

## Avaliação da Criticidade do Campo Elétrico em Isoladores de Vidro

Henrique Dantas Silva\* Allan David da Costa Silva\* Almir Carlos dos Santos Júnior\* Iago Batista Oliveira\* Renan Gonzaga Silva dos Santos\*\* Edson Guedes da Costa\*\*\*

\*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, (e-mail: henrique.dsilva@ee.ufcg.edu.br; allan.costa@ee.ufcg.edu.br; almir.carlos.junior@ee.ufcg.edu.br; iago.oliveira@ee.ufcg.edu.br).

\*\*Companhia Hidrelétrica de São Francisco - Chesf, Campina Grande, Brasil (e-mail: renan.gonzaga@gmail.com).

\*\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, (e-mail: edson@dee.ufcg.edu.br).

---

**Abstract:** This paper presents an evaluation of the electric field criticality and the electric potential distribution in a chain of 69 kV glass insulators. The analysis was performed under different operating conditions: glass chain insulators with cement reduction, with sacrificial ring, with bell touching the glass and under pollution effect. For this, a multiphysics simulation software was used. As results, it was noted that the cement reduction and the sacrificial ring presence intensified the electric fields values close to the pin of the first insulator of the chain by more than 40%, which could cause flashovers, increase the pin corrosion rate and puncture in the glass, unlike pollution, which didn't cause significant changes in the electric field. On the other hand, the electric potential distribution along the glass shed of the first insulator remained standardized, with the exception of the cases with sacrificial ring, which resulted in an increase in the electric potential at all points along the glass skirt.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma avaliação da criticidade do campo elétrico e da distribuição de potencial elétrico em uma cadeia de isoladores de vidro de 69 kV. A análise foi feita sob diferentes condições de operação: cadeia de isoladores de vidro com redução de cimento, com anel de sacrifício, com campânula encostando no vidro e sob o efeito de poluição. Para isso, foi utilizado um *software* de simulação multifísica. Como resultados, constatou-se que a redução do cimento e a presença do anel de sacrifício intensificaram os valores de campo elétrico próximo ao pino do primeiro isolador da cadeia em mais de 40%, podendo causar *flashovers*, aumento da velocidade de corrosão do pino e perfuração no vidro, diferentemente da poluição, que não causou alterações significativas no campo elétrico. Por outro lado, a distribuição do potencial elétrico ao longo da saia de vidro do primeiro isolador se manteve padronizada, com exceção dos casos que possuíam anel de sacrifício, que resultou em uma elevação do potencial elétrico em todos os pontos ao longo da saia de vidro.

**Keywords:** Electrical field; sacrificial ring; glass insulator string; finite element method; pollution; cement reduction.

**Palavras-chaves:** Campo elétrico anel de sacrifício; cadeia de isolador de vidro; método dos elementos finitos; poluição; redução de cimento.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Os isoladores são componentes utilizados nos sistemas elétricos responsáveis pelo isolamento elétrico e sustentação mecânica dos condutores (Miau et al, 2019). Nas linhas de transmissão e subtransmissão, os isoladores são submetidos a esforços elétricos (campos elétricos) de alta intensidade (Hassanvand et al, 2014) que podem atingir valores críticos e promover a aceleração da degradação de seus materiais, além de reduzir sua suportabilidade dielétrica. Além do campo elétrico, a suportabilidade dielétrica é influenciada por fatores ambientais, pelo formato e materiais aplicados aos isoladores e pelo tempo e tipo do esforço elétrico (alternado, contínuo ou impulso).

O desempenho dos isoladores tem sido estudado considerando seu formato e materiais empregados (Yafeng et al, 2020; Silva e Garcia, 2018). Yafeng et al (2020) estudaram um defeito de fabricação em um isolador de vidro que causou um acidente numa linha de 500 kV da *State Grid Hunan Electric Power Co.* No estudo foi demonstrado que um defeito de fabricação no formato da região de vidro entre a campânula e o pino resultou na queda do condutor. Silva e Garcia (2018) definiram uma metodologia de ensaios para acentuar as diferenças entre os isoladores de baixa e alta qualidade, avaliando seus materiais quanto a características mecânicas e dielétricas. O resultado da avaliação mostrou que a umidificação do cimento do isolador que influencia sua expansão (Cherney et al, 2014) interferiu no seu desempenho quanto à radio interferência, fazendo com que

o lote de isoladores fosse reprovado no ensaio de rotina, e apontando a necessidade de análises mais profundas quanto às características do cimento.

No processo de colocação do cimento nos isoladores, a dosagem e os componentes utilizados são importantes para que não seja propiciado um meio para a formação de uma pilha galvânica entre o cimento e o pino. Cherney et al (2014) e Peek (1920) caracterizam os problemas com isoladores causados por expansão do cimento e corrosão do pino. Cherney et al (2014) indicaram os processos de envelhecimento por corrosão no pino e expansão do cimento em isoladores cerâmicos. Como resultado, os autores sugeriram um plano de teste para uma amostra aleatória e representativa de isoladores a fim de avaliar seu desempenho e estabelecer um critério para determinar se os isoladores devem continuar em serviço ou ser substituídos. Uma revisão dos mecanismos de envelhecimento e estresses causados pela expansão foi feita por Peek (1920). Nos resultados, o autor avaliou que modificações no projeto devem ser levadas em consideração, assim como a inclusão de um teste de uniformidade elétrico e mecânico para assegurar a qualidade de fabricação.

Além disso, estudos também têm sido feitos analisando o desempenho dos isoladores considerando os efeitos da poluição (Unahalekhaka e phonkaphon, 2014; Ilhan et al, 2012; Othman et al, 2013). Nos estudos realizados por Unahalekhaka e phonkaphon (2014) foi calculada e estudada a tensão crítica para os isoladores de vidro. Para tanto, os autores simularam em uma cadeia composta de sete unidades utilizadas numa linha de transmissão aérea de 115 kV sob condições de poluição superficial pesada segundo a IEC 60815 (1991) e concluíram que a diferença de potencial submetida ao isolador mais próximo do condutor supera a tensão crítica simulada, comprovando a redução da suportabilidade dielétrica.

Ilhan et al (2012) estudou experimentalmente e via simulação os efeitos dos níveis de poluição em isoladores de vidro quando submetidos a poluição ao longo de todo o contorno do vidro, apenas na parte superior e depois apenas na parte inferior. No estudo foi mostrado que a distribuição de potencial elétrico ao longo do isolador varia em função da localização da poluição na superfície dos isoladores. Adicionalmente, Othman et al (2013) simulou um isolador de suspensão de vidro usando o *software QuickField™ Professional*®. Eles modelaram uma fina camada de poluição ao longo de toda a superfície do vidro e estudaram a influência da camada de poluição na distribuição de tensão e no campo elétrico. No estudo, os autores concluíram que a distorção no campo elétrico causada pela camada de poluição acelera o envelhecimento do isolador, e pode resultar em uma *flashover*, resultando na interrupção do fornecimento de energia.

Gorur et al (1999) relatam que, em ambientes muito contaminados, a corrosão do pino metálico nos isoladores cerâmicos é um problema sério. Adicionalmente, Cherney et al (2014) afirmam que a degradação pode advir da ação eletrolítica no material. O processo corrosivo ocasiona perdas na seção transversal do pino e na resistência

mecânica dos isoladores, podendo acarretar, em última instância, em quedas de cabos condutores (Cherney, 1982). Além da redução da área da seção transversal do pino, Cherney (1983) afirma que os subprodutos da corrosão, em torno do pino dentro do cimento, podem aumentar o estresse mecânico naquela região. Ademais, os efeitos da degradação são mais comuns em linhas de corrente contínua, mas também são observados em linhas de corrente alternada, particularmente em ambientes muito contaminados (Gorur et al, 1999). De modo a proteger o pino metálico de um isolador da corrosão galvânica, grande parte dos isoladores são disponibilizados com aplicação de um anel de zinco no pino (Chesf, 2016). O anel de zinco é aplicado ao pino, na área de interface cimento-pino, atuando como um eletrodo de sacrifício e protegendo o pino metálico da corrosão galvânica (Cherney et al, 2014; Gorur et al, 1999).

Pelo exposto, o objetivo da pesquisa é expor, estudar e analisar, via simulação computacional, potenciais elétricos ao longo dos isoladores e regiões de campos elétricos ionizantes capazes de provocar a degradação da campânula e do pino. Para tanto, a presença de poluição pesada nas nervuras da saia de vidro, os efeitos da redução do nível de cimento, a presença do anel de sacrifício e a variação da distância entre a campânula e a saia de vidro foram simulados. Na construção do modelo computacional foi utilizada uma cadeia de isoladores de vidro de suspensão de 69 kV e as simulações foram realizadas utilizando um *software* comercial baseado no Método dos Elementos Finitos.

## 2. METODOLOGIA E MODELO DE SIMULAÇÃO

A representação gráfica do perfil de uma cadeia de isoladores (sustentação) de vidro classe U120B de 69 kV (TEXPI EQUIPAMENTOS, 2021), a qual está representada na Fig. 1, foi utilizada no estudo. A cadeia é composta por cinco isoladores de vidro.



Fig. 1. Modelo de cadeia de isoladores de vidro de 69 kV (TEXPI EQUIPAMENTOS, 2021).

Na Tabela 1 são apresentadas as características dimensionais dos isoladores que compõem a cadeia. Na Fig. 2 são mostrados os detalhes do isolador de vidro classe U120B. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros elétricos dos materiais que compõem os isoladores.

Com o objetivo de estudar os campos elétricos na região da campânula e do pino e o potencial elétrico ao longo da saia

de vidro do isolador, os estudos serão apresentados em forma de casos.

**Tabela 1. Características Dimensionais do Isolador de Vidro U120B (Adaptado de (TEXPI EQUIPAMENTOS, 2021)).**

Parâmetro	Dimensão (mm)
Distância de Passo (H)	146
Diâmetro (D)	252
Distância de Escoamento	320
Diâmetro do Pino	17,76

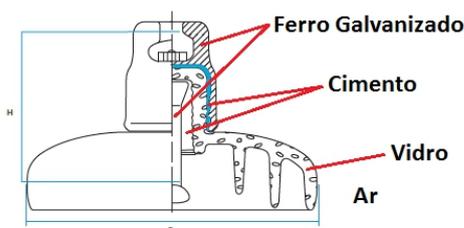


Fig. 2. Modelo do isolador de vidro classe U120B (Adaptado de (TEXPI EQUIPAMENTOS, 2021)).

**Tabela 2. Parâmetros elétricos dos materiais (Comsol, 2017).**

Material	Permissividade Relativa
Ar	1
Cimento	6
Ferro Galvanizado	$10^5$
Vidro	7,5

## 2.1 Casos Analisados

### Caso 1: Modelo Base do Isolador de Vidro

O Caso 1 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

### Caso 2: Isolador com Poluição em Todas as Nervuras

O Caso 2 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro. A poluição é representada como uma camada de 0,5 mm de espessura nas nervuras do isolador de vidro. Os valores utilizados da permissividade relativa para a camada de poluição podem ser observados na Tabela 3, caracterizando um nível de poluição pesada (Neto et al, 2020). Na Fig. 3 são indicadas as superfícies com a camada de poluição.

**Tabela 3. Parâmetros elétricos da poluição (Adaptado de (Neto et al, 2020)).**

Material	Permissividade Relativa
Poluição	15

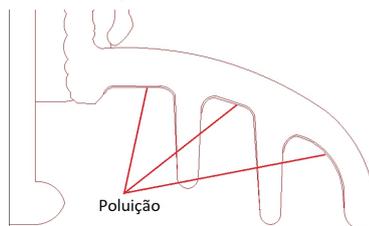


Fig. 3. Modelo do isolador de vidro com as superfícies com a camada de poluição.

### Caso 3: Isolador com Redução de Cimento

O Caso 3 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), sem anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro. A redução da camada de cimento foi de 9,57 mm tomando como base o nível padrão da camada de cimento. Na Fig. 4 está representada o modelo do isolador de vidro com a redução do nível de cimento.

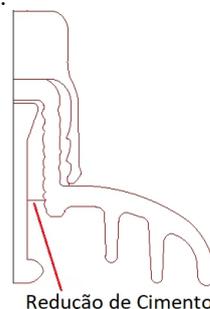


Fig. 4. Modelo do isolador de vidro com redução do nível de cimento.

### Caso 4: Isolador com Anel de Sacrifício

O Caso 4 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), com anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro. O anel de sacrifício é representado como um anel de zinco entre o pino e a camada de cimento do isolador, com permissividade relativa igual a  $10^5$ . Na Fig. 5 está apresentado o modelo do isolador de vidro com anel de sacrifício.

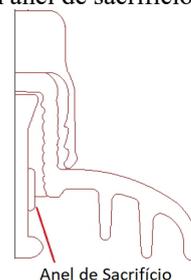


Fig. 5. Modelo do isolador de vidro com anel de sacrifício (SGD INSULATORS, 2016).

### Caso 5: Isolador com Campânula Encostando no Vidro

O Caso 5 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com a campânula encostando no vidro. Na Fig. 6 está apresentado o modelo do isolador de vidro com a campânula encostando no vidro.



Fig. 6. Modelo do isolador de vidro com campânula encostando no vidro.

*Caso 6: Isolador com Poluição na Primeira Nervura*

O Caso 6 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na primeira nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 7: Isolador com Poluição na Segunda Nervura*

O Caso 7 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na segunda nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 8: Isolador com Poluição na Terceira Nervura*

O Caso 8 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na terceira nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 9: Isolador com Redução de Cimento e Poluição em Todas as Nervuras*

O Caso 9 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, sem anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 10: Isolador com Redução de Cimento e Anel de Sacrifício*

O Caso 10 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), com anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 11: Isolador com Redução de Cimento e Campânula Encostando no Vidro*

O Caso 11 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, limpos (sem poluição), com anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com a campânula encostando no vidro.

*Caso 12: Isolador com Poluição na Primeira Nervura e Anel de Sacrifício*

O Caso 12 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na primeira nervura, com anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 13: Isolador com Poluição na Segunda Nervura e Anel de Sacrifício*

O Caso 13 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na segunda nervura, com anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 14: Isolador com Poluição na Terceira Nervura e Anel de Sacrifício*

O Caso 14 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na terceira nervura, com anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 15: Isolador com Poluição em Todas as Nervuras e Anel de Sacrifício*

O Caso 15 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, com anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

*Caso 16: Isolador com Poluição na Primeira Nervura e Campânula Encostando no Vidro*

O Caso 16 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na primeira nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com a campânula encostando no vidro.

*Caso 17: Isolador com Poluição na Segunda Nervura e Campânula Encostando no Vidro*

O Caso 17 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na segunda nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com a campânula encostando no vidro.

*Caso 18: Isolador com Poluição na Terceira Nervura e Campânula Encostando no Vidro*

O Caso 18 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição na terceira nervura, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com a campânula encostando no vidro.

*Caso 19: Isolador com Poluição em Todas as Nervuras e Campânula Encostando no Vidro*

O Caso 19 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, sem anel de sacrifício, com o nível padrão de cimento e com a campânula encostando no vidro.

*Caso 20: Isolador com Redução de Cimento, Poluição em Todas as Nervuras e Anel de Sacrifício*

O Caso 20 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, com anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com o espaçamento padrão entre campânula e vidro.

### Caso 21: Isolador com Redução de Cimento, Poluição em Todas as Nervuras e Campânula Encostando no Vidro

O Caso 21 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, sem anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com a campânula encostando no vidro.

### Caso 22: Isolador com Redução de Cimento, Poluição em Todas as Nervuras, Anel de Sacrifício e Campânula Encostando no Vidro

O Caso 22 se caracteriza por uma cadeia com cinco isoladores de vidro temperado, com poluição em todas as nervuras, com anel de sacrifício, com nível de cimento reduzido e com a campânula encostando no vidro.

## 2.2 Modelo de Simulação

Para realizar as simulações de cada caso, foi utilizado o software comercial *COMSOL Multiphysics*<sup>®</sup>. As simulações foram realizadas em um ambiente de duas dimensões (2D) de simetria de revolução. O módulo de eletrostática pertencente ao pacote de físicas AC/DC foi adotado (Estefenon et al, 2018; Krzma et al, 2018). Como condições de contorno, a diferença de potencial (1) foi aplicada à cadeia de isolador.

$$V = \frac{69 \text{ kV} * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} V. \quad (1)$$

O modelo da cadeia de isoladores foi inserido no centro de um cilindro com 3 m de raio e 5 m de altura.

## 2.3 Pontos de Análise do Potencial Elétrico

Os potenciais elétricos foram analisados ao longo da saia de vidro do isolador inferior da cadeia, conforme sugerido por Fuchs (Fuchs, 1977). Na Fig. 7 estão apresentados os pontos de análise do potencial elétrico no isolador de vidro.

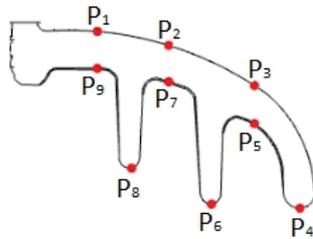


Fig. 7. Pontos de análise de potencial elétrico no isolador de vidro (Fuchs, 1977).

## 2.4 Regiões Críticas de Campo Elétrico

As regiões críticas de campo elétrico foram definidas como sendo as regiões da interface pino-cimento-primeira nervura da saia de vidro, R<sub>1</sub>, pino-cimento-parte superior do vidro, R<sub>2</sub>, e campânula-ar-saia de vidro, R<sub>3</sub>. As regiões de análise foram escolhidas considerando o desgaste do pino, R<sub>1</sub>, e da campânula, R<sub>3</sub>. Nestes casos, o desgaste se caracteriza pela corrosão devido à oxidação. No caso da região R<sub>2</sub>, se analisa o caso crítico da possibilidade de uma ruptura interna que causaria a queda do condutor fase. Na Fig. 8 estão apresentadas as regiões críticas do campo elétrico no isolador de vidro.

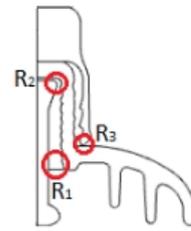


Fig. 8. Regiões críticas de campo elétrico no isolador de vidro.

## 3. RESULTADOS

Nessa seção são analisados o potencial elétrico ao longo da saia de vidro e a criticidade do campo elétrico em algumas regiões do isolador inferior da cadeia.

### 3.1 Potencial Elétrico

O potencial elétrico da cadeia de isoladores de vidro de 69 kV no Caso 1, que se caracteriza como o modelo base, pode ser observado nas Figs. 9 e 10. Na Fig. 9 é mostrada a distribuição de potencial elétrico percentual na cadeia de isoladores. Na Fig. 10 é mostrada a distribuição de potencial elétrico ao longo da cadeia de isoladores, com destaque para a distribuição de potencial no isolador inferior da cadeia, uma vez que a maior percentagem do potencial elétrico da cadeia se concentrou nesse isolador.

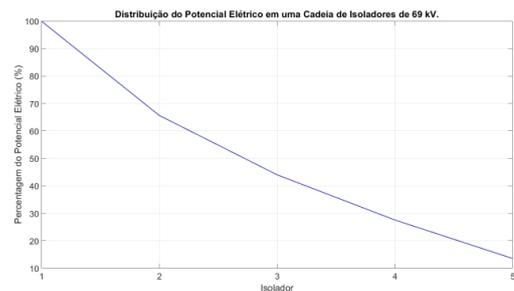


Fig. 9. Distribuição de potencial elétrico percentual na cadeia de isoladores de vidro de 69 kV no Caso 1.

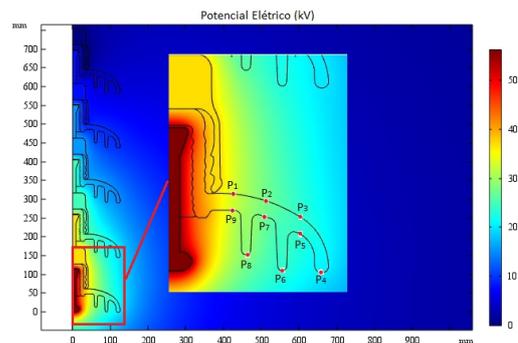


Fig. 10. Potencial elétrico na cadeia de isoladores de vidro de 69 kV para o Caso 1.

A partir das Figs. 9 e 10 foi constatado que o potencial elétrico é maior nas proximidades do pino do isolador inferior, com valor máximo de 56,34 kV. À medida que se analisa os demais isoladores, verifica-se que os níveis de tensão são gradualmente reduzidos até o isolador mais superior, cuja tensão é próxima de zero volt. A distribuição do potencial elétrico ao longo da saia de vidro do primeiro isolador, conforme os pontos definidos nas Figs. 7 e 10, pode ser observada na Tabela 4.

## 5.2 Campo Elétrico

De acordo com a Tabela 4, os potenciais elétricos são mais elevados próximo ao pino e à campânula, enquanto que potenciais menores ocorrem ao longo da superfície restante do isolador, caracterizando uma distribuição uniforme de potencial. Uma segunda análise da distribuição de potencial ao longo do isolador é realizada ao calcular a correlação (Oliveira, 2020) entre o Caso 1 e os demais, obtendo-se um valor muito próximo de 1 para todos os casos, revelando um comportamento similar de distribuição de potencial independente das alterações propostas.

**Tabela 4. Distribuição de potencial elétrico ao longo da saia de vidro do isolador inferior da cadeia de 69 kV.**

Caso	Potencial Elétrico (kV)								
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$
1	33,4	28,0	23,7	20,7	23,3	23,7	27,6	28,9	32,9
2	33,3	28,0	23,9	21,0	23,5	23,9	27,6	28,9	32,8
3	32,7	27,4	23,2	20,3	22,8	23,2	27,0	28,3	32,1
4	34,3	28,7	24,3	21,3	23,9	24,3	28,3	29,6	33,9
5	33,6	28,0	23,7	20,7	23,3	23,7	27,6	28,9	33,1
6	33,4	28,1	23,8	20,8	23,4	23,8	27,7	29,0	32,9
7	33,2	27,9	23,7	20,8	23,3	23,8	27,5	28,7	32,7
8	33,3	27,9	23,6	20,8	23,2	23,6	27,4	28,8	32,8
9	33,4	28,1	23,8	20,8	23,3	23,7	27,6	28,9	32,8
10	33,6	28,1	23,8	20,9	23,4	23,8	27,7	29,0	33,1
11	33,2	27,7	23,4	20,5	23,0	23,4	27,3	28,5	32,6
12	34,4	28,9	24,5	21,4	24,1	24,5	28,5	29,9	34,1
13	34,2	28,7	24,4	21,4	24,0	24,4	28,3	29,6	33,9
14	34,3	28,7	24,3	21,4	23,9	24,3	28,3	29,6	33,9
15	34,3	28,9	24,6	21,6	24,2	24,6	28,5	29,8	33,9
16	33,7	28,2	23,8	20,8	23,4	23,8	27,8	29,1	33,2
17	33,6	28,0	23,8	20,8	23,4	23,8	27,6	28,9	33,0
18	33,6	28,0	23,7	20,8	23,3	23,7	27,6	28,9	33,1
19	33,6	28,1	23,9	21,0	23,5	23,9	27,7	29,0	33,1
20	33,5	28,2	24,0	21,1	23,6	24,0	27,8	29,1	33,0
21	33,1	27,7	23,5	20,6	23,1	23,6	27,5	28,9	32,7
22	33,1	27,7	23,5	20,7	23,2	23,6	27,3	28,6	32,5

Dentre os resultados obtidos para a distribuição de potencial elétrico, destacam-se os Casos 4, 12, 13, 14 e 15, que apresentam anel de sacrifício. Nesses casos foi constatado que a presença desse anel resulta em maiores valores de potencial elétrico ao longo do isolador. Esse aumento ocorre devido às distorções nas linhas equipotenciais próximas ao anel (Gorur et al, 1999). Na Fig. 11a) podem ser observadas as linhas de potencial para o Caso 1 e na Fig. 11b) podem ser observadas as distorções nas linhas de potencial causadas pela presença do anel de sacrifício.

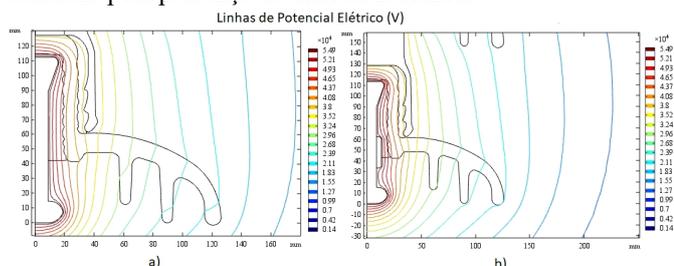


Fig. 11. Linhas de Potencial elétrico na cadeia de isoladores de vidro de 69 kV para o a) Caso 1 b) Caso 4.

O campo elétrico do primeiro isolador da cadeia de isoladores de 69 kV no Caso 1 pode ser observado na Fig. 12.

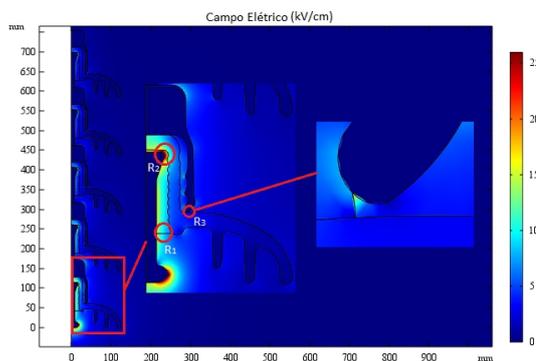


Fig. 12. Campo elétrico na cadeia de isoladores de vidro de 69 kV para o Caso 1.

Na Fig. 12, o isolador inferior apresentou campo elétrico acima de 26 kV/cm em  $R_2$ , ou seja, o valor limite do campo para o início da ionização sob condições atmosféricas padrões (Chesf, 2016) foi atingido, porém nessa região não há a presença de ar (interface pino-cimento-parte superior do vidro), logo não ocorrerá ionização. A análise do máximo campo elétrico em  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  do primeiro isolador pode ser vista nas subseções seguintes.

### 5.2.1 Poluição

A análise comparativa dos valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  entre o modelo base (Caso 1) e os casos que apresentam apenas poluição (Casos 2, 6, 7 e 8) é apresentada. Assim, na Tabela 5 estão mostrados os valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  da cadeia de isoladores de vidro para os casos apenas com poluição e para o Caso 1.

**Tabela 5. Máximo campo elétrico no isolador de vidro considerando casos apenas com poluição.**

Caso	Máximo Campo Elétrico (kV/cm)		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	16,31	37,42	16,72
2	16,42	37,35	16,19
6	16,38	37,29	16,36
7	16,31	37,29	16,65
8	16,29	37,27	16,75

De acordo com a Tabela 5, a adição da camada de poluição ao longo das nervuras dos isoladores da cadeia não causa alterações significativas nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ .

### 5.2.2 Redução de Cimento

A análise comparativa dos valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  entre o modelo base (Caso 1) e o modelo com redução de cimento (Caso 3) é apresentada. Assim, na Tabela 6 estão mostrados os valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  da cadeia de isoladores de vidro para os Casos 1 e 3.

**Tabela 6. Máximo campo elétrico no isolador de vidro considerando o Caso 3 – redução de cimento.**

Caso	Máximo Campo Elétrico (kV/cm)		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	16,31	37,42	16,72
3	19,25	38,10	10,13

De acordo com a Tabela 6, a redução do nível de cimento causou alterações nas três regiões de análise do campo elétrico. Nas regiões  $R_1$  e  $R_2$ , observou-se um aumento de campo elétrico de 18,03% e 1,82%, respectivamente. O aumento do campo elétrico observado em  $R_1$  ocorreu devido à mudança de meio e, conseqüentemente, a redução da permissividade elétrica nessa região, uma vez que a permissividade no Caso 1 era a do cimento e no Caso 3 passou a ser a do ar, que é seis vezes menor. Na região  $R_3$ , observou-se uma redução de campo elétrico de 39,41%, causado pela distorção das linhas equipotenciais no Caso 3 em relação ao Caso 1, gerando uma elevação de potencial no vidro, implicando em uma menor diferença de potencial entre o vidro e a campânula e, conseqüentemente, gerando um campo elétrico menor em  $R_3$ .

### 5.2.3 Anel de Sacrificio

A análise comparativa dos valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  entre o modelo base (Caso 1) e o modelo com anel de sacrificio (Caso 4) é apresentada. Para tanto, na Tabela 7 estão mostrados os valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  da cadeia de isoladores de vidro para os Casos 1 e 4.

**Tabela 7. Máximo campo elétrico no isolador de vidro considerando o Caso 4 – anel de sacrificio.**

Caso	Máximo Campo Elétrico (kV/cm)		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	16,31	37,42	16,72
4	24,58	36,32	26,66

De acordo com a Tabela 7, o anel de sacrificio causou alterações nas três regiões de análise do campo elétrico. Nas regiões  $R_1$  e  $R_3$ , observou-se um aumento de campo elétrico de 50,71% e 59,52%, respectivamente. Esse aumento ocorreu devido à presença de um material condutor (zinco), gerando uma maior concentração de linhas de campo próximas ao anel e, conseqüentemente, gerando um aumento do campo elétrico nessas regiões. Para  $R_3$ , o aumento no campo elétrico foi suficiente para causar a ionização do ar, acontecendo *flashover*, o que pode gerar corrosão na campânula e puntura no vidro (Gorur et al, 1999). Na região  $R_2$ , observou-se uma redução de campo elétrico de 2,94%.

### 5.2.4 Campânula Encostando no Vidro

Nesta subseção será apresentada uma análise comparativa dos valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  entre o modelo base (Caso 1) e o modelo com campânula encostando no vidro (Caso 5). Na Tabela 8 estão mostrados os valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  da cadeia de isoladores de vidro para os Casos 1 e 5.

**Tabela 8. Máximo campo elétrico no isolador de vidro considerando o Caso 5 – campânula encostando no vidro.**

Caso	Máximo Campo Elétrico (kV/cm)		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	16,31	37,42	16,72
5	16,39	37,65	0

De acordo com a Tabela 8, a campânula encostando no vidro não causou alterações significativas nas regiões  $R_1$  e  $R_2$ . Na região  $R_3$ , observou-se que o campo elétrico foi nulo, devido a ausência de uma camada de ar entre a campânula e o vidro, assim é esperado que nessa região não ocorra a ionização das moléculas de ar.

### 5.2.5 Demais Casos

Nesta subseção será apresentada uma análise comparativa dos valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  entre o modelo base (Caso 1) e os demais casos (Casos 9 a 22). Na Tabela 9 estão mostrados os valores máximos de campo elétrico nas regiões  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  da cadeia de isoladores de vidro para os Casos 1, 9 a 22.

De acordo com a Tabela 9, essa cadeia de isoladores apresenta uma intensidade de campo elétrico capaz de promover ionização do ar, causando fenômenos como corona ou até mesmo ruptura em algumas configurações em  $R_1$  e  $R_3$ .

Em  $R_1$  se observou que a redução de cimento e a presença de anel de sacrificio (Caso 10), em adição com a poluição em todas as nervuras (Caso 20) causaram uma elevação relativa de 64,34% e 70,75%, respectivamente. Esse aumento do campo elétrico ocorre pela alta concentração de linhas de campo devido à redução da permissividade relativa nessa região em comparação com o Caso 1. Para esses casos, o campo elétrico foi suficientemente grande para causar a ionização do ar, induzindo-se *flashovers* e aumentando a velocidade de corrosão do pino do isolador, o que leva a saída de operação precoce da cadeia (Othman et al, 2013).

**Tabela 9. Máximo campo elétrico no isolador de vidro para os demais casos.**

Caso	Máximo Campo Elétrico (kV/cm)		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	16,31	37,42	16,72
9	23,50	37,44	10,32
10	27,62	37,17	18,99
11	19,09	38,56	0
12	24,71	36,35	26,32
13	24,62	36,36	26,54
14	24,60	36,34	26,63
15	24,77	36,41	26,15
16	16,48	37,70	0
17	16,41	37,70	0
18	16,40	37,68	0
19	16,52	37,76	0
20	27,85	37,14	18,47
21	19,21	38,20	0
22	19,31	38,51	0

Com relação a  $R_2$ , não há nenhum caso que apresente uma mudança significativa no campo elétrico. Como essa região é interna ao isolador, ou seja, não há a presença do ar, mesmo que o campo elétrico seja superior a 26 kV/cm não ocorrerá ionização nessa região. Em relação a  $R_3$ , observa-se que em todas os casos em que há anel de sacrifício e poluição o campo elétrico é superior a 26 kV/cm, assim é esperado que nessa região ocorra ionização das moléculas de ar (Casos 12 a 15).

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram feitas simulações computacionais numa cadeia de isoladores de vidro de 69 kV sob o efeito de poluição, com cimento reduzido no pino, com anel de sacrifício e com campânula encostando no vidro, de forma a expor, estudar e analisar os efeitos do campo e do potencial elétrico e determinar os pontos críticos, não conformidades, suportabilidade dielétrica e risco de falhas.

A partir da análise da distribuição do potencial elétrico na superfície do isolador de vidro, é possível observar que nos casos com anel de sacrifício, o potencial elétrico apresentou um aumento em relação aos demais casos. Nos demais casos, independentemente das alterações propostas, os resultados se mantiveram padronizados.

Com os resultados obtidos do campo elétrico, observou-se que a redução de cimento e a presença do anel de sacrifício ocasionaram uma intensificação do campo na região  $R_1$  e que a poluição na parte inferior do isolador do vidro não resultou em uma alteração significativa do campo elétrico. Além disso, notou-se que a criticidade da região  $R_3$  ocorre nos casos com a presença de anel de sacrifício – devido à redistribuição de campo ocasionada pela presença do anel.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES/CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsas e ao LAT/UFMG pela infraestrutura cedida para realização de simulações e estudos.

## REFERÊNCIAS

- Cherney, E.A. (1982). Electromechanical integrity of suspension insulators. *Ontario Hydro Res. Rev.*, (no. 5), pp. 19–23.
- Cherney, E.A. (1983). Cement growth failure of porcelain suspension insulators. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102 (no. 8), pp. 2765-2774.
- Cherney, E.A. et al. (2014). Evaluation of and Replacement Strategies for Aged High Voltage Porcelain Suspension-Type Insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29 (no. 1), pp. 275-282.
- Chesf. (2016). *Instrução de Manutenção IM-MN-LT-M.055*. COMSOL Multiphysics® v. 5.3.
- Fuchs, R.D. (1977). *Transmissão de Energia Elétrica*, vol. 1, cap. 1, p. 32. LTC, Rio de Janeiro.
- Gorur, R.S., Cherney, E.A. e Bumham, J.T. (1999). *Outdoor Insulators*. Ravi Gorur Inc, Arizona.
- Hassanvand, A., Illias, H.A., Mokhlis, H. e Bakar, A.H.A. (2014). Effects of corona ring dimensions on the electric field distribution on 132 kV glass insulator. *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference*, pp. 248-251.
- IEC 60815. (1991). *Guide for the selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions, Part 1: Definitions, information and general principles*.
- Ilhan, S., Ozdemir, A., Jayaram, S.H. e Cherney, E.A. (2012). Simulations of Pollution and their Effects on the Electrical Performance of Glass Suspension Insulators. *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 803-806.
- Krzma, A.S., Khamaira, M.Y. e Abdulsamad, M. (2018). Comparative Analysis of Electric Field and Potential Distributions over Porcelain and Glass Insulators Using Finite Element Method. *First Conference for Engineering Sciences and Technology*, vol. 1, pp. 176-184.
- Miao, X., Liu, X., Chen, J., Zhung, S., Fan, J. e Jiang, H. (2019). Insulator Detection in Aerial Images for Transmission Line Inspection Using Single Shot Multibox Detector. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9945-9956.
- Neto, A. F. L., Costa, E.G., Araújo, J. F., Dias, B. A. e Balbino, L. S. (2020). Comparative Analysis of Polymeric Insulators Under Pollution and External Defect Using the Finite Element Method. *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1-4.
- Oliveira, I. B. (2020). *Análise estatística dos impactos causados pela pandemia de COVID-19 no setor elétrico brasileiro*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande.
- Othman, N. A., Piah, M. A. M., Adzis, Z., Ahmad, H. e Ahmad, N. A. (2013). Simulation of voltage and electric-field distribution for contaminated glass insulator. *2013 IEEE Student Conference on Research and Development*, pp. 116-120.
- Peek, F.W. (1920). Electrical Characteristics of the Suspension Insulator-II. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 39 (no. 2), pp. 1685-1741.
- SGD INSULATORS. (2016). *Isoladores de vidro*.
- Silva, F. T. S. e Garcia, R. W. S. (2018). Evaluation of the quality of glass cap and pin insulators by radio interference, puncture and mechanical failing load tests. *2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, pp. 1-6.
- Stefenon, S. F., Américo, J. P., Grebogi, R. B. e Nied, A. (2018). Analysis of the Electric Field in Porcelain Pin-Type Insulators via Finite Elements Software. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16 (no 10), pp. 2505- 2512.
- TEXPI EQUIPAMENTOS. (2021). *Catálogo de isoladores de vidro de suspensão*.
- Unahalekhaka, P., Phonkaphon, S. (2014). Simulation of Potential and Electric Field Due to Defective Insulator in 115 kV Transmission Line. *GMSARN International Journal*, vol. 8 (no. 1), pp. 1-6.
- Yafeng, C., Yi, Y., Liu, Z., Zhiqiang, X., Yishi, Y. e Zhenyu, L. (2020). Analysis and Suggestion on String Breakage Failure of Glass Insulator in 500kV Transmission Line. *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, pp. 1-3.