

**RAFAEL MARTINS**

**DESENVOLVIMENTO DE ISOLADOR POLIMÉRICO INTELIGENTE**

**Curitiba  
2015**

**RAFAEL MARTINS**

**DESENVOLVIMENTO DE ISOLADOR POLIMÉRICO INTELIGENTE**

**Tese de Doutorado** apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Doutor. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho.

**Curitiba  
2015**

---

M386d

Martins, Rafael

Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente/ Rafael Martins. – Curitiba, 2015.

91 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE, 2015.

Orientador: Vitoldo Swinka Filho .

Bibliografia: p. 88-91.

1. Polimeros - Isoladores e isolamentos eletricos. 2. Materiais inteligentes.  
3. Materiais - Propriedades termicas. I. Universidade Federal do Paraná.  
II.Swinka Filho, Vitoldo. III. Título.

CDD: 620.192042

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais  
Setor de Tecnologia

### RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos dezessete dias do mês de julho de 2015, na Sala I do LACTEC - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. César Augusto Dartora, vice-coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a septuagésima terceira defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Vitoldo Swinka Filho (UFPR), Edemir Luis Kowalski (UFPR), Emilson Ribeiro Viana Junior (UTFPR), Sergei Anatolyevich Paschuk (UTFPR), Ricardo Canute Kamikawachi (UTFPR). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **RAFAEL MARTINS** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada **“DESENVOLVIMENTO DE ISOLADOR POLIMÉRICO INTELIGENTE”**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 17 de julho de 2015.

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho  
Orientador

Prof. Dr. Edemir Luis Kowalski  
Examinador

Prof. Dr. Emilson Ribeiro Viana Junior  
Examinador

Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk  
Examinador

Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi  
Examinador

Prof. Dr. César Augusto Dartora  
Vice-Coordenador do PIPE

*Dedico esse trabalho à  
Adonay, Joceli, Monalisa e Lucas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador e amigo Dr. Vitoldo Swinka Filho que sempre esteve presente quando necessário e que me apoiou com o seu conhecimento, bom humor e amizade.

Ao Dr. Edemir Luis Kowalski que sempre se mostrou disposto a ajudar durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos Institutos LACTEC e à Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL - que forneceram as condições e infraestrutura necessárias.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE - por oferecer a oportunidade de cursar o Doutorado na área de Engenharia de Materiais.

## RESUMO

O presente trabalho baseia-se no desenvolvimento de um isolador elétrico polimérico inteligente. Materiais inteligentes são aqueles que possuem a capacidade de alterar alguma propriedade física de forma controlada. No caso do isolador desenvolvido, a propriedade a ser alterada foi a cor. O objetivo principal é que o mesmo indique, através da alteração da sua cor, quando está em condição de falha, facilitando, assim, a manutenção do sistema, pois, um dos maiores problemas dos isoladores poliméricos é identificação da sua degradação ou falha, antes que eles causem o desligamento da rede elétrica devido ao curto circuito gerado pelo defeito. Após a análise da condição de falha dos isoladores utilizados em sistemas de energia elétrica, foi definido que seria utilizada a propriedade termocrômica no isolador a ser desenvolvido, ou seja, a falha, devido ao efeito joule, aqueceria o material e isso deveria fazer com ele alterasse a sua cor, indicando que está com problema. Com isso, foi realizada a modelagem térmica do isolador, através de ensaios em corpo de prova, simulações computacionais e foi proposta uma metodologia alternativa para a modelagem térmica que contemplasse o período transitório térmico. Durante a modelagem foi encontrado o valor do coeficiente de transferência de calor da superfície do isolador desenvolvido ( $21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Após a modelagem, foi confeccionado um isolador com pigmento termocrômico. A temperatura de mudança de cor deveria estar acima da temperatura ambiente, para caracterizar uma falha, assim foi aplicada a temperatura de ativação de  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ , e verificou-se através de ensaios que, sob uma condição de falha interna, o isolador não mudaria de cor na sua superfície e, por se tratar de um material opaco, não seria possível identificar essa condição, contudo, para resolver esse problema, foi proposta a inserção de uma pastilha de óxido de zinco no seu interior, o que gerou bons resultados e tornou viável tecnicamente a utilização da propriedade termocrômica no isolador polimérico inteligente.

**Palavras-chave:** Isoladores poliméricos, materiais inteligentes, termocrômico, modelagem térmica.

## ABSTRACT

This work is based on the development of a intelligent polymeric electrical insulator. Intelligent materials are those that have the ability to change some physical property in a controlled manner. In the case of the developed insulator property to be modified is the color. The main objective is that it indicates, by changing its color when it is in fault condition, thereby facilitating system maintenance because one of the major problem of polymeric insulators is identifying its degradation or failure before they cause the shutdown of the power grid due to the short circuit generated. After the analysis of insulators under fault condition used in electrical power systems, it was decided that it would be used the thermochromic property of the insulator to be developed, due to the Joule effect of the failure to heat the material, the heat would change its color, indicating its failure. Thus it was carried out a thermal modeling of the insulator, through testing specimen, computer simulations and was proposed an alternative methodology for thermal modeling contemplating the thermal transitional period. During the modeling has been found the value of heat transfer coefficient of the surface of the insulator ( $21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). After, it was made an insulator with a thermochromic pigment. The color change temperature should be above of room temperature to characterize a failure, so it was applied at  $47 \text{ }^\circ\text{C}$  activation temperature, and it was found by tests that, on an internal fault condition, the insulator not change color in his surface, due it is an opaque material, it would not be possible to identify this fault condition, however, to solve this problem, it was proposed the inclusion of zinc oxide inside, which generated good results and made it technically feasible to use thermochromic property in intelligent polymeric insulator.

**Keywords:** Polymeric insulators, intelligent materials, thermochromic, thermal modeling.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ISOLADOR TIPO ROLDANA. ....	5
FIGURA 2: ISOLADOR TIPO DISCO. ....	5
FIGURA 3: ISOLADOR TIPO PILAR. ....	6
FIGURA 4: ISOLADOR POLIMÉRICO TIPO PINO. ....	6
FIGURA 5: MATERIAIS CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES. ....	7
FIGURA 6: POLARIZAÇÃO ELETRÔNICA. ....	8
FIGURA 7: POLARIZAÇÃO IÔNICA. ....	9
FIGURA 8: MOLÉCULA DE CO <sub>2</sub> COM DIPOLO NULO. ....	9
FIGURA 9. MOLÉCULA COM DIPOLO PERMANENTE. ....	10
FIGURA 10: POLARIZAÇÃO MOLECULAR. ....	10
FIGURA 11: ALINHAMENTO DOS DIPOLOS ELÉTRICOS COM UM CAMPO ELÉTRICO EXTERNO. .	12
FIGURA 12: DIELETRICO ENTRE DUAS PLACAS CONDUTORAS. ....	15
FIGURA 13: ILUSTRAÇÃO DE ISOLADOR EM CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO. ....	20
FIGURA 14: ILUSTRAÇÃO DE ISOLADOR COM DEFEITO. ....	21
FIGURA 15: SÓLIDO ENTRE DUAS PLACAS COM TEMPERATURAS IGUAIS. ....	22
FIGURA 16: CORPO SUBMETIDO A UMA TEMPERATURA MAIOR EM UM DOS LADOS (PERFIL DE TEMPERATURAS PARA T=0 S). ....	22
FIGURA 17: ILUSTRAÇÃO DO PERÍODO TRANSITÓRIO DA TRANSFERÊNCIA DE TEMPERATURA. .....	24
FIGURA 18: ANALOGIA TÉRMICA – ELÉTRICA. ....	27
FIGURA 19: ANALOGIA TÉRMICA – ELÉTRICA PARA DIVERSOS MATERIAIS. ....	28
FIGURA 20: ANALOGIA TÉRMICA-ELÉTRICA COM INSERÇÃO DE CAPACITORES. ....	31
FIGURA 21: RADIOGRAFIA DIGITAL OBTIDA COM O SISTEMA RDP. ....	35
FIGURA 22: SENSORES DE CORRENTE DE FALHA. ....	36
FIGURA 23: EVOLUÇÃO DE FALHA EM ISOLADOR POLIMÉRICO TIPO PINO. ....	37
FIGURA 24: DEFEITO EM ISOLADOR DA CELPE. ....	38
FIGURA 25: SISTEMA EDL. ....	39
FIGURA 26: DETALHE DO FIXADOR DO ISOLADOR NO SISTEMA EDL. ....	39
FIGURA 27: ENERGIA DISSIPADA NO TRILHAMENTO ELÉTRICO EM MATERIAL POLIMÉRICO. ...	41
FIGURA 28: ISOLADOR POLIMÉRICO TIPO PINO. ....	47
FIGURA 29: CORPO DE PROVA COM MATERIAL TERMOCRÔMICO. ....	48
FIGURA 30: PONTE DE WHEATSTONE. ....	51
FIGURA 31: CIRCUITO DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO PT-100. ....	53
FIGURA 32: ENSAIO TÉRMICO EM CORPO DE PROVA. ....	54
FIGURA 33: CORPO DE PROVA INSERIDO NO SOFTWARE COMSOL. ....	55
FIGURA 34: INTERFACE DO SOFTWARE COMSOL. ....	56
FIGURA 35: PERFIL DE TEMPERATURAS DO CORPO DE PROVA. ....	57
FIGURA 36: VALORES DE TEMPERATURAS DO CORPO DE PROVA. ....	57
FIGURA 37: SÓLIDO FORMADO NO CILINDRO. ....	59
FIGURA 38: ANALOGIA TÉRMICA-ELÉTRICA. ....	61
FIGURA 39: ANALOGIA TÉRMICA-ELÉTRICA COM CIRCUITO RC. ....	61
FIGURA 40: CIRCUITO ELÉTRICO ANÁLOGO AO TÉRMICO DA FIGURA 39. ....	64
FIGURA 41: CIRCUITO ELÉTRICO ANÁLOGO INSERIDO NO SOFTWARE ATP. ....	65
FIGURA 42: TENSÃO NO RESISTOR R <sub>DISS</sub> (ANÁLOGO À SUPERFÍCIE DO CILINDRO). ....	66
FIGURA 43: GEOMETRIA DO ISOLADOR INSERIDA NO SOFTWARE COMSOL. ....	67
FIGURA 44: ISOLADOR COM FONTE DE CALOR NO CENTRO. ....	67
FIGURA 45: ISOLADOR COM FONTE DE CALOR NO CENTRO (VISTA DE CORTE). ....	68
FIGURA 46: SIMULAÇÃO EM ISOLADOR COM FONTE AO CENTRO. ....	68

FIGURA 47: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO ISOLADOR. CADA CURVA REPRESENTA UM PERÍODO DE 500 s. ....	69
FIGURA 48: ENSAIO TÉRMICO APÓS 90 MINUTOS COM 110 °C NO CENTRO.....	70
FIGURA 49: ISOLADOR COM PINO. ....	71
FIGURA 50: ENSAIO TÉRMICO EM PINO POLIMÉRICO. ....	72
FIGURA 51: ENSAIO TÉRMICO EM PINO METÁLICO. ....	72
FIGURA 52: MATERIAL INSERIDO ENTRE O ISOLADOR E O PINO (EM VERMELHO).....	73
FIGURA 53: DISTANCIA DO MATERIAL ATÉ A SUPERFÍCIE DO SOLADOR. ....	73
FIGURA 54: PERFIL DE TEMPERATURAS NO ISOLADOR COM MATERIAL EM SEU INTERIOR. ....	74
FIGURA 55: VALORES DE TEMPERATURAS NO ISOLADOR COM MATERIAL EM SEU INTERIOR. AS CURVAS REPRESENTAM A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA A CADA 500 SEGUNDOS. ....	74
FIGURA 56: ENSAIO TÉRMICO EM ISOLADOR INTELIGENTE (À ESQUERDA APÓS 13 MINUTOS E À DIREITA APÓS 19 MINUTOS).....	75
FIGURA 57: PASTILHAS DE ÓXIDO DE ZINCO UTILIZADAS EM PÁRA-RAIOS. ....	76
FIGURA 58: PASTILHAS DE ÓXIDO DE ZINCO USINADA PARA ENCAIXE NO INTERIOR DO ISOLADOR POLIMÉRICO TERMOCRÔMICO. ....	77
FIGURA 59: GRÁFICO DE CORRENTE X TENSÃO OBTIDOS NO ENSAIO.....	78
FIGURA 60: PASTILHAS DE ÓXIDO DE ZINCO INSERIDA NO INTERIOR DO ISOLADOR POLIMÉRICO. ....	79
FIGURA 61: ARRANJO DE ENSAIO EM ISOLADOR COM PASTILHA INTERNA. ....	80
FIGURA 62: FOTOGRAFIA DO TERMÔMETRO TERMOVISOR COM SUPERFÍCIE DO ISOLADOR A 46,6 °C. ....	80
FIGURA 63: IMAGEM DO ISOLADOR COM SUPERFÍCIE A 46,6 °C. ....	81
FIGURA 64: TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO ISOLADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	82
FIGURA 65: TEMPO PARA MUDANÇA DE COR, PARA CADA VALOR DE CORRENTE DE DEFEITO. ....	83
FIGURA 66: TEMPO PARA RETORNO DE COR, PARA CADA VALOR DE CORRENTE DE DEFEITO. ....	84

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: GRANDEZAS FÍSICAS DO HDPE.....	56
TABELA 2: GRANDEZAS DO HDPE UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO. ....	58
TABELA 3: RAIOS UTILIZADOS PARA MODELAGEM TÉRMICA COM ANALOGIA ELÉTRICA.....	64
TABELA 4: RESISTORES E CAPACITORES CALCULADOS NA MODELAGEM TÉRMICA COM ANALOGIA ELÉTRICA. ....	65
TABELA 5: VALORES DE CORRENTE E TENSÃO OBTIDOS NO ENSAIO.....	78
TABELA 6: VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS OBTIDAS DURANTE ENSAIO. ....	81
TABELA 7: TEMPO PARA MUDANÇA DE COR PARA CADA VALOR DE CORRENTE DE DEFEITO. .	82
TABELA 8: TEMPO PARA RETORNO DE COR, PARA CADA VALOR DE CORRENTE DE DEFEITO..	83

## LISTA DE ABREVIações

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	-	Alternative Transient Program
CELPE	-	Companhia Energética de Pernambuco
COSERN	-	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
EDL	-	Experimental delivery line
DC	-	Direct current
DEC	-	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EPDM	-	Ethylene propylene diene monomer
FEC	-	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
HDPE	-	High density polyethylene
MEF	-	Método dos elementos finitos
QEE	-	Qualidade da Energia Elétrica
RC	-	Circuito resistor-capacitor
RDP	-	Radiografia digital portátil
ROI	-	Region of Interest
UV	-	Radiação ultra violeta

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	3
1.1.1 Objetivo Geral .....	3
1.1.2 Objetivos Específicos .....	3
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 ISOLADORES.....	5
2.1.1 Isoladores Poliméricos .....	17
2.1.2 Defeitos e degradação de isoladores poliméricos .....	18
2.1.3 Mecanismos de falha.....	19
2.2 PROPAGAÇÃO DE TEMPERATURA.....	21
2.2.1 Condição Transitória da transferência de energia.....	24
2.2.2 Analogia térmica-elétrica .....	26
2.3 MATERIAIS INTELIGENTES .....	32
2.4 ESTADO DA ARTE .....	34
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 DETERMINAÇÃO DO PRINCÍPIO CRÔMICO A SER UTILIZADO .....	43
3.2 CONFECÇÃO DO ISOLADOR INTELIGENTE .....	45
3.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO .....	47
3.3.1 Ensaio em corpo de prova.....	47
3.3.2 Desenvolvimento do controle de temperatura da fonte .....	49
3.3.3 Modelagem e simulação computacional.....	55
3.3.4 Modelagem térmica – Método da analogia elétrica .....	58
3.3.5 Simulação Computacional do isolador .....	66
3.3.6 Ensaio térmico em isolador .....	69
3.4 Estudo de alternativas para aplicação termocrômica .....	70
3.5 Confecção da pastilha interna .....	76
4 CONCLUSÕES .....	85
5 TRABALHOS FUTUROS .....	87
REFERÊNCIAS .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

A reestruturação do setor elétrico brasileiro que ocorreu nas últimas décadas proporcionou o surgimento de diversas mudanças no setor. Muitas delas aconteceram devido à livre concorrência instalada entre as empresas que geram, transmitem e distribuem a energia elétrica. A competição entre as empresas, aliada às exigências mais rígidas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fizeram crescer a importância dada à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), com isso, alguns indicadores de QEE foram criados, entre eles pode-se destacar o DEC - Duração Equivalente de Continuidade, que indica quantas horas em média por ano o consumidor brasileiro fica sem energia elétrica, e o FEC - Frequência Equivalente de Continuidade, que indica a quantidade de interrupções por ano ocorridas [1].

Neste contexto muitas empresas investiram na melhoria desses indicadores, ou seja, investiram no aumento da confiabilidade do sistema. Com relação ao DEC, que indica o tempo de interrupção, muitos estudos foram realizados principalmente na área de recomposição de sistemas, porém, seria mais vantajoso que a recomposição não precisasse ocorrer, ou seja, que o sistema não fosse interrompido ou que somente ocorresse interrupções planejadas, para a manutenção.

Com o objetivo de diminuir as interrupções não programadas, que são causadas principalmente por falhas no sistema e, com isso, melhorar o indicador FEC, o conceito de manutenção preditiva obteve grande destaque entre as concessionárias de energia, que são as empresas que possuem o direito de atuar no sistema elétrico brasileiro. Esse conceito, basicamente, consiste no monitoramento de máquinas e equipamentos de forma a obter dados que demonstrem que o mesmo está prestes a apresentar falha ou mau funcionamento. Com isso, é possível maximizar o tempo de utilização de máquinas e equipamentos diminuindo consideravelmente o risco de que os mesmos falhem durante a sua operação [2].

Um dos principais causadores de interrupção da rede elétrica, devido à sua falha, é o isolador elétrico. Isoladores servem para separar de forma segura partes com elevado potencial elétrico, tal como linhas energizadas, de partes com potencial inferior, como, por exemplo, postes e torres de transmissão. São constituídos de materiais dielétricos como vidro, porcelana e polímeros. Materiais dielétricos são

aqueles que tem características de isolantes elétricos, mas quando o campo elétrico está acima de um limite, o mesmo passa a conduzir corrente e, quando isso ocorre, diz-se que a rigidez dielétrica do material foi ultrapassada. Quando há a ocorrência de falha no isolador, ou seja, o rompimento do dielétrico, surge um curto circuito na rede, o que gera, na grande maioria dos casos, interrupção do fornecimento de energia elétrica na região onde ocorreu o curto circuito (isolador falhado), pois proteções instaladas na rede atuam de forma a proteger o sistema como um todo, porém, em alguns casos a falha pode não sensibilizar o sistema de proteção e o isolador com defeito fica instalado por longo período no sistema gerando perdas elétricas e riscos de acidentes.

Entre os tipos de isoladores existentes atualmente, aqueles constituídos de materiais poliméricos merecem especial atenção, pois vêm substituindo gradativamente os demais, que são de vidro ou porcelana, devido ao fato de apresentarem diversas vantagens, tais como menor custo de fabricação, peso inferior, facilidade de transporte, maior resistência ao vandalismo, entre outros. A principal desvantagem, porém, dos isoladores poliméricos, é a dificuldade de se obter indícios da deterioração deste equipamento ao longo da sua vida útil, sendo mais facilmente encontrados quando o isolador já está na iminência de apresentar falha, dificultando, portanto, a detecção e planejamento da substituição do mesmo [3]. Os testes mais comumente realizados em isoladores de porcelana são: medições acústicas, campo elétrico, emissão de luz e térmicos, porém, estes testes não são eficientes no diagnóstico da deterioração de isoladores poliméricos [4].

Com isso, formas de se obter indícios de que tais isoladores estão se deteriorando, com detecção do fenômeno em um tempo hábil para a substituição do isolador, são extremamente importantes, visto que os isoladores são equipamentos essenciais para o sistema elétrico.

A proposta deste projeto é desenvolver um “isolador inteligente” com a capacidade de mudar de cor quando o mesmo está em condição de deterioração, com isso, seria possível a detecção e a substituição de isoladores deteriorados instalados em campo, somente com uma inspeção visual, sem a necessidade de equipamentos de teste ou medição.

## **1.1 OBJETIVOS**

Os objetivos a serem alcançados para o desenvolvimento do presente trabalho estão descritos a seguir.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um isolador polimérico "inteligente" do tipo pino que indique que está com defeito através da alteração da sua cor.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Confirmar o princípio crômico a ser utilizado no isolador;
- Realizar simulações computacionais para a análise do isolador a ser desenvolvido;
- Confeccionar amostras de isoladores e corpos de prova para ensaios e validação das simulações computacionais;
- Realizar ensaios para constatação do correto funcionamento da mudança de cor.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Os isoladores poliméricos vêm sendo utilizados desde a década de 80 e estão substituindo gradativamente os isoladores de vidro e de porcelana, pois apresentam muitas vantagens técnicas e econômicas. Apesar de ser um equipamento relativamente simples, a natureza da sua aplicação reflete o seu impacto no sistema, pois, como a sua finalidade é isolar partes com diferença de potencial elétrico, no caso de falha há a ocorrência de um curto circuito na rede, o que gera a atuação do sistema de proteção e, conseqüentemente, tem-se a interrupção do fornecimento de energia elétrica na região onde ocorreu o problema. Com isso, os índices de QEE, tais como o DEC e FEC, são impactados negativamente e, caso a falha não sensibilize o sistema de proteção, há o surgimento de perdas elétricas e riscos de acidentes.

Para melhorar a QEE, uma possível ação seria detectar quando o isolador está prestes a falhar, para que fosse possível a sua substituição programada. Assim, desligamentos não programados poderiam ser evitados. Porém, não há uma metodologia eficiente para realizar essa análise, ou seja, uma análise da deterioração do isolador polimérico antes da ocorrência da falha. Os métodos existentes para detecção de falha foram desenvolvidos para os isoladores de porcelana ou vidro e, devido à natureza dos materiais, não são eficientemente aplicáveis aos isoladores poliméricos. A execução do presente trabalho visa, portanto, suprir, em parte, essa carência através do desenvolvimento de um “isolador inteligente”, que muda a sua coloração quando está em fase de deterioração, sinalizando de forma simples para os operadores do sistema a necessidade de troca do mesmo.

Esta solução forneceria um avanço para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico em geral e proporcionaria um método simples de avaliação, pois não seriam necessários equipamentos para a detecção, uma vez em que isto seria feito visualmente, através da sinalização por cores. A utilização de materiais crômicos em sistemas de distribuição de energia é inédito pois não há registros na literatura.

### **1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

O presente documento está estruturado da seguinte forma: no primeiro capítulo está contida a introdução e também os objetivos, geral e específicos. No capítulo dois, é apresentada a revisão bibliográfica com foco em isoladores de sistemas de energia elétrica, materiais inteligentes e teorias sobre o transporte de energia térmica, também é apresentado nesse capítulo o estado da arte referente aos métodos utilizados para a detecção de falhas em isoladores poliméricos. No capítulo três são apresentados os métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, bem como os resultados obtidos. No quarto capítulo são apresentadas as conclusões e no quinto capítulo as sugestões de trabalhos futuros. Após o capítulo cinco estão contidas as referências bibliográficas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os temas relacionados ao presente trabalho se referem, principalmente, aos isoladores utilizados no sistema elétrico e aos materiais inteligentes. Esses temas serão abordados a seguir e, ao final do capítulo, será apresentado o estado da arte com foco nas metodologias de detecção de falhas em isoladores.

### 2.1 ISOLADORES

Os isoladores utilizados em sistemas de energia elétrica são elementos sólidos capazes de suportar esforços mecânicos solicitados pelos condutores elétricos e, também, exercer a função de isolar os condutores submetidos à uma diferença de potencial em relação à terra ou à outro condutor [5].

Existem diversos tipos de isoladores e os mesmos são denominados conforme sua forma ou função. Exemplos: isoladores tipo roldana, disco, pilar, pino etc. Nas Figuras 1, 2, 3 e 4 são ilustrados os exemplos citados.



Figura 1: isolador tipo roldana.

Fonte: Mamede, 2004.



Figura 2: isolador tipo disco.

Fonte: Fonte: Mamede, 2004.



Figura 3: isolador tipo pilar.

Fonte: Fonte: Mamede, 2004.



Figura 4: isolador polimérico tipo pino.

Fonte: Fonte: Mamede, 2004.

A função isolante desses equipamentos tem por objetivo, sob outro ponto de vista, evitar que correntes elétricas circulem entre as partes isoladas, contudo, há alguns fenômenos que fazem surgir pequenas correntes em condições normais de operação que são desprezíveis na prática, mas que serão abordados a seguir.

Os isoladores são na verdade constituídos de materiais dielétricos, os quais possuem uma quantidade muito pequena de elétrons na banda de condução pois a banda de valência é preenchida e a quantidade de energia necessária para a passagem dos elétrons para a banda de condução é relativamente grande, entre 4 eV e 8 eV. Isso se deve ao fato de existir um “gap de energia” entre as duas bandas, conforme ilustrado na Figura 5. Como consequência há uma corrente de condução extremamente baixa no material [6].

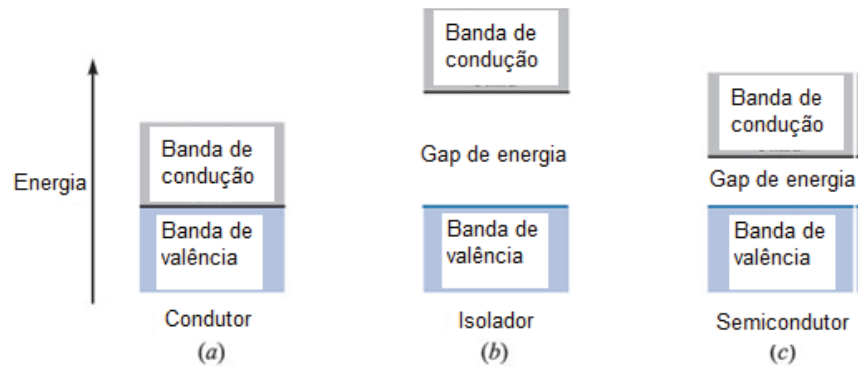


Figura 5: materiais condutores, isolantes e semicondutores.

Fonte: Hayt, 2003.

Há também uma corrente de polarização nos materiais dielétricos. Essa corrente possui a característica de armazenar energia elétrica (efeito capacitivo) através do deslocamento relativo das cargas positivas e negativas do material contra as forças normais atômicas e moleculares, cujo fenômeno é denominado polarização [7]. Em outras palavras, as cargas elétricas do material tentam se alinhar ao campo elétrico externo, provocando um deslocamento relativo e, quando o campo externo é cessado, as cargas tendem a voltar para a sua posição inicial. Existem diversos mecanismos de polarização através do deslocamento de cargas em materiais dielétricos, tal como a polarização eletrônica, na qual um campo elétrico externo provoca uma deformação ou translação na distribuição simétrica da nuvem de elétrons ou moléculas, o que provoca o surgimento de um dipolo elétrico, constituído de um par de carga positiva e negativa separadas por uma distância “ $d$ ” [4]. Quando o campo elétrico é cessado, as cargas retornam para suas posições iniciais, conforme ilustrado na Figura 6. A grandeza que fornece o grau de polarização é o vetor de polarização, definido como:

$$\vec{p} = Q\vec{d} \quad [\text{C.m}] \quad (1)$$

Onde  $\vec{p}$  é o vetor dipolo,  $Q$  é o valor da carga positiva do par de cargas e  $\vec{d}$  é a distância entre elas.

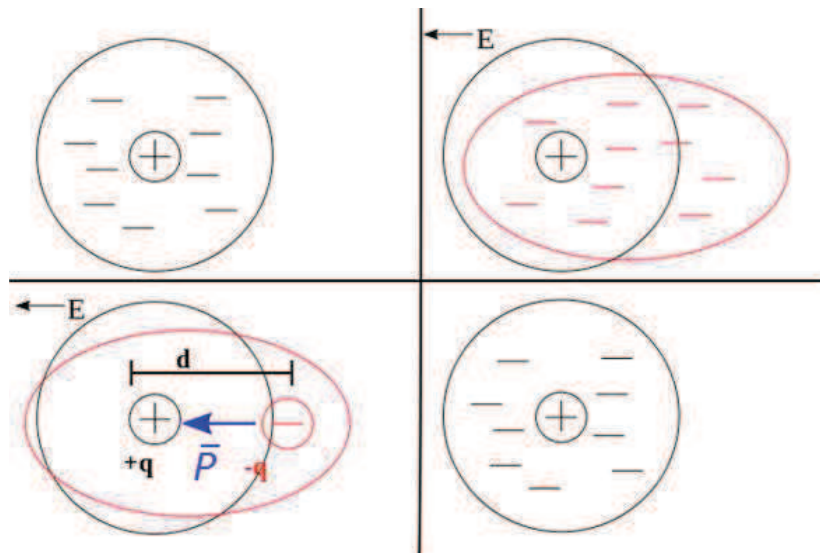


Figura 6: polarização eletrônica.

Fonte: Kao, 2004.

Outro mecanismo de polarização é a atômica, também chamada de polarização iônica. Um exemplo simples do fenômeno consiste na ligação iônica entre dois átomos A e B. O átomo B, apesar de ser eletricamente neutro, necessita de um elétron para completar sua camada de valência e o átomo A cede esse elétron, surgindo a ligação. Com isso, os átomos ficam com cargas positiva, no átomo A, e negativa, no átomo B, devido à transferência do elétron. Sem a presença de um campo elétrico externo, a distribuição dos átomos é a mostrada na Figura 7a, na qual percebe-se que a distância entre eles é, em média, constante, considerando um alinhamento na direção “x”. Contudo, após a aplicação de um campo elétrico externo, ocorre o fenômeno da polarização eletrônica, conforme explicado anteriormente e, com isso, há o deslocamento da nuvem de elétrons, formando dipolos, ilustrados na Figura 7b. Após a polarização eletrônica, as partes positivas e negativas dos dipolos se atraem, alterando a distância entre os átomos, que se tornam maiores ou menores que a distância “a”, dependendo da posição no eixo x, conforme ilustrado na Figura 7c.

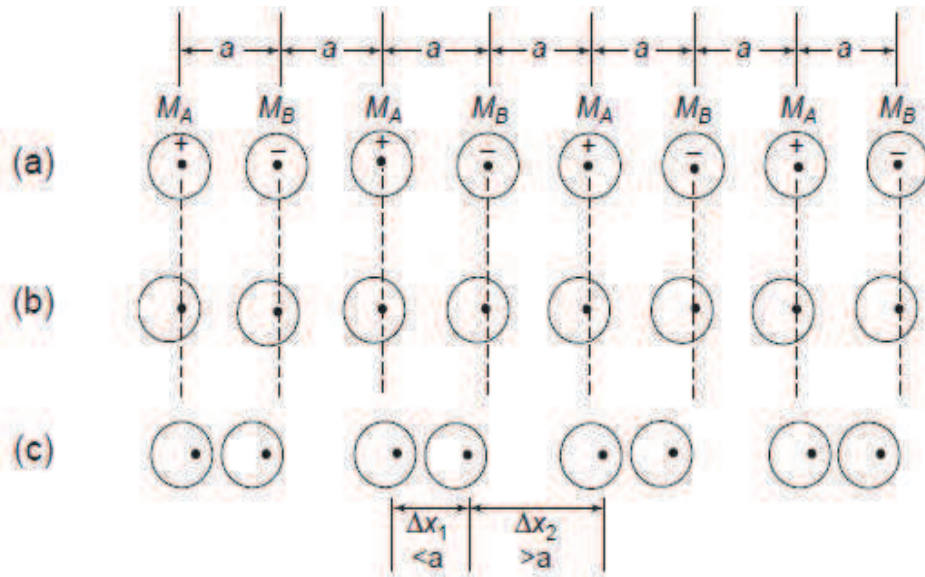


Figura 7: polarização iônica.

Fonte: Kao, 2004.

Um exemplo de estrutura que possui esse comportamento é o NaCl. É importante ressaltar que, sem a aplicação de um campo elétrico externo, cada molécula possui um momento de dipolo, contudo, a soma vetorial de todos os dipolos em todas as direções do material resulta em um dipolo nulo.

Existe também a polarização molecular, que ocorre em moléculas que possuem momento de dipolo permanente [4]. Algumas moléculas formadas por ligações do tipo  $A_2B$  ou  $AB_2$ , como por exemplo o  $CO_2$ , possuem estrutura de ligação simétricas, com centros de cargas coincidentes e com o íon e ânion formando  $180^\circ$ . Devido à essas características, o momento de dipolo resultante de cada molécula será nulo, portanto, nesse caso, a molécula não possuirá dipolo permanente, Figura 8.

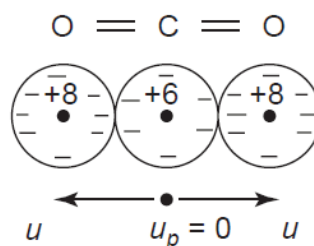


Figura 8: molécula de  $CO_2$  com dipolo nulo.

Fonte: Kao, 2004.

Caso seja aplicado um campo elétrico no material com moléculas que possuem momento de dipolo nulo, não haverá alinhamento das mesmas com o campo, pois as forças de atração e repulsão das cargas se anularão e o fenômeno da polarização não ocorrerá. Materiais com essas características são chamados de apolares.

Contudo, em alguns tipos de moléculas  $A_2B$  ou  $AB_2$ , tal como  $H_2O$ , a estrutura de ligação possuirá um ângulo diferente de  $180^\circ$ , assim, os centros de cargas negativa e positiva não serão coincidentes, surgindo, portanto, um dipolo permanente não nulo na molécula [4], conforme visto na Figura 9.

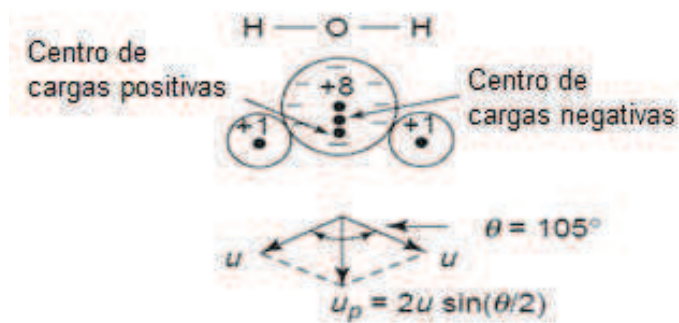


Figura 9. Molécula com dipolo permanente.

Fonte: Kao, 2004.

Materiais com essas características são chamados de dipolares ou polares. A consequência da existência do dipolo permanente nas moléculas é que, se for aplicado um campo elétrico externo, as mesmas tenderão a se alinhar ao campo, ou seja, a orientação de cada momento de dipolo tenderá a se alinhar, conforme Figura 10. Esse fenômeno é denominado de polarização molecular.

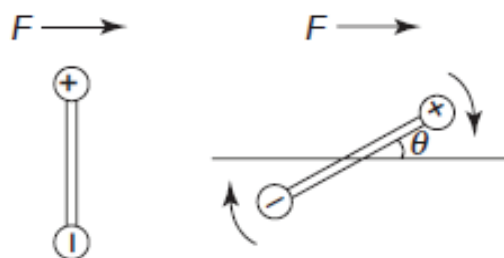


Figura 10: polarização molecular.

Fonte: Kao, 2004.

Evidentemente, a polarização molecular necessita de energia para vencer a resistência da estrutura molecular do material, ou seja, cada molécula, para se alinhar ao campo, precisa vencer a resistência das moléculas vizinhas. Portanto, a polarização molecular é altamente dependente da temperatura do material. A polarização molecular e a temperatura são inversamente proporcionais.

Esses mecanismos de polarização, eletrônica, atômica e molecular, são os principais responsáveis pela polarização resultante nos materiais dielétricos quando expostos a campos elétricos moderados (mais fracos que os campos do nível atômico) [4].

É importante ressaltar que os materiais são eletricamente neutros, portanto, possuem pares de cargas positivas e negativas que na soma total se anulam. Como visto, cada átomo ou molécula pode possuir um momento de dipolo, porém, se o alinhamento deles for aleatório no material, o momento total de dipolo será nulo, mas, se houver um campo elétrico externo, o alinhamento pode possuir uma resultante diferente de zero devido ao alinhamento dos dipolos. A grandeza que nos fornece o quanto essas cargas estão alinhadas no material é chamada de momento de dipolo elétrico total.

Se existem  $n$  dipolos por unidade de volume em um material e se supõe-se um volume  $\Delta v$ , então há  $n \cdot \Delta v$  dipolos e o dipolo total será a soma vetorial descrita na equação 2:

$$\vec{p}_{total} = \sum_{i=1}^{n\Delta v} \vec{P}_i \quad (2)$$

Para obter a polarização por unidade de volume, tem-se que:

$$\vec{p} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{n\Delta v} \vec{P}_i \quad [\text{C/m}^2] \quad (3)$$

A polarização de um material causa o deslocamento de cargas. A quantidade de cargas deslocadas em um material isotrópico, pode ser calculada considerando um elemento incremental de superfície  $\Delta \vec{S}$  dentro do material dielétrico. Se for aplicado um campo elétrico  $\vec{E}$  formando um ângulo  $\Theta$  com  $\Delta \vec{S}$ , o mesmo produzirá um momento de dipolo  $\vec{p}$ . A forma com a qual as cargas se movimentam através da superfície é demonstrada na Figura 11.

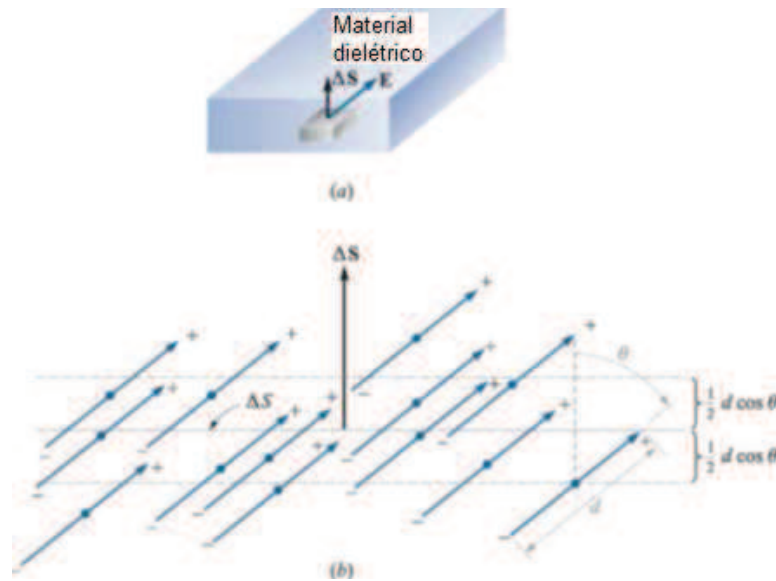


Figura 11: alinhamento dos dipolos elétricos com um campo elétrico externo.

Fonte: Hayt, 2003.

Verifica-se ao analisar a Figura 11b que quando os pares de cargas, ou seja, os dipolos, se alinham com o campo elétrico, as cargas positivas que se encontram abaixo da superfície imaginária  $\Delta\vec{S}$  somente atravessam a superfície para cima, se o centro do dipolo estiver na região entre a superfície e  $\frac{1}{2} d \cdot \cos(\theta)$ . Durante esse processo, o mesmo ocorre para as cargas negativas, porém, de cima para baixo [7]. Portanto, a quantidade líquida de cargas que atravessam  $\Delta\vec{S}$  depende de quantos dipolos (ou moléculas) existem nessa região. Assim, se existem  $n$  moléculas por metro cúbico, a quantidade de cargas  $Q_b$  que atravessam a superfície devido ao dipolo é dada pela equação 4:

$$\Delta Q_b = n \cdot Q \cdot d \cdot \cos \theta \cdot \Delta S \quad (4)$$

que também pode ser escrita na forma:

$$\Delta Q_b = n \cdot Q \cdot \vec{d} \cdot \Delta\vec{S} \quad (5)$$

Em termos do momento de dipolo:

$$\Delta Q_b = \vec{P} \cdot \Delta\vec{S} \quad (6)$$

Como  $\Delta\vec{S}$  é um dos elementos de uma superfície fechada, a direção é para fora da superfície, e o aumento das cargas dentro da superfície pode ser escrita como:

$$Q_b = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (7)$$

Aplicando a lei de Gauss para a carga total “ $Q_t$ ”, ou seja, a carga total livre “ $Q$ ” mais a carga ligada total dos dipolos “ $Q_b$ ”, pode-se escrever em termos do campo elétrico a equação 8.

$$Q_t = \oint_S \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

Onde

$$Q_t = Q_b + Q \quad (9)$$

Ou seja, o total de cargas livres pode ser escrita como  $Q = Q_t - Q_b$ , assim, substituindo-se as equações 7 e 8 na equação 9, tem-se:

$$Q = \oint_S (\epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} \quad (10)$$

Escrevendo a lei de Gauss em termos da densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  para as cargas livres, encontra-se:

$$Q = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (11)$$

Comparando as equações 10 e 11, obtém-se a forma mais genérica de  $\vec{D}$  gerado pelas cargas livres:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (12)$$

Assim, observa-se a presença de mais um termo quando existe a presença de um material polarizável.

É conveniente escrever o momento de dipolo  $\vec{P}$  em termos do campo elétrico  $\vec{E}$ . Considerando um material isotrópico essa relação é linear, contudo, obviamente depende do tipo de material. Assim define-se a relação:

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (13)$$

Onde  $\chi_e$  é uma grandeza adimensional e é denominada de susceptibilidade elétrica do material. Assim, substituindo a equação 13 na equação 12:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \chi_e \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (14)$$

ou

$$\vec{D} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (15)$$

Definindo que:

$$\epsilon_r = (1 + \chi_e) \quad (16)$$

Onde  $\epsilon_r$  é a permissividade elétrica relativa do material ou constante dielétrica, adimensional. Assim, é possível reescrever a equação 15:

$$\vec{D} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (17)$$

ou

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (18)$$

Onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do material, adimensional. Com isso, é possível relacionar o campo elétrico com a densidade de fluxo elétrico em materiais dielétricos.

Os materiais dielétricos, como descrito anteriormente, exercem a função de isolar partes com diferença de potencial elétrico e, por isso, é utilizado em sistemas elétricos. Uma aplicação prática para as equações descritas anteriormente seria o

cálculo da capacitância. Sejam duas placas condutoras envolvidas por um material dielétrico, conforme Figura 12.

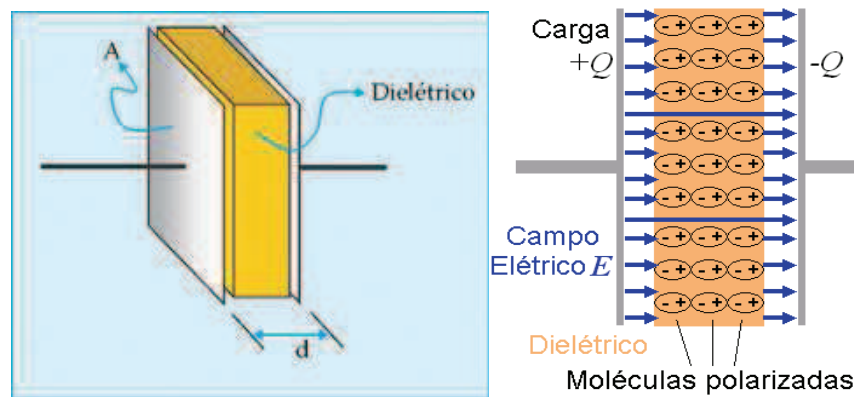


Figura 12: dielétrico entre duas placas condutoras.

Fonte: Kao, 2004.

Ao aplicar uma diferença de potencial nas placas, uma quantidade de cargas +Q e -Q é acumulada nas mesmas, carga positiva de um lado e negativa do outro lado. O acúmulo se deve ao fato das mesmas, idealmente, não conseguirem atravessar o espaço entre elas, preenchido pelo material dielétrico (sabe-se que na realidade uma parte muito pequena de cargas consegue atravessar).

A capacitância é definida como a razão entre as cargas acumuladas em uma das placas e a diferença de potencial aplicada entre elas [7], ou seja:

$$C = \frac{Q}{V} \quad [\text{F}] \quad (19)$$

A diferença de potencial é definida como sendo:

$$V = - \int_{\text{inicial}}^{\text{final}} \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad [\text{V}] \quad (20)$$

Para o exemplo das placas, desprezando o efeito das bordas, o campo elétrico no seu interior é constante e é causado pelas linhas de campo que saem das cargas positivas e entram nas cargas negativas, conforme visto na Figura 12. O campo elétrico é paralelo à distância  $d$  entre elas. O sinal negativo se deve ao

sentido percorrido para a integração, podendo nesse caso ser convenientemente invertido. Portanto, para o exemplo proposto, pode-se reescrever a equação:

$$V = E \cdot L \text{ [V]} \quad (21)$$

Substituindo a equação 21 na equação 19 tem-se que:

$$C = \frac{Q}{E \cdot L} \quad (22)$$

Como descrito anteriormente na equação 11, a lei de Gauss para as cargas livres é:

$$Q = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

Considerando o efeito do dielétrico, ou seja, dos momentos de dipolos, substitui-se a equação 17 na equação da lei de Gauss:

$$Q = \oint_S \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (23)$$

A integral de superfície nos fornece valores nulos para as superfícies perpendiculares ao campo (vetor normal à superfície) devido ao produto escalar e na superfície externa da placa o campo é nulo, com isso resta somente a área  $A$ , cuja direção é paralela ao campo elétrico, com isso, considerando o campo constante:

$$Q = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot \vec{S} \quad (24)$$

Substituindo a equação 24 na equação 22 tem-se que:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{L} \quad (25)$$

Percebe-se que quando utiliza-se materiais dielétricos entre as placas, ao invés do vácuo, a capacitância pode aumentar por um fator  $\epsilon_r$ .

Isso ocorre porque o campo elétrico gerado pelas cargas das placas polariza as moléculas no interior do material dielétrico. O alinhamento dos dipolos gera um

campo oposto (próprio do dipolo), diminuindo o campo resultante. Assim, a tensão  $V$  diminui, aumentando a capacitância  $C$ , pois essas grandezas são inversamente proporcionais.

Se não existisse o dielétrico entre as placas do capacitor (existisse apenas o vácuo), a mesma dedução levaria a:

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{L} \quad (26)$$

Onde  $C_0$  é a capacitância no vácuo. Ao dividir a equação 25 pela equação 26, obtém-se:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (27)$$

Percebe-se que a permissividade relativa do dielétrico é a razão entre a capacitância com o dielétrico em relação à capacitância no vácuo. Como visto, a capacitância  $C$  é maior quando adiciona-se um material dielétrico, logo  $\epsilon_r$  é maior que 1. A maioria dos dielétricos sólidos e líquidos possuem valores de  $\epsilon_r$  entre 2 e 10 [6]. Em isoladores de polietileno de alta densidade o valor fica em torno de 2,3.

### 2.1.1 Isoladores Poliméricos

Os isoladores poliméricos são amplamente utilizados em sistemas elétricos da Europa, América do Norte e Austrália, devido ao fato de diminuírem os custos em projetos de linhas de transmissão e espera-se que seu uso aumente ainda mais nos próximos anos em outros países [8]. Esses isoladores são constituídos normalmente de borracha de silicone (SIR), resinas epóxi e a borracha de etileno propileno (EPDM) [8,9]. No Brasil, também é utilizado o polietileno de alta densidade (HDPE). Os isoladores poliméricos estão substituindo gradativamente os isoladores feitos de vidro e cerâmica, devido às diversas vantagens oferecidas pelos mesmos, entre elas podemos citar:

- Hidrofobicidade na presença de névoa e de chuva;
- Possui peso inferior aos outros tipos de isoladores proporcionando o aumento da capacidade de transmissão das torres, sem alterar suas dimensões;

- Boa resistência à contaminação;
- Facilidade de instalação;
- Baixo custo.

Contudo, os isoladores poliméricos também apresentam algumas desvantagens, as principais são [9]:

- Degradação por trilhamento elétrico e erosão, a qual pode ocasionar a falha;
- Dificuldade de avaliar o tempo de vida;
- Desconhecimento da confiabilidade em longo prazo;
- Dificuldade para a detecção de falhas.

Os tipos de falhas ocorridas em isoladores poliméricos podem ter várias causas, tais como defeito de manufatura, defeito mecânico, trilhamento elétrico e erosão, corona, ruptura, defeito de instalação e outros. As formas mais utilizadas para a avaliação preditiva de isoladores poliméricos são a inspeção visual, medições de corrente de fuga, descargas parciais e ultrassom [8,9].

Os testes de laboratório mais comuns são: intemperismo acelerado, que é utilizado principalmente para classificação de materiais e incluem câmaras de névoa salina, câmaras de névoa limpa, teste de trilhamento com plano inclinado e teste de trilhamento no carrossel.

### **2.1.2 Defeitos e degradação de isoladores poliméricos**

O conceito de degradação de materiais dielétricos envolve as mudanças irreversíveis e deletérias que ocorrem ao longo do tempo e que podem causar perda do desempenho requerido, afetando as propriedades elétricas, dielétricas e físico-químicas do material [10]. Devido aos estresses que os isoladores estão expostos nas situações reais de operação, tais como elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais, o envelhecimento pode ocorrer e suas consequências mais comuns são o surgimento de trilhamento elétrico, a erosão e as descargas parciais internas [11].

O trilhamento elétrico ocorre quando há deterioração superficial do material dielétrico do isolador. Há o surgimento de trilhas elétricas que são resultantes da

ação de descargas elétricas próximas ou na superfície do dielétrico, que podem causar, também, a erosão que é a perda da massa do material [12].

O polímero possui alta resistividade superficial, porém, a contaminação superficial, poluentes industriais, umidade, sal, entre outros fatores pode favorecer o surgimento de correntes que fluem entre pontos de diferentes potenciais pois diminuem a resistência superficial. Estas correntes causam evaporação não uniforme que formam bandas secas, o que causa um campo elétrico não homogêneo podendo ocorrer, com isso, descargas superficiais que carbonizam o material e facilitam o surgimento de trilhas elétricas. A carbonização acelera o processo de trilhamento, pois aumenta a não homogeneidade do potencial superficial, podendo causar erosão.

Estes fenômenos ocorrem principalmente nos pontos de amarração do isolador com o cabo. Outro fator que pode influenciar e acelerar o trilhamento e a erosão é a compatibilidade dielétrica, quando há a concentração de campo elétrico devido a diferentes isolantes empregados em conjunto no isolador [13, 14, 15].

A definição de descargas parciais pode ser entendida como descargas elétricas ocorridas no espaço, devido a um campo elétrico, no qual o caminho percorrido pela descarga não une dois eletrodos de forma completa. Em materiais dielétricos as descargas parciais são causadas por vazios existentes no interior do material sujeito a um campo elétrico [24]. A ocorrência contínua deste fenômeno altera as propriedades do material causando sua deterioração, podendo culminar na sua falha, ou seja, o rompimento completo do dielétrico [1, 5]. As descargas parciais são fenômenos que contribuem para a elevação da temperatura do isolador polimérico [16].

### **2.1.3 Mecanismos de falha**

O isolador de sistemas de energia possui a função elétrica de isolar os condutores com potencial elétrico elevado dos demais elementos do circuito, com o objetivo de evitar que a corrente elétrica, responsável pela realização de trabalho, seja desviada do seu destino final, conforme é mostrado de forma simplificada na Figura 13.

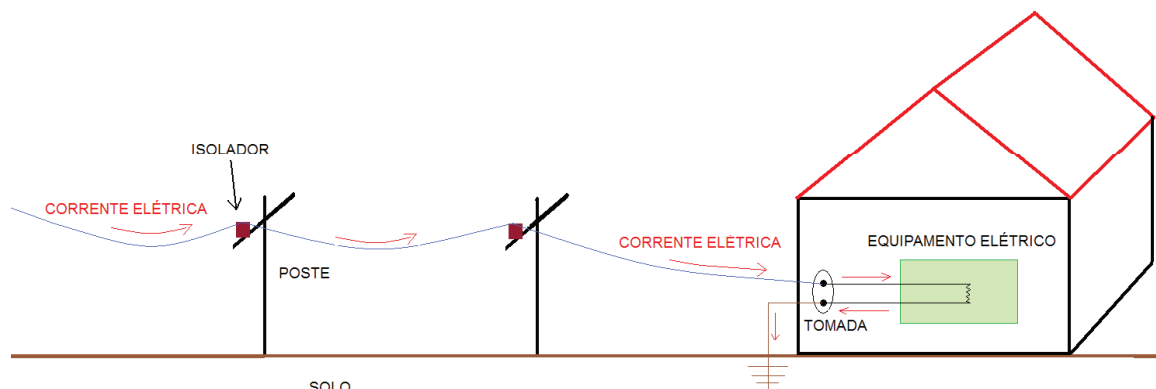


Figura 13: ilustração de isolador em condições normais de operação.

Fonte: O autor.

Percebe-se na Figura 13 que o isolador em condições ideais de operação possui em uma de suas extremidades o mesmo potencial dos condutores, pois eles estão em contato. Na outra extremidade do isolador, que está em contato com o poste, por exemplo, o potencial é diferente, pois o poste está conectado à Terra. Em postes de concreto, que são bastante utilizados em sistemas de distribuição, a condutividade elétrica é relativamente grande dependendo das condições (por exemplo umidade) e, com isso, o potencial se aproxima bastante do potencial da Terra. Portanto, pode-se considerar, que na pior situação, o isolador possui entre as suas extremidades a mesma diferença de potencial que existe entre o condutor e a Terra.

Como a função do isolador é não deixar que a corrente seja desviada através do poste para a Terra, a sua condutividade elétrica deve ser muito baixa, para que a corrente não encontre um caminho para a Terra através do isolador. O isolador ideal possui condutividade elétrica igual a zero.

Uma falha ou defeito no isolador é caracterizada pela perda de sua função em intervalos de tempo ou permanentemente. Isso significa que a corrente elétrica pode ser desviada, ou seja, surge uma corrente de fuga, conforme visto na Figura 14.

Em muitos casos o isolador apresenta um defeito que faz com que a corrente não seja grande o suficiente para causar a falha total (curto circuito com

atuação do sistema de proteção para o desligamento do sistema), contudo, se for possível detectar essa condição, seria possível evitar a falha do sistema nesse local. As principais dificuldades das concessionárias de energia elétrica, com relação aos isoladores poliméricos, se referem à capacidade de evitar estas falhas quando o equipamento ainda está em operação, para que se possa evitar o desligamento não planejado. Para isso, uma grande questão deve ser respondida: como identificar isoladores poliméricos deteriorados em campo? [14]. Talvez a resposta esteja no estudo de alguns efeitos que surgem no isolador quando o mesmo está em condição de defeito ou falha, tais como corrente elétrica, campo magnético ou elevação de temperatura.

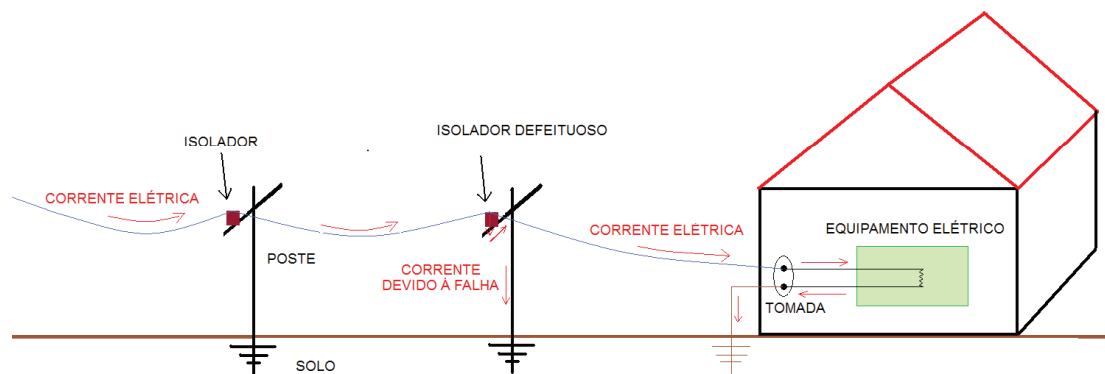


Figura 14: ilustração de isolador com defeito.

Fonte: O autor.

## 2.2 PROPAGAÇÃO DE TEMPERATURA

A condutividade térmica é definida como sendo a taxa com a qual o calor (energia) é conduzido por um determinado corpo [17]. Existem três mecanismos que envolvem a transferência de energia térmica, tais como a condução, que ocorre no nível molecular, a convecção, que ocorre no movimento de fluidos, no nível macroscópico, e o radioativo, o qual não necessita de meio material para o transporte de energia.

Em materiais sólidos há o transporte de energia por meio do mecanismo de condução e suas condutividades térmicas são determinadas experimentalmente, já

que dependem de muitos fatores que são difíceis de prever, devido principalmente às diferenças existentes nas estruturas moleculares [6].

Porém, para a determinação experimental, é necessário conhecer as leis que regem os fenômenos envolvidos, tal como a lei de Fourier da condução de calor, que está descrita a seguir.

Considere um material sólido com seção retangular de área  $A$ , com duas faces separadas por uma distância  $L$ , e que cada face se encontra em temperatura  $T_1$  e  $T_2$  iguais e em equilíbrio com a temperatura do sólido, no instante  $t < 0$ , conforme Figura 15.

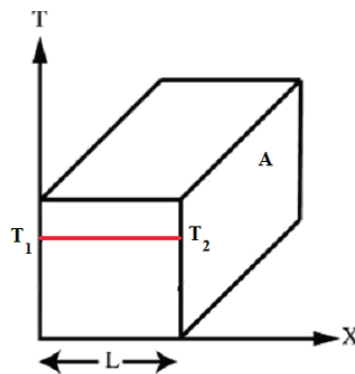


Figura 15: sólido entre duas placas com temperaturas iguais

Fonte: O autor.

No instante  $t = 0$  s, um dos lados é submetido instantaneamente a uma temperatura  $T_1$  maior que  $T_2$  e essa diferença é mantida indefinidamente. Quando isso ocorre, surge um fluxo de calor  $q$  no sentido de  $T_1$  para  $T_2$  e, após um período transitório, é estabelecido um perfil de temperaturas ao longo do eixo  $X$ , conforme visto na Figura 16.

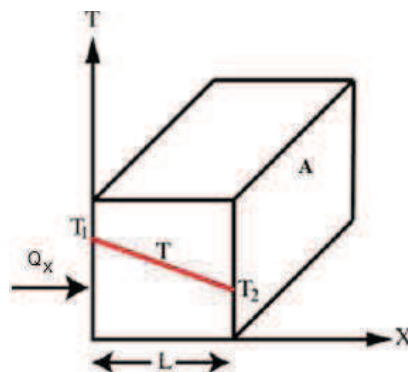


Figura 16: Corpo submetido a uma temperatura maior em um dos lados (perfil de temperaturas para  $t=0$  s).

Fonte: O autor.

Quando o sistema alcança o regime permanente, mantendo-se a diferença de temperatura entre  $T_1$  e  $T_2$ , uma taxa de calor constante flui ao longo do eixo X mantendo o perfil de temperatura, com isso, nota-se que:

$$\frac{Q_x}{A} = -k \frac{\Delta T}{X} \quad (28)$$

onde:

$Q_x$  é a taxa de transferência calor na direção X, em watts [W];

A é a área da superfície ortogonal à direção do fluxo de calor, em metros quadrados [ $m^2$ ];

$\Delta T$  é a diferença entre  $T_1$  e  $T_2$ , em kelvin [K];

X é a distancia na direção da taxa de calor, em metros [m];

k é a condutividade térmica, em [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ].

A equação 28 demonstra que a taxa de calor por área é proporcional ao decréscimo de temperatura ao longo do eixo X. A constante de proporcionalidade é definida como a condutividade térmica. É importante ressaltar que essa relação é válida para  $\Delta T$  relativamente pequenos.

A taxa de calor  $Q_x$ , em regime permanente, é constante através da área A, mesmo para outras formas geométricas, onde a área varia ao longo da direção da propagação da temperatura.

Para utilização da lei de Fourier em problemas gerais é melhor utilizar a forma diferencial, ou seja, a forma limite quando a espessura do sólido tende a zero, assim tem-se que:

$$q_x = -k \frac{dT}{dX} \quad (29)$$

Onde  $q_x$  é a taxa de calor por unidade de área na direção X. A equação 29 define que ao fluxo térmico devido à condução é proporcional ao gradiente de temperatura. Isso na verdade não é uma "lei" da natureza, mas o empirismo mostrou que a relação apresentada nessa equação é muito útil [17].

A equação 29 descreve a variação de temperatura na direção X. Para as variações nas demais direções, tem-se mesma forma dessa equação.

Para corpos onde há a variação de temperatura em todas as direções, ao somar-se a variação em todas elas e utilizando os vetores unitários apropriados, pode-se escrever a forma tridimensional da lei de Fourier:

$$\vec{q}_x = -k\nabla T \quad (30)$$

Onde  $\nabla$  é o operador nabla. Em materiais isotrópicos (na qual não há preferência na condução de calor) a condutividade térmica k é constante. Materiais anisotrópicos, tais como cristais não cúbicos, materiais fibrosos e laminados devem considerar a variação da condutividade térmica [17].

### 2.2.1 Condição Transitória da transferência de energia

Logo após a imposição de uma diferença de temperatura em um corpo, existe um período de transição, até que se estabeleça um regime permanente no qual a taxa de calor seja constante no corpo. Fica claro ao analisar a Figura 17 que para um determinado ponto, (coordenada X na Figura) a temperatura é constante em regime permanente, mas para atingir essa temperatura, existe um período transitório.

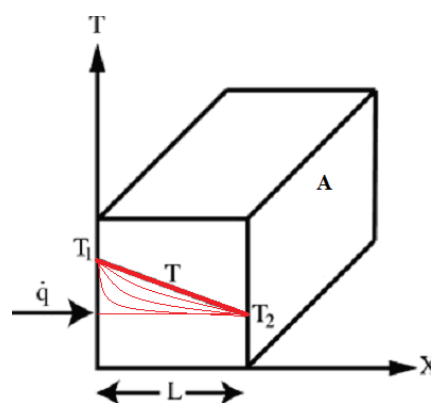


Figura 17: ilustração do período transitório da transferência de temperatura.

Fonte: O autor.

Portanto, antes do estabelecimento do regime permanente há uma variação da temperatura em função da coordenada x e do tempo t, ou seja,  $T(x, t)$ . Com isso,

é necessário obter uma equação para a temperatura, com duas variáveis independentes: a posição e o tempo. Para a aplicação nos isoladores inteligentes, se for utilizado o princípio termocrômico, é importante conhecer esse comportamento, pois a corrente de defeito age como uma fonte de calor, devido ao efeito joule, o qual descreve a potência dissipada em forma de calor através do produto da resistência pelo quadrado da corrente. Portanto, é necessário conhecer a dinâmica da transferência de temperatura, conforme será demonstrado a seguir.

Através do balanço de energia, a variação da energia em função da temperatura, para sólidos é dada por [17]:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = -k \nabla^2 T \quad (31)$$

onde:

$k$  é a condutividade térmica, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$\rho$  é a massa específica, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$c_p$  é o calor específico a pressão constante, [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

A equação 31 também pode ser escrita da forma:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \nabla^2 T \quad (32)$$

Onde  $\alpha$  é a difusidade térmica, que indica a rapidez com que o corpo pode se ajustar à temperatura imposta [17], e:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (33)$$

Mesmo com as equações descritas anteriormente para a obtenção da distribuição das temperaturas transitórias, são necessárias técnicas matemáticas bastante complexas para encontrar a solução das equações, mesmo para geometrias simples e, quando o resultado é obtido, os mesmos são tão complexos para análise quantitativa que muitas vezes o esforço e tempo gastos não são

justificáveis [18], e, portanto, atualmente métodos numéricos são os mais utilizados para resolver tais problemas, através de ferramentas computacionais.

### 2.2.2 Analogia térmica-elétrica

Para aplicações em transitórios com transferência uni-dimensional de calor, uma metodologia que possui muitas vantagens práticas é o método da analogia elétrica [19]. Nessa metodologia, o sistema físico térmico é convertido em um sistema elétrico equivalente, onde a temperatura é considerada como o potencial elétrico e o fluxo de calor é equivalente à corrente elétrica, assim, é possível construir um circuito elétrico equivalente para o caso específico estudado. A desvantagem dessa metodologia é que dependendo do caso a ser aplicado, o sistema elétrico pode ser muito complexo [19].

Dois sistemas são ditos análogos quando possuem equações e condições de contorno semelhantes. Por exemplo, se a equação 28 for manipulada, tem-se:

$$Q_x = \frac{\Delta T}{\frac{X}{Ak}} \quad (34)$$

que pode ser escrita da forma:

$$Q_x = \frac{\Delta T}{R_x} \quad (35)$$

onde  $R_x$  é a resistência térmica na direção  $x$ , e:

$$R_x = \frac{X}{Ak} \quad [KW^{-1}] \quad (36)$$

Em sistemas elétricos, pela lei de ohm:

$$i = \frac{\Delta V}{R_e} \quad (37)$$

onde:

$i$  é a corrente em ampère [A];

$\Delta V$  é a diferença de potencial elétrico em volts [V];

$R_e$  é a resistência elétrica na direção da corrente, em ohms [ $\Omega$ ].

É clara a semelhança entre as equações 35 e 37, que evidenciam a analogia entre os sistemas térmicos e elétricos. No sistema térmico, uma diferença de temperatura cria um fluxo de calor e esse fluxo depende da resistência térmica do material. No sistema elétrico, a diferença de potencial cria uma corrente elétrica que depende da resistência elétrica. A Figura 18 ilustra a equivalência dos sistemas:

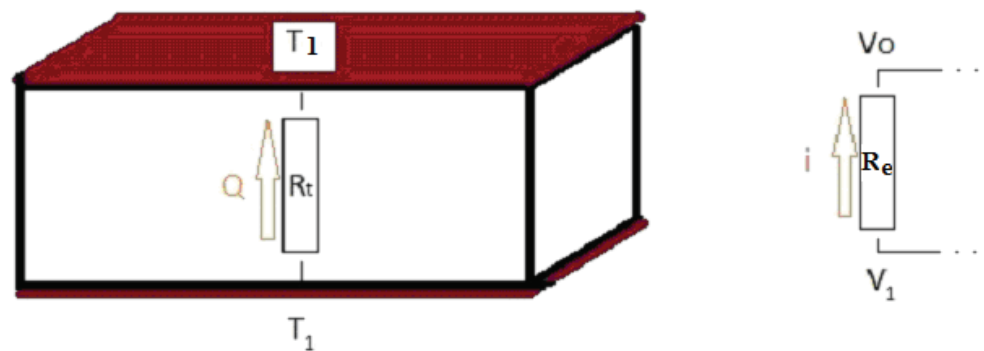


Figura 18: analogia térmica – elétrica.

Fonte: O autor.

A analogia elétrica possui bastante utilidade quando deseja-se obter a temperatura em sistemas compostos por mais de um tipo de material podendo possuir dimensões diferentes, o que resulta em resistências térmicas diferentes. Para resolver esse problema, um circuito elétrico equivalente pode ser bastante útil, conforme visto na Figura 19.

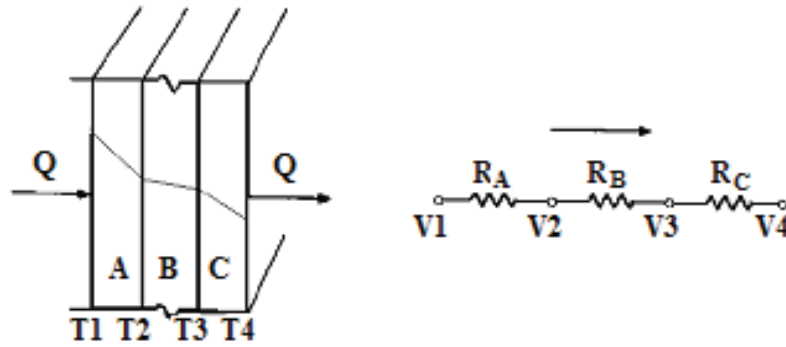


Figura 19: analogia térmica – elétrica para diversos materiais.

Fonte: Lawton, 1996.

Para a modelagem elétrica realizada na Figura 19, é importante ressaltar que somente é possível obter as temperaturas nos locais onde é possível determinar as tensões  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ . Caso fosse necessário obter a temperatura, por exemplo, no centro do material A, bastaria dividir a resistência térmica do material em duas, para que fosse possível calcular o “potencial  $V$ ” nesse local.

Percebe-se que essa modelagem elétrica apresentada pode ser utilizada somente para regime permanente.

Fica fácil entender o porquê ao realizar a seguinte análise: se a diferença de potencial fosse retirada instantaneamente na Figura 19, fazendo  $V_4$  assumir o valor de  $V_1$ , ou seja,  $\Delta V = 0$ , a corrente também cessaria instantaneamente, e, nesse momento, o potencial ao longo de todo o circuito elétrico seria  $V_1$ . Isso equivaleria dizer que no sistema térmico, no mesmo instante em que a temperatura  $T_4$  se igualasse a  $T_1$ , o fluxo de calor cessaria e a temperatura ao longo de todo o corpo seria  $T_1$ , instantaneamente, contudo, sabe-se que isso não ocorre na realidade, pois quando a diferença de temperatura é retirada ( $T_4 = T_1$ ), as temperaturas ao longo do material não mudam instantaneamente. Em uma situação real o material acumula energia térmica e quando a fonte cessa, essa energia acumulada mantém por algum tempo um fluxo de calor que vai diminuindo conforme a energia acumulada se dissipa. Durante esse fenômeno, portanto, tem-se um período transitório até que se atinja o equilíbrio térmico.

O mesmo ocorre quando há a imposição instantânea de fonte de calor, ou seja, diferença de temperatura. Para o sistema elétrico, modelado somente com resistências, os potenciais ao longo do circuito são estabelecidos instantaneamente, mas no sistema térmico, ao impor uma fonte de calor, as temperaturas não se

alteram instantaneamente. Isso ocorre porque o corpo está acumulando energia térmica nesse período, o que causa um intervalo de tempo transitório. Conclui-se que em regime permanente, as resistências térmicas são suficientes para a modelagem, mas para estudos transitórios é necessária uma modelagem elétrica mais complexa, como será demonstrado a seguir.

A grandeza que fornece a capacidade de armazenamento de energia térmica é denominada “capacidade térmica”, e é dada por:

$$C_t = \frac{dQ_t}{dT} \quad (38)$$

onde:

$Q_t$  é a energia térmica fornecida ao corpo, em joules [J];

$T$  é a temperatura do corpo, em kelvin [K];

$C_t$  é a capacidade térmica, em [J/K].

A equação 38 pode ser reescrita considerando que a energia térmica é o calor fornecido ao corpo em um intervalo de tempo. Considerando que o calor pode variar ao longo do tempo em períodos transitórios, tem-se que:

$$C_t = \frac{q(t).dt}{dT} \quad (39)$$

Isolando a temperatura na equação 39 e aplicando a integral nos dois lados da equação:

$$T = \frac{1}{C_t} \int q(t).dt \quad (40)$$

Ao analisar a equação 40, conclui-se que a temperatura em um corpo aumenta conforme é fornecido calor ao longo do tempo e é inversamente dependente da capacitância térmica.

Na analogia elétrica a temperatura é equivalente à tensão elétrica e o fluxo de calor à corrente. Analisando a equação 41 percebe-se que a capacidade térmica é equivalente à capacitância elétrica, que é definida pela relação da carga acumulada pela tensão elétrica:

$$C_e = \frac{dQ_e}{dV} \quad (41)$$

Onde:

$Q_e$  é a carga elétrica, em coulombs [C];

$V$  é a tensão, em volts [V];

$C_e$  é a capacitância elétrica, em faraday [F].

Mas a carga pode ser definida como a corrente elétrica em um intervalo de tempo, sendo assim, se a corrente variar, pode-se escrever a equação 41 da seguinte forma:

$$C_e = \frac{i(t).dt}{dV} \quad (42)$$

Assim como feito na equação 40, a equação 42 fica:

$$V = \frac{1}{C_e} \int i(t).dt \quad (43)$$

Ao comparar as equações 40 e 43 verifica-se que a capacidade térmica, que é a grandeza que indica a capacidade de armazenamento de energia térmica de um corpo, possui analogia à capacitância elétrica, que fornece a capacidade de armazenamento de energia elétrica, em forma de campo elétrico. Portanto, ao inserir um capacitor no circuito elétrico análogo, poder-se-ia obter um modelo elétrico que representasse não somente o regime permanente, mas também, o regime transitório. A inserção do capacitor no circuito para representação do fenômeno térmico, é feita através de vários circuitos resistor-capacitor (RC) em paralelo, conforme visto na Figura 20, onde está representado um corpo com duas placas de temperaturas diferentes em suas extremidades. Cada circuito RC representa uma parte do corpo, assim, a distribuição de temperaturas fica discretizada no espaço, e o intervalo de discretização depende da quantidade de circuitos RC adotada [19].

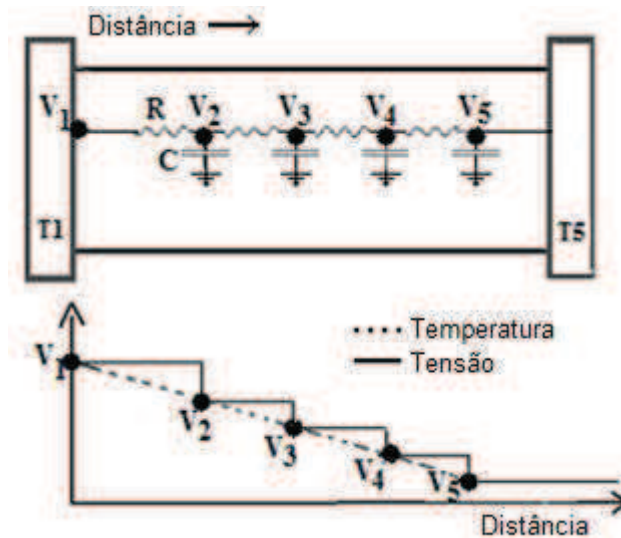


Figura 20: analogia térmica-elétrica com inserção de capacitores.

Fonte: O autor.

Percebe-se ao analisar a Figura 20 que a modelagem elétrica fornece valores das temperaturas (análoga ao potencial elétrico) somente nos pontos onde há os nós do circuito elétrico. Pode-se notar também por análise de circuitos, que a tensão  $V_1$  vai caindo ao longo do circuito até atingir o valor de  $V_5$ , assim como ocorre com a temperatura, e que cada trecho do circuito (ou parte do corpo modelado) possui uma energia térmica acumulada, representada pelo capacitor.

Isso faz com que no instante em que é retirada a diferença de potencial, a corrente não cesse instantaneamente, mantendo um valor de tensão nos nós, assim como aconteceria com a temperatura, ou seja, o corpo manteria um valor de temperatura no instante da retirada da diferença de temperatura. No caso elétrico, o capacitor manteria a corrente por algum tempo, no caso térmico, a capacidade térmica manteria o fluxo de calor. O contrário também está representado, pois no instante em que é imposta uma diferença de potencial elétrico, é necessário um período transitório para que os capacitores se carreguem e estabeleçam as tensões em regime permanente nos nós, assim como quando é imposta uma diferença de temperatura, quando é necessário um período para se estabelecer as temperaturas ao longo do corpo em regime permanente.

Contudo, para a modelagem elétrica, os valores das capacitâncias e resistências elétricas análogas dependem da geometria do corpo, pois são dependentes da área e do comprimento na direção do fluxo de calor, portanto, para

aplicação dessa metodologia no isolador, deve-se realizar cálculos considerando a sua geometria.

## **2.3 MATERIAIS INTELIGENTES**

O conceito de Materiais Inteligentes envolve aqueles que possuem a capacidade de mudar uma ou mais propriedades através de estímulos externos. Com isso, é possível confeccionar equipamentos que possuem a capacidade de informar uma alteração do seu estado ou perda de funcionalidade sem a necessidade de equipamentos complexos de medição ou monitoramento. Entre as diversas propriedades que podem ser alteradas em um material, uma delas é bastante útil para a sinalização da alteração de uma ou mais funções do mesmo, esta propriedade é a cor. Este fenômeno de mudança de cor é denominado cromismo e os materiais que possuem esta característica de mudança de cor são denominados cromógenos [20]. A alteração de cor pode ocorrer devido a estímulos diversos no material, tais como:

Materiais fotocromicos - são materiais que alteram sua coloração quando expostos à luz, visível ou ultravioleta, tais como o vidro dopado com cádmio ou prata. São exemplos da aplicação de materiais fotocromicos os óculos e espelhos retrovisores de automóveis que escurecem na presença de luz intensa.

Materiais Barocromicos – O sulfeto de samário é um exemplo de material barocromico são materiais que alteram a sua coloração através de mudanças na pressão.

Materiais Eletrocromicos – são materiais que mudam de cor quando submetidos a uma mudança eletroquímica. Esta propriedade é bastante promissora do ponto de vista tecnológico.

Existem diversas outras formas de estímulos que alteram a cromaticidade de materiais cromicos, tais como campos elétricos, que mudam a orientação das moléculas de certos cristais que alteram o espalhamento e a absorção ótica [20]. Porém, uma das principais formas de cromismo, e que é o foco deste projeto, é o termocromismo, que está descrito a seguir.

Materiais termocromicos são aqueles que possuem a capacidade de mudar de cor quando submetidos a variações de temperatura. A mudança ocorre quando a temperatura atinge um limiar e geralmente este processo é reversível. Os materiais

termocrômicos mais usados são constituídos pelos óxidos metálicos, pelos corantes leucos e pelos cristais líquidos.

A transição de cor em compostos inorgânicos pode ocorrer devido à mudança de fase cristalina, mudança da geometria das ligações ou mudança no número de moléculas do solvente na esfera de coordenação [2]. O óxido de zinco, por exemplo, muda para amarelo quando aquecido, sendo branco em temperatura ambiente, sua mudança ocorre devido a defeitos ocorridos na rede cristalina. O iodeto de mercúrio cuproso quando aquecido é marrom e na temperatura ambiente é vermelho brilhante, a mudança de coloração ocorre à 55 °C. O iodeto de mercúrio muda de vermelho para amarelo quando está em uma temperatura média de 126 °C.

Compostos de vanádio podem transferir suas propriedades crômicas aos materiais no quais são adicionados [19, 21], pode-se citar o exemplo do dióxido de vanádio que em forma de filmes finos, quando depositados em substratos de vidro, agem como bloqueadores de radiação infravermelha a certas temperaturas, funcionando como uma janela inteligente que bloqueia a radiação quando a temperatura ultrapassa certos limites.

Outras formas de se transferir o cromismo aos materiais podem ser observadas através da aplicação de corantes que possuem estas características. Estes corantes podem ser adicionados como carga em matrizes sólidas como polímeros termoplásticos ou termofixos ou misturados em tintas. Geralmente os corantes não são aplicados diretamente ao material, pois são encapsulados em microcápsulas poliméricas [24]. Esta composição é formada por um corante junto com um desenvolvedor de cor contendo ácido protônico, que é capaz de transferir prótons ou realizar ligações fortes de hidrogênio, então os dois são dissolvidos em um solvente não volátil e esta composição é encapsulada. Quando há o aumento da temperatura o solvente se funde ocasionando a mudança de cor. Exemplos de desenvolvedores que podem ser usados: bisfenol A, bisfeno B, 1,2,3 - triazola, toureia, etc. Os solventes são mais comumente usados os álcools alifáticos. A vantagem desta composição é que a mesma apresenta cor quando estão com temperatura baixa e são incolores quando estão com temperaturas elevadas e a mudança de cor depende do ponto de fusão do solvente utilizado.

O termocromismo possui um grande potencial de aplicação no setor elétrico, visto que muitos fenômenos ligados às falhas de equipamentos apresentam correlação com a elevação de temperatura. Para os isoladores poliméricos, quando

há a deterioração do equipamento, ocorrem fenômenos que elevam a sua temperatura devido à energia dissipada em forma de calor, tal fenômeno está ligado principalmente à corrente de fuga, de trilhamento e descargas parciais ocorridas no interior do isolador.

## 2.4 ESTADO DA ARTE

Muitos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de diagnosticar a deterioração e falha em isoladores, contudo, a grande maioria teve como foco os isoladores cerâmicos ou de vidro e isoladores poliméricos de transmissão de energia elétrica, cujo material é o EPDM (etileno propileno dieno monômero). Para isoladores poliméricos de polietileno de alta densidade conhecido como PEAD ou, em inglês, HDPE, os trabalhos publicados são mais reduzidos e, aqueles que possuem relevância para o presente trabalho, estão resumidos a seguir.

Foi realizado um trabalho com o objetivo de desenvolver metodologias para estudo do processo de envelhecimento em campo de isoladores poliméricos em polietileno utilizados em redes de distribuição de energia com cabos nus. Foram apresentados os resultados de ensaios de *stress cracking* efetuados em isoladores de polietileno de diferentes procedências. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova na forma de placas e também em isoladores inteiros. Os isoladores, com 2 anos de uso em média, foram retirados de três regiões do estado do Rio Grande do Norte: Litoral, Zona da Mata e Sertão. Foram realizados ensaios de Inspeção Visual, Microscopia Eletrônica de Varredura, Corrente de Fuga, Radiografia Industrial, Descargas Parciais, Tensão Aplicada, Análise Dinâmico-Mecânica, Multiestressamento. Os resultados indicam a ocorrência de degradação branda no interior dos materiais e bolhas, mas que não comprometem o seu desempenho, sob condições normais de operação. Isoladores de alguns fabricantes apresentaram problemas de degradação superficial por radiação UV, que pode prejudicar seu desempenho em ambientes marítimos e em ambientes poluídos. É importante ressaltar que os resultados se referem aos isoladores com 2 anos de uso [22].

Em [23] foram apresentados os resultados obtidos da aplicação de metodologias de reconhecimento de padrões em imagens radiográficas de isoladores poliméricos. Também foi desenvolvido um sistema de radiografia digital portátil (sistema RDP), para a detecção de espaços vazios (bolhas) nos isoladores.

As metodologias desenvolvidas para o reconhecimento de defeitos de forma automática envolveram basicamente o pré-processamento das radiografias digitais (utilizando-se um filtro passa baixa), a segmentação da ROI (Region Of Interest) e dos defeitos, a extração de 13 características de 714 regiões segmentadas e, por fim, a classificação dos defeitos (D) e estruturas regulares (ER). O trabalho obteve resultados satisfatórios para a classificação de isoladores defeituosos. A Figura 21 demonstra uma radiografia obtida durante o trabalho.

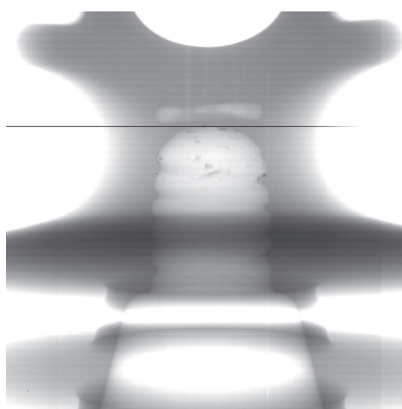


Figura 21: Radiografia digital obtida com o sistema RDP.

Fonte: (Godoi, 2005).

Um sensor foi desenvolvido para medir a corrente de fuga em isoladores de sistemas de 69 kV, compostos de material polimérico de EPDM. Os isoladores foram instalados em campo e retirados de tempo em tempo para realização de ensaios. Com isso, foi possível estimar um limiar de corrente de fuga que caracterizaria um defeito de 10 mA [24]. Os sensores desenvolvidos foram instalados em campo e o custo estimado de cada um, de um total de cinco, foi de R\$ 50,00. Concluiu-se que são necessários mais ajustes nos sensores para utilização em campo, pois os mesmos apresentaram oxidação e o limiar de 10 mA não estava sendo respeitado pelos mesmos. Vale ressaltar que o custo estimado de cada sensor poderia inviabilizar a utilização dos mesmos em sistemas de distribuição com isoladores de polietileno de alta densidade. A Figura 22 ilustra um dos sensores em campo.

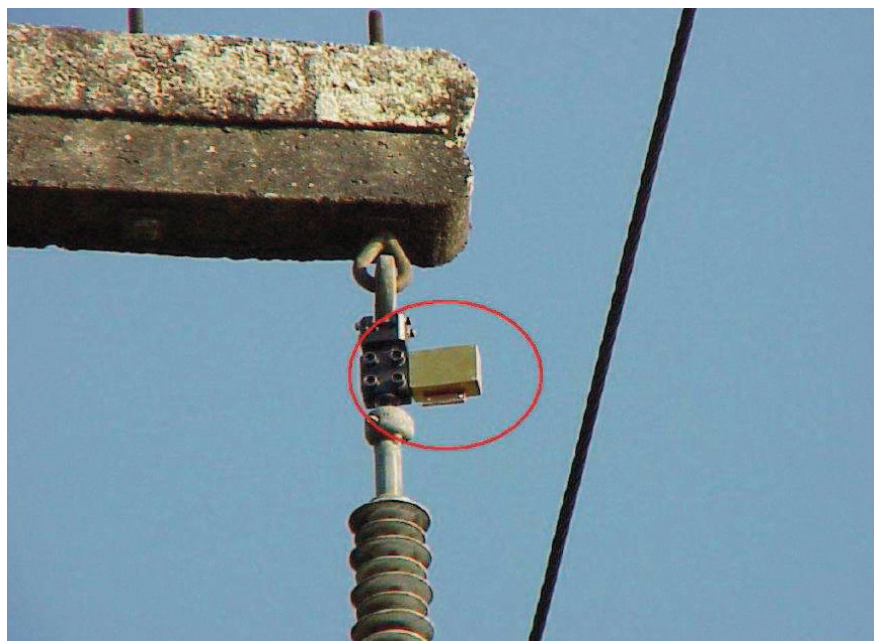


Figura 22: Sensores de corrente de falha.

Fonte: (Góis, 2007).

Em [25] foi apresentada a experiência da empresa COSERN com o isolador polimérico após 10 anos de utilização em seu sistema elétrico de distribuição, de 15 kV, ressaltando índices de falhas e desempenho. Foram instalados no total 376.917 isoladores. Já nos primeiros meses do período analisado, foram detectadas algumas falhas nos isoladores poliméricos recém instalados, que ocasionaram desligamentos no sistema. Após análise das causas verificou-se que as falhas ocorreram por instalação inapropriada, visto que, no início, o pessoal da empresa ainda estava acostumado com o método de instalação dos isoladores de porcelana. Ocorreram falhas devido aos defeitos de fabricação que geraram bolhas dentro do isolador, acarretando em descargas elétricas e também devido ao meio ambiente, pois unidades próximas ao mar, em ambiente salino, apresentaram corrente de trilhamento. Em algumas unidades, foi detectado visualmente que houve descargas elétricas, devido à carbonização do material, porém, nesses casos não houve desligamento do sistema elétrico. Durante a análise foram verificados os resultados de algumas falhas, conforme a Figura 23.

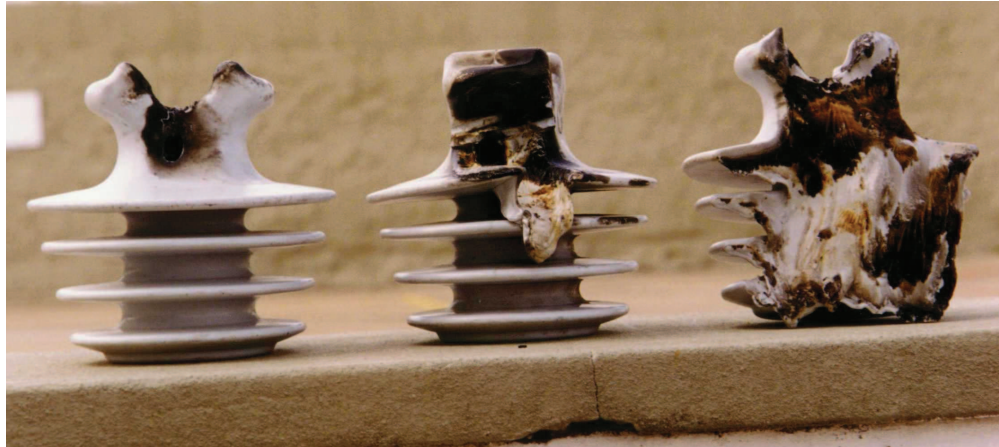


Figura 23: Evolução de falha em isolador polimérico tipo pino.

Fonte (Oliveira, 2008).

Percebe-se ao analisar a Figura 23 que, em alguns casos, chega-se a fundir o material, até a detecção da falha (acionamento da proteção do sistema elétrico), mas em outros casos o efeito é menos evidente.

Em [26] também foi apresentada a experiência da utilização de isoladores poliméricos de polietileno de alta densidade em redes de 15 kV. O período analisado foi de 15 anos e a empresa foi a CELPE. O problema mais grave detectado foi o da suscetibilidade ao *stress cracking*, ou seja, fissuração por esforço mecânico. O stress cracking pode provocar falhas mecânicas e ou elétricas, devido à formação de trincas no corpo dos isoladores. Os resultados mostraram que, as condições superficiais dos isoladores envelhecidos em campo variaram de fabricante para fabricante e também de região para região de procedência. Em regiões litorâneas, o nível de degradação superficial dos isoladores foi maior do que o encontrado em isoladores provenientes de regiões menos agressivas. Vários isoladores com falha foram analisados e na Figura 24 é possível verificar um deles, com carbonização do material no centro do isolador.

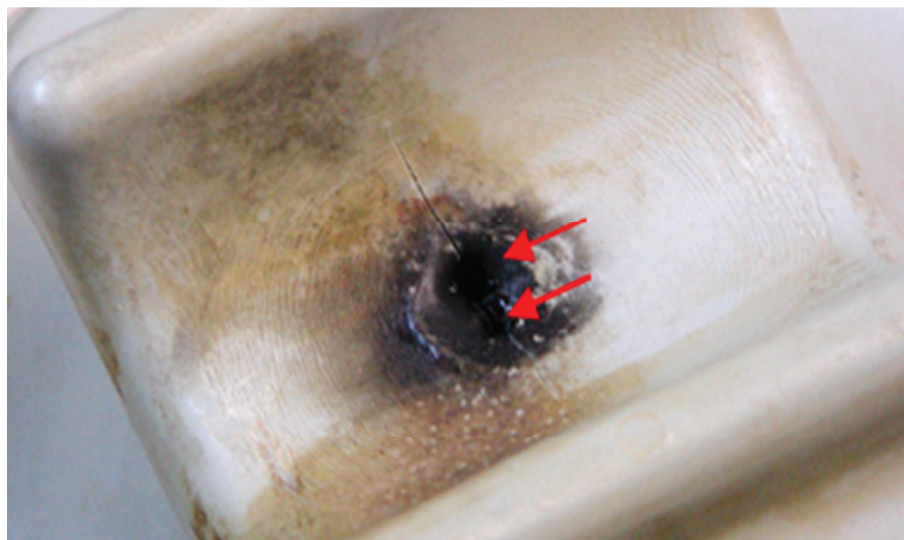


Figura 24: Defeito em isolador da CELPE.

Em [27] foram usadas técnicas de radio frequência para monitorar as descargas parciais em isoladores poliméricos. As descargas atmosféricas e chaveamentos no sistema podem gerar impulsos de tensão que ocasionam descargas elétricas momentâneas nos isoladores, mas que não fazem o sistema de proteção atuar, contudo, com a repetição desse fenômeno, o material pode se degradar e com isso vir a gerar uma falha mais grave no sistema. Ao final do trabalho conclui-se que é possível detectar sinais de RF provenientes das descargas parciais, contudo, é necessário desenvolver sistemas de detecção de RF mais sensíveis, pois é importante a medição da variação da energia do RF para, com isso, tentar encontrar uma correlação com a deterioração do isolador.

Em [28] foram monitoradas a corrente de fuga, descargas parciais e a resistência de isolamento de vários tipos de isoladores sob poluição industrial e litorânea. Concluiu que é possível prever quando um isolador está em fase de degradação através da análise dessas medidas, contudo, para realizá-las é necessário retirar os isoladores de operação para ensaios.

Foi desenvolvido um sistema de distribuição experimental de distribuição de 13,8 kV, denominada EDL (experimental delivery line), para o monitoramento de isoladores poliméricos tipo pino [29]. Foram instalados 249 isoladores conforme as Figuras 25 e 26.



Figura 25: Sistema EDL.

Fonte: (Bezerra, 2012)

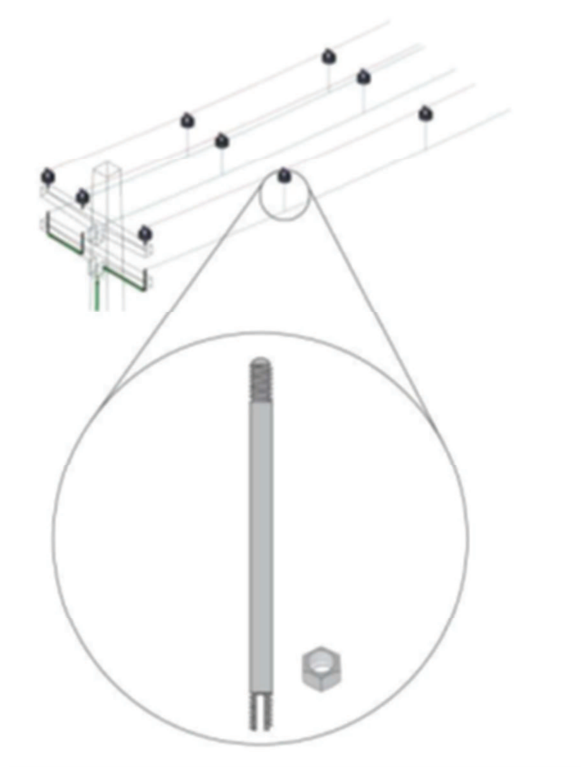


Figura 26: Detalhe do fixador do isolador no sistema EDL.

Fonte: (Bezerra, 2012)

Os isoladores foram submetidos previamente a testes de radiografia e suas imagens foram arquivadas com as características das cavidades de cada isolador, os quais, após instalação, são monitorados por técnicas de ultrassom. O resultado

tem demonstrado que até a publicação do trabalho o comportamento dos isoladores se mostrou normal, contudo, sabe-se que é necessário mais tempo para poder detectar algum tipo de falha.

Em [21] fez-se a simulação de campos elétricos através do método dos elementos finitos (MEF) de um isolador polimérico de 230 kV submetido a sobretensões de até 2 vezes a nominal, primeiramente sem defeito. Em seguida, foi simulado no mesmo modelo de isolador, cavidades e furos na interface núcleo/revestimento para obter a distribuição de campo elétrico ao longo do isolador polimérico. Observou-se então que o espectro das distribuições de campo de um isolador sem defeito diferia daquela em isoladores nos quais foram simulados os defeitos, evidenciando a presença destes. Uma vez identificado o defeito pode-se tomar a medida corretiva necessária evitando assim a perda do isolador com o desligamento intempestivo da linha de transmissão. O trabalho foi realizado em isoladores de 230 kV que são constituídos de *ethylene propylene diene monomer* - EPDM, e não de High-density polyethylene - HDPE, como os isoladores tipo pino de distribuição.

Em [30] foi estudado o comportamento de isoladores poliméricos através da distribuição espacial de cargas na aplicação de tensão EDL (experimental delivery line),

Devido às características do isolador e de cavidades em seu interior, quando há a aplicação de tensão DC as cargas se acumulam em determinados locais o que intensifica o campo elétrico. Foi realizado envelhecimento térmico para verificar o comportamento dos isoladores. Verificou-se que os mesmos tiveram as suas perdas aumentadas e que é possível a detecção desse fenômeno através da análise das distribuições de cargas.

Em [31] buscou-se a correlação da energia absorvida por materiais poliméricos durante o trilhamento elétrico com as fases do processo de degradação de sua superfície e utilizar esta correlação como parâmetro de avaliação do momento da falha desses materiais. Com os resultados obtidos verificou que em determinado momento do trilhamento a quantidade de energia dissipada pelo trilhamento muda conforme o gráfico da Figura 27.

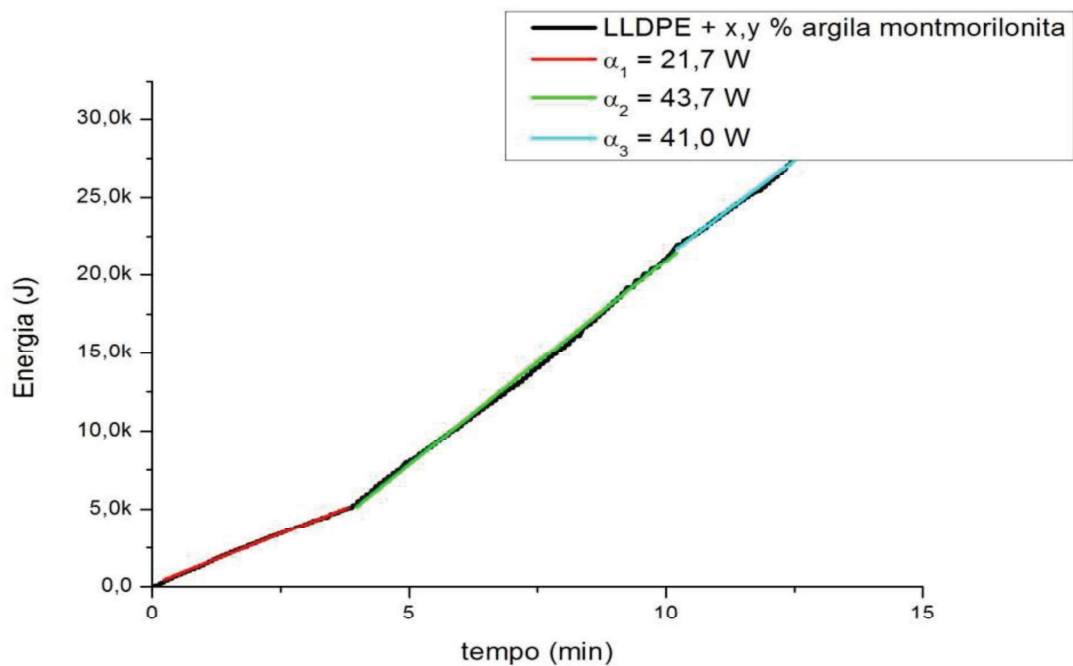


Figura 27: Energia dissipada no trilhamento elétrico em material polimérico.

Fonte: (Silva, 2014).

Verifica-se na Figura 27 que há três momentos distintos nos quais a energia dissipada se altera, indicando uma mudança no processo de trilhamento. Com a evolução desta técnica acredita-se, que no futuro, será possível o acompanhamento em tempo real do momento de falha do material isolante.

Em [32] foi realizado o monitoramento simultâneo dos níveis de corrente de fuga em sistemas isolantes e das condições meteorológicas. Neste contexto, o trabalho propôs o desenvolvimento de um medidor e registrador de corrente de fuga e de condições climáticas isolado, portátil e de fácil instalação. Foram apresentados os resultados do monitoramento da corrente de fuga em quatro regiões do Estado de Santa Catarina, fazendo comparativos entre os diferentes locais. Durante o trabalho foram realizadas análises de correlação entre a corrente de fuga e os dados meteorológicos. Concluiu que há correlação positiva entre a umidade e a corrente de fuga, sendo mais perceptível para altos valores de umidade.

Ao analisar o estado da arte verifica-se que a forma de detecção da degradação de isoladores poliméricos é realizada através de medições de grandezas físicas envolvidas no fenômeno. Essa abordagem traz um inconveniente que é a complexidade e custo para realizar tal medição com o isolador em campo sendo que, em alguns casos, é necessário que os mesmos sejam retirados de

operação para a realização dos testes em bancada. Nos trabalhos apresentados, os sensores desenvolvidos para medir a corrente de fuga foram utilizados em sistemas de transmissão ou sub-transmissão, onde os custos dos equipamentos envolvidos são menos impactantes, contudo, no caso de isoladores de distribuição de polietileno, o baixo custo é o que o torna competitivo em relação aos isoladores de vidro ou porcelana, lembrando que os sistemas de monitoramento destes já estão mais desenvolvidos. Foi verificado, também, que a corrente de fuga por trilhamento elétrico considerada como limiar de defeito em um dos trabalhos, foi na ordem de 10 mA, mas é importante ressaltar que para defeitos com correntes internas ao isolador, não há estudos indicando um valor da corrente. Portanto, uma solução que torne possível a detecção de defeitos em isoladores de polietileno de alta densidade utilizados em sistemas de distribuição, de forma simples e de baixo custo, seria um avanço nas técnicas de monitoramento dos mesmos.

### 3 METODOLOGIA

Durante o desenvolvimento do trabalho muitas etapas da metodologia dependeram de resultados de etapas anteriores, com isso, para a fluência e melhor entendimento de todo o processo, nesse capítulo, a metodologia aplicada e os resultados estão apresentados conforme a sequencia da execução do trabalho.

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DO PRINCÍPIO CROMICO A SER UTILIZADO

Com relação ao princípio termocrômico a ser aplicado, em função do estado da arte apresentado, verifica-se que uma diferença evidente da condição de falha ou defeito de um isolador para a condição de operação normal, é que, na condição normal, pode-se considerar que a corrente elétrica através do isolador é muito baixa com relação à corrente na condição de falha. Com isso, poder-se-ia utilizar um princípio crômico ligado direto ou indiretamente à corrente elétrica, para sinalizar quando há a existência da mesma. Para utilizar um princípio diretamente ligado à corrente, ou seja, um princípio eletrocrômico, seria necessário estudar uma forma de aplicar esse princípio sem alterar as características dielétricas do isolador, o que pode inviabilizar tecnicamente ou economicamente o mesmo.

Para a utilização de uma propriedade ligada indiretamente, deve-se entender os efeitos da corrente elétrica no isolador e assim utilizar alguma forma de cromismo ligado à esses efeitos.

Existem dois efeitos bastante evidentes ligados à corrente elétrica que surge devido a um defeito ou falha no isolador. Um deles é o surgimento de um campo magnético, o outro é o aumento da sua temperatura. Para o campo magnético, segundo a lei de Biot-Savart, tem-se que:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{L}x\vec{r}}{r^2} \quad (44)$$

Percebe-se, ao analisar a equação 44 que o campo magnético em um ponto distante “R” da corrente “I” que passa por um elemento diferencial de comprimento “dL”, possui direção perpendicular ao plano que contém o vetor da corrente e o vetor

unitário que indica a direção da distância  $R$ , isso está indicado pelo produto vetorial  $d\vec{L} \times \vec{r}$ .

Conclui-se que o campo magnético é diretamente proporcional à corrente elétrica. Contudo, é difícil utilizar essa grandeza para detectar falhas nos isoladores, pois há corrente circulando nos condutores também, levando energia elétrica para as cargas (equipamentos elétricos), com isso, há um campo magnético no local que não é gerado pela falha ou defeito do isolador. Poder-se-ia pensar em detectar a variação do campo em condições normais com relação à condição de falha, pois quando o isolador apresentasse defeito haveria um campo magnético que se somaria ao campo dos condutores, devido à nova corrente que surgiria através do isolador, porém, isso também é de difícil aplicação, pois, se fosse desenvolvido algo que detectasse essa variação, o sistema estaria sujeito a não ser eficiente, uma vez que há variações normais do campo magnético também, em condições na qual o isolador está em perfeitas condições. Isso ocorre porque há uma variação da corrente normal que circula pelos cabos condutores, devido à variação das cargas conectadas ao sistema. Essa variação provoca uma mudança no campo magnético, em condições normais de operação, além do fato de que as variações do campo magnético em condições normais são geralmente muito maiores que a variação do campo em caso de defeito ou falha do isolador.

Outro fenômeno causado pela corrente elétrica nos isoladores é o aumento da sua temperatura, isso ocorre devido à transformação da energia elétrica em energia térmica. A temperatura de um corpo é definida como o grau de agitação dos átomos do mesmo [33]. A corrente elétrica, que é o movimento de cargas, quando atravessa um material, faz com que as cargas elétricas, mais especificamente os elétrons, se choquem com os átomos desse material, transferindo energia cinética aos átomos, aumentando seu nível de agitação. Esse fenômeno é traduzido em um aumento da temperatura na região onde existe a corrente elétrica, ou seja, na região onde os elétrons estão se chocando com os átomos do material. Surge, portanto, uma diferença de temperatura entre a região onde há corrente elétrica e as demais regiões do material, com isso, há a transferência de energia térmica para as demais regiões, ou seja, há um fluxo de energia, denominada fluxo de calor [33]. Esse fenômeno é bastante atraente para a aplicação na detecção de defeitos em isoladores, pois, pode-se utilizar materiais termocrômicos na confecção dos

isoladores. Outra vantagem, é que materiais termocrômicos já vêm sendo utilizados em maior escala na indústria, com maior variedade de cores de transição e também possibilidade de custo menor para a confecção, característica fundamental para isoladores poliméricos, visto que o custo é um dos principais fatores que os tornam mais atraentes que os isoladores de porcelana ou vidro.

### **3.2 CONFECÇÃO DO ISOLADOR INTELIGENTE**

Para a confecção dos isoladores inteligentes poliméricos deve-se levar em consideração os custos para a fabricação dos mesmos. A alternativa mais atraente sobre esse ponto de vista é a utilização de materiais termocrômicos no isolador, ou seja, com o aumento da temperatura, devido à corrente causada pelo defeito, o mesmo mudaria de cor, sinalizando a sua condição.

Após pesquisa realizada foram encontrados pigmentos termocrômicos disponíveis no mercado. Contudo, para que fosse possível a aplicação nos isoladores, esse pigmentos devem atender alguns requisitos, tais como possuir uma temperatura de transição de cor compatível com a aplicação dos isoladores, transferir sua propriedade termocrômica para o isolador de forma eficaz (bom contraste) e também não reagir com o material polimérico de forma a prejudicar seu desempenho elétrico e mecânico. Com isso, tem-se as seguintes considerações:

- Para a temperatura de transição de cor é imprescindível que a temperatura seja acima da temperatura ambiente, pois obviamente a mudança deveria ocorrer por motivo de defeito e não pela condição climática. Assim, considerando uma temperatura ambiente máxima de 40 °C, a mudança de cor deveria ocorrer em um valor um pouco acima, pois se a mudança ocorresse com um valor muito elevado de temperatura, existiria o risco da falha não gerar calor suficiente para que houvesse a mudança de cor.
- Para que o pigmento termocrômico possa “colorir” de forma eficaz a matriz polimérica, deve-se escolher cores com bom contraste na transição de cor.
- O efeito deve ser, em princípio, reversível, ou seja, a mudança de cor deve retornar ao normal quando resfriado. Isso se deve ao processo de injeção do material polimérico para a confecção dos isoladores, pois esse processo ocorre a altas temperaturas e, se o processo fosse irreversível, o mesmo seria ativado ainda na fabricação.

Entre os pigmentos disponíveis encontrados, os que mais se ajustaram aos requisitos citados foram os pigmentos da empresa *QCR Solutions Corp*, pois possuem as seguintes características:

**Temperatura de ativação disponível: 15 °C, 31 °C ou 46 °C** – A temperatura de transição de 46 °C está acima das temperaturas ambientais máximas, evitando que o isolador mude de cor devido somente às condições do meio ambiente.

**Pigmento do tipo “corante leuco” disponível nas cores azul, verde, magenta, laranja e vermelha** – Corante leuco significa que acima da temperatura de ativação, o corante apresenta ausência de cor, ou seja, para a aplicação nos isoladores, acima da temperatura de ativação, a cor seria a própria do isolador sem o corante.

**Princípio termocrômico Indireto e encapsulado** – A mudança de cor ocorre devido a alteração do pH do meio causada pela temperatura, para isso, moléculas halocrômicas, juntamente com moléculas doadoras de H<sup>+</sup> e um solvente são colocadas em capsulas menores que 6 microns. Devido ao fato do pigmento ser constituído de microcápsulas, o risco de reação com o material polimérico é menor.

Foram escolhidas duas cores para testes nos isoladores, azul e verde, com temperatura de ativação de 47 °C, com aplicação de 2% do master (especificação do fabricante).

É importante ressaltar que a mudança de cor ocorrerá com 47 °C, contudo, no isolador polimérico, dependendo do tipo de defeito, a temperatura não será uniforme em todo o material. Com isso, se a temperatura for maior que 47 °C no interior do isolador, mas for inferior a esse valor na superfície, não será possível visualizar a mudança de cor, uma vez em que o material polimérico é opaco. Portanto, para que haja sucesso na funcionalidade do isolador inteligente, é necessário que a falha cause uma temperatura superior a 47 °C na superfície do isolador. Para verificar se isso ocorre é necessário estudar o comportamento térmico do isolador polimérico, para isso, foram utilizados diversos métodos para que fosse possível a confrontação dos resultados. Foi utilizada a modelagem térmica através de circuitos elétricos análogos, simulação computacional, ensaios em corpo de prova e em isoladores confeccionados com material termocrômico.

### 3.3 ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

#### 3.3.1 Ensaio em corpo de prova

Para o isolador polimérico HDPE, que é o foco do presente trabalho, observando a Figura 28, percebe-se que o volume, que separa o cabo condutor do pino com rosca, está na parte superior do isolador, compreendido na região de linha pontilhada. As abas laterais servem para aumentar a distância superficial de isolamento, também chamada de distância de escoamento. A região destacada é onde ocorrem a maioria dos defeitos em isoladores (surgimento de correntes), pois é onde há o maior campo elétrico, devido à menor distância entre o condutor e o pino, exceto para a corrente de trilhamento que flui pela superfície do isolador, motivo pela qual existem as abas laterais, para o aumento dessa distância.

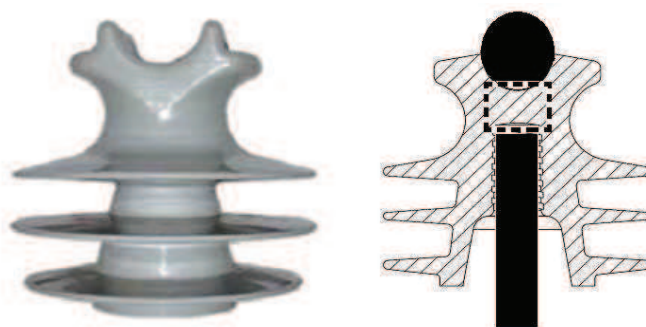


Figura 28: isolador polimérico tipo pino.

Fonte: O autor.

Portanto, devido à natureza do problema, para a confecção do corpo de prova foi utilizada a forma geométrica de um cilindro, como aproximação da forma da região descrita na Figura 28. O corpo de prova foi confeccionado com material polimérico HDPE (polietileno de alta densidade), que é o mesmo material utilizado nos isoladores de distribuição poliméricos, e foram inseridas no material as microcápsulas termocrômicas, conforme especificações do fabricante, citadas anteriormente. O cilindro possui 0,0125 m de raio e 0,015 m de altura. O corpo de prova pode ser visualizado na Figura 29.



Figura 29: corpo de prova com material termocrômico.

Fonte: o autor.

Para a realização do ensaio térmico no corpo de prova é necessário aplicar uma diferença de temperatura entre o interior (centro) do cilindro e sua parte externa, isso seria equivalente à diferença de potencial elétrico (tensão) no circuito elétrico análogo. Contudo, é importante observar que essa diferença de temperatura tem que ser constante durante o ensaio, para ser possível a comparação com o circuito elétrico análogo a ser desenvolvido posteriormente.

Para elevar a temperatura no centro do cilindro, o mais prático seria a inserção de um resistor elétrico no seu centro, pois, ao fazer circular uma corrente pelo mesmo, haverá a elevação de temperatura devido ao efeito joule, pois:

$$P_e = R.i^2 \quad [W] \quad (45)$$

Onde  $P_e$  é a potência elétrica, ou seja, é a energia por unidade de tempo transformada em calor na resistência. Portanto, é o valor da taxa de calor gerado, ou seja, é o valor de  $q$ .  $R$  é a resistência elétrica [ $\Omega$ ] e  $i$  é a corrente [A].

Contudo, ao circular uma corrente constante pelo resistor, a potência será constante, ou seja, a taxa de calor no centro do corpo de prova será constante. Dessa forma, a temperatura da fonte em regime transitório será variável. Assim, por exemplo, se o cilindro não dissipar calor, como a energia térmica está sendo gerada continuamente no seu interior, a temperatura do mesmo tenderá ao infinito, fazendo com que o corpo de prova atinja facilmente seu ponto de fusão, outra consequência é que seria mais difícil distinguir o regime transitório do regime permanente, pois as temperaturas nunca se estabilizariam.

Mas se fosse possível manter a temperatura da fonte constante, caso o corpo de prova não dissipe calor, o resultado seria que com o passar do tempo todo

o corpo de prova atingiria a temperatura da fonte. Essa condição é mais favorável para o ensaio, pois poder-se-ia determinar um valor de temperatura para a fonte um pouco abaixo da temperatura de fusão do corpo de prova, e medir o perfil de temperaturas do cilindro, bem como o tempo do regime transitório.

Para manter a temperatura constante no resistor, é necessário variar a corrente de forma que o mesmo produza somente o calor necessário para manter a temperatura constante, independente de estar em regime transitório ou permanente. Percebe-se que, por exemplo, no instante inicial, a fonte deve fornecer uma energia maior (calor) para atingir a temperatura especificada, pois o corpo de prova estaria com temperatura menor na região próxima à fonte, porém, com o passar do tempo, o próprio corpo de prova seria aquecido, sendo necessário menos calor para manter a mesma temperatura na fonte. Com isso, é necessário desenvolver um sistema de controle que varie a corrente automaticamente, para obter a variação da taxa de calor, com o objetivo de manter uma dada temperatura constante.

O problema do sistema de controle é que o mesmo deve possuir a característica de fornecer potência no interior do cilindro (corpo de prova) através de uma resistência e também medir a temperatura da resistência, ou seja, o sistema deve ser realimentado, contudo, inserir um sensor de temperatura no interior juntamente com uma resistência elétrica, pode resultar em dados não confiáveis, devido à troca de calor entre os elementos envolvidos.

Porém, sabe-se que os materiais alteram o valor de sua resistência devido à variação de temperatura e isso pode ser uma solução para o problema, pois, se for necessária uma temperatura constante, pode-se pensar em manter um valor de resistência constante nesse material, portanto, obtendo a equação que descreve a variação de resistência com a temperatura de um dado resistor, o mesmo poderia funcionar como fonte e ao mesmo tempo como sensor, pois, ao circular uma corrente, o resistor forneceria calor e, medindo sua resistência, poder-se-ia variar a corrente, com o objetivo de manter a resistência constante.

### **3.3.2 Desenvolvimento do controle de temperatura da fonte**

Um material que possui comportamento bastante estável e preciso na correlação entre a temperatura e a resistência elétrica é a platina, sendo que, esse material é utilizado na fabricação de sensores de temperatura, nos quais o valor da

resistência elétrica indica em qual temperatura o sensor se encontra. Sensores com essas características são chamadas de termoresistências.

Contudo, na aplicação típica desses sensores, para que seja possível medir sua resistência é necessário aplicar uma tensão e, com o valor da corrente gerada, através da lei de ohm obtém-se o valor da resistência. Percebe-se que como o objetivo tradicional do sensor é medir a temperatura ambiente, o mesmo não deve gerar calor, ou seja, a temperatura deve ser consequência do meio ambiente e não da corrente que atravessa a termoresistência, assim, essa corrente deve ser a menor possível.

Mas como o objetivo do presente trabalho não é medir a temperatura ambiente e sim a própria temperatura do resistor (sensor), pode-se então impor uma corrente elétrica que gere calor na termoresistência, assim, ela estaria atuando como fonte de calor, e a temperatura da fonte em um dado instante seria obtida através do valor da sua resistência nesse instante. Com isso, para manter a temperatura da fonte, basta controlar a corrente de forma que o valor de resistência seja constante.

Uma termoresistência bastante utilizada como sensor de temperatura e que pode ser utilizada para o sistema de controle proposto é o PT-100. Esse sensor é feito de platina e sua variação de resistência com a temperatura obedece à seguinte equação geral:

$$R_t = R_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (46)$$

Onde:

$R_0$  é a resistência de referência. Para o PT-100, vale 100  $\Omega$ ;

$T_0$  é a temperatura de referência. Para o PT-100 vale 0  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  é o coeficiente de temperatura. Para o PT-100 vale  $3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$R_t$  é a resistência relativa à temperatura T em ohms;

T é a temperatura relativa à  $R_t$ , em graus Celsius.

Substituindo os valores para o PT-100, a equação fica:

$$R_t = 100 + 0,385T \quad (47)$$

Assim tem-se a relação entre a temperatura do sensor e a sua resistência elétrica. Como a temperatura de fusão do corpo de prova é em torno de 130  $^{\circ}\text{C}$ , será

utilizada a temperatura de 110 °C para a fonte de temperatura no interior da amostra. Com isso, é possível calcular qual deve ser a resistência elétrica do PT-100 para essa temperatura. Substituindo T por 110 °C na equação 47 tem-se que:

$$R_t = 142,35 \Omega$$

Ou seja, se for mantida essa resistência constante no PT-100, a temperatura será de 110 °C constante no mesmo.

Assim foi possível desenvolver um sistema de controle que varie automaticamente a corrente que atravessa o PT-100, com o objetivo de manter a sua resistência sempre com o mesmo valor (142,35  $\Omega$ ). Durante o presente trabalho foi desenvolvido um circuito específico para esse fim, e utilizou-se o princípio da ponte de Wheatstone.

Uma ponte de Wheatstone é basicamente um circuito elétrico arranjado de tal forma que seja possível a determinação de uma resistência elétrica desconhecida. O esquema elétrico pode ser visto na Figura 30.

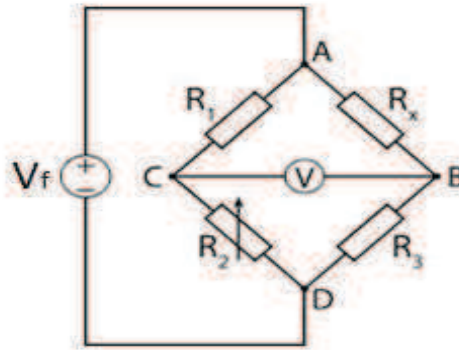


Figura 30: ponte de Wheatstone.

Fonte: o autor.

Através da análise de circuitos, pode-se obter a equação que descreve o circuito da ponte de Wheatstone:

$$V = V_f \left( \frac{R_3}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) \quad (48)$$

Onde:

$V_f$  é a tensão elétrica da fonte do circuito, [V];

$V$  é a tensão entre os pontos B e C [V];

$R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são resistências elétricas conhecidas, [ $\Omega$ ];

$R_x$  é a resistência elétrica a ser determinada, [ $\Omega$ ].

Quando a diferença de potencial entre os pontos B e C é igual a zero, ou seja  $V = 0$  V, diz-se que a ponte está em equilíbrio. Assim, substituindo  $V$  por zero, na equação 48, tem-se que:

$$R_x = \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \quad (49)$$

Portanto, para a determinação de  $R_x$ , a resistência  $R_2$  é ajustada até um valor conhecido que faz com que  $V$  seja igual a zero. Com isso, é possível utilizar a equação 49 para a determinação de  $R_x$ .

Contudo, para a aplicação do controle da temperatura do PT-100, todas as resistências são conhecidas, portanto, a ponte não será utilizada para a sua finalidade usual, mas será utilizada a propriedade do estado de equilíbrio da ponte para o controle da temperatura do sistema a ser desenvolvido.

Utilizando esse princípio,  $R_x$  será substituído pelo PT-100. Assim, para uma temperatura de 110 °C,  $R_x = 142,35 \Omega$ . Com isso é possível arbitrar os valores de  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  que satisfazem a equação 49 (ponte em equilíbrio), com isso:

$$R_x = 142,35 \quad \Omega;$$

$$R_1 = 50 \quad \Omega;$$

$$R_2 = 50 \quad \text{k}\Omega;$$

$$R_3 = 142,35 \quad \text{k}\Omega.$$

Para esses valores de resistências elétricas a ponte estará em equilíbrio, ou seja,  $V = 0$  V.

É importante observar que se  $R_x$  está com 142,35  $\Omega$  significa que sua temperatura é de 110 °C, e também  $V = 0$  V, mas se a temperatura do PT-100 não for essa, a resistência  $R_x$  será diferente e, assim, a ponte não estará em equilíbrio.

Portanto, manter a ponte em equilíbrio para o valor de  $R_x$  igual  $142,35 \Omega$  significa manter o PT-100 à  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para manter a ponte em equilíbrio, ou seja, manter  $V = 0 \text{ V}$ , o seguinte circuito elétrico foi desenvolvido, conforme Figura 31.

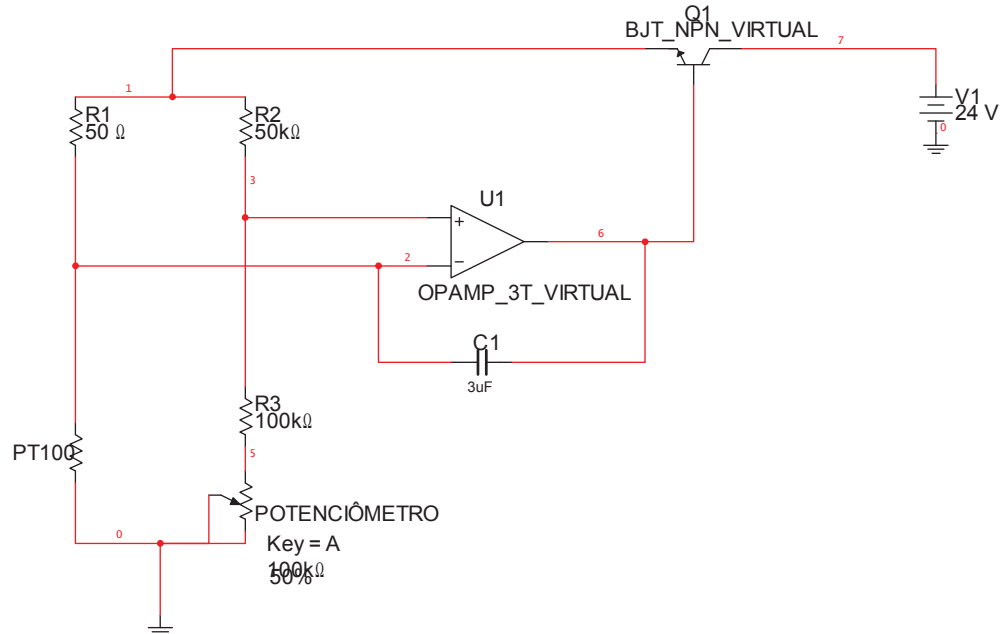


Figura 31: circuito de controle de temperatura do PT-100.

Fonte: o autor.

Através da análise de circuitos já realizada anteriormente, para que a tensão imposta no amplificador operacional seja igual a zero (ponte em equilíbrio), tem-se que:

$$R_{pt-100} = \frac{50 \cdot (R_{potenciômetro} + 100 \cdot 10^3)}{50 \cdot 10^3} \quad [\Omega]$$

Para que a ponte esteja em equilíbrio com o PT-100 à  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_{pt100} = 142,35 \Omega$ ), é necessário ajustar o potenciômetro do circuito para  $142,35 \text{ k}\Omega$ .

No circuito desenvolvido, a tensão de saída da ponte de Wheatstone é amplificada pelo amplificador operacional e enviada para a entrada da fonte, formando, assim, um sistema com retroalimentação. Seu princípio de funcionamento é o seguinte: Quando o circuito é ligado, como a temperatura está abaixo de  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , a resistência do PT-100 está abaixo de  $142,35 \Omega$ . Com isso, a ponte não está em equilíbrio, assim, surge uma diferença de potencial na entrada do amplificador, essa diferença é então amplificada e enviada à entrada da ponte, isso faz circular uma corrente elétrica pelo circuito, inclusive pelo PT-100. A corrente que passa pelo PT-

100 aquece-o por efeito joule e o aumento da temperatura faz com que sua resistência aumente gradativamente. Conforme a resistência do PT-100 se aproxima do valor de  $142,35 \Omega$  a diferença de potencial na entrada do amplificador vai diminuindo e, conseqüentemente, a corrente que passa por ele também diminui. Quando o PT-100 atinge o valor de  $142,35 \Omega$ , ou seja  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , a ponte entra em equilíbrio e não há tensão na entrada do amplificador, assim a corrente cessa. Nota-se que o circuito mantém o PT-100 à  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , pois, caso haja dissipação de calor no mesmo, a sua temperatura tenderá a diminuir e, imediatamente, a ponte entrará em desequilíbrio, fazendo surgir uma tensão no amplificador que fará circular uma corrente que aquecerá o PT-100, mantendo-o a  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Portanto, com esse dispositivo elétrico é possível inserir uma fonte (PT-100) com temperatura constante no interior do isolador e garantir que a mesma estará na temperatura desejada, independente da dissipação de calor que houver.

Assim, é possível, sob condição controlada, verificar a distribuição de temperatura ao longo do tempo, sendo  $t = 0 \text{ s}$  quando a fonte é ligada, ou seja, o regime transitório térmico. Várias informações e parâmetros podem ser obtidos através desse ensaio.

Como visto anteriormente, o cálculo do regime transitório é muito complexo e difícil de ser realizado analiticamente, com isso, a principal informação a ser obtida do ensaio é o tempo de propagação de temperatura, para a obtenção de dados que auxiliem na modelagem transitória. Assim, foi tomada como referência a temperatura de  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ , pois é a temperatura de transição de cor do material termocrômico, com isso, no momento em que a fonte de temperatura é ligada, é possível medir o tempo da propagação da mudança de cor na superfície, em outras palavras, a propagação da temperatura de  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme visto na Figura 32.

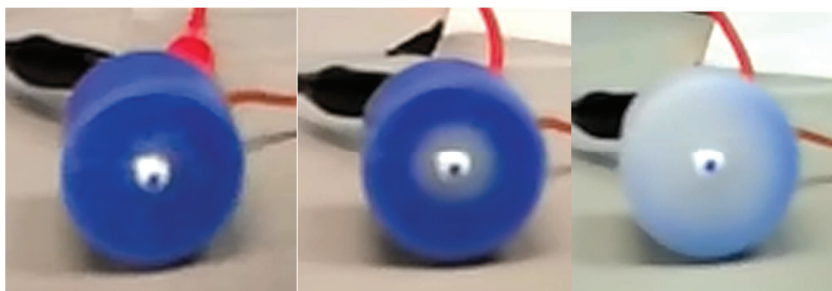


Figura 32: ensaio térmico em corpo de prova.

Fonte: o autor.

O ensaio foi realizado 3 vezes para a obtenção do tempo em que a temperatura de 47 °C atinge a superfície, com temperatura ambiente de 26,7 °C. Foi realizada a medição da temperatura na superfície com termopar e foi verificado que o tempo médio foi de 7 minutos e 54 segundos, ou seja, 474 segundos. Esse tempo será importante para a validação da modelagem matemática do corpo de prova conforme será visto a seguir.

### 3.3.3 Modelagem e simulação computacional

Para a simulação computacional foi utilizado o software *Comsol* que possui o módulo para simulações de transferência de calor. O mesmo utiliza o método de elementos finitos e é capaz de simular fenômenos em regime estacionário e também em regime transitório. Nesse módulo é necessário entrar com os dados dimensionais do objeto sob estudo e com os parâmetros físicos. Tem-se também que determinar quais são as fontes de calor ou de temperatura e, após o processamento, são disponibilizadas as informações sobre as distribuições das temperaturas. Na Figura 33 é possível verificar a interface gráfica com as dimensões do corpo de prova (0,0125 m de raio e 0,015 m de altura).

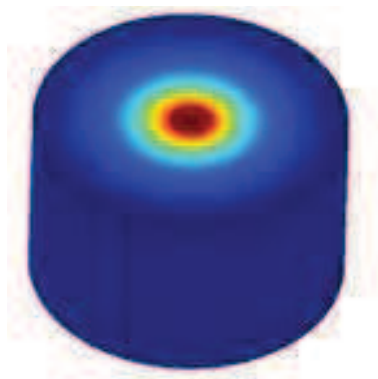


Figura 33: corpo de prova inserido no *software Comsol*.

Fonte: o autor.

Os valores das grandezas físicas do HDPE obtidas da literatura consideradas para a simulação estão descritos na Figura 34 e na tabela 1.

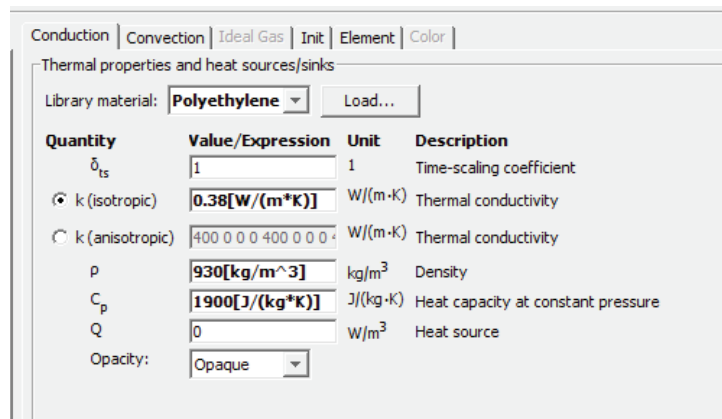


Figura 34: Interface do software Comsol.

Fonte: o autor.

Tabela 1: Grandezas físicas do HDPE.

Grandeza	Valor	Unidade
Densidade ( $\rho$ )	930	$\text{kg/m}^3$
Capacidade térmica ( $c$ )	1900	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
Condutividade térmica ( $k$ )	0,38	$\text{W/m}\cdot\text{K}$

Fonte: o autor.

Outro dado de entrada necessário para a modelagem computacional é o coeficiente de transferência de calor ( $h$ ), contudo, essa grandeza não depende apenas do material, mas também da superfície do objeto, pois a rugosidade da superfície influencia na troca de calor do mesmo com o meio. Devido a esses fatos, essa grandeza é bastante específica para cada tipo de objeto, com isso, não foram encontrados na literatura valores do coeficiente de transferência de calor para o caso sob estudo, mas, como para a simulação computacional essa é a única grandeza que não se tem conhecimento, ou seja, tem-se apenas uma variável na simulação. Para conhecer-se o valor dessa variável, basta comparar os resultados com os ensaios realizados no corpo de prova. Como o valor de  $h$  faz variar o tempo de propagação da temperatura transitória, o procedimento baseou-se em inserir vários valores distintos de  $h$  até que o tempo de propagação da temperatura de

47 °C, até a superfície, atingisse o tempo de 474 segundos. Mesmo valor encontrado no ensaio do corpo de prova.

O valor do coeficiente de transferência de calor inserido no software que mais se aproximou do ensaio foi 21 W/m<sup>2</sup>K. Com esse valor, foi possível obter o perfil de temperaturas através da linha vermelha (eixo “x”) da Figura 35. Os resultados do regime transitório simulado são demonstrados no gráfico da Figura 36.

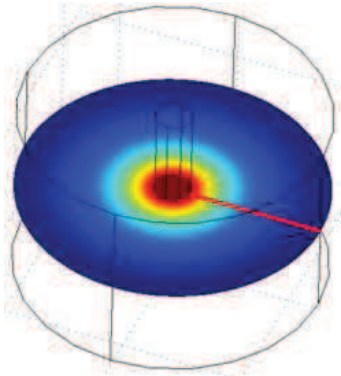


Figura 35: perfil de temperaturas do corpo de prova.

Fonte: o autor.

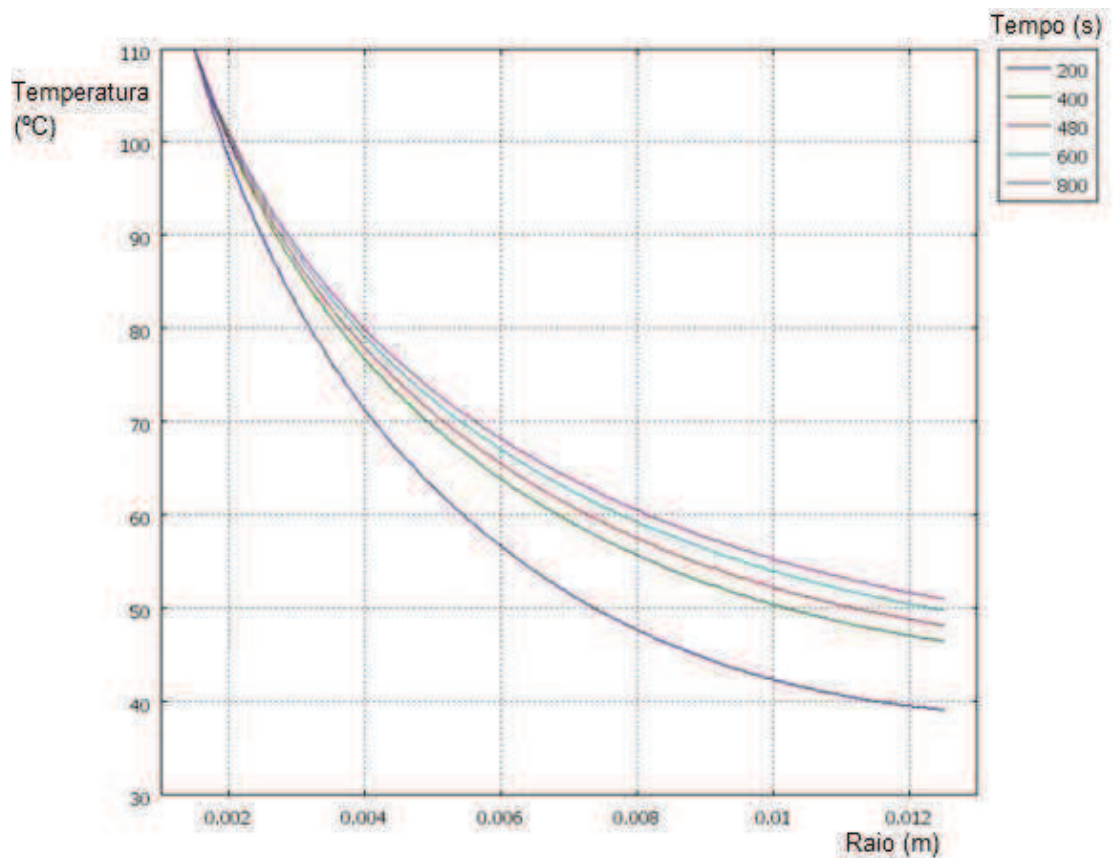


Figura 36: valores de temperaturas do corpo de prova.

Fonte: o autor.

Com o valor de  $h$  de  $21,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  observa-se no gráfico da Figura 36, na direção do raio da amostra, que a temperatura no regime transitório na superfície, onde  $r = 0,0125 \text{ m}$ , se eleva até  $47,00 \text{ }^\circ\text{C}$  em 480 segundos, Esse valor é muito próximo do tempo obtido com o ensaio no corpo de prova (474 s), validando assim o valor de  $h$ . Os valores usados para a simulação estão na tabela 2.

Tabela 2: Grandezas do HDPE utilizadas na simulação.

Grandeza	Valor	Unidade
Densidade ( $\rho$ )	930	$\text{kg/m}^3$
Capacidade térmica ( $c$ )	1900	$\text{J/kg.K}$
Condutividade térmica ( $k$ )	0,38	$\text{W/m.K}$
Coefficiente de transferência de calor ( $h$ )	21,0	$\text{W/m}^2\text{K}$

Fonte: o autor.

### 3.3.4 Modelagem térmica – Método da analogia elétrica

É possível construir um circuito elétrico que possua um comportamento análogo ao comportamento térmico do isolador, no qual a tensão elétrica representa a temperatura. Para que isso seja possível, é necessário fazer a aproximação da forma geométrica do isolador.

Para o estudo através da analogia elétrica do comportamento térmico do isolador, com uma fonte de calor no seu interior, será realizada a mesma aproximação feita para o corpo de prova, ou seja, será assumida a forma cilíndrica.

Como visto, o circuito elétrico análogo ao sistema térmico é composto por vários circuitos RC (resistor- capacitor). Para o cilindro, cada um deles representa termicamente os diversos sólidos formados entre dois raios internos do cilindro. Na Figura 37 é possível visualizar, por exemplo, o sólido formado entre os raios  $r_1$  e  $r_2$ .

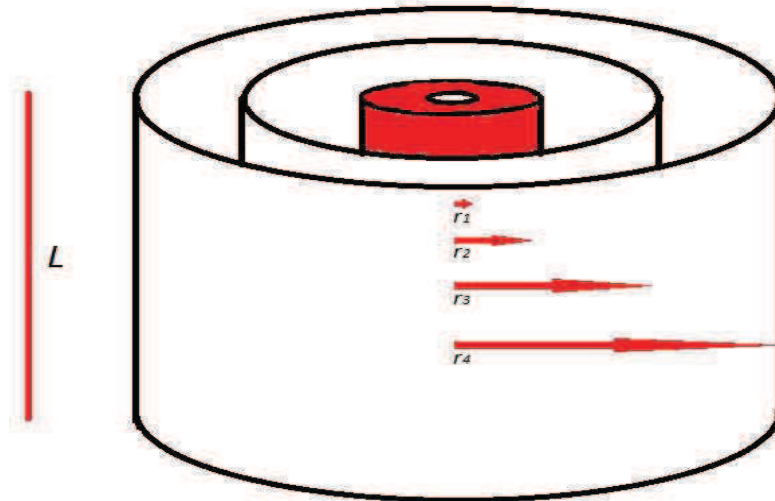


Figura 37: sólido formado no cilindro.

Fonte: o autor.

Para a determinação da resistência térmica do sólido formado entre dois raios quaisquer do cilindro, considerando que o calor se propaga na direção do raio, a partir do centro do cilindro, deve-se considerar, como visto anteriormente, a equação 29 para esse caso:

$$q_r = -Ak \frac{dT}{dr}$$

Considerando que a área é a da superfície do cilindro tem-se que:

$$q_r = -2\pi r L k \frac{dT}{dr}$$

Arranjando a equação:

$$q_r \cdot \frac{dr}{r} = -2\pi L k dT$$

Inserindo os limites de integração, entre os raios  $r_1$  e  $r_2$  a temperatura será  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente, portanto:

$$\int_{r_1}^{r_2} q_r \frac{dr}{r} = -2\pi L k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

Como a taxa de calor  $Q$  é constante na direção de  $r$ , a solução da integral é:

$$q_r \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi Lk(T_1 - T_2)$$

Que pode ser escrita na forma:

$$(T_1 - T_2) = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} q_r \quad (50)$$

A analogia elétrica é realizada considerando a equivalência entre a diferença de temperatura e a diferença de potencial, e também considerando a taxa de calor  $q$  equivalente à corrente elétrica, com isso, verificando a lei de ohm, onde:

$$(V_1 - V_2) = RI$$

Assim, obtém-se a resistência elétrica análoga, para o caso de um cilindro:

$$R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad (51)$$

Analogamente, para o cilindro da Figura 37, as resistências térmicas, podem ser modeladas conforme a Figura 38, onde:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad ; \quad R_2 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi Lk} \quad \text{e} \quad R_3 = \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi Lk}$$

As tensões  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  da Figura 38 correspondem às temperaturas nos pontos distantes do centro do cilindro, conforme os respectivos raios.

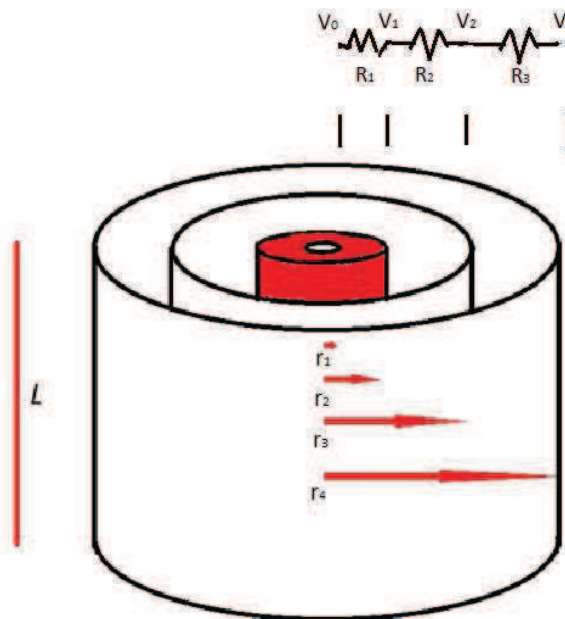


Figura 38: analogia térmica-elétrica.

Fonte: o autor.

Conforme descrito anteriormente, a modelagem com analogia elétrica utilizando somente resistências é apropriada somente para regime permanente. Para obter informações sob o regime transitório, é necessária a utilização do modelo RC (resistor – capacitor). Portanto, é necessário obter o capacitor equivalente do sistema térmico.

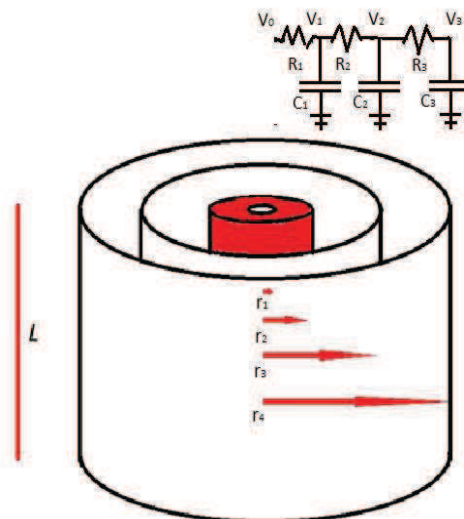


Figura 39: analogia térmica-elétrica com circuito RC.

Fonte: o autor.

Já foi visto que a grandeza capacidade térmica é equivalente à capacitância elétrica, logo, observando a Figura 39, onde há o modelo RC equivalente, verifica-se

que é necessário calcular a capacidade térmica para cada volume de cilindro, determinados pelas distâncias dos raios.

A capacidade térmica, conforme a equação 39 vista anteriormente, é:

$$C_t = \frac{dQ_t}{dT}$$

sabe-se que:

$$dQ_t = m.c.dT \quad (52)$$

Onde  $m$  é a massa [kg] e  $c$  é o calor específico [J/Kg.K]

Substituindo a equação 52 na equação 39 tem-se que:

$$C_t = m.c \quad (53)$$

Mas a massa pode ser escrita como sendo:

$$m = \rho.v \quad (54)$$

Onde  $\rho$  é a densidade volumétrica [kg/m<sup>3</sup>] e  $v$  é o volume [m<sup>3</sup>].

Assim, substituindo 54 em 53, tem-se:

$$C_t = c.\rho.v \quad (55)$$

Para o cilindro da Figura 39, o volume compreendido entre os raios 1 e 2, é dado pelo volume do cilindro formado pelo raio 2 subtraindo o volume do cilindro determinado pelo raio 1.

Assim, o volume 1, correspondente à capacidade térmica 1 do circuito elétrico equivalente será:

$$v_1 = v_{cil2} - v_{cil1} \quad (56)$$

Como o volume do cilindro é dado por:

$$v_{cil} = L\pi r^2 \quad (57)$$

Substituindo 57 em 56:

$$v_1 = L\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (58)$$

Substituindo 58 em 55:

$$C_1 = cpL\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (59)$$

Por analogia, encontra-se  $C_2$  e  $C_3$ :

$$C_2 = cpL\pi(r_3^2 - r_2^2) \quad \text{e} \quad C_3 = cpL\pi(r_4^2 - r_3^2)$$

Como o calor que chega na superfície do cilindro é dissipado no ar, é necessário ainda inserir uma última resistência na modelagem elétrica, que represente a dissipação do calor, caso contrário, para um tempo infinito, a modelagem nos forneceria a informação de que todo o cilindro atingiria a temperatura da fonte, pois para o circuito elétrico descrito até aqui, a tensão em cada capacitor, que representa a temperatura em cada nó, atingiria o valor da tensão  $V_0$  após um certo tempo. Isso aconteceria de fato, caso a superfície do isolador não dissipasse calor, ou seja, se fosse isolada termicamente.

A dissipação de calor pela superfície de um corpo é dada por:

$$Q = hA\Delta T \quad [\text{W}] \quad (60)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de transmissão térmica [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ]. Como  $Q$  é análogo à corrente elétrica e  $\Delta T$  à tensão elétrica, a resistência térmica de dissipação que é equivalente à resistência elétrica é dada por:

$$R_{diss} = \frac{1}{hA} \quad [\text{KW}^{-1}] \quad (61)$$

Assim, para o cilindro da Figura 39 substituindo a área do cilindro na equação 61, tem-se:

$$R_{diss} = \frac{1}{h2\pi(r_4.L + r_4^2)} \quad (62)$$

Agora é possível criar um circuito elétrico equivalente para um cilindro com uma fonte de calor no centro, capaz de armazenar energia térmica e que dissipa calor para o ambiente.

O circuito elétrico equivalente para o cilindro da Figura 39 está mostrado na Figura 40:

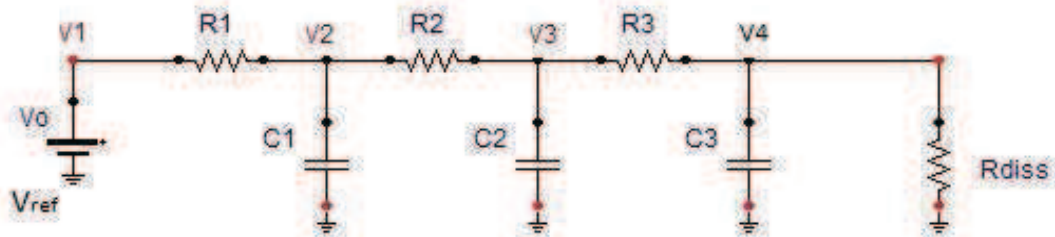


Figura 40: circuito elétrico análogo ao térmico da Figura 39.

Fonte: o autor.

No circuito elétrico da Figura 40, as tensões  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$  representam as temperaturas nas distâncias correspondentes aos raios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  e  $r_4$ .

Fica evidente que quanto maior for o número de circuitos RC's mais refinados serão os resultados obtidos para a distribuição das temperaturas.

Ao aplicar essa metodologia para o corpo de prova, mas discretizando o cilindro ensaiado para a obtenção de 10 valores de raios, mostrados na tabela 3, tem-se :

Tabela 3: raios utilizados para modelagem térmica com analogia elétrica.

Raios (m)									
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0,0	0,0015	0,002875	0,00425	0,005625	0,0070	0,008375	0,00975	0,011125	0,0125

Fonte: o autor.

Com esses valores de raios, juntamente com as grandezas físicas térmicas descritas na tabela 2 e as equações obtidas na analogia elétrica, foi possível discretizar o cilindro em oito circuitos RC. Os valores encontrados estão na tabela 4:

Tabela 4: resistores e capacitores calculados na modelagem térmica com analogia elétrica.

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7	RC8
Resistência elétrica ( $\Omega$ )	18,166	10,914	7,827	6,106	5,008	4,245	3,684	3,254
Capacitância elétrica (F)	0,501	0,816	1,131	1,445	1,760	2,075	2,390	2,705

Fonte: o autor.

Para compor o circuito elétrico análogo, mostrado na Figura 40, foi utilizada uma tensão de 110 V, que representa a fonte de calor de 110 °C no interior do cilindro, e uma tensão de 26,7 V, que representa a temperatura ambiente. Para a resistência de dissipação, que representa a dissipação térmica no ambiente externo, foi utilizado o valor de 22,047  $\Omega$ , pois esse foi o valor obtido através da aplicação da equação 62, deduzida nesse trabalho.

Para estudar o comportamento transitório do circuito elétrico análogo foi utilizado o *software ATP*, que atualmente é gratuito. O circuito inserido no *software*, com os valores de resistências, capacitâncias e tensões descritos anteriormente, estão demonstrados na Figura 41.

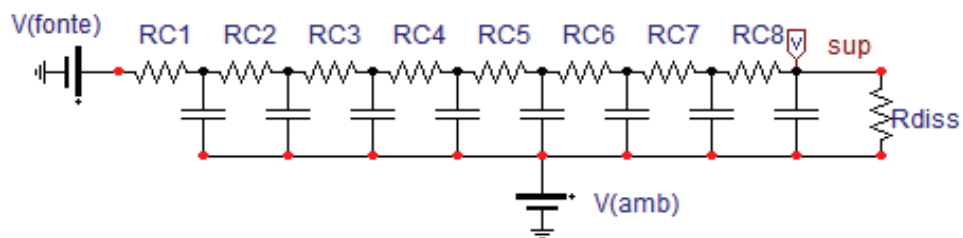


Figura 41: circuito elétrico análogo inserido no software ATP.

Fonte: o autor.

A tensão obtida ao longo do tempo no ponto equivalente à superfície do cilindro, ou seja, a tensão no resistor  $R_{diss}$ , está demonstrada no gráfico da Figura 42.

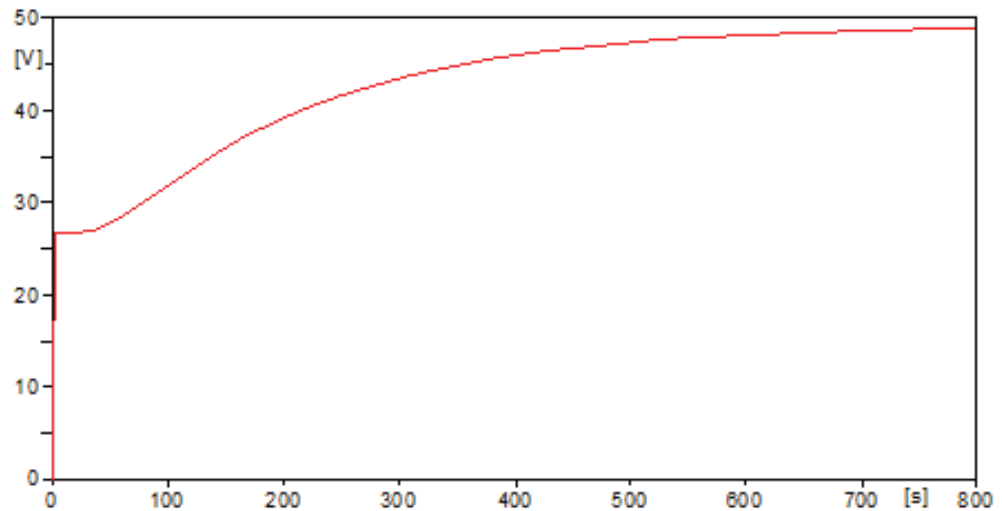


Figura 42: tensão no resistor  $R_{diss}$  (análogo à superfície do cilindro).

Fonte: o autor.

Percebe-se ao analisar a Figura 42 que a temperatura na superfície do cilindro se eleva de 26,7 °C (26,7 V) até 49,0 °C (49,0 V).

No instante  $t = 480$  s, o valor é de 47,0 °C (47,0 V). Ao analisar os resultados obtidos pela simulação computacional, feita através do *software Consol*, verifica-se que na superfície ( $x = 0,0125$  m na Figura 36), os resultados são muito semelhantes ao do gráfico da figura 42. Ao analisar todos os instantes, conclui-se que há divergência de no máximo 2 °C.

### 3.3.5 Simulação Computacional do isolador

Após os ensaios e análises realizadas no corpo de prova, é possível aplicar os parâmetros físicos obtidos para a realização da simulação computacional em um isolador e, assim, espera-se que os resultados sejam mais confiáveis. Para a simulação foi utilizado o *software Comsol*, no qual foi inserido o isolador, conforme dimensões exigidas em norma. Na Figura 43 está ilustrada a geometria do mesmo.

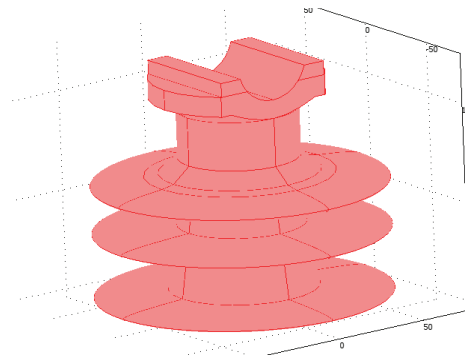


Figura 43: geometria do isolador inserida no *software Comsol*.

Fonte: o autor.

Na modelagem do isolador foi inserida uma fonte de calor para simular um defeito no mesmo. Em uma situação real a fonte de calor (corrente elétrica devida à falha ou defeito) pode ocorrer no interior do isolador, e a pior situação para a detecção da avaria (através do termocromismo) seria quando a corrente ocorresse no interior, bem ao centro, devido à maior distância da superfície. Isso se deve ao fato de que para que a mudança de cor seja percebida visualmente, é necessário que a temperatura no interior se propague até a superfície do isolador, para que a mudança de cor ocorresse também na superfície, caso contrário, não seria possível visualizar a mudança de cor, pois não seria possível visualizar o interior do material, uma vez que o mesmo é opaco. Portanto, é necessário estudar se, na pior condição de uma situação real, a temperatura se propagaria do interior até a superfície do isolador a ser desenvolvido e, devido a isso, a fonte inserida na simulação se encontra bem no centro do isolador, conforme a Figura 44 e 45.

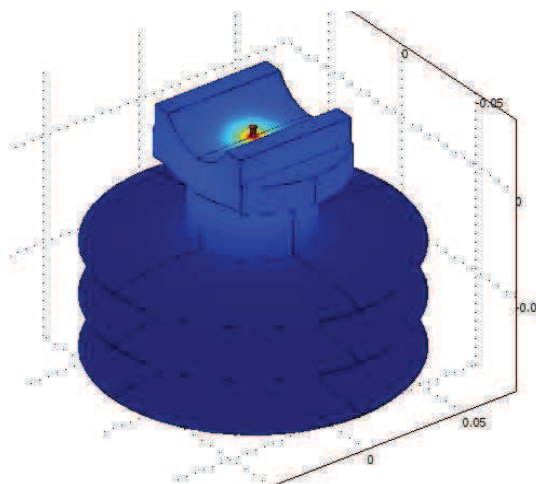


Figura 44: Isolador com fonte de calor no centro.

Fonte: o autor.

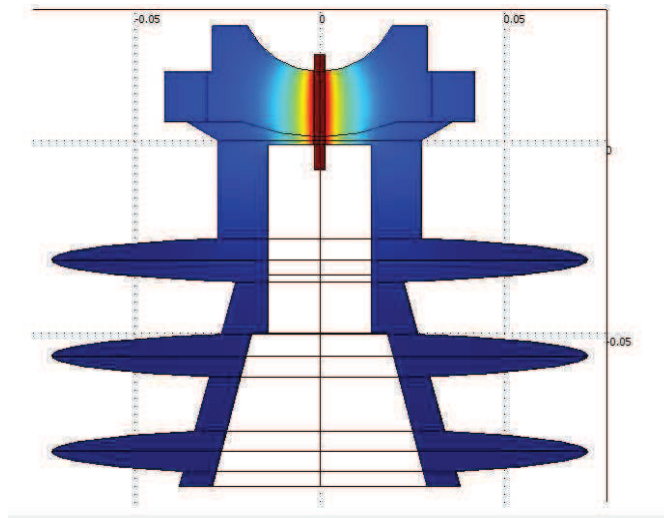


Figura 45: Isolador com fonte de calor no centro (vista de corte).

Fonte: o autor.

A fonte inserida na simulação possui as mesmas dimensões do PT-100 utilizado nos ensaios do corpo de prova. O objetivo é realizar ensaios utilizando o mesmo dispositivo utilizado no corpo de prova, assim, os dados da simulação podem ser confrontados com os dos ensaios no isolador.

A simulação foi realizada com a fonte de calor na temperatura constante de 110 °C e a temperatura ambiente de 26,7 °C. Os resultados da simulação podem ser vistos na Figura 47, no qual cada curva representa a distribuição de temperatura a cada 500 segundos, da linha vermelha ilustrada no gráfico da Figura 46.

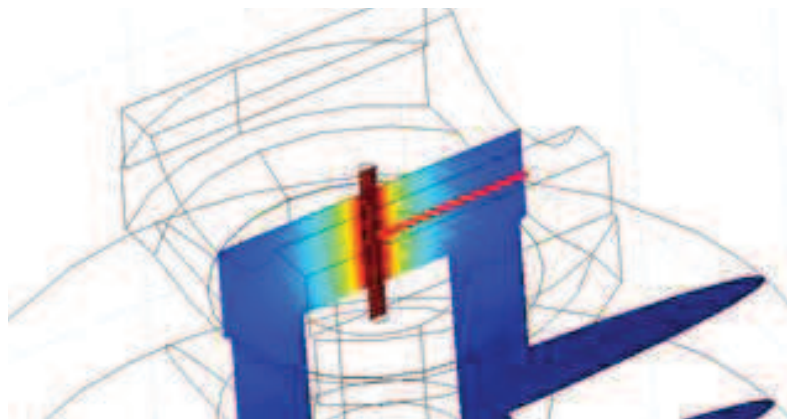


Figura 46: simulação em isolador com fonte ao centro.

Fonte: o autor.

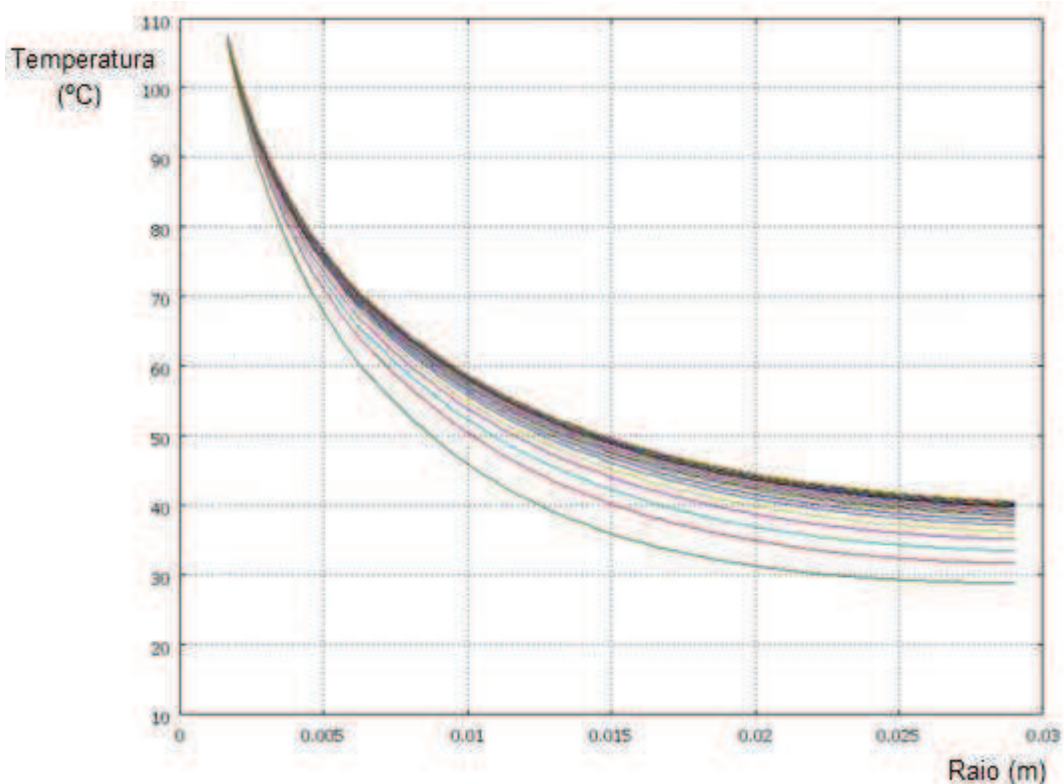


Figura 47: resultados da simulação no isolador. Cada curva representa um período de 500 s.

Fonte: o autor.

A simulação foi realizada do instante  $t = 0$  s até  $t = 20000$  s, ou seja, durante aproximadamente 6 horas após o início da inserção da temperatura de  $110\text{ °C}$  pela fonte no centro. Na Figura 47 percebe-se que em regime permanente (após estabilização) a temperatura na superfície é próxima de  $40\text{ °C}$ . Esse resultado indica que não será possível verificar a mudança de cor do isolador, pois a mudança somente ocorre a  $46\text{ °C}$  e essa temperatura é atingida somente no interior do isolador ( $x = 0,0157$  m), contudo, o interior do material, por ser opaco, dificulta a visualização da alteração de cor.

Como a simulação indicou um resultado insatisfatório para a aplicação do material termocrômico e também devido ao fato de já ter sido desenvolvido um dispositivo para a aplicação de temperatura constante, utilizado no corpo de prova, foi realizado um ensaio para a comprovação dos resultados obtidos na simulação.

### 3.3.6 Ensaio térmico em isolador

Para a realização do ensaio foi confeccionado um isolador polimérico com material termocromico, com a mesma composição do corpo de prova. Após a fonte

submeter 110 °C no seu centro, foi observada a mudança de cor do mesmo. Após 90 minutos de ensaio, foi verificado que a temperatura na superfície se estabilizou em 38,2 °C. Comprovando os resultados obtidos na simulação, ou seja, o isolador não mudou de cor na sua superfície, pois, para isso, necessitaria de no mínimo 46,0 °C, e não 38,2 °C. O resultado pode ser visto na Figura 48.

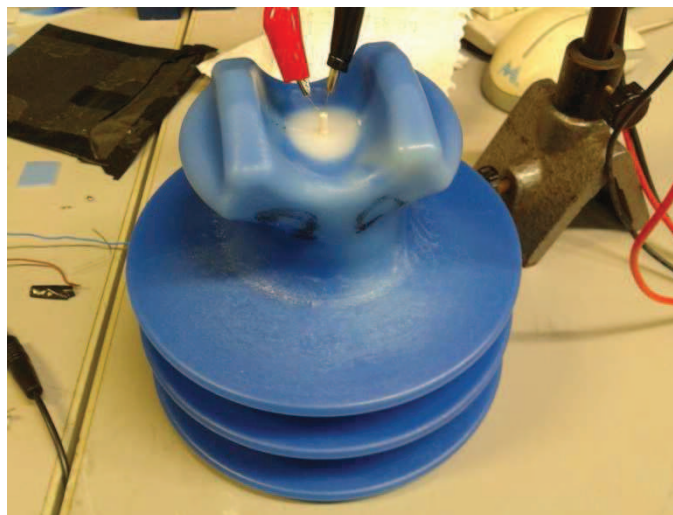


Figura 48: ensaio térmico após 90 minutos com 110 °C no centro.

Fonte: o autor.

Com os resultados obtidos foi evidenciada a necessidade de encontrar alternativas para a funcionalidade crômica do isolador. A propriedade termocrômica ainda é a mais atraente devido ao baixo custo. Após discussões e análises, foram levantadas algumas alternativas para a solução do problema, para que fosse possível a aplicação da propriedade termocrômica, as quais estão expostas a seguir.

### **3.4 Estudo de alternativas para aplicação termocrômica**

Diversas hipóteses foram levantadas para a solução do problema, contudo, duas se destacaram, pois mantêm, em princípio, as características de isolamento do equipamento e são soluções de baixo custo, que é uma característica fundamental para os isoladores poliméricos. Uma das alternativas propostas tem como foco o pino de fixação do isolador.

A corrente de falha obrigatoriamente deve passar pelo pino, pois é o único caminho possível, com isso, o mesmo também se aquecerá devido ao efeito joule. A

figura 49 ilustra um arranjo típico de montagem do isolador com pino com um defeito do centro do isolador.

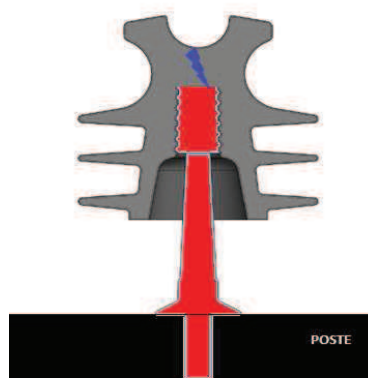


Figura 49: isolador com pino.

Fonte: o autor.

O pino deve atender requisitos mecânicos e não de isolamento, pois essa função é exercida pelo isolador, assim, existem materiais diversos usados para a sua confecção, pode-se destacar aqueles feitos de metal (material condutor) e os poliméricos (material isolante).

Para a utilização da propriedade termocrômica nos pinos seria interessante uma forma que pudesse ser aplicada em qualquer tipo de material, assim surgiu a idéia de se utilizar uma tinta termocrômica nos pinos. Após busca foi encontrada a tinta termocrômica fornecida pela empresa Colour Therm Ltda. A tinta possui temperatura de transição de 60 °C, quando passa da cor vermelha clara para a roxa.

A tinta foi aplicada em dois pinos, feitos de material polimérico e de metal. Após isso, os mesmos foram instalados nos isoladores.

Para o tipo polimérico, como o objetivo é verificar se a corrente de falha aquece suficientemente o pino, para mudança de cor, foi realizado um ensaio prévio para constatar se o mesmo propagaria a temperatura até a sua superfície. Para isso, foi introduzido um resistor no interior do pino e, assim, foi possível obter uma fonte de calor no seu interior. A fonte de calor foi ligada e foi aumentada lentamente a sua potência. Foi verificado que o pino entrou em processo de fusão (presença de fumaça e odor característico) sem ocorrer a mudança efetiva de cor, descartando assim a possibilidade de aplicação da propriedade termocrômica para essa configuração. Na Figura 50 é possível verificar o pino com a tinta aplicada antes e durante o ensaio. No ensaio do pino metálico, após a aplicação da tinta termocrômica, o mesmo foi instalado em condições reais de operação. Foi simulada

uma falha no isolador, ligando-se a parte entre o cabo condutor e o pino, para que circulasse uma corrente de falha através do pino metálico. Os resultados demonstraram que após uma hora a temperatura se estabilizou em torno de 30 °C e a tinta ainda não havia mudado de cor, invalidando também essa configuração para a aplicação do material termocrômico. A Figura 51 ilustra o ensaio realizado.



Figura 50: ensaio térmico em pino polimérico.

Fonte: o autor.

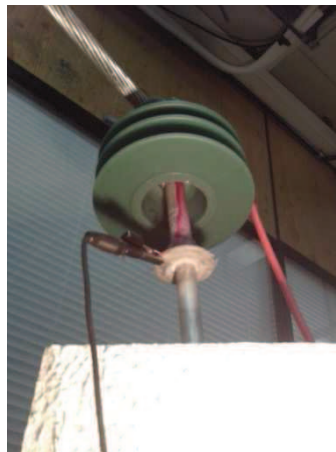


Figura 51: ensaio térmico em pino metálico.

Fonte: o autor.

A segunda alternativa escolhida para ensaios e verificação da possibilidade do uso da propriedade termocrômica nos isoladores consiste em adicionar um material resistivo na interface entre o isolador e o pino. A Figura 52 ilustra a montagem de um isolador com a inserção de um material entre o pino e o isolador.

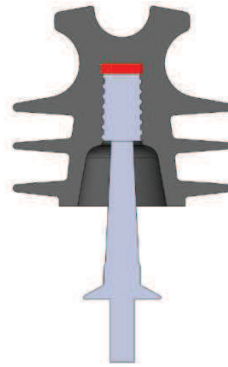


Figura 52: material inserido entre o isolador e o pino (em vermelho).

Fonte: o autor.

Assim, com uma resistividade maior do que a do isolador (em condição de falha), a energia dissipada por efeito joule deve ser maior no material, visto que, no circuito elétrico equivalente, o mesmo está em série com o isolador. O efeito joule depende da resistência e da corrente, como a corrente é a mesma, para o circuito série, o elemento que possuir maior resistência terá maior energia dissipada. Com isso, o material se tornaria uma fonte de temperatura e, como suas dimensões são maiores, a mesma poderia se propagar gerando um valor maior de temperatura na superfície do que na condição normal (sem material), pois a distância da fonte de temperatura até a superfície do isolador seria menor, conforme as distâncias  $d_1$  e  $d_2$  da Figura 53.

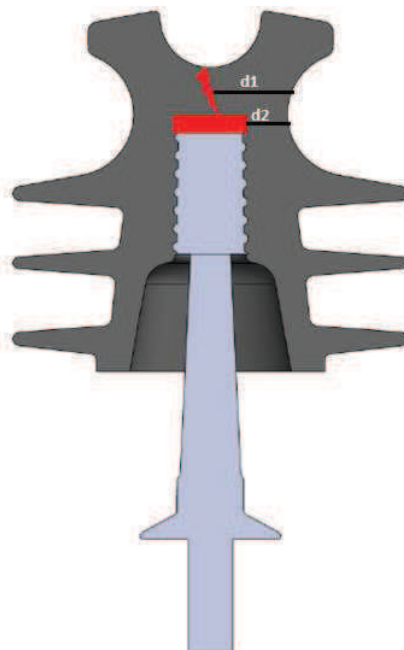


Figura 53: distancia do material até a superfície do solador.

Fonte: o autor.

Para a verificação da eficácia dessa possível solução foram realizadas simulações computacionais, considerando que o material atingiria 110 °C. Após as simulações, foram realizados ensaios em laboratório. Foi considerado um disco de um centímetro de espessura como sendo o material. Os resultados da simulação podem ser verificados na Figura 54 e 55. Na Figura 55 são apresentadas as distribuições de temperatura ao longo do isolador (ao longo da linha preta da Figura 54).

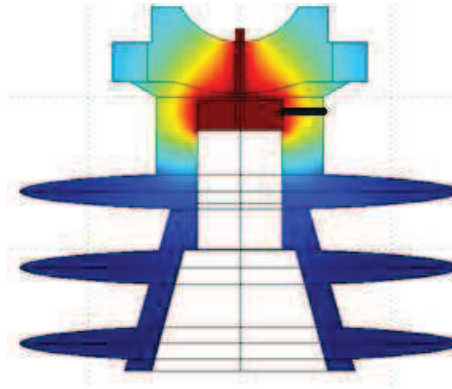


Figura 54: perfil de temperaturas no isolador com material em seu interior.

Fonte: o autor.

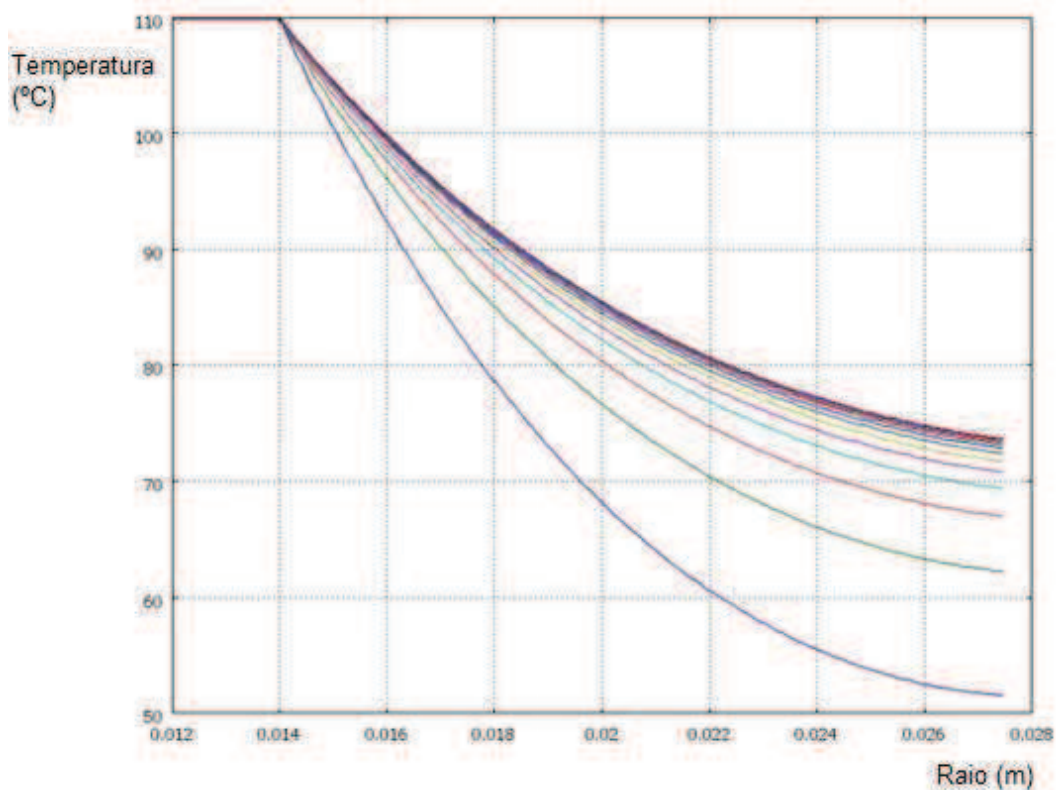


Figura 55: valores de temperaturas no isolador com material em seu interior. As curvas representam a distribuição de temperatura a cada 500 segundos.

Fonte: o autor.

Ao analisar o gráfico da Figura 55, verifica-se que a temperatura na superfície do isolador se estabiliza em torno de 73 °C. A simulação foi realizada para instantes de tempo a cada 500 segundos, representada por cada curva da Figura 55, de baixo para cima.

Percebe-se que a temperatura de 48 °C, necessária para a mudança de cor na superfície do isolador, é atingida antes de 500 segundos, ou seja, antes de 10 minutos, na simulação. Assim, esse resultado supõe que é possível aplicar essa solução, contudo, ensaios em laboratório devem confirmar essa suposição, conforme descrito a seguir.

Para a realização dos ensaios em laboratório foi inserida entre o pino e o isolador uma pastilha retirada de um resistor composto por carbono. Com isso foi possível estudar qualitativamente o fenômeno.

Após aproximadamente 13 minutos a superfície do isolador atingiu 46°C, alterando a cor do mesmo nessa região. Na Figura 56 estão ilustrados os isoladores com 13 minutos e 19 minutos após o início do ensaio.



Figura 56: ensaio térmico em isolador inteligente (à esquerda após 13 minutos e à direita após 19 minutos)

Fonte: o autor.

Os resultados demonstraram que é possível aplicar a propriedade termocrômica nessa condição de operação, com isso, o material a ser inserido no interior do isolador como alternativa proposta foi analisada com maior profundidade, conforme a seguir.

### 3.5 Confeção da pastilha interna

O material a ser utilizado na pastilha interna do isolador deve possuir algumas características básicas para a aplicação proposta, entre elas:

- Baixo custo;
- Capacidade elevada de absorção de energia;
- Alta resistência mecânica.

Aumentar o custo dos isoladores poliméricos para que se possa diminuir o problema da detecção de falhas e defeitos nos mesmos, seria incoerente, pois, nesse caso, os de porcelana ou vidro, que já possuem métodos mais desenvolvidos de detecção de falhas, seriam mais viáveis economicamente.

A capacidade de absorção de energia é um requisito técnico importante, pois a corrente de falha que atravessará o material deverá gerar calor e o mesmo não poderá danificar o material.

A Alta resistência mecânica é necessária, pois a pastilha deverá situar-se entre o pino e o isolador, portanto, estará sujeita a esforços mecânicos consideráveis devido às vibrações e à compressão devida ao peso do cabo condutor.

Após a análise dessas premissas optou-se pela utilização de um material já utilizado em sistemas elétricos, justamente por possuir essas características, trata-se das pastilhas de óxido de zinco utilizadas em pára-raios, conforme visto na Figura 57.



Figura 57: pastilhas de óxido de zinco utilizadas em pára-raios.

Fonte: o autor.

As pastilhas de óxido de zinco são utilizadas em pára raios, devido ao fato de se comportarem como varistores, ou seja, sua resistência elétrica varia com a tensão, assim, em regime normal de operação do sistema elétrico, o pára raios possui alta impedância elétrica e, quando há uma descarga elétrica, que faz a tensão se elevar, o pára raios diminui sua resistência para que essa energia seja drenada do sistema para a terra através do circuito elétrico em paralelo. Nessa condição há uma corrente que flui através das pastilhas e, por isso, as mesmas devem possuir a capacidade de suportar a energia térmica gerada pelo efeito joule. Outra consideração importante é que, como se trata de um material largamente utilizado em sistemas elétricos, o seu custo de fabricação já está bastante reduzido e, também, possui uma resistência mecânica suficiente para a aplicação no isolador polimérico inteligente, contudo, são necessários alguns ensaios para verificar se suas características proporcionarão a função termocrômica ao isolador. Para isso, uma pastilha de óxido de zinco foi usinada para que fosse possível encaixá-la no interior do isolador, conforme ilustrado na Figura 58.



Figura 58: pastilhas de óxido de zinco usinada para encaixe no interior do isolador polimérico termocrômico.

Fonte: o autor.

Como as dimensões da pastilha foram alteradas, suas características elétricas foram medidas para o levantamento das curvas de tensão versus corrente, pois, assim, é possível analisar se, em condição de falha, a corrente que atravessará a pastilha será suficiente para aquecer a mesma, devido ao efeito joule. Durante o ensaio, a tensão foi elevada a cada 0,1 kV, e foi anotada o valor da corrente que circulou pela pastilha. Os valores encontrados estão dispostos na tabela 5 e ilustrados no gráfico da Figura 59.

Tabela 5: valores de corrente e tensão obtidos no ensaio.

Tensão (kV)	Corrente (mA)
0,3	0,1
0,4	0,2
0,5	0,7
0,6	1,6
0,7	3,8
0,8	6,3
0,9	9,2
1,0	14,8

Fonte: o autor.

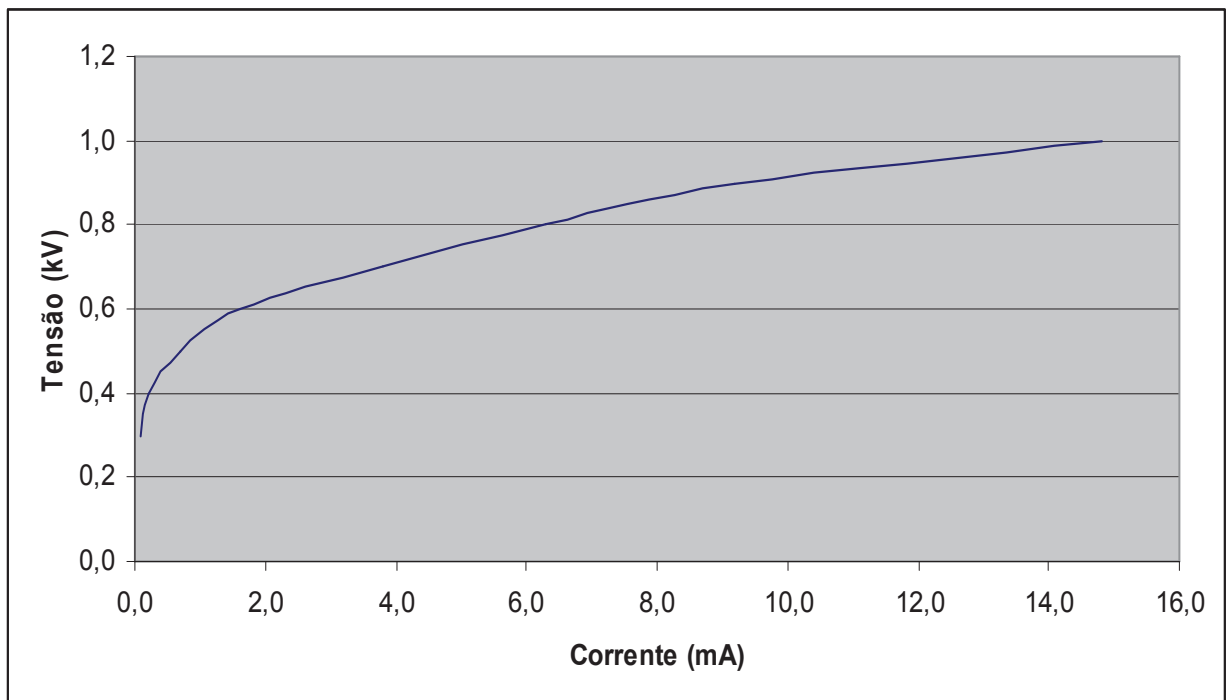


Figura 59: Gráfico de corrente x tensão obtidos no ensaio

Fonte: o autor.

Verifica-se através dos dados obtidos no ensaio que a partir de 0,6 kV a corrente se eleva rapidamente e, conseqüentemente, espera-se que a temperatura da pastilha também, devido ao efeito joule.

Após a confecção da pastilha, a mesma foi inserida no interior do isolador e foi aplicada pasta térmica para otimizar a transferência de calor entre a superfície da pastilha e a superfície interna do isolador, conforme ilustrado na Figura 60.



Figura 60: pastilhas de óxido de zinco inserida no interior do isolador polimérico.

Fonte: o autor.

Com a pastilha montada no isolador, foram realizados ensaios para a verificação da funcionalidade termocrômica do conjunto. No arranjo de ensaio foi utilizada uma fonte de corrente para que fosse possível inserir um valor constante de corrente e, assim, levantar os dados relevantes do ensaio para cada valor. Foi utilizado um termômetro tipo termovisor para o monitoramento da temperatura da superfície do isolador, além da verificação visual, pois se sabe que a superfície do isolador muda de cor quando atinge 46 °C.

Procedimento de ensaio: ao ligar a fonte, para iniciar o ensaio, foram registradas a corrente, a tensão, a temperatura da superfície do isolador a cada cinco minutos, o tempo para a superfície alcançar 46 °C (mudança de cor) e, após a mudança de cor, a fonte foi desligada para registrar o tempo para a superfície voltar abaixo de 46 °C. As Figuras de 61 a 63 ilustram algumas etapas realizadas no ensaio.



Figura 61: arranjo de ensaio em isolador com pastilha interna.

Fonte: o autor.

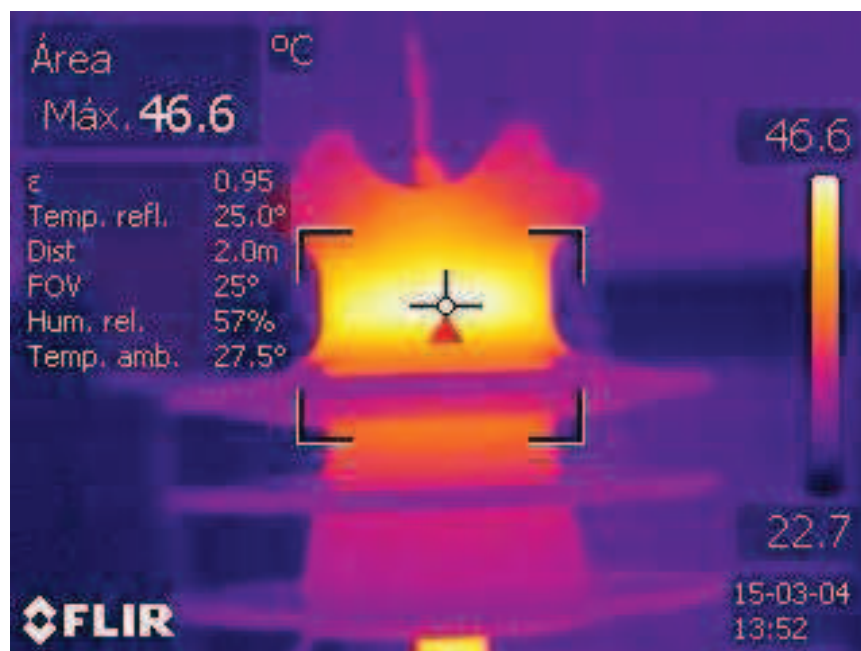


Figura 62: fotografia do termômetro termovisor com superfície do isolador a 46,6 °C.

Fonte: o autor.



Figura 63: imagem do isolador com superfície a 46,6 °C.

Fonte: o autor.

É importante ressaltar que não existem na literatura estudos que indiquem a magnitude da corrente elétrica de defeito em isoladores poliméricos, principalmente em defeitos que ocorrem no interior dos mesmos. Contudo, sabe-se que em condições normais os isoladores possuem uma corrente de fuga na ordem de  $\mu\text{A}$ , com isso, uma corrente mil vezes maior que essa caracterizaria uma falha e não seria suficiente para atuar o sistema de proteção da rede elétrica. Portanto, para a realização dos ensaios foram utilizados valores de corrente de 15 mA, 20 mA e 30 mA através do isolador, simulando uma corrente de defeito. Os valores obtidos para as grandezas elétricas estão expostos na tabela 06:

Tabela 6: valores das grandezas elétricas obtidas durante ensaio.

Corrente (mA)	Tensão (V)	Potência (W)
15	540	8,1
20	585	11,7
30	625	18,7

Fonte: o autor.

Os valores da temperatura da superfície foram monitorados e registrados a cada cinco minutos, para cada valor de corrente. Os resultados estão ilustrados no gráfico da Figura 64. O tempo para a mudança de cor na superfície do isolador, ou

seja, o tempo para que a superfície atingisse 46 °C, para cada valor de corrente está descrito na tabela 7 e ilustrado na Figura 65.

Tabela 7: tempo para mudança de cor para cada valor de corrente de defeito.

Corrente (mA)	Tempo para atingir 46 °C (min)
15	40
20	24
30	13

Fonte: o autor.

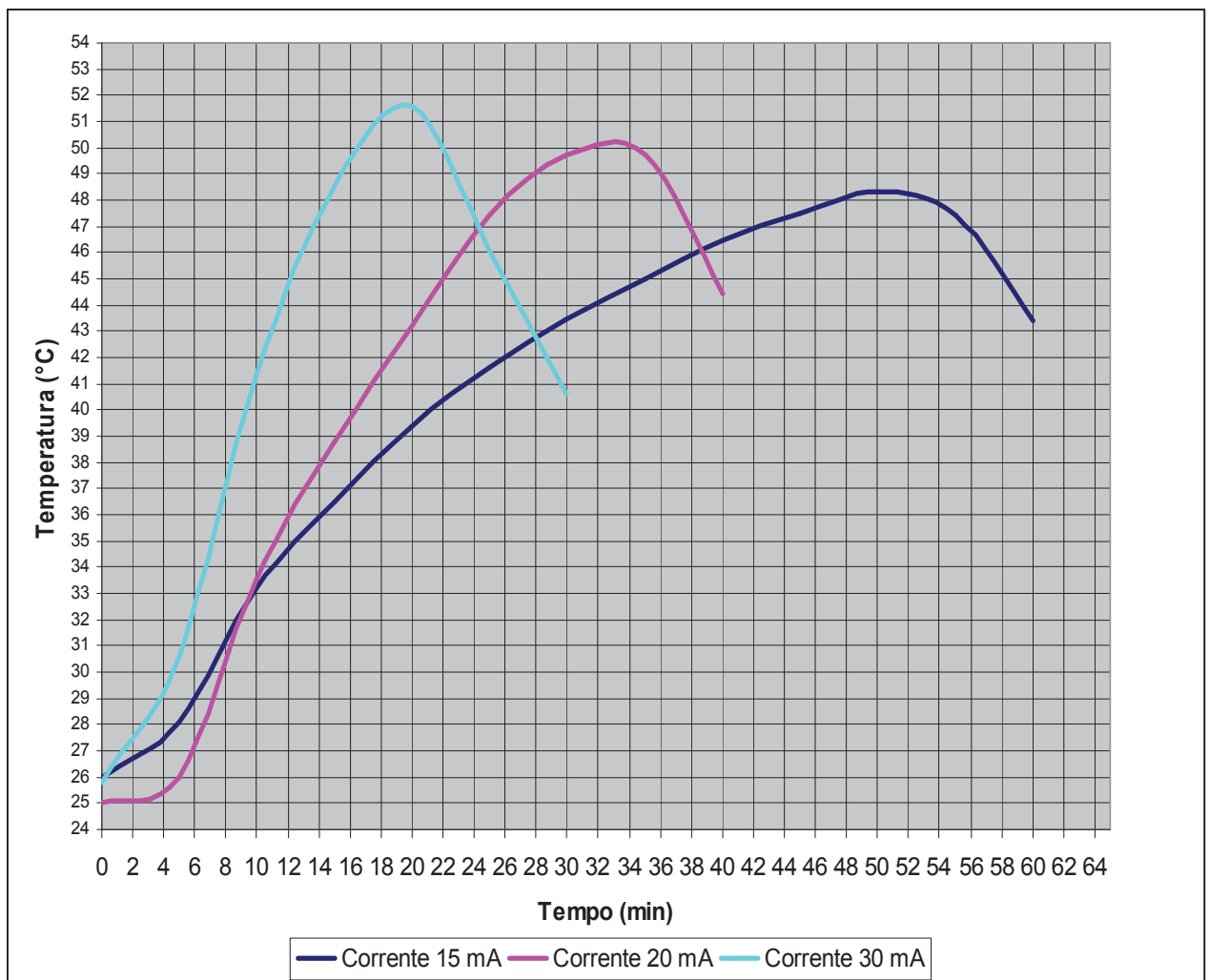


Figura 64: temperatura da superfície do isolador em função do tempo.

Fonte: o autor.

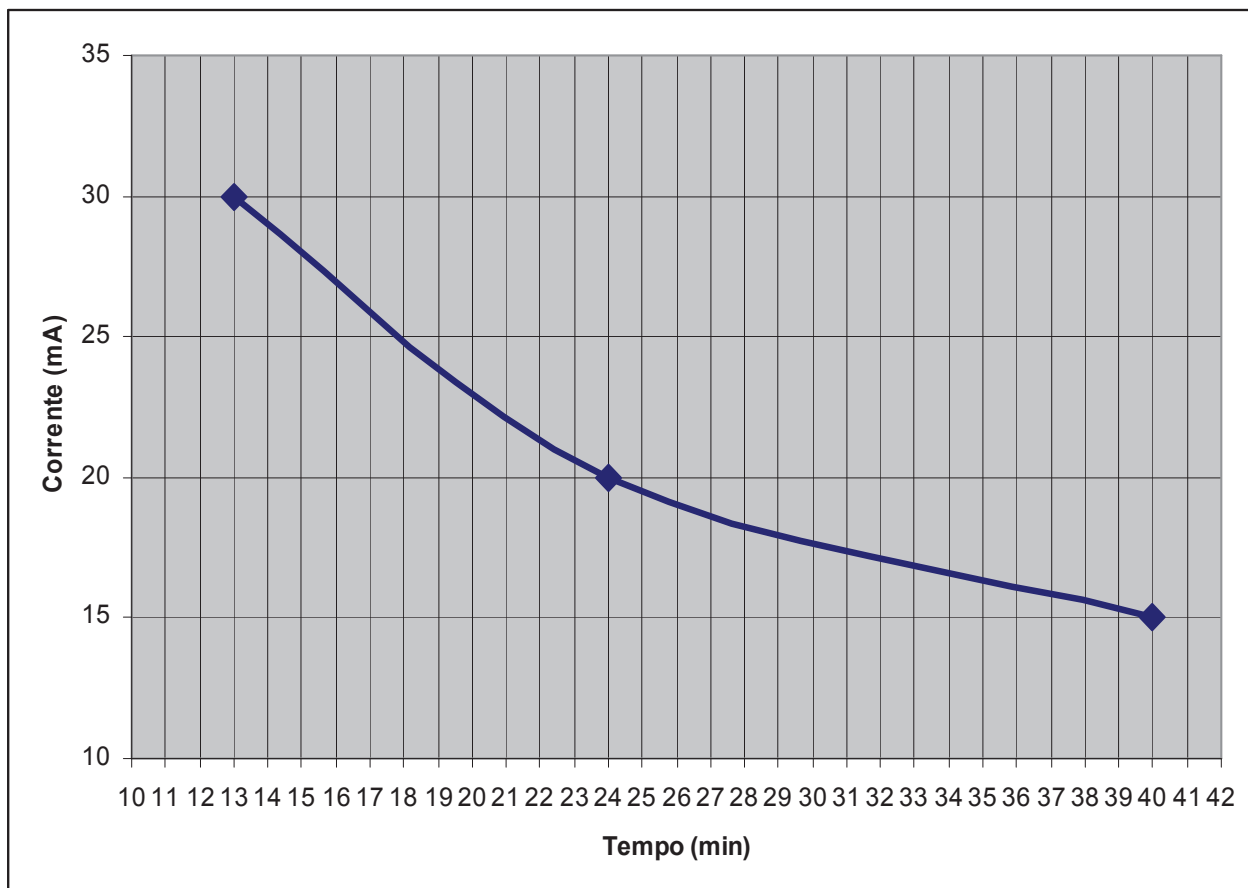


Figura 65: tempo para mudança de cor, para cada valor de corrente de defeito.

Fonte: o autor.

Após a superfície atingir 46 °C (transição de cor) a fonte de corrente foi desligada e assim foi possível registrar o tempo para a superfície retornar abaixo de 46 °C (transição de cor). Os valores de tempo registrados estão ilustrados na tabela 8 e ilustrados no gráfico da Figura 66.

Tabela 8: tempo para retorno de cor, para cada valor de corrente de defeito.

Corrente (mA)	Tempo para voltar abaixo de 46 °C (min)
15	19
20	16
30	12

Fonte: o autor.

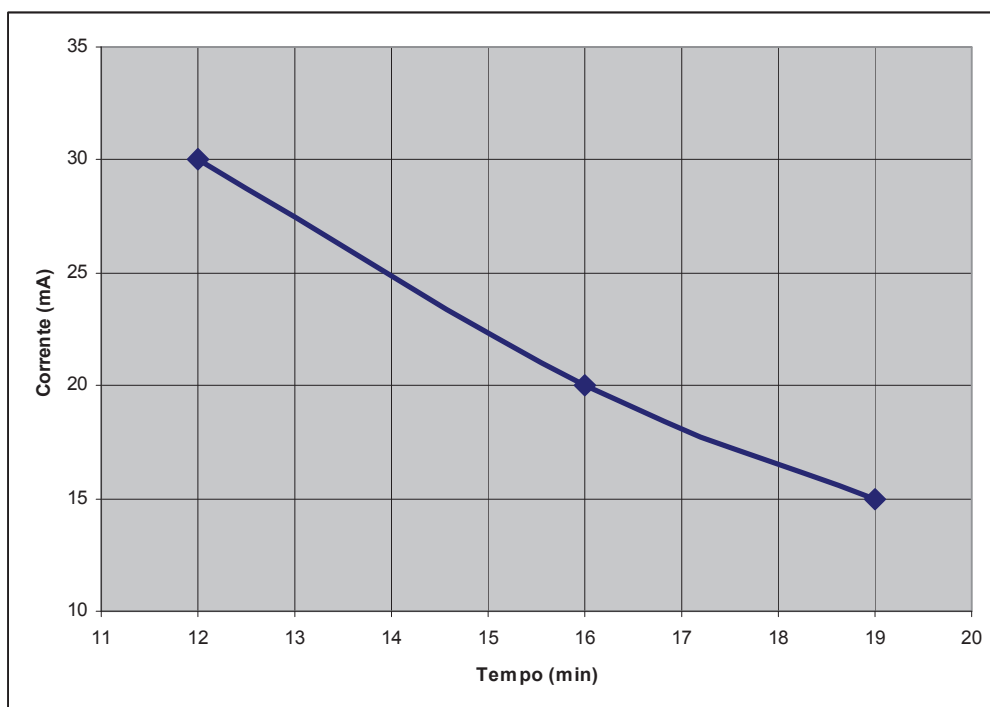


Figura 66: tempo para retorno de cor, para cada valor de corrente de defeito.

Fonte: o autor.

Verifica-se que quanto maior a corrente, menor é o tempo para a superfície retornar abaixo de 46 °C. Esse fenômeno não era esperado pois com mais corrente a energia deveria ser maior e a temperatura deveria se manter por mais tempo após o desligamento. Uma hipótese para esse resultado, observando a figura 64, é que, com maior corrente elétrica, a temperatura de 47 °C atinge a superfície mais rapidamente e, assim, há menos tempo para a energia térmica ser acumulada nas regiões vizinhas de onde ocorreu a mudança de cor, com isso, quando há o desligamento, há menos energia para manter a temperatura acima de 47 °C. Conclui-se, com essa hipótese, que a taxa de calor fornecida à amostra é maior (devido à alta corrente) mas o calor total fornecido é menor (devido ao menor tempo).

## 4 CONCLUSÕES

Após a análise do problema foi verificado que o princípio termocrômico possui diversas vantagens para a detecção de falhas em isoladores, principalmente com relação ao custo. Contudo, para a aplicação termocrômica é necessário conhecer o comportamento térmico do isolador e, para isso, foram realizados ensaios em amostras, simulações computacionais e foi desenvolvida uma metodologia alternativa para a modelagem térmica do mesmo.

Durante os ensaios realizados, foi necessário o desenvolvimento de uma fonte de calor que mantivesse a temperatura constante, ou seja, o calor fornecido deveria variar para que a temperatura se mantivesse em um determinado valor. Para isso, foi utilizado um sensor do tipo PT-100, que foi inserido em um circuito de controle, no qual o PT-100 se tornou uma fonte de calor e, ao mesmo tempo, forneceu seu valor de temperatura, que se manteve constante e, assim, foi possível realizar os ensaios.

Para a simulação computacional foi utilizado o *software Comsol*, no qual a amostra utilizada nos ensaios foi modelada e, através dos dados obtidos, foi possível determinar o valor do coeficiente de transferência de calor do isolador,  $21 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Com o objetivo de aprofundamento na modelagem térmica, foi desenvolvida uma metodologia alternativa de estudo, utilizando o conceito da analogia térmica-elétrica. Para isso, além de representar o fenômeno térmico através de um circuito elétrico análogo com resistores, foram inseridos, também, capacitores e um resistor que representa a dissipação térmica na superfície. Assim, foi possível desenvolver um circuito elétrico análogo mais completo, capaz de representar, inclusive, o fenômeno transitório térmico. A metodologia se mostrou eficaz para a modelagem de transferência de calor em uma única direção e apresentou diversas vantagens em relação à metodologia analítica de transientes térmicos, que possui soluções muito complexas, envolvendo séries de Fourier, e também em relação às ferramentas computacionais, pois não há necessidade de compra de licenças.

Após os estudos foi então modelado um isolador polimérico tipo pino no *software Comsol* e os resultados mostraram que a temperatura na superfície do isolador não alcançou a temperatura necessária para a alteração de cor, ou seja,  $46 \text{ }^\circ\text{C}$ . Assim, alternativas foram analisadas para resolver o problema.

Entre as alternativas, a que apresentou maiores vantagens foi a inserção de um material entre o pino e o isolador. Esse material teria a função de armazenar calor e transferir para o isolador. Após a verificação dos materiais chegou-se a conclusão que o óxido de zinco utilizado em pára raios já possuía as características necessárias, além de possuir um mercado já desenvolvido, o que faz seu custo ser menor. Com isso, uma pastilha de pára raios de óxido de zinco foi moldada para que, então, pudesse ser encaixada no interior do isolador.

Com a pastilha inserida no isolador desenvolvido com material termocrômico, foram realizados ensaios para verificar a funcionalidade do isolador inteligente. Foram utilizadas nos ensaios correntes de defeito que não fossem suficientes para atuar o sistema de proteção da rede elétrica, mas que fossem da ordem de grandeza característica de uma falha ou defeito. Assim, um operador, ao inspecionar a rede poderia visualizar os isoladores defeituosos. Os ensaios demonstraram que o isolador altera sua cor e que quanto maior a corrente de defeito, menor o tempo para essa mudança, sendo, portanto, uma alternativa para a detecção de defeitos de isoladores em campo, sem a necessidade da retirada dos mesmos de operação e desligamento do sistema de energia elétrica. Contudo, há situações nas quais a falha causa o desligamento da rede elétrica e, com isso, não há corrente no isolador defeituoso, assim, é possível que o isolador dissipe o calor e retorne à cor que caracteriza uma condição sem falha.

Para o isolador inteligente, a temperatura ambiente é um fator que pode influenciar no seu funcionamento, fazendo que, para temperaturas elevadas, o isolador mude de cor sem falha. Contudo, é possível ajustar a temperatura da mudança do material termocrômico e, assim, seria possível instalar isoladores com temperaturas de ativação ajustadas para os tipos de regiões, segundo a média de temperatura ambiente.

Por fim, é importante ressaltar que, para sistemas de monitoramento, o uso de materiais inteligentes termocrômicos em sistemas elétricos é inédito e, com o presente trabalho, conclui-se que a sua aplicação possui um grande potencial em outras áreas do setor elétrico devido, principalmente, à sua simplicidade de operação e baixo custo.

## 5 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros sugere-se a análise do desempenho do isolador em campo para a verificação da sua degradação ao longo do tempo. Sugere-se também o desenvolvimento de isoladores poliméricos termocrômicos com ação irreversível, ou seja, após realizar a transição cor, quando a temperatura de falha for atingida, a cor não retornaria com o esfriamento do isolador. Com isso, ter-se-ia o registro de que houve uma falha no isolador, assim, se um isolador vier a falhar e causar o desligamento do sistema, ao percorrer o sistema seria fácil de identificar visualmente o isolador defeituoso.

Outro estudo interessante seria com foco no pino do isolador, pois, como a corrente de falha atravessa também o pino, poder-se-ia desenvolver um pino termocrômico. Existem pinos feitos de materiais de ligas metálicas e de polímeros. A vantagem de se utilizar os pinos é que os mesmos possuem um diâmetro menor e, portanto, a temperatura gerada em seu interior, devido à uma corrente de falha, poderia atingir mais facilmente a sua superfície.

Por fim, trabalhos envolvendo a aplicação termocrômica em outras partes do sistema elétrico poderiam ser muito promissores, tais como a aplicação em buchas de transformadores ou espaçadores de linhas de distribuição, poderiam indicar que o equipamento ou condutor está sobrecarregado devido à sua elevada temperatura.

## REFERÊNCIAS

- 1 - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Informações técnicas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=79>>. Acesso em: 23 nov. 2010, 16:30:00.
- 2 - DAY, J.H. **Thermochromism of inorganic compounds**. Chemical Reviews. V.68, N.6, p.649-657, November, 1968.
- 3 - BEZERRA, R. DA C.; TOSTES, J. A. S.; TEIXEIRA JR, J. M.T; LEITE, R. C. **Estudo para aumento da confiabilidade de Isoladores poliméricos nas linhas de Transmissão da Eletronorte**. Simpósio brasileiro de sistemas elétricos, 2010.
- 4 - Kao, Kwan Chi. **Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes**. Elsevier Academic Press, 2004.
- 5 - MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos eletrônicos**. 2a. ed. Rio de Janeiro: L.T.C., 1994.
- 6 - Ciletti, M.D., Irwin, J.D., Kraus, A.D., Balabanian, N., Bickart, T.A., Chan, S.P., Nise, N.S. **“Linear Circuit Analysis”** *The Electrical Engineering Handbook*. Ed. Richard C. Dorf. CRC Press LLC, 2000.
- 7 - HAYT, William Hart; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 339 p.
- 8 - ANDERSSON J.; DERNFALK A.; GUBANSKI S.M.; HILLBORG H.; **Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, nº 5, 2007.
- 9 - HACKAM, R. **Outdoor HV Composite Polymeric Insulator**. IEEE TDEI, vol. 6, n. 5, p. 557-585, 1999.

- 10 - MONTANARI, G. C.; SIMONI, L. **Aging Phenomenology and Modeling**. IEEE TEI, vol. 28, n. 5, p. 775-776, 1993.
- 11 - BARTNIKAS, R. **Engineering Dielectrics - Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behaviour**. vol IIA. Baltimore: ASTM STP783, 1983.
- 12 - DISSADO, L. A.; FOTHERGHILL, J.C. **Electrical Degradation and Breakdown in Polymers**. London: Peter Peregrinus, 1992.
- 13 - DOI, H. ET AL. **Cabos cobertos com XLPE para Linhas Aéreas de Distribuição**. Mundo Elétrico, p. 90-93, 1987.
- 14 - XIDONG, L. ET AL. **Development of Composite Insulators in China**. IEEE TDEI, vol. 6, n. 5, p. 586-594, 1999.
- 15 - YOSHIMURA, N.; KUMAGAI, S.; DU, B. **Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials**. IEEE-EIM, vol. 13, n. 5, p. 8-19, 1997.
- 16 - DA COSTA E. G; FERREIRA T. V.; VILAR P. B.; **Estudo do Aquecimento de Isoladores Poliméricos Através de Simulações Computacionais**. Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- 17 - BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E; LIGHTFOOT, Edwin N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. -. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 838p.
- 18 - KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: E. Blucher, 1977. 550p.
- 19 - LAWTON, B.(Bryan); KLINGENBERG, Gunter. **Transient temperature in engineering and science**. Oxford: Oxford University Press, 1996. 584p.

- 20 - DE OLIVEIRA, S. C.; TORRESI R. M.; DE TORRESI, S. I. **Uma visão das tendências e perspectivas em eletrocromismo: A busca de novos materiais e desenhos mais simples.** Química Nova, n 23, p 79 – 87, 2000.
- 21 - LEITE, R.C.; BEZERRA, R.C.; TEIXEIRA JR, J.M.T. **Deteção e Identificação de Defeitos Através da Medição de Campo Elétrico ao Longo de Isoladores Poliméricos.** Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, 2013.
- 22 - FORMIGA, A. M. ET AL. **Avaliação do Desempenho em Campo de Isoladores em Polietileno Tipo Pino em Dedes de Cabos nus de 15 kV.** CITENEL, 2005.
- 23 - GODOI, W.C. ET AL. **Deteção de Defeitos em Isoladores Poliméricos por meio da Radiografia Digital e Reconhecimento de Padrões.** Espaço Energia. 2ª ed. 2005.
- 24 - GÓIS, N.C. ET AL. **Aplicação de Sensor para Monitoramento da Degradação de Isoladores Poliméricos de EPDM na Coelba.** XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2007.
- 25 - OLIVEIRA, S.C.F.; MIRANDA, J.M.R. **A Aposta da COSERN no uso de Isoladores Poliméricos tipo Pino em Redes Nuas de Distribuição de 15 kV Desempenho e Evolução.** XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2008.
- 26 - SANTOS, A.A.F. ET. AL. **Análise do Uso e Desempenho em Campo de Isoladores em Polietileno Tipo Pino em Redes de Cabo Nu de 15kV da CELPE.** XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI, 2008.
- 27 - MASON, R. ET AL. **Application of Partial Discharge Monitoring to Impulse Damaged Polymeric Insulation.** International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis IEEE, 2008.

- 28 - PORTELLA K.F. ET AL. **Monitoramento da Corrente de Fuga, Descargas Parciais e Resistência de Isolamento de Isoladores sob Poluição Industrial e Litorânea.** Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI, 2008.
- 29 - BEZERRA, J.M.B. ET. AL. **An Experimental Distribution Line to Develop a Polymeric Insulator Monitoring System.** IEEE, 2012.
- 30 - DAS, S.; PANDEY, J.C.; GUPTA, N. **Space Charge Diagnostics in Aged Polymeric Insulation.** IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, 2013.
- 31 - SILVA, R.F. **Trilhamento Elétrico Sobre Materiais Poliméricos Pela Análise da Energia Absorvida Devido às Descargas Elétricas Superficiais.** Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais PIPE, 2014.
- 32 - OLIBONI, C.R.P.; MEYER, L.H. **Estudo e Caracterização da Corrente de Fuga em Sistemas Isolantes de Redes de Distribuição no Estado de Santa Catarina.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, 2014.
- 33 - TIPLER, Paul Allen. **Física para cientistas e engenheiros.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.