



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO COENTÍFICA – PIBIC

**UM MODELO BASEADO NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS  
PARA POLUIÇÃO SALINA EM ISOLADORES DE ALTA TENSÃO**  
Proposição de modelos computacionais que correlacionem atividade climatológica e  
desempenho de isoladores

Área do conhecimento: Engenharia Elétrica  
Subárea do conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência  
Especialidade do conhecimento: Monitoramento de Equipamentos Elétricos

Relatório Final  
Período da bolsa: de setembro de 2022 a agosto de 2023

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PIBIC/CNPq

Orientador: Tarso Vilela Ferreira  
Autor: Ana Beatriz Farias de Oliveira



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: <i>Design</i> de um isolador de vidro de suspensão .....	6
Figura 2: Desenho axissimétrico de um isolador de vidro de suspensão no CAD.....	17
Figura 3: Desenho de um isolador de vidro de suspensão no CAD de 280 mm de diâmetro e 170 mm de passo. ....	17
Figura 4: Representação da malha do isolador de vidro utilizada na simulação no SBMEF. ....	18
Figura 5: Materiais do isolador de vidro de suspensão no SBMEF. (a) Ar no retângulo; (b) Vidro na saia; (c) Cimento; (d) Ferro Galvanizado na campânula e pino.....	18
Figura 6: Camada salina aplicada no isolador de vidro de suspensão no SBMEF.....	19
Figura 7: Modelo trideimensional do isolador de vidro de suspensão no SBMEF. ....	19
Figura 8: Diferentes vistas do modelo trideimensional do isolador de vidro de suspensão no SBMEF. ....	20
Figura 9: Comparação das curvas da corrente de fuga referencial com a corrente de fuga simuladas. ....	22
Figura 10: Curva e linha de tendência da relação entre condutividade e corrente de fuga. .	23
Figura 11: Curvas da relação entre condutividade, corrente de fuga e resistência.....	24
Figura 12: Curvas da relação entre condutividade, salinidade e ESDD. ....	24
Figura 13: Curva da relação entre ESDD e resistência elétrica.....	25
Figura 14: Distribuição do potencial elétrico em linhas no isolador limpo.....	26
Figura 15: Distribuição do potencial elétrico em linhas no isolador com maior poluição. ....	26
Figura 16: Distribuição do campo elétrico em linhas no isolador limpo.....	27
Figura 17: Distribuição do campo elétrico em linhas no isolador com maior poluição. ....	28
Figura 18: Borda do vidro selecionada para análise gráfica do potencial e campo elétrico.	28



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

Figura 19: Distribuição gráfica do potencial elétrico no isolador limpo.....	29
Figura 20: Distribuição gráfica do potencial elétrico no isolador poluído com os cinco níveis de poluição. ....	30
Figura 21: Distribuição gráfica do campo elétrico no isolador limpo.....	31
Figura 22: Distribuição gráfica do campo elétrico no isolador poluído com os cinco níveis de poluição.....	31



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Propriedades dos materiais que compõem o isolador de vidro. ....	12
Tabela 2: Condutividade e corrente de fuga de acordo com o modelo utilizado. ....	13
Tabela 3: Dimensões do isolador de vidro de suspensão 10kVrms utilizado. ....	16
Tabela 4: Corrente de fuga aplicada a diferentes constantes de correção. ....	21
Tabela 5: EMQ das diferentes correntes de fuga aplicada a diferentes constantes de correção comparada à corrente referencial. ....	21
Tabela 6: Condutividade da simulação de acordo com a razão da condutividade da referência com a constante de correção de 500. ....	21
Tabela 7: Relação entre as condutividades aplicadas com a salinidade, ESDD, corrente de fuga e resistência elétrica.....	22



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

## **SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. OBJETIVO GERAL.....	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4. METODOLOGIA.....	11
4.1. MATERIAIS.....	11
4.2. MÉTODOS.....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
5.1. DESENHO DO ISOLADOR TRIDIMENSIONAL.....	16
5.2. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	20
5.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, CORRENTE DE FUGA, ESDD E RESISTÊNCIA.....	22
5.4. POTENCIAL E CAMPO ELÉTRICO.....	25
6. CONCLUSÕES.....	32
7. PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABALHOS.....	33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
9. OUTRAS ATIVIDADES.....	37

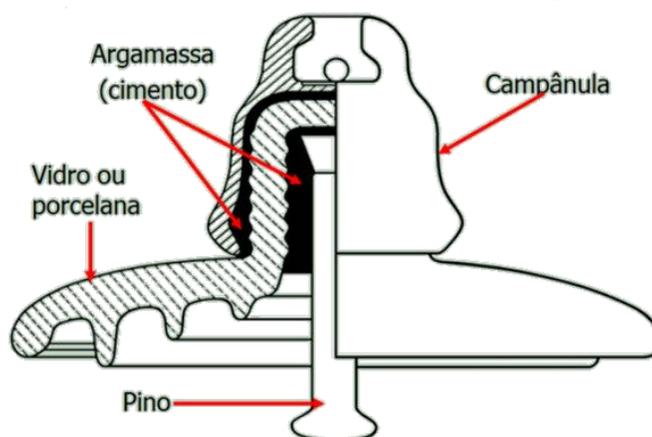
## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é responsável por suprir a demanda de energia elétrica dos consumidores através das linhas de transmissão e distribuição, e se faz necessário equipamentos que garantam o seu bom funcionamento. Dentre eles, estão os isoladores, que têm finalidade de garantir o isolamento dos condutores entre as fases e a terra, bem como garantir sustentabilidade e fixação a esforços mecânicos. Além disso, têm a função de prover sustentação para condutores e massas energizadas sem permitir que se estabeleça uma corrente elétrica significativa através de si. (VILAR, 2012).

Segundo Gorur e outros (1999), há três principais classes de dielétrico usados para isoladores de alta tensão: porcelana, vidro (ambos cerâmicos) e polímero. Especificamente, os isoladores de vidro e de porcelana são usados há mais de 100 anos e são construídos de forma similar. Ademais, os isoladores de vidro são usados ao redor do mundo graças ao seu bom funcionamento no SEP.

O isolador de vidro de suspensão é um tipo comumente utilizado e tem um *design* muito eficaz para carga constante e para suportar cargas cíclicas derivadas de variadas circunstâncias da natureza, como a presença de gelo e fortes ventos. (GORUR; CHERNEY; BURNHAM, 1999). Ele é composto de uma campânula e pino de ferro galvanizado, argamassa de cimento e de uma saia de vidro, conforme na Figura 1.

Figura 1: *Design* de um isolador de vidro de suspensão



Fonte: (BEZERRA, 2019).

Ao serem usados no SEP, os isoladores estão sujeitos a diversos tipos de ações

poluentes da natureza que comprometem o seu perfeito funcionamento, como maresia, chuva e neblina. Dessa maneira, apesar de seu baixo custo quando comparado aos outros equipamentos que compõem o SEP, o seu mau funcionamento pode provocar prejuízos significativos, de modo a ocasionar suspensão de fornecimento, afundamentos de tensão, blecautes, multas e eventuais danos a outros equipamentos. (VILAR, 2012).

Idealmente os isoladores devem apresentar corrente de fuga nula. A corrente de fuga pode ser dividida em volumétrica e superficial: a volumétrica está relacionada com a natureza do material, suas impurezas e falhas estruturais. Em contrapartida, a superficial está vinculada ao estado de limpeza da superfície do isolador. (ARCANJO, 2017). Sendo assim, a presença de poluição, especificamente a salina e a umidade, pode prover caminhos de baixa impedância na superfície do isolador e, portanto, haver uma circulação de corrente de fuga não nula. (JIANXUN, 2015). De forma análoga, o aumento da poluição no isolador acarreta, além do aumento de sua corrente de fuga, na diminuição de sua resistência. (SALAM, 2002).

Posto isso, o monitoramento direto ou indireto da corrente de fuga pode ser um modo eficaz de avaliar o desempenho de isoladores e, desta forma, definir se há necessidade de lavagem do equipamento. (FERREIRA; GERMANO; DA COSTA, 2012). Isso pode ser realizado a partir de simulações computacionais utilizando um *software* de projeto ou Desenho Auxiliado por Computador (CAD) e um *Software* Baseado no Método de Elementos Finitos (SBMEF).

No Método de Elementos Finitos (MEF), a geometria do desenho é submetida a restrições, dividindo-se a área superficial em pequenas partes em diferentes formatos, como triangular e hexagonal, de acordo com o problema. Nele, os elementos formam uma malha e estão conectados por nós, em que são aplicadas equações diferenciais parciais com o objetivo de analisar seu comportamento físico, obtendo-se um resultado aproximado da realidade. (STEFENON, 2018).

Neste trabalho de iniciação científica, é proposto um modelo no SBMEF que correlacione níveis distintos de contaminação com a sua condutividade. Nele, aplicam-se distintos níveis de condutividade em uma camada salina a fim de obterem-se valores de corrente de fuga e resistência similares ao encontrado na experimentação prática registrada na literatura. Além disso, propõe-se calcular os valores de poluição depositada, ou seja, a Densidade de Depósito de Sal (ESDD ou DDS) correspondentes.

## **2. OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho são descritos a seguir:

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Estabelecer um modelo a partir de simulações computacionais, baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF), que correlacione níveis distintos de contaminação de um isolador de vidro com a sua condutividade.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar sobre isoladores de alta tensão;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre isoladores, deposição de sal e corrente de fuga;
- Dimensionar as características construtivas e de funcionamento de um isolador de alta tensão;
- Desenvolver um modelo tridimensional (3D) do isolador de alta tensão, utilizando ferramenta de Desenho Auxiliado por Computador (CAD);
- Simular computacionalmente o comportamento da condutividade, baseada no método dos elementos finitos, do modelo 3D desenvolvido;
- Propor um modelo baseado em MEF que relacione o fenômeno de deposição de salinidade em isoladores com sua resistência;
- Divulgação dos resultados obtidos na forma de relatórios científicos e artigos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura, encontram-se algumas referências ao estudo laboratorial e de simulações computacionais do comportamento de isoladores submetidos a diferentes tipos de poluição.

Banik, Dalai e Chatterjee (2014) realizaram experimentos laboratoriais de um isolador de porcelana de 11 kV. Junto ao isolador, foi utilizado um transformador de 150 kVA, 500 V/250 kV e resistores de proteção. Os testes foram realizados para avaliar o efeito de diferentes níveis de poluição na corrente de fuga e tensão de ruptura do isolador. Para constituir a poluição artificial, foram feitas 5 soluções com kaolin, sal comum (NaCl) e água destilada, visando obter a salinidade almejada. A poluição é aplicada no isolador limpo e então são medidos seus valores de corrente e de tensão. Para encontrar os valores de ESDD, os autores mediram com um condutivímetro os valores de condutividade para cada nível de poluição (0,0295, 0,0467, 0,0635, 0,0843 e 0,1256 S/m). Com isso, foi possível observar que a relação entre a condutividade e ESDD é linear. Ao analisar a corrente de fuga, foi percebido que ela aumenta consideravelmente nos isoladores poluídos quando comparada à condição limpa, inclusive para diferentes tensões aplicadas, o que aumenta a possibilidade de ocorrer uma descarga *flashover* na superfície do isolador. Constatou-se que com o aumento da ESDD, a descarga *flashover* diminui e a corrente de fuga aumenta. Além disso, com diferentes aplicações de tensão (10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV e 30 kV), a corrente de fuga aumentou significativamente com o crescimento da poluição de ESDD.

Othman, Piah e Adzis (2015) realizaram um estudo simulado acerca do efeito da contaminação de uma cadeia de quatro isoladores de vidro na corrente de fuga e na *trapped charge* (carga presa). Para tal, utilizou-se o *software QuickField™*, em que foram aplicadas 4 espessuras de camadas poluídas: 0 mm (limpa), 1 mm (leve), 1,5 mm (médio) e 2,0 mm (pesado). Para a parte experimental, foram utilizadas três soluções de água destilada e sal comum (NaCl), em que foram utilizadas para a determinação da ESDD. À cadeia de 4 isoladores, foi aplicada a solução e a 2 cm dos três primeiros isoladores e a 4 cm do quarto, uma malha de aço inoxidável de forma radial. Além disso, utilizou-se um resistor shunt de 100  $\Omega$  para medir a corrente de fuga. Ao analisar a densidade de corrente (para fins de simplicidade) ao longo da região de fuga (medida da campânula do isolador ao pino),

percebe-se que, para os isoladores 1 e 4, a amplitude da densidade de corrente é maior perto do pino e que ela aumentou com o crescimento da poluição. Além disso, com a aplicação dos níveis de poluição, há uma tendência de distribuição negativa de carga eletrostática para os 4 isoladores da cadeia e nota-se que a distribuição de carga eletrostática para os isoladores limpos e contaminados é consideravelmente distinta. Ao observar o comportamento da corrente de fuga com a variação dos níveis de poluição do limpo ao pesado, percebe-se que ela também aumenta e comparando-a com a carga eletrostática, percebe que, apesar da amplitude da corrente aumentar com o crescimento da poluição, a amplitude da carga eletrostática diminui.

Arshad *et al* (2015) realizaram um estudo sobre a distribuição de campo elétrico de um isolador polimérico, classe 33 kV, sob condições poluentes de uma camada uniforme de água. Para isso, utilizou-se a física *Electric Current* do *software* COMSOL *Multiphysics*, baseado no MEF, para realizar simulações de distribuição de campo elétrico a fim de avaliar o efeito da poluição na superfície do isolador no campo elétrico e a possibilidade de corona e iniciação de arco de banda seca. Para tal, aplicou-se via COMSOL *Multiphysics* diferentes níveis de camadas úmidas (0,5; 1,0; 1,5; 2 mm) e de condutividade ( $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$  S/m). Para as distintas aplicações da camada poluente, fixou-se a condutividade em  $500 \mu\text{S/cm}$  (0,05 S/m), o que resultou no crescimento do campo elétrico de 0,8 a 1,45 kV/cm. Já para a aplicação dos níveis da condutividade, fixou-se a camada de água em 1 mm, de forma que, com o aumento da condutividade da poluição, a intensidade do campo elétrico também aumentou de 0,5 a 0,64 kV/cm, em que o maior resultado foi para  $10^{-3}$  S/m. Portanto, observa-se que essas diferentes aplicações modificam a intensidade do campo elétrico na superfície do isolador polimérico, fato mais evidente ao mudar o nível da camada úmida quando comparado à condutividade, no qual a maior intensidade de campo elétrico alcançado na simulação foi de 1,45 kV/cm, aplicando uma camada úmida de 2 mm e condutividade de 0,05 S/m.

## 4. METODOLOGIA

Os materiais e métodos necessários para alcançar os objetivos específicos do trabalho foram os seguintes:

### 4.1. MATERIAIS

- *Software* de projeto ou Desenho Auxiliado para Computador (CAD): Autocad, versão estudantil 2023;
- *Software* Baseado no Método dos Elementos Finitos (SBMEF): COMSOL *Multiphysics* 6.1;
- *Software WEB* para manuseio e gerenciamento de Tabelas e Gráficos (STG): Planilhas Google 2023.

### 4.2. MÉTODOS

Com o objetivo de estabelecer um modelo a partir de simulações computacionais, baseadas no MEF, que correlacione níveis distintos de contaminação de um isolador de vidro com a sua condutividade, foi necessário, a priori, realizar o dimensionamento de um isolador de alta tensão de vidro de suspensão de 10 kV<sub>RMS</sub>.

Com as dimensões do isolador determinadas, é possível desenvolver um desenho 2D axissimétrico do isolador escolhido com o auxílio do *software* de projeto ou Desenho Auxiliado por Computador (CAD).

No desenho, é inserido, além da campânula, pino, cimento e saia do vidro, uma camada uniforme de 0,1 mm (valor arbitrário) de poluição salina ao longo da saia do vidro, com o intuito de aplicar diferentes níveis de condutividade.

Após o desenvolvimento do modelo em 2D no CAD, o desenho pode ser

implementado no *Software* Baseado no Método de Elementos Finitos (SBMEF). Na simulação, a malha utilizada é no formato triangular e customizada a fim de refinar a análise do comportamento do isolador, dividindo a área dos triângulos em menores regiões.

Ao desenho, é inserida as propriedades reais de um isolador de 10 kV<sub>RMS</sub>, atribuindo ao domínio de cada material sua respectiva permissividade relativa e condutividade elétrica, de acordo com a literatura encontrada na Tabela 1. Já para a camada salina, suas propriedades foram determinadas ao longo do trabalho.

Além disso, adicionou-se o espaço da simulação, no formato de um retângulo, com dimensões muito maiores que as do isolador, com 2500 mm de largura e 5000 mm de altura, a fim de simular o ar que cerca os isoladores e de definir uma fronteira de simulação, na qual o potencial elétrico é nulo, longe o suficiente do objeto simulado a ponto de não interferir na distribuição de campo dele.

Tabela 1: Propriedades dos materiais que compõem o isolador de vidro.

Material	Permissividade Relativa $\epsilon_r$	Condutividade Elétrica $\sigma$ (S/m)
Ar	1,00	$1,00 \times 10^{-15}$
Ferro Galvanizado	$1,00 \times 10^5$	$5,98 \times 10^7$
Vidro Temperado	7,5	$1,00 \times 10^{-8}$
Cimento Portland	6	$5,30 \times 10^{-4}$

Fonte: (DIAS, 2017).

Para implementar as propriedades elétricas do isolador, aterrou-se o retângulo e a campânula, bem como aplicou-se a tensão de 10 kV<sub>RMS</sub> no terminal do pino. Dessa forma, foi possível desenvolver o modelo tridimensional do isolador.

Para a camada salina, foi estabelecida uma permissividade relativa característica do sal de 5,9. (SILVA, 2014). Já para a condutividade elétrica ( $\sigma$ ), utilizaram-se 6 (seis) diferentes valores para observar o comportamento da corrente elétrica e resistência do isolador com o a poluição, em que a primeira condutividade representa o isolador limpo ( $\sigma_{\text{vidro}}=1,00 \times 10^{-8}$ ) e as demais a variação da poluição. Além disso, entre eles, foi adicionado alguns outros valores com o intuito de aumentar o número de pontos da análise para melhor visualização das curvas referentes ao seu comportamento.

Segundo Banik e outros (2014), os níveis distintos de condutividade aplicados em laboratório em um isolador de porcelana podem ser similarmente implementados no SBMEF para o isolador de vidro trabalhado, pois ambos têm *design* e propriedades semelhantes, uma vez que ambos são cerâmicos.

A fim de determinar as condutividades implementadas na simulação, foi necessário utilizar uma constante de correção (CC), uma vez que as condições reais de poluição de um isolador não podem ser completamente replicadas na simulação. Nela, a camada salina de 0,1 mm é aplicada de forma arbitrária e uniforme, porém, na realidade, a espessura e a disposição da poluição são aleatórias e desiguais, o que torna necessário o uso da constante.

O valor da constante de correção foi definido de acordo com o menor Erro Médio Quadrático (EMQ) a partir de uma faixa de constantes determinadas (600, 550, 500, 450 e 400), de modo que os valores da corrente de fuga relacionados à variação da condutividade no SBMEF se assemelhassem às encontradas em laboratório por (BANIK; DALAI; CHATTERJEE, 2014). Para tal, utilizou-se a razão entre a condutividade de referência – conforme na Tabela 2– e a constante de correção, de acordo com (1).

Tabela 2: Condutividade e corrente de fuga de acordo com o modelo utilizado.

$\sigma_{ref}$ (S/m)	$I_{ref}$ (mA)
0,0295	0,195
0,0467	0,288
0,0635	0,366
0,0843	0,410
0,1256	0,498

Fonte: (BANIK; DALAI; CHATTERJEE, 2014).

$$\sigma = \frac{\sigma_{ref}}{CC} \quad (1)$$

Em que  $\sigma$  é a condutividade da simulação,  $\sigma_{ref}$  é a condutividade da referência e  $CC$  é a constante de correção.

De acordo com os valores da condutividade determinados, obtêm-se suas respectivas correntes de fuga no SBMEF e os compara às de (BANIK; DALAI; CHATTERJEE, 2014)

a partir do cálculo do EMQ, a fim de determinar qual delas deveria ser aplicada às condutividades. Utilizou-se o EMQ porque ele mede o desempenho de modelos de regressão, em que é possível comparar valores medidos de amostras com as amostras de um modelo (2):

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2} \quad (2)$$

Em que  $n$  é o número de amostras,  $y_i$  é o valor observado para a amostra  $i$  e  $p_i$  é o valor previsto pelo modelo para a amostra  $i$ .

Com as condutividades determinadas, é possível calcular a Densidade de Depósito de Sal (ESDD ou DDS) com a finalidade de avaliar o nível de poluição depositada na superfície do isolador com a variação da condutividade. Para tal, utilizou-se as equações de Salinidade ( $Sa$ ) e ESDD de acordo com a norma IEC 60815-1:

$$Sa = (5,7\sigma_{20})^{1,03} \quad (3)$$

$$ESDD = \frac{Sa \cdot V}{A} \quad (4)$$

Em que  $\sigma_{20}$  é a condutividade volumétrica à temperatura de 20°C (S/m) aplicadas à simulação;  $ESDD$  é o equivalente de densidade de depósito de sal (mg/cm<sup>2</sup>);  $V$  é o volume de água destilada (cm<sup>3</sup>). Para ele, determinou-se um valor padrão de 500 cm<sup>3</sup>, de acordo com os limites volumétricos fornecidos pela norma IEC 60815-1;  $A$  é a área da superfície poluída do isolador (cm<sup>2</sup>). Ela é calculada por  $A = \pi r^2 = 615,75$  cm<sup>2</sup>.

Por fim, após a aplicação dos diferentes níveis de poluição com a variação de condutividade e cálculo do acúmulo de sal respectivos, é possível obter os valores de corrente de fuga e resistência elétrica a fim de analisar a relação entre si, bem como seu efeito no campo e potencial elétrico do isolador.

Além disso, faz-se imprescindível salientar que, além do SBMEF, todas as tabelas e

gráficos deste trabalho foram realizadas através do *Software WEB* para manuseio e gerenciamento de Tabelas e Gráficos (STG).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia empregada descrita neste trabalho, é possível realizar a análise do desenho, bem como de gráficos e valores encontrados.

### 5.1. DESENHO DO ISOLADOR TRIDIMENSIONAL

O isolador escolhido para o desenho possui dimensões conforme na Tabela 3.

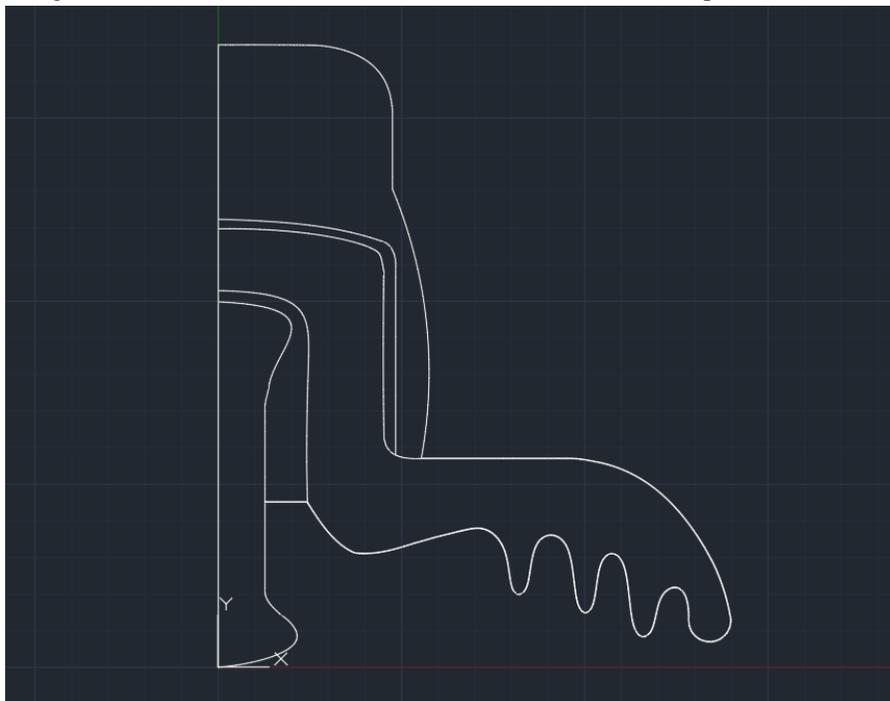
Tabela 3: Dimensões do isolador de vidro de suspensão 10kVrms utilizado.

Dimensões - Isolador de vidro de suspensão	
Distância de escoamento (mm)	380
Diâmetro D (mm)	280
Passo P (mm)	170

Fonte: (CST, 2020).

Com as dimensões determinadas, tem-se, na Figura 2, o desenho 2D axissimétrico realizado no CAD.

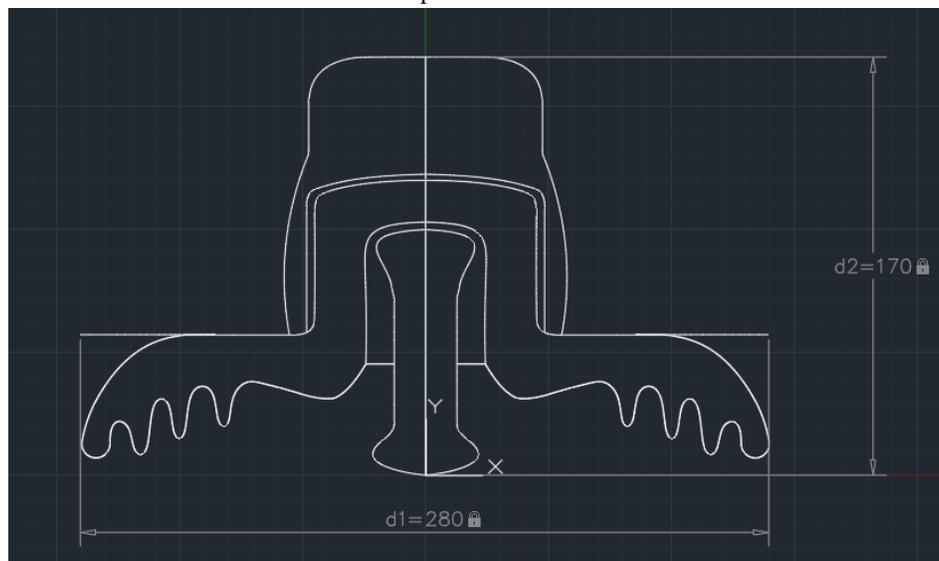
Figura 2: Desenho axissimétrico de um isolador de vidro de suspensão no CAD.



Fonte: autoria própria.

O desenho é, então, espelhado para observar as dimensões finais do isolador, conforme pode-se observar na Figura 3.

Figura 3: Desenho de um isolador de vidro de suspensão no CAD de 280 mm de diâmetro e 170 mm de passo.

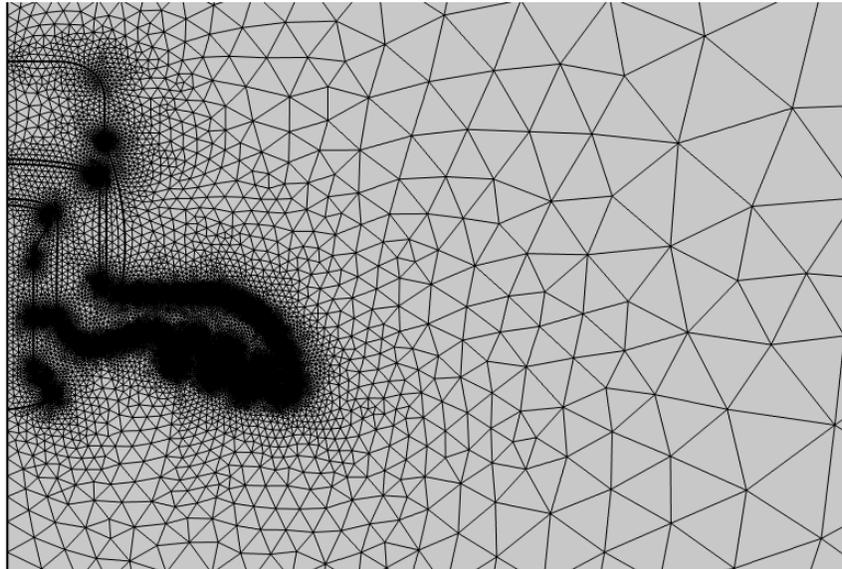


Fonte: autoria própria.

Após a finalização do desenho do isolador no CAD e importação para o SBMEF com

refinamento na malha, obtemos resultado conforme na Figura 4.

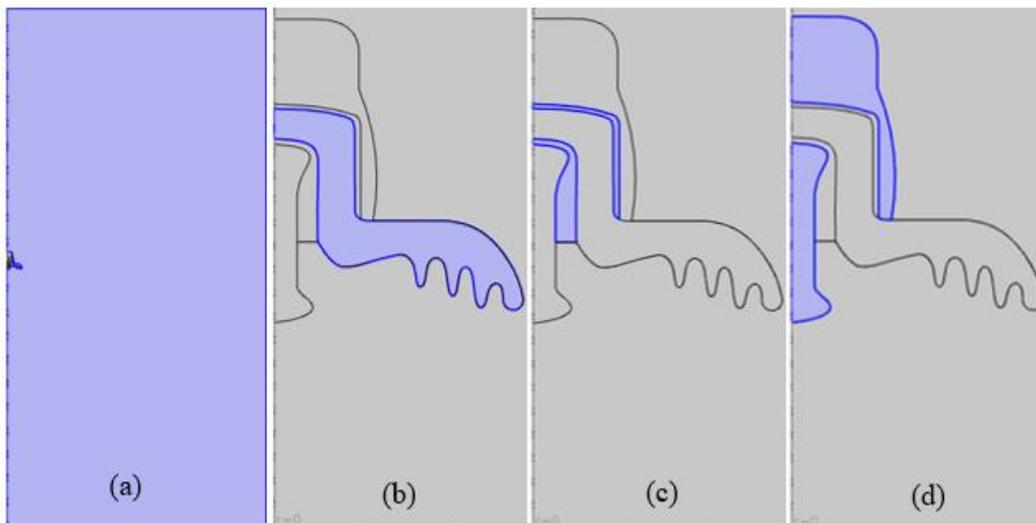
Figura 4: Representação da malha do isolador de vidro utilizada na simulação no SBMEF.



Fonte: autoria própria.

Ao inserir as propriedades dos materiais do isolador conforme na Tabela 1, bem como da camada salina temos o isolador preparado para as simulações, de acordo como na Figura 5 e Figura 6.

Figura 5: Materiais do isolador de vidro de suspensão no SBMEF. (a) Ar no retângulo; (b) Vidro na saia; (c) Cimento; (d) Ferro Galvanizado na campânula e pino.

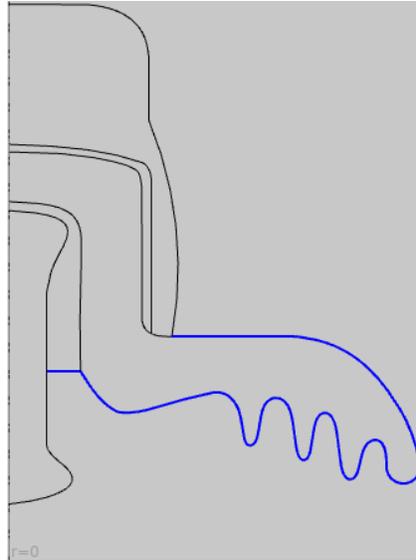


Fonte: autoria própria.

Faz-se imprescindível salientar que a camada salina por toda a saia do vidro foi

desenhada até o pino do isolador, pois o desenho foi realizado em máxima possível proximidade com a realidade.

Figura 6: Camada salina aplicada no isolador de vidro de suspensão no SBMEF.



Fonte: autoria própria.

Com a inserção dos materiais e propriedades elétricas do isolador, obtemos o modelo tridimensional do isolador no SBMEF, conforme na Figura 7e Figura 8.

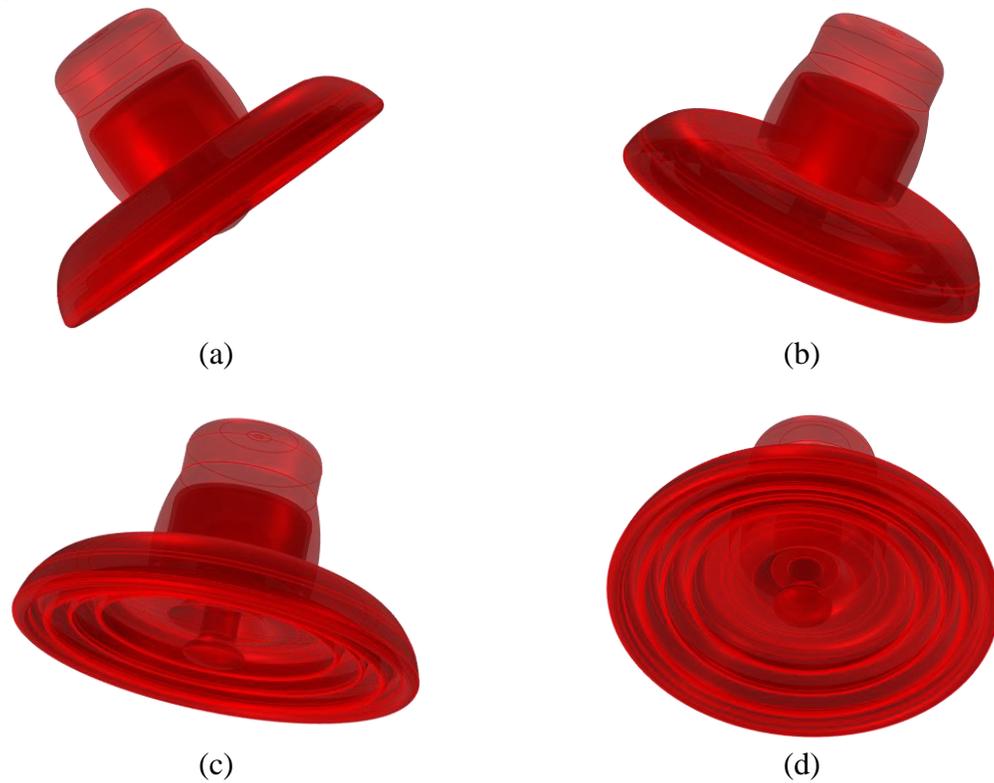
Figura 7: Modelo tridimensional do isolador de vidro de suspensão no SBMEF.



Fonte: autoria própria.

O modelo tridimensional é possível ser visualizado de diferentes vistas.

Figura 8: Diferentes vistas do modelo tridimensional do isolador de vidro de suspensão no SBMEF.



Fonte: autoria própria.

## 5.2. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

De acordo com a as faixas de constantes determinadas (600, 550, 500, 450 e 400) e conforme a equação (1), foi possível determinar os valores de corrente (correntes 1, 2, 3, 4 e 5) para cada constante no SBMEF:

Tabela 4: Corrente de fuga aplicada a diferentes constantes de correção.

CC	600	550	500	450	400
$I_{ref}$ (mA)	I 1 (mA)	I 2 (mA)	I 3 (mA)	I 4 (mA)	I 5 (mA)
0,195	0,18768	0,19561	0,20502	0,21641	0,23049
0,288	0,23746	0,24948	0,26381	0,28123	0,30288
0,366	0,28467	0,30073	0,31992	0,34329	0,3724
0,41	0,34228	0,36337	0,38862	0,4194	0,45779
0,498	0,45547	0,48661	0,52392	0,56947	0,62631

Fonte: (BANIK; DALAI; CHATTERJEE, 2014).

Com os valores das cinco diferentes correntes determinados, utilizou-se a equação (2) para determinar qual delas possui o menor EMQ, ou seja, qual corrente mais se aproxima da corrente referencial do modelo escolhido.

Tabela 5: EMQ das diferentes correntes de fuga aplicada a diferentes constantes de correção comparada à corrente referencial.

CC	600	550	500	450	400
EMQ	0,05588782014	0,04012087836	0,02806376204	0,03525985252	0,06366985896

Fonte: autoria própria.

Comparando-se os valores do EMQ dentre as cinco constantes de correção, é possível observar que a constante 500 associada à I 3 (conforme na Tabela 4) apresenta o menor erro. Dessa forma, ela foi utilizada para a determinação das cinco condutividades utilizadas, exceto para a condutividade do vidro de  $1,00 \times 10^{-8}$  S/m, pois ela representa a condição limpa do isolador.

Tabela 6: Condutividade da simulação de acordo com a razão da condutividade da referência com a constante de correção de 500.

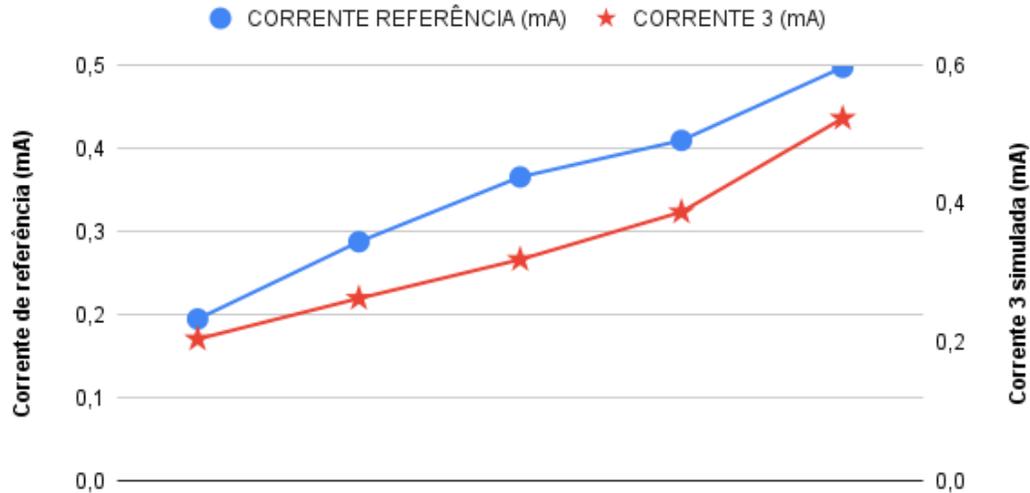
$\sigma_{ref}$ (S/m)	$\sigma$ (S/m)
$2,95 \times 10^{-2}$	$5,90 \times 10^{-5}$
$4,67 \times 10^{-2}$	$9,34 \times 10^{-5}$
$6,35 \times 10^{-2}$	$1,27 \times 10^{-4}$
$8,43 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^{-4}$
$12,56 \times 10^{-2}$	$2,51 \times 10^{-4}$

Fonte: autoria própria.

Com isso, é possível comparar a corrente de fuga referencial e a corrente 3 (com a relação da constante de 500) encontrada na simulação no SBMEF, em que se percebe que

são valores próximos entre si e que as suas curvas possuem formato parecido, uma vez que foi escolhida a constante de correção de menor EMQ:

Figura 9: Comparação das curvas da corrente de fuga referencial com a corrente de fuga simuladas.



Fonte: autoria própria.

### 5.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, CORRENTE DE FUGA, ESDD E RESISTÊNCIA

Com as condutividades estabelecidas, foi possível simular suas respectivas correntes de fuga e resistência elétrica no SBMEF. E, além disso, utilizando as equações (3) e (4), os valores de salinidade e ESDD.

Tabela 7: Relação entre as condutividades aplicadas com a salinidade, ESDD, corrente de fuga e resistência elétrica.

$\sigma$ (S/m)	Sa (kg/m <sup>3</sup> )	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	I <sub>fuga</sub> (mA)	Resistência (M $\Omega$ )
$1,00 \times 10^{-8}$	0,00000003	0,00000003	0,074589	134,07
$5,90 \times 10^{-5}$	0,00026	0,00021	0,20502	48,775
$9,34 \times 10^{-5}$	0,00042	0,00034	0,26381	37,906
$1,27 \times 10^{-4}$	0,00058	0,00047	0,31992	31,258
$1,69 \times 10^{-4}$	0,00078	0,00063	0,38862	25,732
$2,51 \times 10^{-4}$	0,00118	0,00096	0,52392	19,087

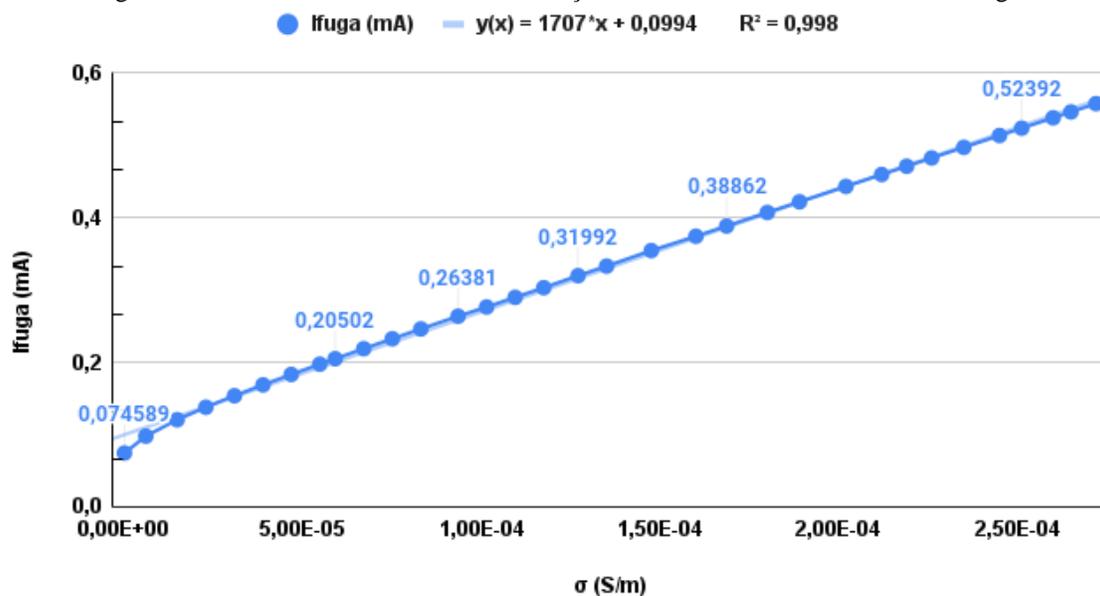
Fonte: autoria própria.

Comparando os valores obtidos entre si, percebe-se que, com o aumento da

condutividade simulada no SBMEF, a corrente de fuga também aumenta, bem como a salinidade ( $Sa$ ) e a ESDD. No entanto, constata-se que a resistência se comporta de forma contrária, uma vez que a impedância do isolador também diminui com o aumento da poluição salina. Graficamente também é possível observar essas relações. Porém, para melhor visualização do comportamento das curvas, foram adicionados mais pontos de condutividades entre as já estabelecidas.

Uma das principais relações a ser observada é a da condutividade elétrica e da corrente de fuga, conforme ilustrado na Figura 10. Nela, nota-se que o comportamento da curva é quase idêntico ao da linha de tendência linear do gráfico, com aproximação  $R^2$  em 0,998, o que implica que os valores encontrados em simulação para corrente de fuga se comportaram conforme o esperado para esse tipo de relação. Nesse caso, a corrente de fuga aumenta com o aumento da condutividade e, conseqüentemente, da poluição na superfície de vidro do isolador. Além disso, para essa relação, tem-se a equação linear  $y(x) = 1707x + 0,0994$ .

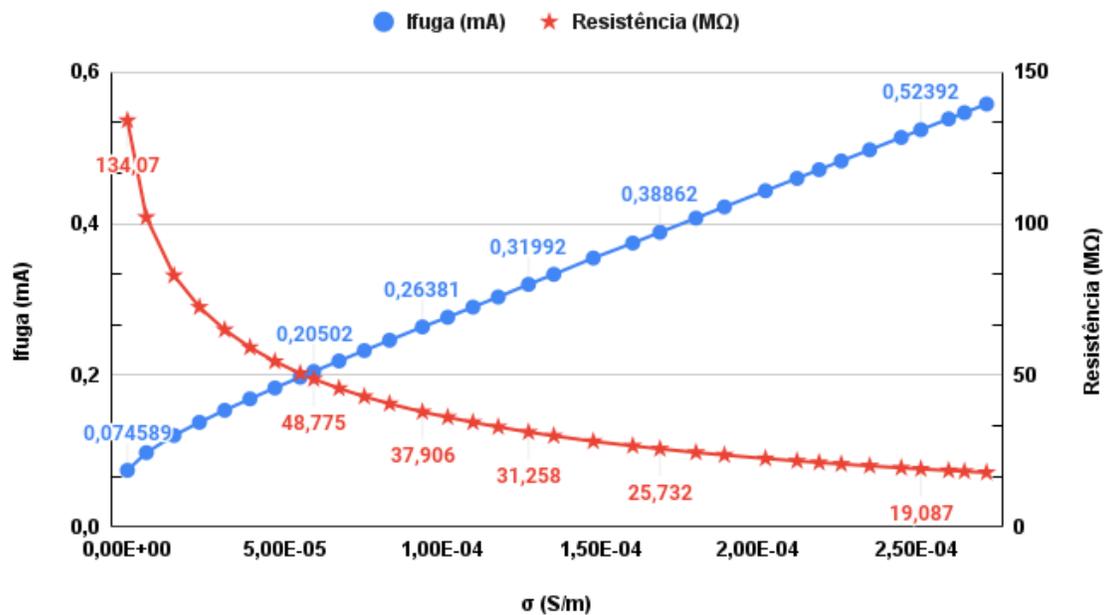
Figura 10: Curva e linha de tendência da relação entre condutividade e corrente de fuga.



Fonte: autoria própria.

É possível, da mesma maneira, realizar a comparação das curvas de corrente de fuga e resistência elétrica, de acordo como na Figura 11, variando-se a condutividade. Percebe-se que a corrente se comporta de forma crescente e linear, no entanto, a resistência elétrica se comporta de modo contrário, isto é, decrescente e se aproximando de uma curva logarítmica.

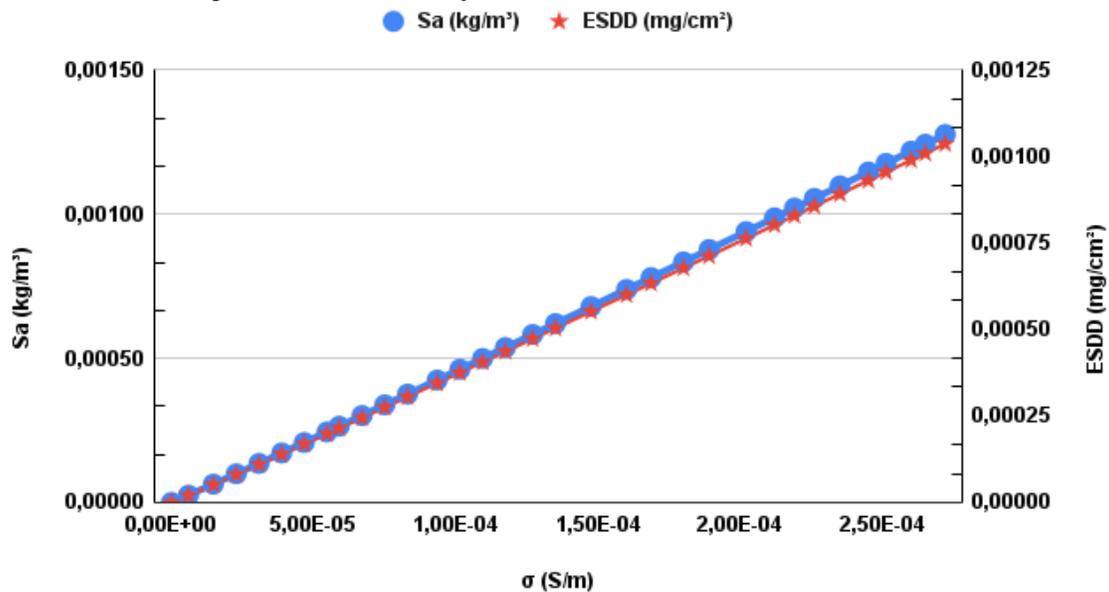
Figura 11: Curvas da relação entre condutividade, corrente de fuga e resistência.



Fonte: autoria própria.

A ESDD aumenta com a variação crescente da condutividade e, de maneira análoga, a salinidade da poluição salina também, conforme na Figura 12. Como é possível observar nessa mesma figura, as curvas de ambas se sobrepõem e apresentam comportamento crescente e linear.

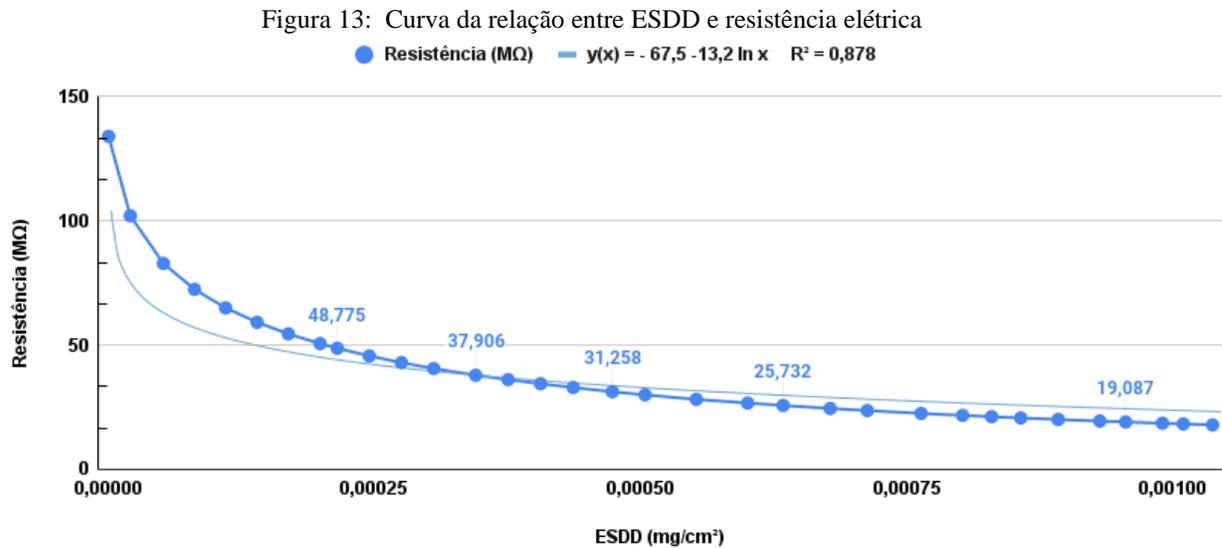
Figura 12: Curvas da relação entre condutividade, salinidade e ESDD.



Fonte: autoria própria.

Outra análise essencial é a relação entre ESDD e resistência elétrica, de acordo como

na Figura 13. Assim como quando relacionada à condutividade, a resistência elétrica se comporta de forma decrescente e logarítmica com a variação crescente da ESDD. Dessa forma, ao traçar uma linha de tendência logarítmica para a curva analisada, percebe-se que ela se aproxima com  $R^2 = 0,878$ , menos que a corrente de fuga com o aumento da condutividade. Além disso, para essa relação, tem-se a equação logarítmica  $y(x) = - 67,5 - 13,2 \ln x$ .

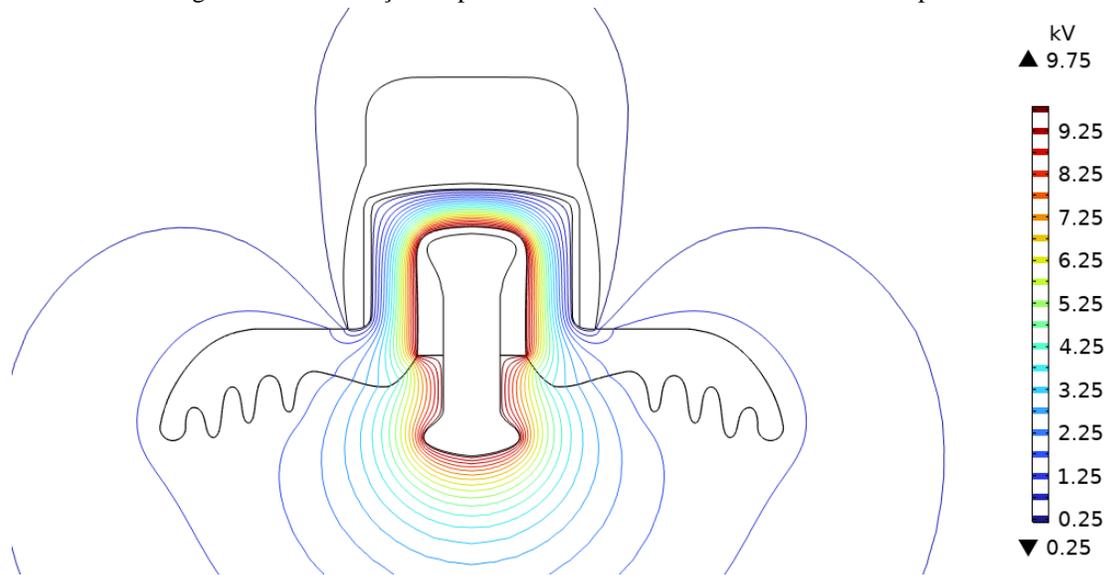


Fonte: autoria própria.

## 5.4. POTENCIAL E CAMPO ELÉTRICO

Além do efeito da poluição à corrente de fuga, depósito de sal e resistência elétrica, há também impacto no potencial e campo elétrico do isolador. Comparando-se a superfície do potencial da maior poluição ( $\sigma = 2,51 \times 10^{-4}$  S/m) com o limpo ( $\sigma = 1,00 \times 10^{-8}$  S/m), percebe-se que, para o limpo, o potencial está mais intenso ao redor do pino e menos distribuído.

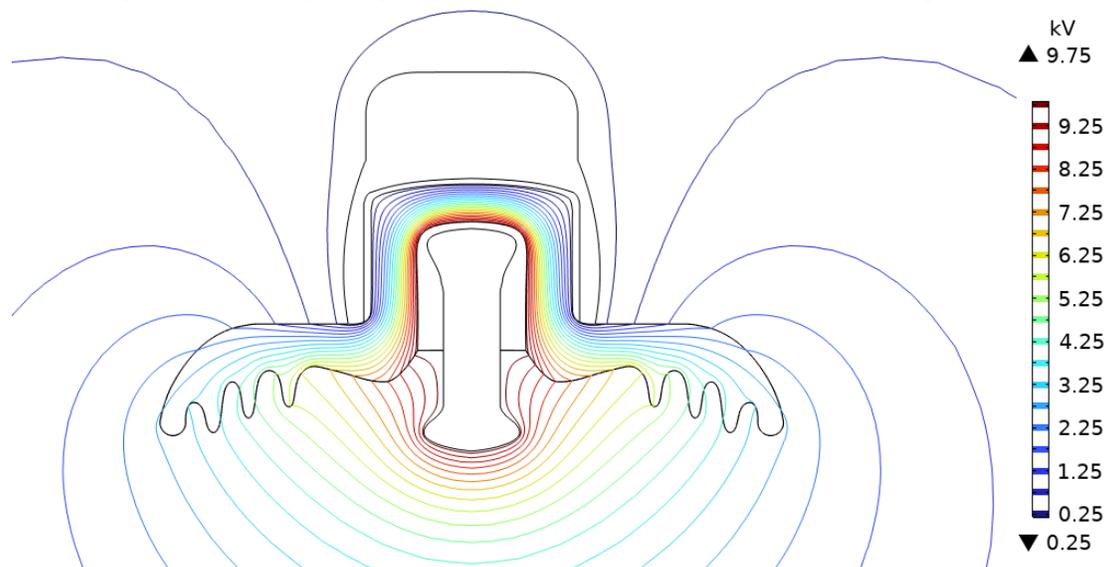
Figura 14: Distribuição do potencial elétrico em linhas no isolador limpo.



Fonte: autoria própria.

De modo contrário, no mais poluído, a distribuição de potencial elétrico está menos intensa ao redor do pino e mais distribuída, em que também está mais presente na saia de vidro do isolador, fato que não ocorre para ele limpo.

Figura 15: Distribuição do potencial elétrico em linhas no isolador com maior poluição.

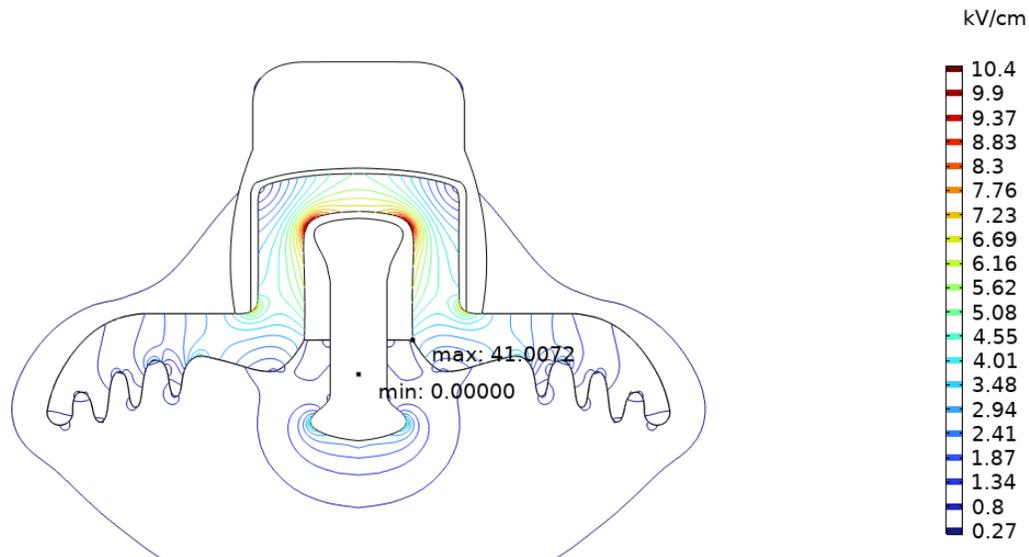


Fonte: autoria própria.

Também, para a distribuição de potencial elétrico, percebe-se que não há potencial dentro do cimento do isolador, uma vez que, na simulação, ele está como semicondutor, pois sua condutividade elétrica é de  $5,30 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ .

Ao analisar a relação entre distribuição de campo elétrico com a poluição na superfície do isolador, observa-se comportamento decrescente. Para o isolador limpo, o campo máximo atingido foi de 41,0072 kV/cm, e para a maior poluição simulada, o campo máximo foi de 10,7066 kV/cm. Isso implica que o campo elétrico máximo diminui conforme a variação crescente da condutividade e com a poluição salina. Isso se dá devido à equalização do campo elétrico, uma vez que é um processo de distribuição uniforme do potencial elétrico em um objeto para eliminar diferenças de potencial.

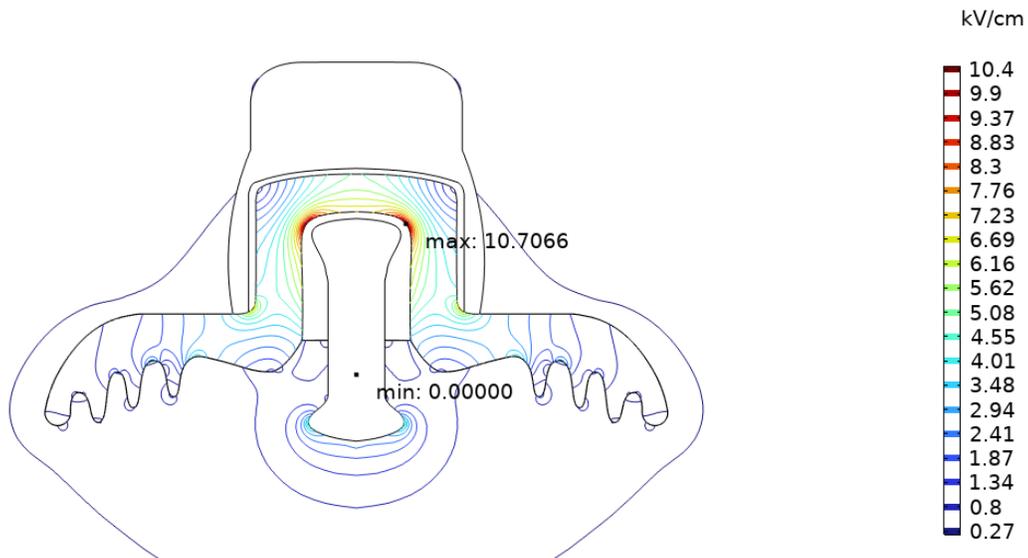
Figura 16: Distribuição do campo elétrico em linhas no isolador limpo.



Fonte: autoria própria.

Nota-se, a partir da Figura 16 e Figura 17, a diferença entre a distribuição das linhas de campo entre a aplicação dos dois extremos da poluição simulada.

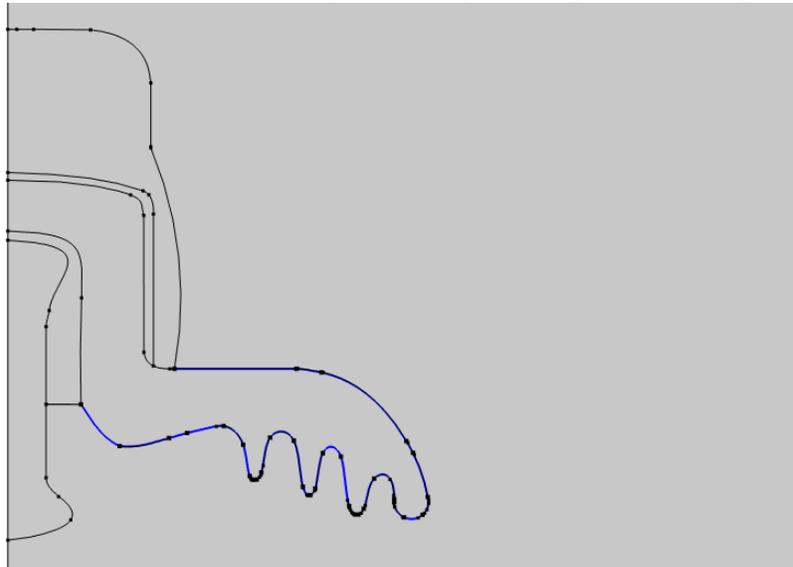
Figura 17: Distribuição do campo elétrico em linhas no isolador com maior poluição.



Fonte: autoria própria.

É possível analisar graficamente o comportamento na borda de vidro, conforme ilustrado na Figura 18, do potencial e campo elétrico com os diferentes níveis de poluição na simulação no SBMEF.

Figura 18: Borda do vidro selecionada para análise gráfica do potencial e campo elétrico.

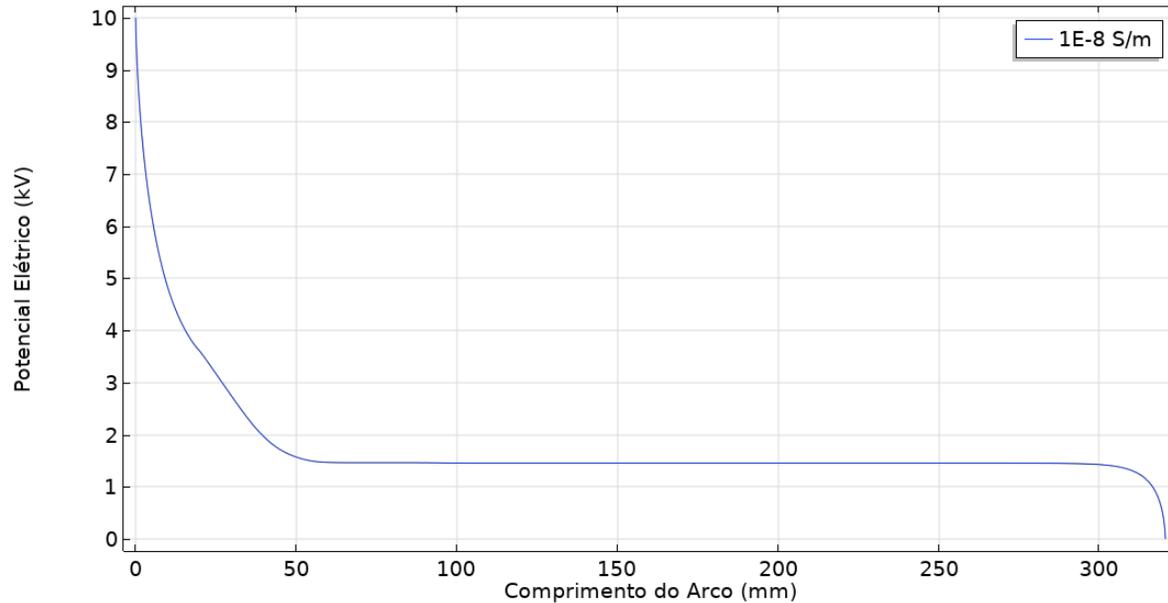


Fonte: autoria própria.

Ao analisar os gráficos na Figura 20 e Figura 20, percebe-se que o potencial elétrico diminui com o comprimento do arco do vidro, uma vez que se afasta do pino. Ademais, ao

comparar as curvas do potencial para o isolador limpo com as da variação de condutividade, percebe-se que em todo o comprimento da borda a curva roxa de  $\sigma = 2,51 \times 10^{-4} \text{ S/m}$  apresenta maior potencial elétrico que as demais. Isso implica que o potencial elétrico cresce com a condutividade na superfície do isolador.

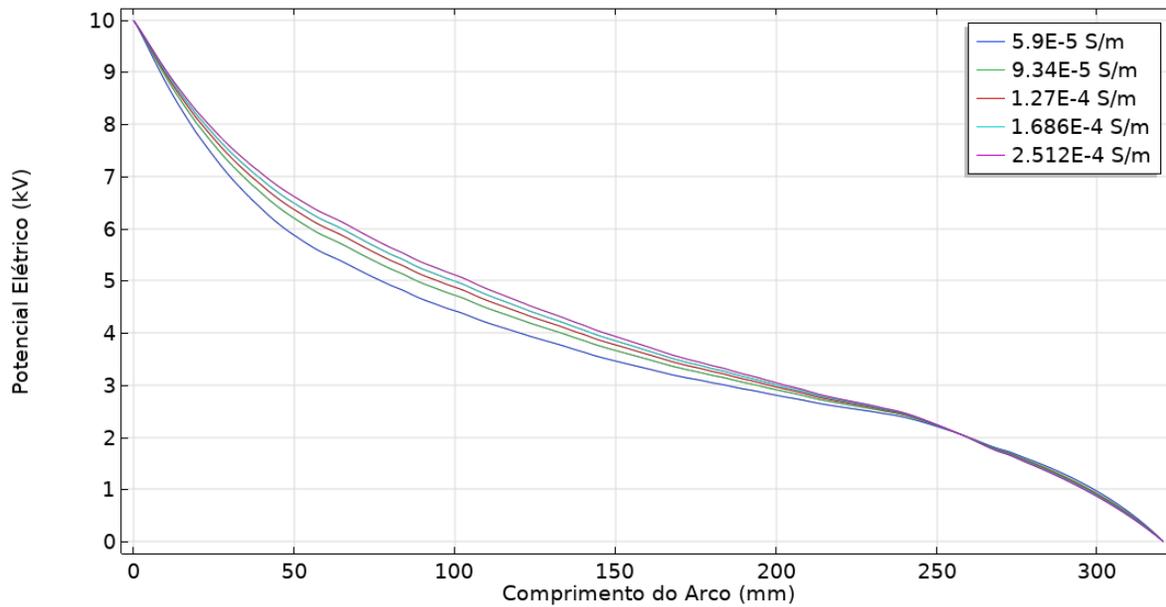
Figura 19: Distribuição gráfica do potencial elétrico no isolador limpo.



Fonte: autoria própria.

Especificamente, o isolador limpo apresenta potencial elétrico quase contínuo na maioria da extensão do comprimento do arco.

Figura 20: Distribuição gráfica do potencial elétrico no isolador poluído com os cinco níveis de poluição.

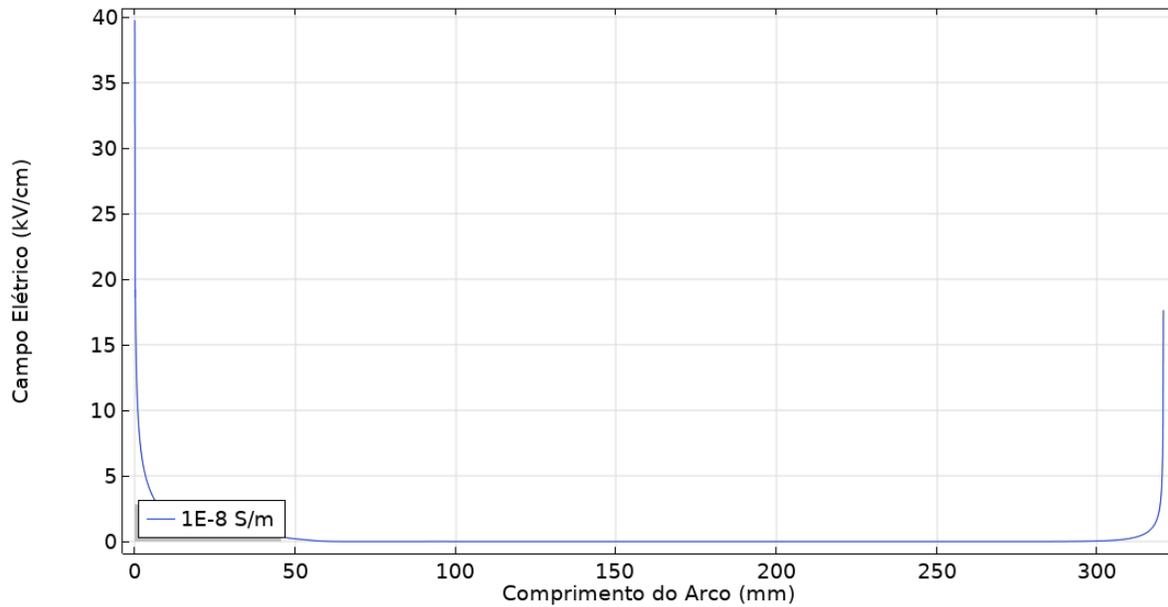


Fonte: autoria própria.

Analogamente aos gráficos apresentados no potencial elétrico, nota-se comportamento similar ao analisar graficamente o campo elétrico médio. No decorrer da borda de vidro, percebe-se que o campo oscila com o aumento do comprimento, pois se afasta do pino e devido ao formato da saia de vidro, porém, depois cresce de forma linear.

Ademais, comparando-se os gráficos na Figura 22e Figura 22, percebe-se que ao decorrer da borda, a curva azul clara ( $\sigma = 2,51 \times 10^{-4}$  S/m) se sobressai, em que apresenta maior campo elétrico médio que as demais poluições. Isso implica que, assim como o potencial, o campo elétrico médio na borda do isolador cresce com a poluição na superfície do isolador, comportando-se de modo contrário ao campo máximo.

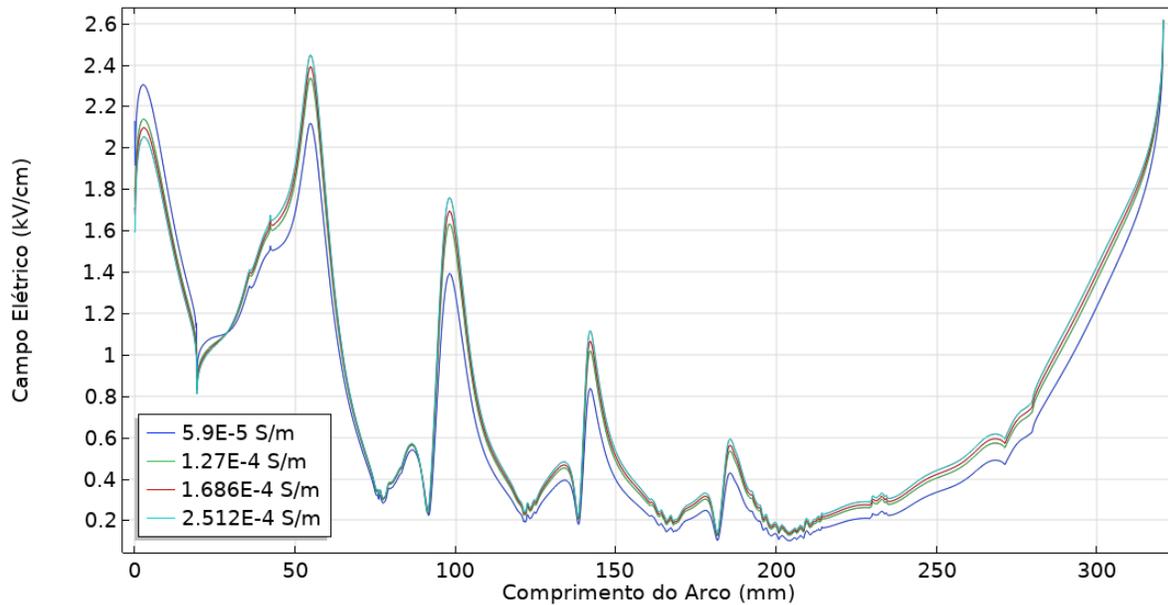
Figura 21: Distribuição gráfica do campo elétrico no isolador limpo.



Fonte: autoria própria.

Assim como para o potencial, o isolador limpo apresenta campo elétrico médio quase contínuo na maioria da extensão do comprimento do arco.

Figura 22: Distribuição gráfica do campo elétrico no isolador poluído com os cinco níveis de poluição.



Fonte: autoria própria.

## 6. CONCLUSÕES

Com a metodologia aplicada neste trabalho, foi possível estabelecer um modelo a partir de simulações computacionais, baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF), que correlacione níveis distintos de contaminação de um isolador de vidro com a sua condutividade.

A partir da literatura encontrada, foi possível adaptar, através da constante de correção com menor EMQ, os níveis de condutividade simulados no SBMEF a fim de obter valores de corrente de fuga similares às encontradas em laboratório. Desse modo, foi possível alcançar os objetivos do trabalho, em que se estabeleceu a relação gráfica e expressiva entre a condutividade elétrica e corrente de fuga e entre ESDD e resistência elétrica. Também, realizou-se a relação do comportamento do potencial e campo elétrico para os diferentes níveis de poluição simulados.

O comportamento apresentado nas análises foi condizente com o esperado em realidade, uma vez que, com o aumento da condutividade, ocorre o aumento da ESDD e da corrente de fuga, mas diminui a resistência. Do mesmo modo, há o aumento do potencial e campo elétrico médio com o aumento da poluição, conforme encontrado na literatura. Porém, há diminuição do campo elétrico máximo com o aumento da corrente.

O uso dos *softwares* para desenho (CAD), para as simulações utilizando o Método do Elementos Finitos (MEF) e para manuseio e gerenciamento de tabelas e gráficos mostrou-se imprescindível para alcançar os objetivos propostos para este trabalho. Especificamente, o SBMEF demonstrou-se uma ótima ferramenta para diferentes simulações que, por diferentes razões, não podem ser realizadas em laboratório.

As análises gráficas proporcionaram análises de maior eficácia do efeito do aumento da poluição para a corrente de fuga, ESDD e resistência, fazendo-se possível desenvolver expressões que as relacionem, bem como observar o comportamento de suas curvas. Já as análises do campo e potencial elétrico em linhas, mostrou as regiões de maior concentração de potencial elétrico a partir do pino do isolador, bem como as regiões de maior campo elétrico ao redor do pino.

## 7. PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABALHOS

Trabalhos futuros podem ser realizados a fim de aplicar as condições realizadas em simulação neste trabalho em laboratório:

- Aplicar os níveis de condutividade relatados neste trabalho a um isolador de vidro de suspensão de 10 kV<sub>RMS</sub> em laboratório.
- Calcular os níveis de depósito de sal (ESDD) com a variação da condutividade;
- Medir em laboratório a corrente de fuga e resistência elétrica com a variação da condutividade;
- Relacionar o comportamento da corrente de fuga encontrada com as condutividades aplicadas;
- Relacionar o comportamento da ESDD com o da resistência;
- Comparar os resultados obtidos em simulação neste trabalho com os obtidos em laboratório a fim de analisar a relação entre eles.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCANJO, Ayrilw Maynison de Carvalho. **Avaliação de espaçadores de 13.8 kV em ambientes contaminados**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ARSHAD et al. **Effect of Pollution Layer Conductivity and Thickness on Electric Field Distribution along a Polymeric Insulator**. Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Grenoble, 2015.

BANIK, A.; DALAI, S.; CHATTERJEE, B. **Condition monitoring of overhead line insulator by measuring surface leakage current**. 2014 Annual IEEE India Conference (INDICON). Pune, Índia: IEEE, dez. 2014.

BEZERRA, Maurício. **Isoladores para Linhas de Transmissão e Distribuição**, 27 nov. 2019. Disponível em: <<https://transmissao108196393.com/2019/11/27/isoladores-para-linhas-de-transmissao-e-distribuicao/>>. Acesso em: 01 maio 2023.

CST - Cerâmica Santa Terezinha. **Isolador de vidro temperado normal 814.2807**. Pedreira, São Paulo: CST - Cerâmica Santa Terezinha, 2020.

DIAS, Bruno Albuquerque. **Simulação computacional da poluição biológica em isoladores de vidro**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande.

FERREIRA, Tarso V.; GERMANO, André D.; DA COSTA, Edson Guedes. **Ultrasound and artificial intelligence applied to the pollution estimation in insulations**. **IEEE transactions on power delivery**, v. 27, n. 2, p. 583-589, 2012.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Phoenix,

Arizona: Ravi S. Gorur, Inc, 1999.

IEC 60815-1. **Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles.** 1. ed. Austrália: IEC, 2007.

JIANXUN, Lv et al. **Nonintrusive insulator leakage current monitoring system based on fiber optic transmission.** In: 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015. p. 885-889.

SALAM, Md. Abdus et al. **Study the Effects of Different types of Contaminants on the Insulator Resistance.** Segunda conferência internacional em Engenharia Elétrica e de Computação ICECE. Dhaka, dez, 2002.

SILVA, Bruno Fontana da. **Eletrostática: Capacitância e Dielétricos.** Instituto Federal de Santa Catarina, 2014.

STEFENON, S. et al. Analysis of the Electric Field in Porcelain Pin-Type Insulators via Finite Elements Software. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 10, p. 2505–2512, out. 2018.

VILAR, P. B. et al. **Caracterização térmica e elétrica de poluição salina em isoladores de vidro.** IV Simpósio Brasileiro De Sistemas Elétricos–Sbse, 2012.

**O que é condutibilidade elétrica? - Mundo da Elétrica.** Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-condutibilidade-eletrica/>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

OTHMAN, N. A.; PIAH, M. A. M.; ADZIS, Z. **Leakage current and trapped charge characteristics for glass insulator string under contaminated conditions.** 2015

IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). Johor Bahru: IEEE, out. 2015.

## 9. OUTRAS ATIVIDADES

O minicurso “Simulações Multifísicas Baseadas no Método dos Elementos Finitos” realizado durante a Semana Acadêmica da Universidade Federal de Sergipe (UFS) possibilitou adquirir conhecimento para desenvolver o modelo computacional deste trabalho a partir do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Além disso, o minicurso “Como elaborar um projeto de pesquisa: aplicações teóricas e práticas” também durante a Semana Acadêmica da Universidade Federal de Sergipe (UFS), possibilitou entender o que é importante ter conhecimento para desenvolver o plano de trabalho da pesquisa, bem como aumentou a compreensão do que se faz necessário para escrever relatórios referentes à pesquisa.

Também foi realizado o curso pré-PIBIC 2022/2023 oferecido pela COPES. Com ele, foi possível compreender os compromissos e obrigações do bolsista ou voluntário durante a realização de seu projeto de pesquisa, assim como do funcionamento, em geral, do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).