

Modelagem Térmica de Isolador Polimérico Termocrômico

Rafael Martins^a, Vitoldo Swinka Filho^b

^a Universidade Federal do Paraná (Curitiba - Paraná – Brasil), swinka@lactec.org.br.

^b Companhia Paranaense de Energia Elétrica (Curitiba - Paraná – Brasil), rafael.martins@copel.com

Resumo.

O presente trabalho descreve a modelagem térmica de isoladores elétricos poliméricos de 34,5 kV termocromicos. Existem diversas falhas em isoladores que podem resultar na mudança da sua temperatura, e uma forma simples de detectar essa mudança em campo seria através da utilização de materiais com propriedades termocrômicas, ou seja, que mudam de cor de acordo com a temperatura. Assim, é necessário modelar e estudar o comportamento térmico do isolador, incluindo o regime transitório. Para isso, foram utilizados ensaios, ferramentas computacionais e foi proposta uma metodologia utilizando a analogia térmica – elétrica para desenvolver um circuito elétrico equivalente que representasse o fenômeno térmico. Durante o trabalho também foi encontrado o valor do coeficiente de transmissão térmica da superfície do isolador polimérico HDPE. Essa grandeza é necessária para qualquer tipo de modelagem térmica de objetos sólidos imersos em um meio. Assim, os resultados do presente trabalho podem ser utilizados em outras áreas que necessitam da modelagem térmica de materias poliméricos semelhantes.

Palavras chave: isolador polimérico, termocromismo, modelagem térmica.

Thermal Modeling of Thermochromic Polymer Insulator

Abstract.

The present work describes the thermal modeling of thermochromic 34.5 kV polymeric electrical insulators. There are several failures in insulators that can result in a change in temperature, and a simple way to detect this change would be through the use of materials with thermochromic properties, that is, they change color according to temperature. Thus, it is necessary to model and study the thermal behavior of the insulator, including the transient regime. For this, we used tests, computational tools and a methodology was proposed using the thermal - electric analogy to develop an equivalent electric circuit that represents the thermal phenomenon. During the work the value of the thermal transmission coefficient of the surface of the polymeric insulator HDPE was also found. This magnitude is required for any type of thermal modeling of solid objects. Thus, the results of the present work can be used in other areas that need the thermal modeling of similar polymeric materials.

Key-words: electric insulator, thermochromic, thermal modeling.

1. Introdução

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 (FILHO, 1994). Existem diversos tipos de isoladores e os mesmos são denominados conforme sua forma ou função. Exemplos: isoladores tipo roldana, disco, pilar, pino etc. Na figura 1 é ilustrado um isolador polimérico tipo pino de 34,5 kV.



Figura 1. Isolador polimérico tipo pino de 34,5 kV.

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 (ANDERSSON; DERNFALK; GUBANSKI, 2007). 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 (HACKAN, 1999).

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 e que os tipos poliméricos estão sendo amplamente utilizados, em substituição àqueles de vidro ou porcelana.

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. Uma possível forma de tentar detectar essa condição é através do uso de materiais termocrômicos, pois, falhas no mesmo podem causar a sua elevação de temperatura por efeito joule e, assim, o isolador mudaria de cor conforme a sua temperatura, sinalizando de forma simples a sua falha.

Portanto é necessário modelar termicamente o isolador para verificar seu comportamento térmico. Para o estudo em regime permanente, os modelos são

relativamente simples de serem desenvolvidos, contudo, é necessário fazer uma análise transitória da temperatura, para, assim, se obter um modelo mais realista, contudo, para a obtenção da distribuição das temperaturas transitórias através de métodos analíticos, são necessárias técnicas matemáticas bastante complexas, 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 (BEZERRA; TOSTES; TEIXEIRA; LEITE, 2010), e, portanto, atualmente métodos numéricos são os mais utilizados para resolver tais problemas, através de softwares. No presente trabalho é apresentada a modelagem obtida através de ensaios, ferramentas computacionais e foi proposta uma modelagem alternativa utilizando a analogia térmica-elétrica.

2. Desenvolvimento

A condutividade térmica é definida como sendo a taxa com a qual o calor (energia) é conduzido por um determinado corpo (KIKUCHI; NISHIMURA; NAGAO; IZUMI; KUBOTA; SAKATA, 1999). 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 (KIKUCHI; NISHIMURA; NAGAO; IZUMI; KUBOTA; SAKATA, 1999). 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 pode ser escrita, com condução de calor unidirecional, da seguinte maneira:

$$\frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

onde:

Q_x é o fluxo de calor na direção X [W];

A é a área ortogonal à direção do fluxo de calor [m^2];

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

T é a temperatura [K];

X é o comprimento na direção do fluxo de calor [m].

Na equação 1 é possível obter a distribuição da temperatura T em função da posição X independente do instante de tempo. Essa equação representa um sistema em regime permanente. Contudo, no instante em que é imposta uma diferença de temperatura entre dois pontos, há um período transitório, conforme visto na figura 2.

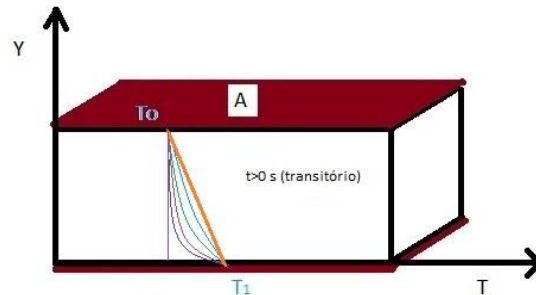


Figura 2. Período transitório da transferência de calor.

Portanto, conforme ilustrado na figura 2, 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. A compreensão desse fenômeno é bastante útil e possui muitas aplicações, tais como em motores de combustão interna, condicionamento de ar, instrumentação e controle de processos (BEZERRA; TOSTES; TEIXEIRA; LEITE, 2010). Através do balanço de energia obtém-se a equação 2, na forma diferencial, e que representa o regime transitório (KIKUCHI; NISHIMURA; NAGAO; IZUMI; KUBOTA; SAKATA, 1999):

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

ρ é a massa específica [kg.m⁻³];

c_p é o calor específico a pressão constante, [J.kg⁻¹ .K⁻¹];

t é o tempo [s];

∇ é o operador nabla.

Para a obtenção da distribuição das temperaturas transitórias através de métodos analíticos, segundo a equação 2, são necessárias técnicas matemáticas complexas, e o esforço e tempo gastos não são justificáveis (BEZERRA; TOSTES; TEIXEIRA; LEITE, 2010), com isso, atualmente, métodos numéricos são os mais utilizados.

Com exceção das correntes por trilhamento, que ocorrem na superfície, conforme a linha pontilhada da figura 3, as falhas e defeitos que geram calor no isolador polimérico tipo pino ocorrem normalmente na região situada entre as partes que possuem a maior diferença de potencial, ou seja, entre o condutor e o pino, conforme visto na figura 3.

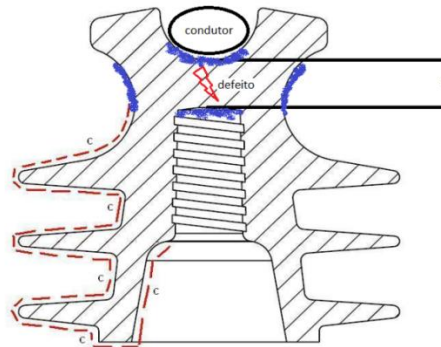


Figura 3: vista em corte do isolador polimérico.

Para a modelagem térmica, foram realizados ensaios e, devido à natureza do fenômeno, foi utilizada a forma geométrica de um cilindro, para a confecção do corpo de prova, figura 4, como aproximação da forma da região compreendida pela distância “d” descrita na figura 3. O corpo de prova foi confeccionado com material polimérico HDPE com propriedades termocrômicas. O isolador é azul abaixo de 47 °C e branco quando a temperatura está acima desse valor.

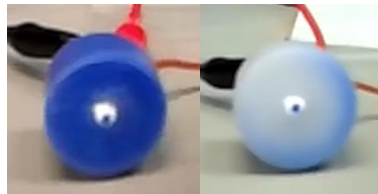


Figura 4: corpo de prova cilíndrico

Foi inserida uma fonte controlada de calor em formato cilíndrico, concêntrico ao corpo de prova, para fornecer um degrau de temperatura constante de 110 °C e foi verificado que, na temperatura ambiente de 26,4 °C, após 474 s em média, a superfície do corpo de prova se elevou de 26,4 °C para 47 °C.

Na simulação computacional foi utilizado o software Comsol, no qual foi inserido o corpo de prova, conforme visto na figura 5.

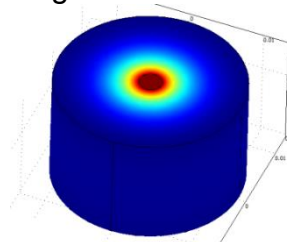


Figura 5: corpo de prova modelado no software Comsol.

As características do material HDPE, utilizadas na simulação, podem ser vista na tabela 1:

Tabela 1: grandezas físicas inseridas no software Comsol.

Grandeza	Valor	Unidade
Densidade (ρ)	930	kg/m ³
Capacidade térmica (c)	1900	J/kg.K
Condutividade térmica (k)	0,38	W/m.K

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. Devido a esse fato, essa grandeza é bastante específica, 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 era a única grandeza que faltava, para conhecer-se o valor da mesma, foram inseridos diversos valores de h até que na simulação o tempo de elevação da temperatura na superfície de 26,4 °C até 47 °C, fosse igual à 474 s, que é o valor levantado empiricamente.

O valor do coeficiente de transferência de calor h encontrado foi de 21 W/m²K.

Para aplicações com transferência uni-dimensional de calor, uma metodologia que possui muitas vantagens práticas é o método da analogia elétrica (APONTE; CASTRO; SÁNCHEZ; CASTRO; ESPINOSA; ROSALES, 2009). Nessa metodologia, o sistema físico térmico é convertido em um sistema elétrico equivalente, no qual 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.

Dois sistemas são ditos análogos quando possuem equações e condições de contorno semelhantes. Por exemplo, se a equação 1 for manipulada, tem-se:

$$Q_x = \frac{dT}{R_x} \tag{3}$$

onde:

$$R_x = \frac{dX}{A.k} \tag{4}$$

Em sistemas elétricos, da lei de ohm tem-se que:

$$i_x = \frac{dV}{R_{ex}} \tag{5}$$

onde:

$$R_{ex} = \frac{dX}{A.\sigma} \tag{6}$$

i é a corrente elétrica na direção X[A];

ΔV é a diferença de potencial elétrico [V];

R_{ex} é a resistência elétrica na direção da corrente [Ω];

σ é a condutividade elétrica [S/m].

É evidente através das equações 3, 4, 5 e 6 a analogia entre os sistemas térmicos

e elétricos. Essa analogia possui bastante utilidade quando se deseja 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 6.

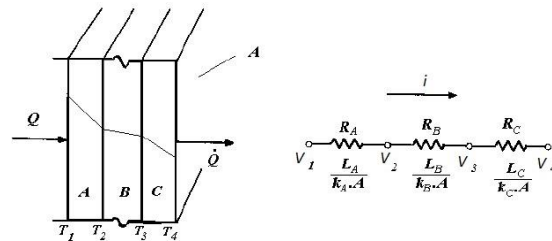


Figura 6. Circuito elétrico equivalente para a transferência de calor em diferentes materiais.

Para a modelagem elétrica realizada na figura 6, 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, ter-se-ia que dividir a resistência térmica do material em duas, para que fosse possível calcular o potencial elétrico nesse ponto.

Percebe-se que essa modelagem elétrica apresentada pode ser utilizada somente para regime permanente, pois, se a diferença de potencial fosse retirada instantaneamente no exemplo da figura 3, 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. O que ocasiona isso é o fato de que 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 um novo equilíbrio térmico. 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. A grandeza que fornece a capacidade de armazenamento de energia térmica é denominada capacidade térmica e, fazendo a análise da analogia elétrica, conclui-se que essa grandeza é equivalente à capacitância elétrica. As equações que relacionam essas grandezas são:

$$T = \frac{1}{C_t} \int Q(t) dt \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{C_e} \int i(t) dt \quad (8)$$

onde:

Ct é a capacidade térmica, em [J/K];
Ce é a capacitância elétrica, em faraday [F].

Ao comparar as equações 7 e 8 fica claro que a capacidade térmica possui analogia à capacitância elétrica, portanto, ao inserir um capacitor no circuito elétrico, 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 em paralelo, conforme visto na figura 7, onde está representado um corpo com duas placas em suas extremidades, com temperatura representadas pelas tensões V1 e V0.

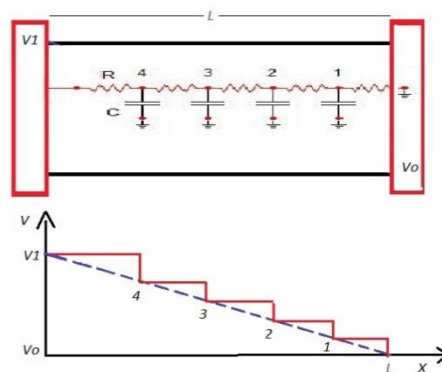


Figura 7: analogia térmica-elétrica com capacitores.

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.

No caso de objetos imersos no meio ambiente, há ainda a necessidade de inserir no circuito elétrico equivalente um elemento que represente a transferência de calor para o meio. Como o calor é dissipado, o elemento deve ser uma resistência, conectada no último circuito RC e a tensão nessa resistência representa a temperatura na superfície do objeto.

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

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (9)$$

onde:

Q é o calor dissipado [W];

h é o coeficiente de transmissão térmica [W/m².K];

A é a área da superfície [m²].

XT é a diferença de temperatura entre a superfície e o meio.

A resistência elétrica equivalente da dissipação de calor na superfície é dada pela equação 10:

$$R_{term\ diss} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (10)$$

Aplicando as equações em um exemplo de geometria cilíndrica, figura 8, cujo raio foi dividido em quatro partes, no desenvolvimento do circuito elétrico equivalente, a fonte de calor é o cilindro de raio r_1 . Para o volume compreendido entre r_1 e r_2 da figura 8, através da equação 1 tem-se que:

$$T_1 - T_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \cdot Q_r \quad (11)$$

Logo, a resistência elétrica equivalente é:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad (12)$$

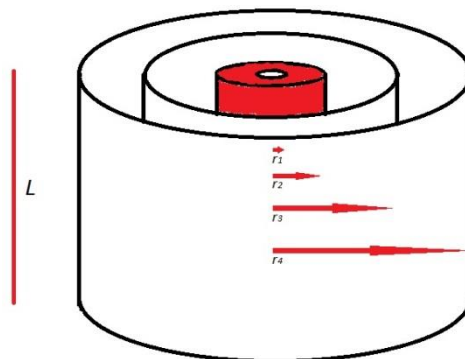


Figura 8: cilindro de raio r_4 dividido em quatro partes.

A capacidade térmica é igual à capacitância elétrica, portanto, a capacitância elétrica equivalente, para o volume compreendido entre r_1 e r_2 da figura 8, é:

$$C_{el} = C_{t1} = c \cdot \rho \cdot L \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (13)$$

onde:

c é o calor específico [J/Kg.K];

ρ é a densidade volumétrica [kg/m³].

A resistência elétrica equivalente da dissipação de calor na superfície, através da equação 10, é dada pela equação 13 a seguir:

$$R_{term\ diss} = \frac{1}{h \cdot 2 \cdot \pi (r_4 \cdot L + r_4^2)} \quad (14)$$

Com as equações 12, 13 e 14 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 8 está mostrado na figura 9:

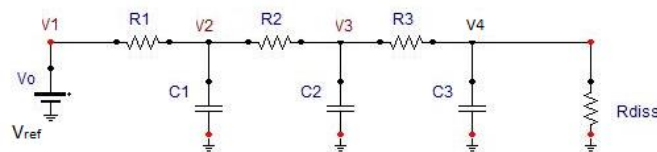


Figura 9: circuito elétrico equivalente do exemplo cilíndrico

Na figura 9, os potenciais elétricos V_1 , V_2 , V_3 e V_4 representam as temperaturas da fonte de calor, temperatura no raio r_2 , temperatura no raio r_3 e a temperatura na superfície, respectivamente.

Na aplicação da modelagem no corpo de prova, o mesmo foi dividido com os valores de raio descritos na tabela 2:

Tabela 2: valores de raios para o corpo de prova.

Raios (mm)									
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
0,0	1,50	2,87	4,25	5,62	7,00	8,37	9,75	11,12	12,50

Os valores de resistência e capacitância elétrica calculados estão descritos na tabela 3:

Tabela 3: valores de resistências e capacitâncias equivalentes.

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7	RC8
Resistência elétrica (Ω)	18,16	10,91	7,82	6,10	5,01	4,24	3,68	3,25
Capacitância elétrica (F)	0,50	0,82	1,13	1,445	1,76	2,08	2,39	2,70

Para a resistência de dissipação, que representa a dissipação térmica no ambiente, foi obtido o valor de $22,047 \Omega$, com isso, o circuito elétrico equivalente ao térmico, obtido para o corpo de prova, está descrito na figura 10:

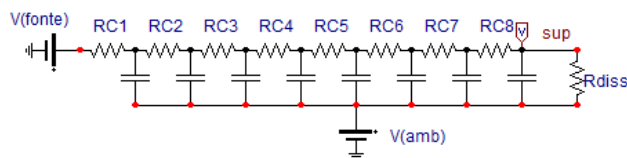


Figura 10: circuito elétrico equivalente do corpo de prova.

Ao aplicar uma tensão elétrica, V_{fonte} , de 110 V (equivalente à fonte de temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C}$) e, considerando que o potencial de referência, V_{amb} , é de $26,4 \text{ V}$ (equivalente à temperatura ambiente), o potencial elétrico V_{sup} , equivalente à temperatura na superfície do corpo de prova, atinge 47 V em 471 s . O regime transitório está ilustrado na figura 11.

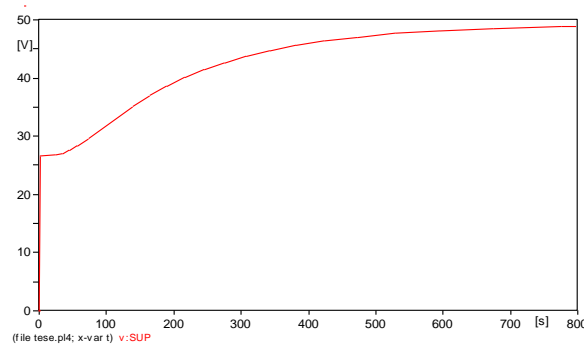


Figura 11: comportamento da temperatura na superfície do corpo de prova.

Verifica-se na figura 11 que a modelagem térmica através da analogia térmica-elétrica apresenta valores muito próximos daqueles encontrados através dos ensaios e simulação computacional.

Com os resultados obtidos no corpo de prova, foi desenvolvido o modelo térmico do isolador no software Comsol, conforme ilustrado na figura 12.

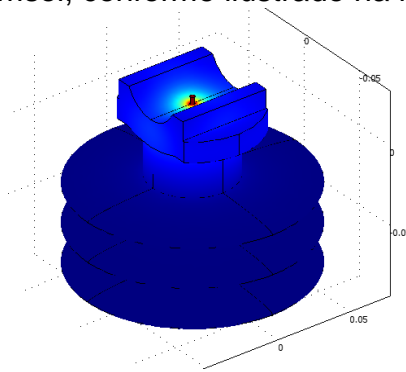


Figura 12: Isolador polimérico modelado no software Comsol.

Na simulação computacional foi inserida a fonte de calor com temperatura constante de 110 °C, utilizada no corpo de prova. Foi verificado na simulação que a temperatura de 47 °C, necessária para a mudança de cor do isolador, não se propagou até a superfície. A temperatura de 47 °C estabilizou a uma distancia de 18 mm do centro do isolador. Na figura 13 é possível verificar várias curvas do perfil de temperaturas, cada curva representa um instante de tempo a cada 500 s.

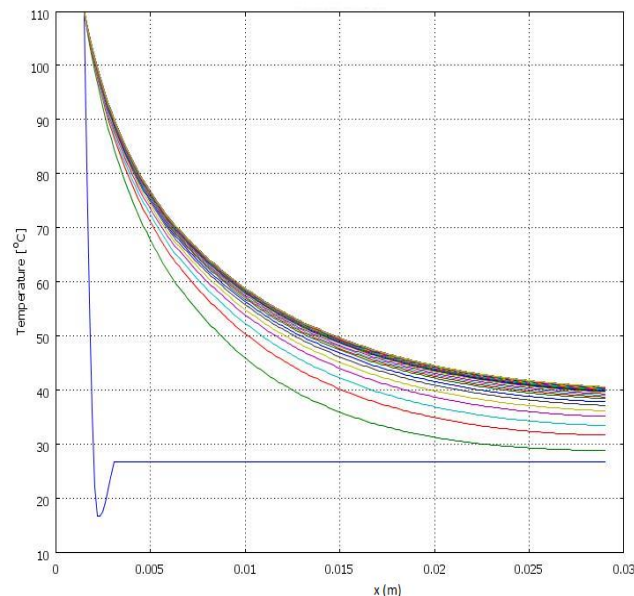


Figura 13: simulação da distribuição de temperaturas ao longo do raio do isolador.

Para comparação dos resultados, foi realizado ensaio no qual foi inserida a fonte de temperatura constante de 110 °C no centro de um isolador polimérico termocrômico com temperatura de ativação de 47 °C. Na figura 14 é possível verificar seu comportamento após a estabilização das temperaturas.



Figura 14: Isolador polimérico com fonte de temperatura constante ao centro.

A temperatura de 47 °C necessária para a mudança de cor se estabilizou a uma distância de 18 mm do centro do isolador, assim como na simulação computacional, ilustrada na figura 12.

3. Conclusões

No presente trabalho foi apresentada a metodologia para a modelagem térmica de isoladores de distribuição de energia elétrica poliméricos de 34,5 kV.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi encontrado o valor do coeficiente de transferência de calor h de $21 \text{ W/m}^2\text{K}$, para a superfície de isoladores poliméricos.

Foram realizados ensaios, simulações computacionais e foi proposta uma modelagem através do desenvolvimento de um circuito elétrico equivalente, através da utilização da analogia térmica-elétrica.

No corpo de prova, ao comparar os resultados com aqueles obtidos através de ensaios e ferramentas computacionais, foi verificado que o modelo elétrico equivalente apresentado pode fornecer resultados satisfatórios de forma mais simples do que soluções analíticas, que são bastante complexas, e com custo menor do que as obtidas com ferramentas computacionais, pois não há necessidade de compra de licenças de software.

Ao final, no isolador polimérico, foi verificado através da comparação entre a simulação computacional e a análise empírica que a modelagem térmica desenvolvida atende às necessidades da aplicação proposta.

4. Agradecimentos

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento–LACTEC e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais-PIPE, pelo apoio e infraestrutura fornecidos durante o desenvolvimento do presente trabalho.

5. Referências

- FILHO, J. M.. *Manual de Equipamentos Elétricos [Handbook of Electrical Equipment]*, 2nd ed. Rio de Janeiro: L.T.C., 1994.
- ANDERSSON, J.; DERNFALK, A.; GUBANSKI, S.M. "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 14, n. 5, 2007.
- HACKAN, R. "Outdoor HV Composite Polymeric Insulator". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, p. 557-585, v. 6, n. 5, 1999.
- BEZERRA, R. C.; TOSTES, J. A. S.; TEIXEIRA, J. M. T.; LEITE, R. C. "Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da Eletronorte [Study to increase the reliability of polymer insulators in the transmission lines of Eletronorte]," in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2010.
- KIKUCHI, T.; Nishimura, S.; NAGAO, M.; IZUMI, K.; KUBOTA, Y.; SAKATA, M.; "Survey on the use of non-ceramic composite insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 548-556, v. 6, n. 5, 1999.
- APONTE, G.; CASTRO, J. C.; SÁNCHEZ, V. H.; CASTRO, M.; ESPINOSA, A.; ROSALES, N. "Contamination Level Evaluation on Colombian North Cost". *IEEE Latin America Transactions*, pp 190, v.7, n. 2, June 2009.