentos conectados. Um componente particularmente suscetível a essas sobretensões é a bucha capacitiva, responsável por isolar e conectar os condutores de alta tensão em transformadores e outros equipamentos de subestações [12].
Dada a criticidade desses eventos transitórios, torna-se essencial uma análise aprofundada dos impactos das VFTOs nas buchas condensivas, pois estas desempenham um papel crucial na confiabilidade de sistemas elétricos de alta tensão. Falhas em buchas geralmente resultam em custos elevados de manutenção e paradas imprevistas no fornecimento de energia.
Neste trabalho, o objetivo é modelar e simular o comportamento das buchas condensivas sob a influência de VFTOs utilizando o método de Monte Carlo, uma técnica robusta que permite a análise estatística de variações estruturais dos componentes elétricos. A escolha dessa metodologia visa fornecer uma avaliação abrangente da sensibilidade dos parâmetros modelados. A partir dessas simulações, as sobretensões transitórias são analisadas em termos de suas amplitudes, frequências e distribuição de tensões ao longo da bucha.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS VFTOS

As Sobretensões Transitórias Muito Rápidas são fenômenos eletromagnéticos caracterizados por altas frequências (tipicamente na faixa de dezenas a centenas de mega-hertz) e tempos de subida extremamente curtos, variando de nanosegundos a poucos microssegundos. Essas sobretensões ocorrem principalmente em subestações isoladas a gás, onde o gás SF6 (hexafluoreto de enxofre) é utilizado como meio isolante. O principal mecanismo de geração das VFTOs está relacionado às operações de manobra, como a abertura e fechamento de disjuntores, chaves seccionadoras, ou falhas internas no GIS, que induzem altas taxas de variação de tensão. A figura 01 exemplifica uma sequência de impulsos VFTO, oriundos de uma GIS incidindo em uma bucha capacitiva.

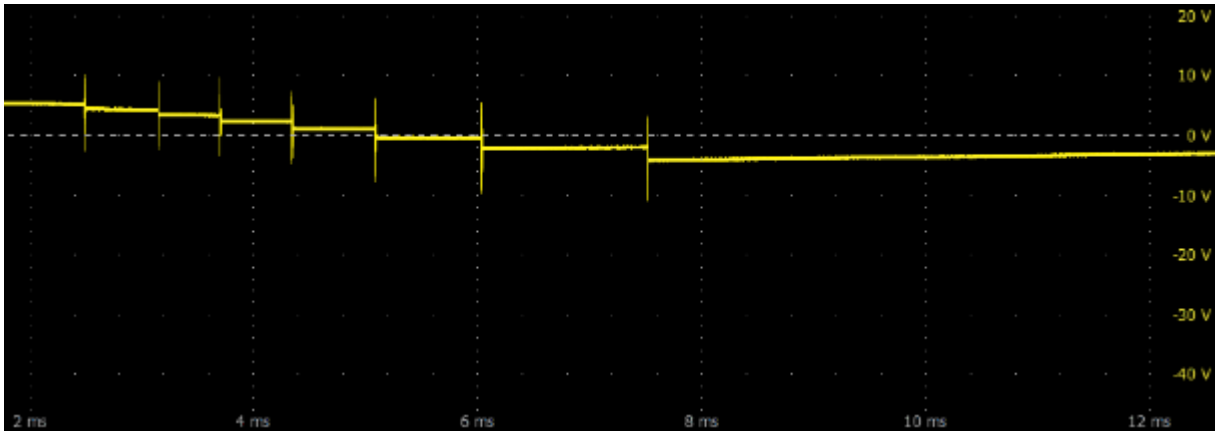


Figura 01 – Sequencia de impulsos tipo VFTO

As VFTOs são particularmente perigosas porque, devido à sua alta frequência, podem induzir sobrecargas localizadas e descargas parciais em componentes isolantes, como as buchas capacitivas. A interação dessas sobretensões com os equipamentos conectados pode resultar em uma distribuição não uniforme de tensões, causando degradação progressiva do isolamento. O comportamento oscilatório dessas sobretensões, com amplitudes que podem atingir valores elevados em um curto período de tempo, exige uma análise cuidadosa e detalhada do seu impacto nos componentes dos sistemas elétricos.

2.1 AS DIFERENÇAS ENTRE VFTO, IMPULSO DE MANOBRA E IMPULSO ATMOSFÉRICO

Embora VFTOs, impulsos de manobra e impulsos atmosféricos sejam formas de sobretensões transitórias, eles apresentam características distintas em termos de frequência, duração e mecanismos de geração. As VFTOs se destacam pela alta frequência e curta duração, sendo especialmente críticas em ambientes GIS [13] [14] [15].
Os impulsos de manobra são mais lentos e possuem mais energia, causando estresses de longa duração, enquanto os impulsos atmosféricos se concentram em sobretensões de maior amplitude com tempos de subida intermediários.
A principal diferença entre VFTOs e as demais formas de sobretensão é a escala temporal em que ocorrem e o impacto de suas altas frequências nos materiais isolantes dos equipamentos conectados. A figura 02 apresenta uma caracterização destes fenômenos transitórios.

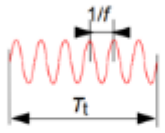
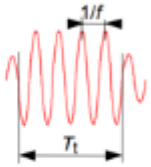
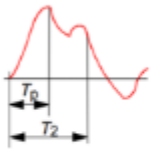
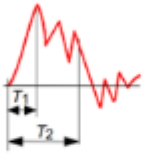
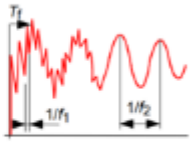
Classe	Baixa Frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Formas de onda das tensões ou sobretensões					
Faixas de formas de onda das tensões ou sobretensões	f = 50 Hz ou 60 Hz Tt ≥ 3 600 s	10Hz<f<500Hz 0,02 s ≤ Tt ≤ 3 600 s	20 µs < Tcr ≤ 5 000 µs T2 ≤ 20 ms	0,1µs < T1 ≤ 20µs T2 ≤ 300 µs	T≤ 0,1 µs 0,3MHz<f1<100 MHz 30 kHz < f2 < 300 kHz

Figura 02 - Classes e formas de onda de tensões e sobretensões. Adaptado de [27] e [28]

3 A BUCHA CAPACITIVA E SUA SUSCEPTIBILIDADE ÀS VFTOS

As buchas capacitivas são componentes essenciais em sistemas de alta tensão [25], utilizadas para isolar e conectar condutores energizados através de barreiras de potencial. Elas possuem um núcleo central condutor envolto por várias camadas concêntricas de material isolante, intercaladas com folhas condutoras. Essa estrutura forma um arranjo capacitivo que distribui uniformemente o campo elétrico ao longo do isolamento, minimizando os gradientes de tensão e reduzindo o risco de falhas elétricas em condições normais de operação.
No entanto, essas buchas são particularmente vulneráveis a Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (*VFTOs*) devido à sua alta frequência e curta duração. A estrutura capacitiva das buchas, que é eficaz para lidar com impulsos de baixa e média frequência, enfrenta desafios significativos com as VFTOs, que apresentam rápidas oscilações de alta frequência [01][02]. Essas oscilações podem induzir sobretensões localizadas entre as camadas condutoras, criando distribuições não uniformes de tensão ao longo do isolamento interno da bucha [03][04][05][06]. Como resultado, há um risco aumentado de descargas parciais, degradação do isolamento e, eventualmente, defeito ou falha do componente.

3.1 INTERAÇÃO DO ARRANJO CIRCUITAL INTERNO DA BUCHA CAPACITIVA COM AS VFTOS

As buchas capacitivas são projetadas para distribuir uniformemente o campo elétrico ao longo do seu isolamento interno, utilizando um arranjo de camadas concêntricas de folhas condutoras intercaladas com materiais isolantes. Esse arranjo cria uma série de capacitâncias entre as camadas condutoras, enquanto as conexões internas e o próprio condutor central apresentam indutâncias. Essa estrutura capacitiva-indutiva resulta em um comportamento complexo quando submetida a surtos transitórios rápidos, como os VFTOs.
Devido à esta complexidade, entender essas dinâmicas é essencial para garantir a confiabilidade dos sistemas de alta tensão. O estudo detalhado dessas interações permite o desenvolvimento de modelos preditivos, a implementação de proteções mais eficientes contra surtos e a adoção de práticas de manutenção preventiva, como o monitoramento online [24][26]. Isso reduz o risco de defeitos ou falhas e aumenta a longevidade dos equipamentos [16][22]. Serão descritas algumas das principais interações e suas consequências.
Capacitâncias internas e a distribuição de tensões: As capacitâncias internas em uma bucha capacitiva são projetadas para reduzir os gradientes de tensão ao longo do isolamento, permitindo uma distribuição mais uniforme das tensões durante a operação normal. No entanto, quando a bucha é atingida por uma VFTO, o comportamento transitório dessas capacitâncias muda drasticamente devido à alta frequência e à rápida variação de tensão associada aos surtos. Em condições normais, as capacitâncias funcionam para "suavizar" as variações de tensão, mas nas VFTOs, que possuem tempos de subida de nanosegundos, essas capacitâncias não conseguem “reagir” com rapidez suficiente. Isso resulta em sobretensões localizadas entre as camadas condutoras, especialmente nas regiões mais próximas à entrada da bucha. Essas sobretensões podem exceder a resistência dielétrica do material isolante, levando à ocorrência de descargas parciais entre as camadas [09]. A figura 03 mostra um modelamento elétrico típico de uma bucha capacita em altas frequências.

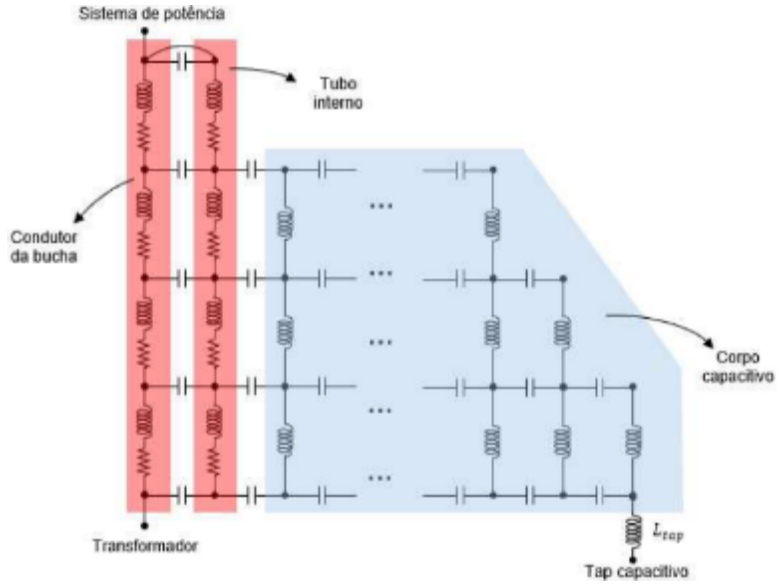


Figura 03 - Modelamento para alta frequência da bucha capacitiva. Adaptado de [17]

Indutâncias internas e respostas oscilatórias: As indutâncias internas, associadas ao condutor central e às conexões metálicas, também desempenham um papel importante nas respostas da bucha às VFTOs. Devido às altas frequências envolvidas (na faixa de 10 MHz a 100 MHz), essas indutâncias podem causar ressonâncias internas, amplificando certas frequências dos surtos VFTO. Essas ressonâncias ocorrem quando a frequência da VFTO

coincide com a frequência natural de oscilação do sistema formado pelas capacitâncias e indutâncias internas da bucha. Quando isso acontece, o fenômeno de ressonância pode causar picos de tensão em alguns pontos da bucha, intensificando ainda mais as sobretensões localizadas e aumentando a probabilidade de falhas no isolamento [07].

Sobretensões e degradação do isolamento: Sob a influência de VFTOs frequentes, a bucha capacitiva experimenta ciclos repetidos de sobretensões transitórias que podem levar a uma degradação progressiva do isolamento. Como as VFTOs possuem componentes de frequência elevada, as rápidas oscilações de tensão induzem estresses localizados nas interfaces das camadas condutoras e no material isolante entre elas. Isso pode iniciar descargas parciais, que degradam a resistência dielétrica do material ao longo do tempo. Essas descargas parciais, quando ocorrem repetidamente, criam caminhos de condução elétrica dentro do isolante, o que eventualmente pode levar a falhas no isolamento. Esse processo é acelerado em sistemas GIS, onde a presença de gás SF6, combinado com a alta frequência dos surtos, aumenta o risco de falhas [10].

Ressonâncias e sobretensões prolongadas: As VFTOs, ao ressoarem com as indutâncias e capacitâncias internas, podem gerar formas de onda oscilatórias prolongadas dentro da bucha. Essas oscilações prolongadas resultam em tensões que se repetem ao longo do tempo, aumentando o número de ciclos de estresse dielétrico. Mesmo que essas oscilações tenham amplitudes menores do que outros tipos de impulsos, como os atmosféricos, a repetição e a frequência elevada desses surtos transitórios causam um efeito cumulativo de degradação no material isolante [11].

Degradação progressiva: A interação entre as capacitâncias, indutâncias e VFTOs leva a uma degradação progressiva do material isolante da bucha. A cada novo surto transitório, o material isolante sofre mais estresse, e as descargas parciais internas enfraquecem a integridade dielétrica do componente. Com o tempo, esses pequenos defeitos acumulados podem se expandir e gerar arcos internos, levando à falha do isolamento. Em condições extremas, isso pode resultar em defeitos ou falhas, como explosões ou incêndios em transformadores, afetando a confiabilidade de toda a instalação.

4 O MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é uma técnica estatística amplamente utilizada para simular e analisar sistemas complexos que envolvem variáveis incertas ou aleatórias. Ele baseia-se na geração de um grande número de cenários possíveis para uma determinada situação, utilizando distribuições probabilísticas que representam variações dos parâmetros de entrada [18].

A figura 04 mostra como o método de Monte Carlo pode ser usado para calcular empiricamente o valor de π.

No contexto deste estudo, o método de Monte Carlo [19] é aplicado para modelar o comportamento das buchas capacitivas quando submetidas a sobretensões transitórias muito rápidas (VFTOs), onde há uma vasta gama de fatores que afetam a magnitude e a propagação dessas sobretensões. As VFTOs, devido à sua natureza complexa e de alta frequência, possuem características que variam substancialmente em função de diversos fatores, como as condições operacionais da subestação, a geometria e os materiais envolvidos nas buchas, bem como o tipo de manobra que desencadeia o surto. Para lidar com essa variabilidade, o método de Monte Carlo oferece uma abordagem robusta para incluir as incertezas e analisar como essas variáveis afetam o desempenho do sistema de forma global [20].

Ao invés de adotar uma análise determinística, onde os parâmetros são considerados fixos e o resultado é único, o método de Monte Carlo simula múltiplos cenários, gerando resultados

estatísticos que fornecem uma visão probabilística do comportamento do sistema sob diferentes condições [21].

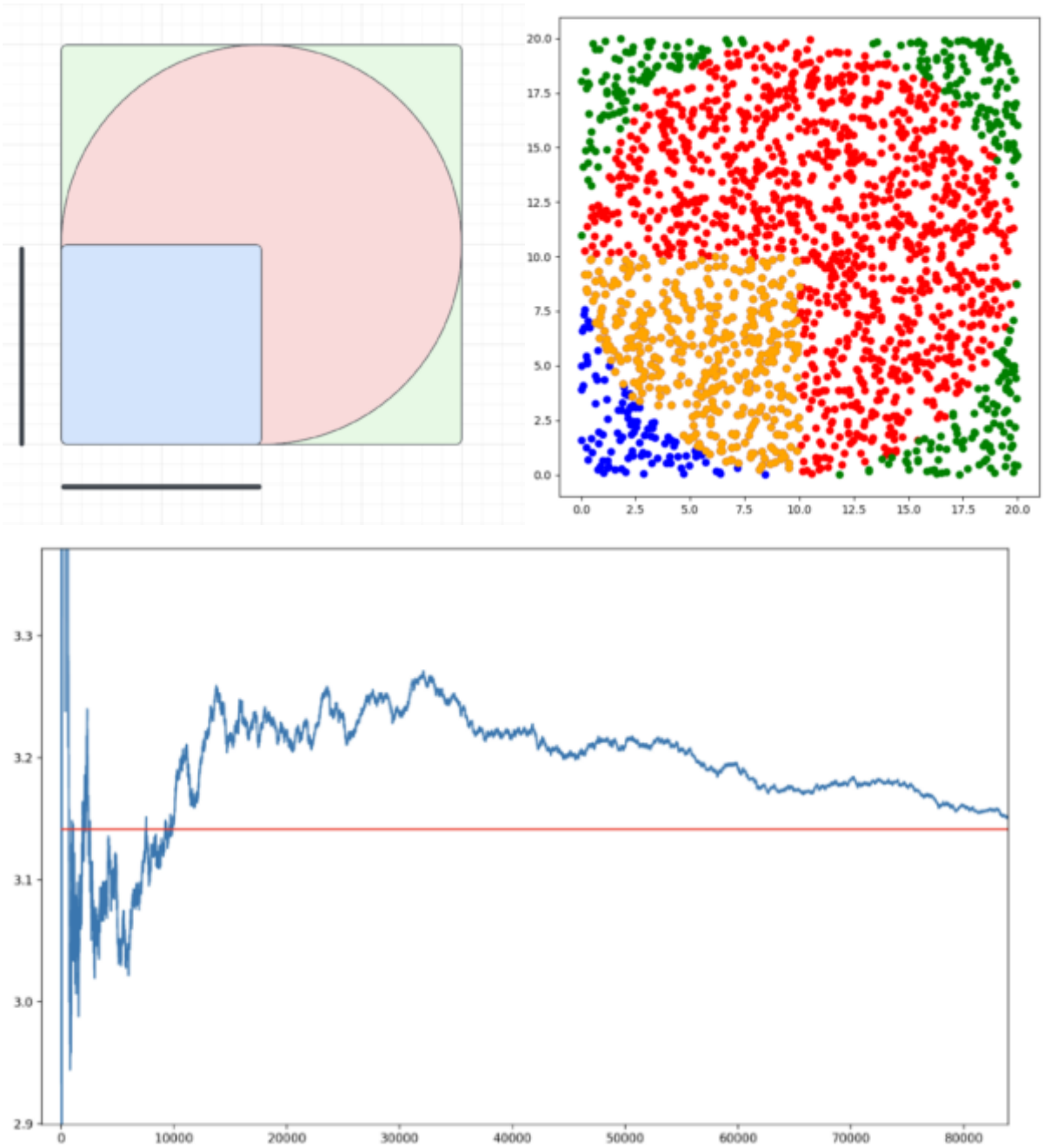


Figura 04 – Método de Monte Carlo usado para calcular π. O gráfico de linha mostra a convergência da simulação para o valor correto conforme mais "rodadas" são realizadas.

Através da geração de centenas de amostras simuladas, o método de Monte Carlo permite uma análise detalhada dos efeitos das VFTOs, observando-se a dispersão das tensões induzidas. Essa abordagem permite identificar não apenas os valores mais prováveis de sobretensão que podem ocorrer, mas também a distribuição dessas sobretensões ao longo da bucha, facilitando a identificação de pontos críticos onde as tensões atingem níveis potencialmente perigosos.

A aplicação desse método é especialmente útil quando se trata de VFTOs, pois esses fenômenos não se comportam de maneira linear ou previsível, tornando difícil prever com

exatidão o comportamento de uma única simulação determinística. A natureza oscilatória e de alta frequência das VFTOs, combinada com as propriedades capacitivas e indutivas das buchas, gera distribuições de tensões que são altamente sensíveis a pequenas variações nos parâmetros do sistema. Dessa forma, o Monte Carlo ajuda a capturar essa sensibilidade e a fornecer uma visão mais clara da probabilidade de falhas por sobretensão em diferentes regiões da bucha.

5 BUCHA CAPACITIVA DE 138 KV MODELADA PARA ALTA FREQUÊNCIA

Como no estudo [23], utilizou-se parâmetros de uma bucha de 138 kV gás-óleo (SF6-Óleo), tipicamente utilizada na interface entre subestações isoladas a gás SF6 (GIS) e transformadores elevadores de potência. A figura 05 apresenta este modelo.

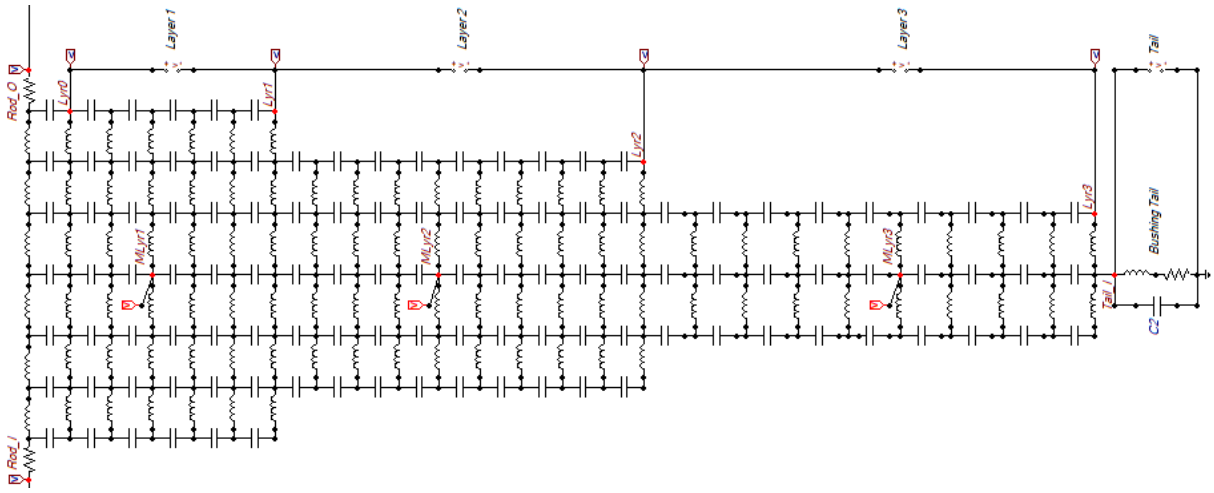


Figura 05 - Modelamento da bucha capacitiva utilizado neste estudo

A forma de onda da VFTO incidente foi a mesma utilizada no estudo [23], como mostra a figura 05a.

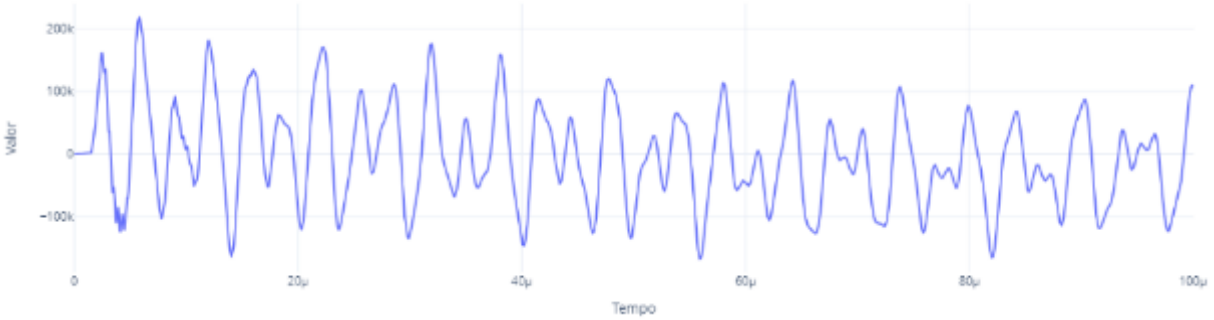


Figura 05a – VFTO incidente na bucha capacitiva em estudo

O modelamento do fio (cabo) de ligação (*tail*) entre a última camada capacitiva e a tomada (*tap*) foi realizado pela superposição de um componente indutivo e outro resistivo. O componente capacitivo foi desprezado pelo fato de ser muito pequeno comparado com o C2 de qualquer bucha real. Foi considerado um cabo de 20 cm, com diâmetro aproximado de 1.784 mm (2,5 mm^2). A figura 06 mostra uma forma usual de conectar eletricamente o *tail* a última camada capacitiva.

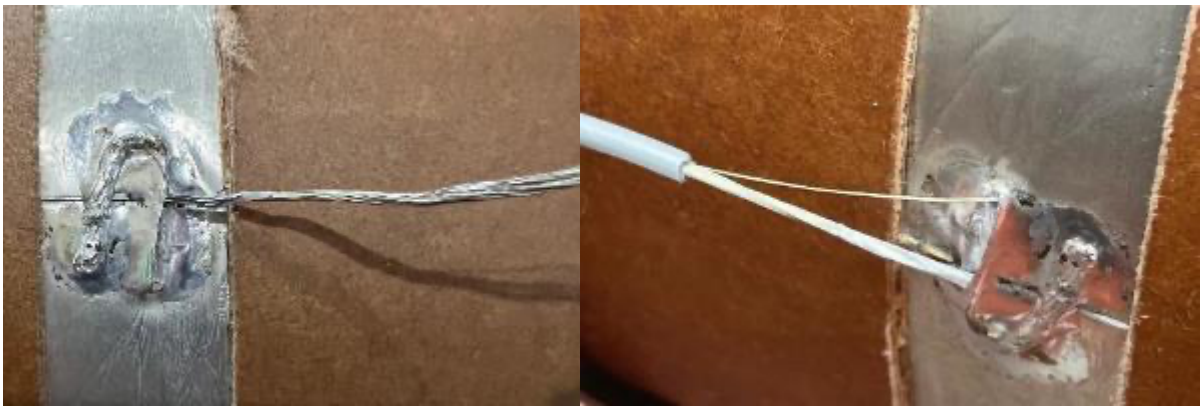


Figura 06 - Exemplo da conexão do *tail* a última camada capacitiva

A frequência de modelamento foi de 20 MHz. Para a parcela indutiva, foi utilizado o método *Li-PACAML* e para a parcela resistiva o método *Rac-TEDML*, ambos descritos em [29]

6 SIMULAÇÕES

O objetivo principal destas simulações foi observar a sensibilidade deste da bucha capacitiva a variação de seus parâmetros.
Forma realizados cinco estudos de caso cada um com cem simulações.

- No primeiro estudo variou apenas a indutância e resistência do fio de ligação (*tail*) entre a última camada capacitiva e a tomada (*tap*);
- No segundo estudo variou-se apenas as capacitâncias das camadas modeladas de C1;
- No terceiro estudo variou-se apenas as indutâncias das camadas modeladas de C1;
- No quarto estudo variou-se simultaneamente as capacitâncias e indutâncias das camadas modeladas de C1;
- No quinto e último estudo, variou-se simultaneamente as capacitâncias e indutâncias de C1 e a indutância e a resistência do *tail*.

Para a geração dos valores utilizados pelo método de Monte Carlo foi utilizada uma distribuição aleatória uniforme (*quando todos os valores no intervalo [a,b] possuem a mesma chance de ocorrer*). Esta distribuição foi usada por ter sido assumido que a *densidade de probabilidade* é constante sobre o intervalo de definição. Como valor médio, foram utilizados os valores modelados em [23] e assumido um intervalo de excursão de ± 10% da média.
Em todas as tabelas das simulações serão apresentados os valores obtidos para as camadas analisadas no modelo apresentado na figura 05.

6.1 SIMULAÇÃO 01: VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA E RESISTÊNCIA DO *TAIL*

Nesta simulação realizou-se a variação dos parâmetros do *tail*. Primeiramente, é necessário verificar se a estabilidade numérica do modelo, em conjunto com a sua acurácia física, atende aos objetivos do estudo. Na tabela 01 são apresentados os valores temporais onde o máximo valor da tensão nas diversas camadas foi atingido, em 12 de 100 simulações. A tabela 02 condensa as estatísticas das 100 simulações.
Destes dados, podemos verificar que a variação temporal entre os pontos de máximo é muito pequena. Isso é o esperado e atesta a estabilidade numérica do modelo, pois como os princípios da superposição e linearidade circuitais totalmente pertinentes ao modelo (*todos os elementos regidos por equações lineares e sem energia inicial armazenada*) é esperado que a forma de onda varie pouco (ou nada) entre cada uma das simulações de um mesmo modelo.

Tabela 01 – Instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido por simulação, por camada

nsim	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
0	5.762 µs	5.761 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
9	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
18	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
27	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.836 µs	5.857 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
36	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
45	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.836 µs	5.857 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
54	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.836 µs	5.857 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
63	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.790 µs	5.832 µs	5.901 µs	3.367 µs	3.367 µs
72	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.789 µs	5.832 µs	5.901 µs	3.368 µs	3.368 µs
81	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.836 µs	5.857 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
90	5.760 µs	5.759 µs	5.757 µs	5.753 µs	5.839 µs	5.859 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
99	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.755 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs

Tabela 02 – Métricas estatísticas do instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	5.764 µs	5.763 µs	5.762 µs	5.758 µs	5.832 µs	5.855 µs	5.878 µs	3.358 µs	3.358 µs
std	0.008 µs	0.009 µs	0.009 µs	0.011 µs	0.016 µs	0.008 µs	0.008 µs	0.003 µs	0.003 µs
min	5.760 µs	5.759 µs	5.757 µs	5.753 µs	5.788 µs	5.831 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
25%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.836 µs	5.857 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
50%	5.762 µs	5.761 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
75%	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.756 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
max	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.787 µs	5.839 µs	5.859 µs	5.901 µs	3.368 µs	3.368 µs

Na tabela 03 são apresentados os valores máximos da tensão nas diversas camadas, em 12 de 100 simulações.

Tabela 03 – Valor máximo da tensão atingido por simulação, por camada

nsim	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
0	218037.8	212834.8	203649.7	189878.6	147170.5	94761.3	42927.2	7077.5	7075.8
9	218047.7	212844.6	203659.2	189887.4	147159.6	94739.7	42901.7	7060.5	7058.8
18	218019.5	212816.7	203632.1	189862.3	147191.3	94800.7	42974.0	7108.0	7106.3
27	218051.3	212848.2	203662.7	189890.8	147155.8	94731.9	42892.2	7054.1	7052.5
36	218030.1	212827.2	203642.4	189871.7	147179.0	94777.7	42946.8	7090.3	7088.6
45	218054.2	212851.0	203665.5	189893.4	147152.7	94725.7	42884.7	7049.1	7047.4
54	218053.7	212850.5	203665.0	189893.0	147153.2	94726.8	42886.0	7049.9	7048.2
63	218998.9	213764.3	204520.1	190653.8	147516.6	93671.3	41676.8	11832.8	11831.1
72	218988.5	213754.3	204510.6	190645.1	147509.8	93656.9	41665.4	11820.3	11818.7
81	218054.2	212851.0	203665.5	189893.4	147152.7	94725.7	42884.7	7049.1	7047.4
90	218004.2	212801.7	203617.4	189848.9	147209.1	94833.3	43012.3	7132.3	7130.6
99	218041.3	212838.3	203653.0	189881.7	147166.7	94753.7	42918.2	7071.5	7069.8

A tabela 04 condensa as estatísticas das 100 simulações.

Tabela 04 – Métricas estatísticas do valor máximo da tensão atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	218144.9	212938.2	203746.4	189964.4	147220.1	94645.2	42795.0	7659.1	7657.4
std	314.9	304.6	285.3	254.1	109.9	366.5	419.6	1546.2	1546.2
min	218001.8	212799.2	203615.0	189846.8	147152.7	93633.8	41646.9	7049.1	7047.4
25%	218016.5	212813.8	203629.3	189859.7	147164.4	94735.0	42896.0	7068.0	7066.3
50%	218034.7	212831.7	203646.8	189875.9	147186.8	94767.8	42935.0	7101.5	7099.8
75%	218049.9	212846.8	203661.3	189889.5	147203.7	94806.9	42981.4	7125.1	7123.4
max	219004.3	213769.6	204525.1	190658.3	147520.2	94838.7	43018.5	11839.4	11837.7

Cabe aqui notar a dispersão amostral da tensão máxima em cada uma das camadas da bucha, em especial a do *tail*, em função da variação dos parâmetros do próprio tail. Percebe-se a sensibilidade da média das tensões máximas (maior desvio padrão) relação a variação dos seus próprios parâmetros. A despeito disto, a variação de tensão das outras camadas em relação à média de seus máximos foi pequena.
A matriz de correlações apresentada na figura 07 é uma outra forma de enxergar estes dados.

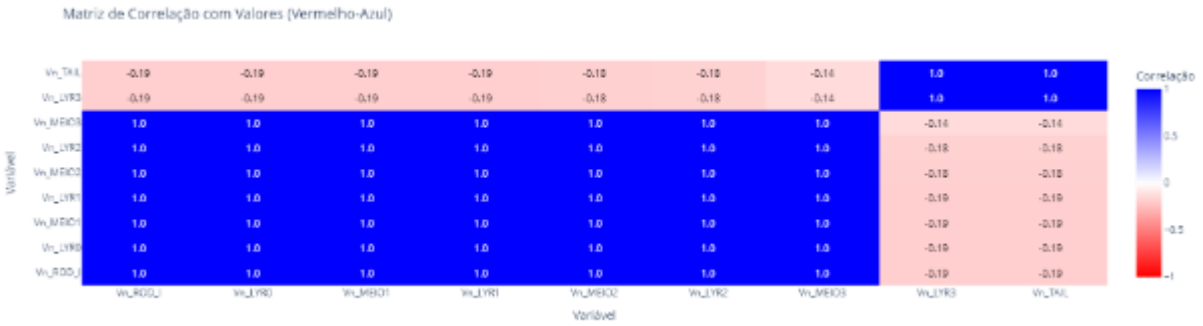


Figura 07: Matriz de Correlações, indicando que a tensão da última camada e do *tail* são pouco correlacionadas com as tensões das outras camadas, que por sua vez, são muito correlacionadas entre si.

Os valores mais próximos de 1 indicam forte correlação entre as variáveis, e os mais próximos de 0 baixa correlação. Quanto mais parecidas são as formas de onda e seus valores máximos, maior a correlação. Por aqui, nota-se que as tenções da camada mais próxima do *tail* e as tensões do próprio *tail* apresentam baixa correlação, o que significa maior sensibilidade a alteração dos parâmetros desta simulação.
Na figura 08, são mostradas as formas de onda para as diversas camadas estudas.

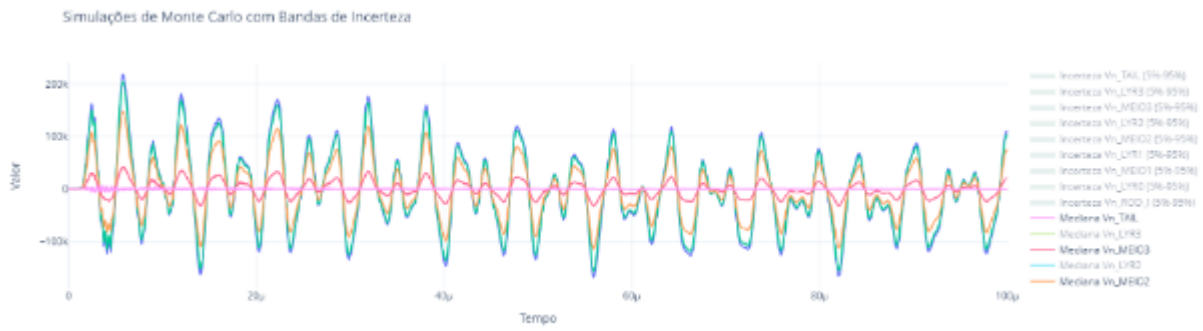


Figura 08 – Formas de onda para as diversas camadas estudas

Na figura 09, são mostradas as formas de onda para as diversas camadas estudas, com destaque para o intervalo de 0 a 20 µs.

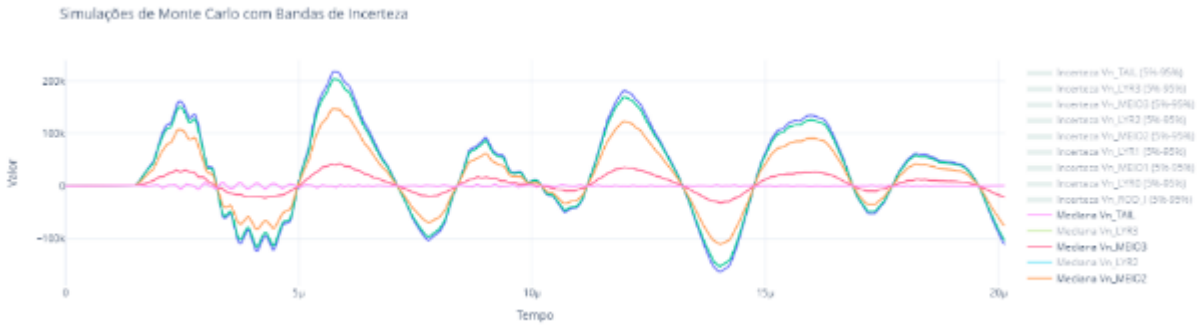


Figura 09 – Formas de onda para as diversas camadas estudas no intervalo de tempo de 0 a 20 µs

Na figura 10, é mostrada a forma de onda da tensão no *tail*, com as incertezas entre a mediana e os valores máximos da tensão.

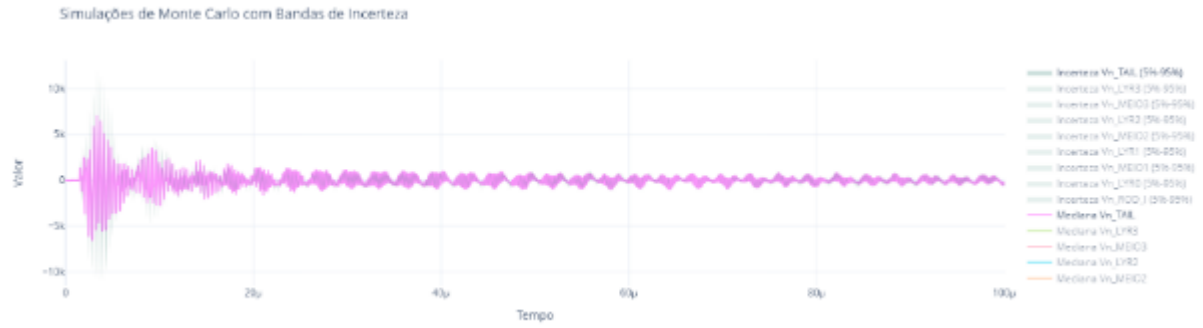


Figura 10 – Forma de onda no *tail*. Em cinza é possível ver as amplitudes das incertezas (variações)

Na figura 11, é mostrada a forma de onda da tensão no *tail*, com as incertezas entre a mediana e os valores máximos da tensão e destaque para o intervalo de 0 a 20 µs.

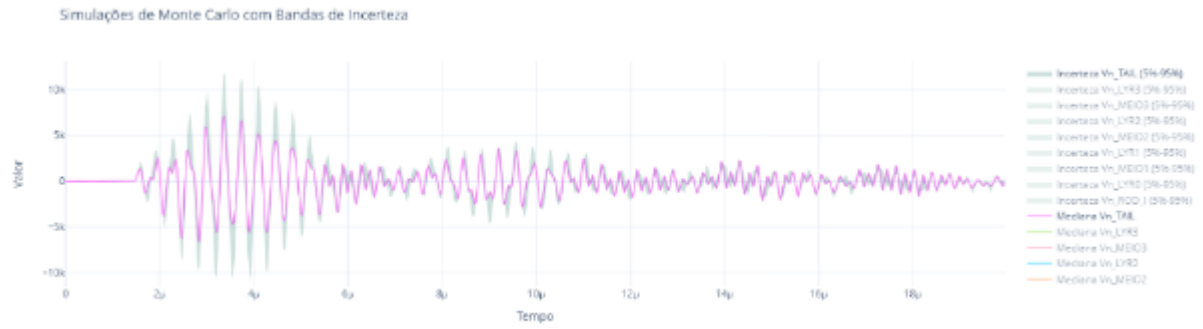


Figura 11 – Forma de onda no tail. Em cinza é possível ver as amplitudes das incertezas (variações) no intervalo de tempo de 0 a 20 µs.

Na figura 12 temos um *boxplot* apresentando a variação dos valores máximos da tensão em cada uma das camadas. É interessante notar o decaimento da tensão para cada uma das camadas.



Figura 12 – Decaimento do valor máximo da tensão por camada

6.2 SIMULAÇÃO 02: VARIAÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE C1

Nesta simulação realizou-se a variação dos parâmetros das capacitâncias formadoras de C1. Na tabela 05 são apresentados os valores temporais onde o máximo valor da tensão nas diversas camadas foi atingido, em 12 de 100 simulações, e a tabela 06 condensa as estatísticas das 100 simulações.

Tabela 05 – Métricas estatísticas do instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
std	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs
min	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
25%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
50%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
75%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
max	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs

Tabela 06 – Métricas estatísticas do valor máximo da tensão atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	218027.5	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.2	42953.3	7094.6	7092.9
std	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
min	218027.6	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.3	42953.3	7094.6	7092.9
25%	218027.6	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.3	42953.3	7094.6	7092.9
50%	218027.6	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.3	42953.3	7094.6	7092.9
75%	218027.6	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.3	42953.3	7094.6	7092.9
max	218027.6	212824.7	203640.0	189869.4	147182.0	94783.3	42953.3	7094.6	7092.9

Destes dados, podemos verificar que a variação temporal entre os pontos de máximo é nula e a variação da tensão máxima é próxima de zero. Isso indica que o modelo é insensível a variação simultânea e aleatória das capacitâncias formadoras do C1 dentro do intervalo de excursão explorado (10% da média).

6.3 SIMULAÇÃO 03: VARIAÇÃO DAS INDUTANCIAS DE C1

Nesta simulação realizou-se a variação dos parâmetros das indutâncias formadoras de C1.

Na tabela 07 são apresentados os valores temporais onde o máximo valor da tensão nas diversas camadas foi atingido, em 12 de 100 simulações, e a tabela 08 condensa as estatísticas das 100 simulações.

Tabela 07 – Métricas estatísticas do instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
std	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs
min	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
25%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
50%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
75%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
max	5.761 µs	5.760 µs	5.759 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs

Tabela 08 – Métricas estatísticas do valor máximo da tensão atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	218027.6	212825.1	203640.2	189869.7	147182.2	94783.5	42953.3	7094.3	7092.9
std	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.3	0.0
min	218026.9	212824.7	203639.7	189869.1	147181.9	94783.1	42953.1	7093.9	7092.9
25%	218027.3	212824.8	203639.9	189869.4	147182.0	94783.3	42953.2	7094.0	7092.9
50%	218027.7	212824.9	203640.0	189869.6	147182.1	94783.5	42953.3	7094.4	7092.9
75%	218027.8	212825.6	203640.6	189870.1	147182.5	94783.6	42953.3	7094.6	7092.9
max	218027.9	212826.0	203641.0	189870.4	147182.7	94783.9	42953.4	7094.7	7092.9

Destes dados, podemos verificar que a variação temporal entre os pontos de máximo é nula e a variação da tensão máxima é próxima de zero. Isso indica que o modelo é insensível a variação simultânea e aleatória das indutâncias formadoras do C1 dentro do intervalo de excursão explorado (10% da média).

6.4 SIMULAÇÃO 04: VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DAS CAPACITANCIAS E INDUTANCIAS DE C1

Nesta simulação realizou-se a variação dos parâmetros das capacitâncias e indutâncias formadoras de C1.
Na tabela 09 são apresentados os valores temporais onde o máximo valor da tensão nas diversas camadas foi atingido, em 12 de 100 simulações, e a tabela 10 condensa as estatísticas das 100 simulações.

Tabela 09 – Métricas estatísticas do instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
std	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs
min	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
25%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
50%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
75%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
max	5.761 µs	5.760 µs	5.759 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs

Tabela 10 – Métricas estatísticas do valor máximo da tensão atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	218027.5	212825.2	203640.3	189869.8	147182.3	94783.5	42953.3	7094.3	7092.9
std	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.3	0.0
min	218027.0	212824.7	203639.7	189869.1	147181.8	94783.1	42953.1	7093.8	7092.9
25%	218027.2	212824.8	203639.9	189869.4	147182.0	94783.3	42953.2	7094.0	7092.9
50%	218027.6	212824.9	203640.0	189869.7	147182.2	94783.5	42953.3	7094.4	7092.9
75%	218027.7	212825.7	203640.6	189870.2	147182.6	94783.6	42953.3	7094.5	7092.9
max	218027.9	212826.0	203640.9	189870.7	147182.8	94783.9	42953.4	7094.7	7092.9

Destes dados, podemos verificar que a variação temporal entre os pontos de máximo é nula e a variação da tensão máxima é próxima de zero. Isso indica que o modelo é insensível a variação simultânea e aleatória das capacitâncias e indutâncias formadoras do C1 dentro do intervalo de excursão explorado (10% da média).

6.5 SIMULAÇÃO 05: VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DA INDUTANCIA E DA CAPACITANCIA DO TAIL E DAS CAPACITANCIAS E INDUTANCIAS FORMADORAS DE C1

Nesta simulação realizou-se a variação simultânea da indutância e da capacitância do *tail* e das capacitâncias e indutâncias formadoras de C1.
Na tabela 11 são apresentados os valores temporais onde o máximo valor da tensão nas diversas camadas foi atingido, em 12 de 100 simulações, e a tabela 12 condensa as estatísticas das 100 simulações.

Tabela 11 – Métricas estatísticas do instante de tempo onde o valor máximo da tensão foi atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
std	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs	0.000 µs
min	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
25%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.754 µs	5.837 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
50%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
75%	5.761 µs	5.760 µs	5.758 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.858 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs
max	5.762 µs	5.761 µs	5.759 µs	5.755 µs	5.838 µs	5.859 µs	5.875 µs	3.357 µs	3.357 µs

Destes dados, podemos verificar que a variação temporal entre os pontos de máximo é muito pequena. Isso é o esperado e atesta a estabilidade numérica do modelo.
Cabe aqui notar a dispersão amostral da tensão máxima em cada uma das camadas da bucha, em especial a do tail, em função da variação dos parâmetros do próprio tail. Percebe-se que agora todas as variações foram muito pequenas, mostrando que dentro do intervalo de excursão explorado (10% da média), o efeito visto na simulação um foi muito atenuado, ainda que esteja presente.
Na figura 13, são mostradas as formas de onda para as diversas camadas estudas.
Na figura 14, são mostradas as formas de onda para as diversas camadas estudas, com destaque para o intervalo de 0 a 20 µs.

Tabela 12 – Métricas estatísticas do valor máximo da tensão atingido, por camada

	Vn_ROD_I	Vn_LYR0	Vn_MEIO1	Vn_LYR1	Vn_MEIO2	Vn_LYR2	Vn_MEIO3	Vn_LYR3	Vn_TAIL
mean	218028.6	212826.1	203641.2	189870.6	147181.1	94781.3	42950.7	7092.6	7091.2
std	5.8	5.8	5.7	5.2	6.6	12.6	14.9	9.7	9.7
min	218018.6	212816.0	203631.2	189861.8	147169.5	94758.6	42923.9	7075.1	7073.6
25%	218023.3	212820.9	203636.1	189866.0	147176.2	94771.7	42938.9	7085.1	7083.5
50%	218028.0	212825.2	203640.3	189869.6	147181.7	94783.1	42952.6	7094.1	7092.5
75%	218032.8	212830.4	203645.3	189874.6	147187.1	94792.5	42963.9	7101.0	7099.8
max	218039.0	212836.9	203651.9	189880.2	147192.2	94802.3	42976.1	7109.3	7107.6

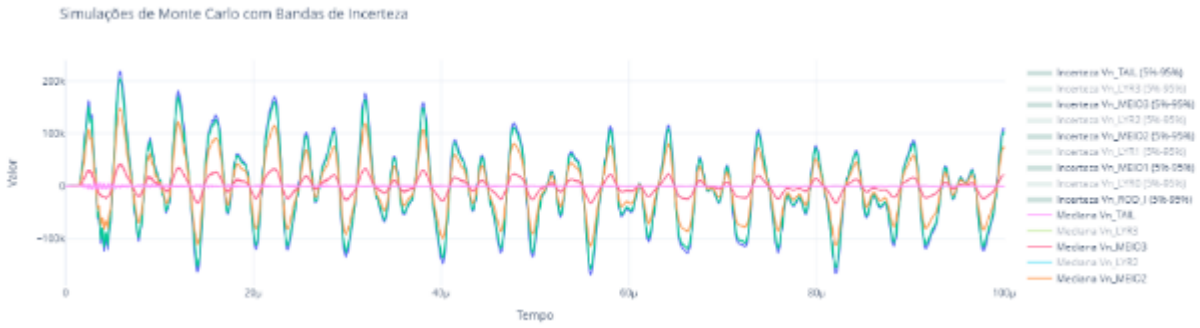


Figura 13 – Formas de onda para as diversas camadas estudas

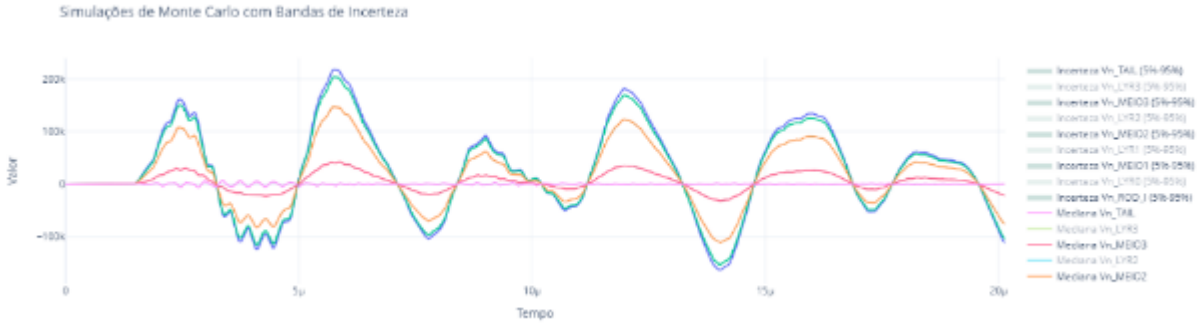


Figura 14 – Formas de onda para as diversas camadas estudas no intervalo de tempo de 0 a 20 µs.

Na figura 15, é mostrada a forma de onda da tensão no *tail*, com as incertezas entre a mediana e os valores máximos da tensão e destaque para o intervalo de 0 a 20 µs.

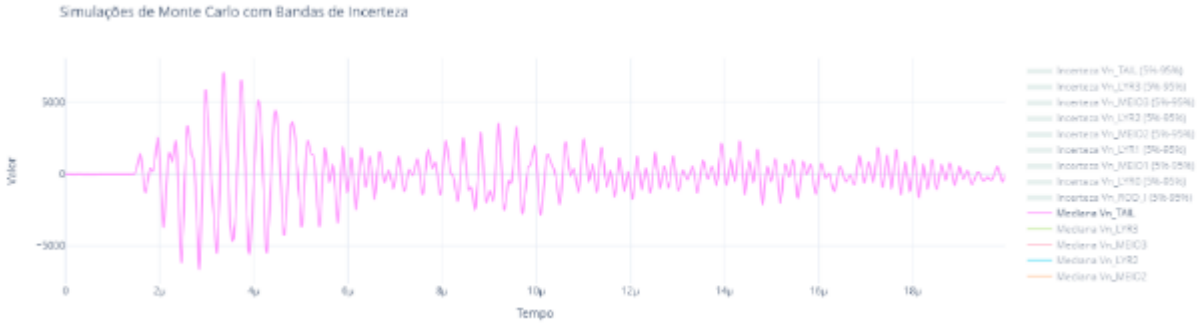


Figura 15 – Forma de onda no tail. Em cinza é possível ver as amplitudes das incertezas (variações) no intervalo de tempo de 0 a 20 µs.

Na figura 16 temos um *boxplot* apresentando a variação dos valores máximos da tensão em cada uma das camadas. É interessante notar o decaimento da tensão para cada uma das camadas.



Figura 16 – Decaimento do valor máximo da tensão por camada

7 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS

A análise realizada permitiu avaliar de forma estatística e detalhada as variações nos parâmetros do modelo e suas influências na isolação da bucha capacitiva. Os resultados obtidos indicam que as VFTOs podem induzir tensões elevadas e desiguais ao longo das camadas capacitivas da bucha. Observamos que esse comportamento foi especialmente crítico nas regiões mais próximas à entrada da bucha, onde os picos de tensão mostraram-se superiores e nas camadas mais próximas a flange, onde apesar de a tensão possuir um menor valor absoluto, a variação em relação aos valores de operação AC normais é maior.
Apesar dos resultados muito interessantes, existem algumas limitações neste estudo.
As simulações foram baseadas em modelos teóricos, o que pode não representar completamente a complexidade das condições reais de operação. Variáveis ambientais, como temperatura e umidade, além do envelhecimento dos materiais isolantes, podem influenciar os resultados, e esses fatores não foram explorados neste estudo.
Outra limitação é a modelagem simplificada dos componentes internos da bucha. Embora este modelo tenha capturado as principais dinâmicas entre capacitâncias e indutâncias internas, características como variações geométricas, maior número de camadas e acoplamento mútuo entre indutâncias não foram considerados.
Por fim, o uso do método de Monte Carlo mostrou-se uma ferramenta poderosa para a análise de cenários incertos e complexos. No entanto, sugerimos que estudos adicionais explorem outras distribuições estatísticas além da distribuição uniforme, como a gaussiana ou a beta, a fim de verificar se esses métodos podem trazer ainda mais precisão às simulações e, assim, melhorar a previsibilidade dos eventos de sobretensão e suas consequências.

BIBLIOGRAFIA

[01] A. Messadi et al., "High Frequency Model of Power Transformer Bushing for Very Fast Transient Studies," in IEEE Access, vol. 11, pp. 93908-93919, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3309702.
[02] A. Ardito, R. Iorio, G. Santagostino and A. Porrino, "Accurate modeling of capacitively graded bushings for calculation of fast transient overvoltages in GIS," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1316-1327, July 1992, doi: 10.1109/61.141849.
[03] Rao, Mandava & Rao, T. & Ram, S.S. & Singh, B.P.; (2008). Simulation of Capacitively Graded Bushing for Very Fast Transients Generated in a GIS during Switching Operations. Journal of Electrical Engineering and Technology. 3. 36-42. 10.5370/JEET.2008.3.1.036.
[04] A Raghuram, M; Mohan Rao, S.S.; Tulasiram and B.P. Singh.; Modelling of 420KV SF6 / Air Capacitively Graded Bushing for Very Fast Transient Overvoltages (VFTO).; Proceedings NPSC 2000.

[05] Alla Raghu Ram; Effect of Very Fast Transient Over Voltages (VFTOs) on GIS Terminal Equipment; Faculty of Electrical Engineering; Jawaharlal Nehru Technological University Hyderabad - Kukatpally - Hyderabad - 500085, India; November 2012
[06] A.Raghu Ram; Dr.J.Amarnath; Dr.S.Kamakshiah.; Estimation of Very Fast Transient Over Voltages on Bushing Connected in Gis; International Journal of Engineering Science and Technology; 2012; Eng Journals Publication; http://www.ijest.info/docs/IJEST12-04-02-160.pdf
[07] Das, Debasmita & Gorayan, Ravi. (2014). EMTP Simulation Studies on Effects of Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated Substation. Proceedings of National Conference on Emerging Trends in Engineering and Science.
[08] "IEEE Guide for Gas-Insulated Substations Rated Above 52 kV," in IEEE Std C37.122.1-2014 (Revision of IEEE Std C37.122.1-1993), vol., no., pp.1-82, 5 Dec. 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6974970.
[09] D. Povh, H. Schmitt, O. Valcker and R. Wutzmann, "Modelling and analysis guidelines for very fast transients," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 4, pp. 2028-2035, Oct. 1996, doi: 10.1109/61.544291.
[10] Saied, Mohamed. (2019). The Frequency and Transient Analyses of a High Voltage Bushing/Transformer Cascade. 42-53.
[11] Saied, Mohamed. (2019). A Contribution to the Frequency and Transient Analysis of High Voltage Bushings. 15-26.
[12] R. Nikjoo and H. Edin, "Effect of transformer winding on the transient response of power transformer bushings," 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344346.
[13] H. Löfås, R. Berg, L. Jonsson and R. Hedlund, "Risk Mitigation through Transient Protection of Transformer Bushings when Using Online Monitoring," 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Minneapolis, MN, USA, 2024, pp. 172-175, doi: 10.1109/EIC58847.2024.10579317.
[14] Henrik Löfås; Lony Tehini; "Breakthrough in Protection when Monitoring Bushings; Transformer Technology; Issue 35; Pg 20; March 2024
[15] Henrik Löfås, Roger Hedlund; Impact of VFT on Bushings & Necessary Protection When Using On-Line Monitoring; INMR World Congress 2023; 11/2023;
[16] Edvard Csanyi; How to mitigate effects of very fast transients (VFT) on HV equipment; Electrical Engineering Portal; Jun, 11th 2014; https://electrical-engineering-portal.com/how-to-mitigate-effects-of-very-fast-transients-vft-on-hv-equipment
[17] de Oliveira, Luiz & Iaronka, Odirlan & Vieira, João & Maschio, Guilherme. (2022). Modelagem de buchas condensivas para transitórios de alta frequência.
[18] F. M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni and A. Santarpia, "An ATP-EMTP Monte Carlo procedure for backflashover rate evaluation," 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344362.
[19] Kräulich, L., Adriano Cavalheiro Marchesan, Lenois Mariotto, Felipe Loose, M. C. Camargo, Gustavo Marchesan and Ghendy Cardoso. “Stochastic Analysis of Transient Overvoltages at Substations by Applying the Monte Carlo Method Integrated with ATP.” (2015).
[20] Martínez-Velasco, J.A. & Castro-Aranda, Ferley. (2008). EMTP implementation of a Monte Carlo method for lightning performance analysis of transmission lines. Ingeniare. 16. 169-180.
[21] KRAULICH, Leyla. Análise Estocástica de Transitórios em Subestações Utilizando o Método de Monte Carlo Integrado ao ATP. 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
[22] Abud, Tiago P., Andre A. Augusto, Marcio Z. Fortes, Renan S. Maciel, and Bruno S. M. C. Borba. 2023. "State of the Art Monte Carlo Method Applied to Power System Analysis with Distributed Generation" Energies 16, no. 1: 394. https://doi.org/10.3390/en16010394
[23] Carrijo, D.; GOMES, G. S. P.; FEHLBERG, R. P.; et.al.; “Análise Simulada dos Impactos de Transitórios Padrões e de VFTOs em Buchas Capacitivas de Alta Tensão” In: XXVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2023, Brasília. Anais do XXVII SNPTEE, 2023. v. XXVII.
[24] Carrijo, D.; GOMES, G. S. P.; Pinto, M.M.; FEHLBERG, R. P.; Alves, M.E.G.; Teixeira, R. M.; Gomes, J. M.; Fritoli, L. P.; “Os 16 anos de Experiência da Cemig GT na Prevenção de Falhas em Transformador Trifásico de 400 MVA pela Monitoração On-line Buchas Capacitivas.” In: XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2022, Rio de Janeiro. Anais do XXVI SNPTEE, 2022. v. XXVI.
[25] Carrijo, D.; Queiroz, L. F.; Neto, D. O.; Medeiros, W. M.; FEHLBERG, R. P.; GOMES, G. S. P.; Pinto, M.M.; Costa, M.; “Sobre o Apoio a Tomada de Decisão em Tempo Real Advinda do Monitoramento Online da Corrente de Fuga das Buchas de Transformadores: A Colaboração da Engenharia de Manutenção a Operação

Segura dos Ativos da Transmissão" In: XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2022, Rio de Janeiro. Anais do XXVI SNPTEE, 2022. v. XXVI.
[26] Carrijo, D.; DE SOUZA PEREIRA GOMES, GABRIEL; Pinto, M.M.; FEHLBERG, R. P.; MOURA, G. A.; MARTINS, G. P. M.; CANEDO, L. S.; Alves, M.E.G.; "Experiência com sistema de monitoração de transformadores de potência na Usina Nuclear de Angra 1 - Estudo de Caso" In: XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2022, Rio de Janeiro. Anais do XXVI SNPTEE, 2022. v. XXVI.
[27] ABNT. NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 6939: Coordenação do isolamento ― Procedimento. 3ª edição. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. 48 p. ISBN 978-85-07-07715-2.
[28] ProNext Engenharia. Nível Básico de Isolamento em equipamentos – NBI. 2021. Disponível em: https://pronextengenharia.com.br/nivel-basico-de-isolamento-em-equipamentos-nbi/. Acesso em: 01/07/2023.
[29] David W. Knight; Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors; DOI: 10.13140/RG.2.1.3865.1284