



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/24  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE SENSOR DE SOBREAQUECIMENTO EM CONEXÕES ELÉTRICAS**

**Jéssica Kimie Akishino  
INSTITUTOS LACTEC**

**Marilda Munaro  
INSTITUTOS LACTEC**

**Sebastião Ribeiro Júnior  
INSTITUTOS LACTEC**

**Vitoldo Swinka Filho  
INSTITUTOS LACTEC**

**Guilherme Cunha da Silva(\*)  
INSTITUTOS LACTEC**

**Dailton Pedreira Cerqueira  
COELBA**

**Roberto Miranda Neves da Rocha  
COELBA**

**RESUMO**

Foi desenvolvido um protótipo de sensor termosensível para sinalização de sobreaquecimento em conexões. Inicialmente foram selecionadas diferentes tecnologias para avaliação de desempenho como elemento sensor. As tecnologias avaliadas foram: fitas termoindicadoras, tintas termocrômicas e sistemas termocrômicos compostos de cera de polietileno e parafina industrial (ambas com pigmento). Após testes de desempenho foi selecionada a tecnologia (cera de polietileno e parafina, com pigmentos) e desenvolvido protótipo de sensor termosensível. Este permite, em função do material usado, atuação em diferentes faixas de temperatura (50 °C, 80 °C e 100 °C). A validação do protótipo de sensor termosensível desenvolvido foi realizada em laboratório e rede piloto.

**PALAVRAS-CHAVE**

Conectores, sensor, sobreaquecimento, termocrômico.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

**1.1 Conectores e termovisão**

A fim de assegurar a continuidade de um circuito elétrico em uma rede de distribuição são utilizados conectores elétricos, os quais permitem a passagem ininterrupta de corrente elétrica entre as superfícies de contato (neste caso, conector-cabo). O sobreaquecimento destes equipamentos pode levar à interrupção do fornecimento de energia de redes aéreas de distribuição (1)-(3).

Para minimizar a probabilidade de ocorrência deste tipo de falha o procedimento normalmente utilizado é a inspeção de redes por meio da técnica de termovisão. Esta permite a medição da temperatura nas conexões elétricas e, consequentemente, a identificação de pontos quentes no circuito. Tal técnica, apesar de não ser invasiva, apresenta deficiências relacionadas à exatidão da medida da temperatura, além de não permitir o monitoramento contínuo da conexão. Ainda, a utilização de um valor inadequado de emissividade pode resultar em um diagnóstico incorreto da condição do conector. Testes realizados com diferentes materiais mostraram que há variações nas temperaturas medidas em função do valor de emissividade usado no ajuste do termovisor. O estado de degradação do equipamento também tem influência no resultado da medida (por ex., um conector com corrosão tem uma emissividade diferente de um conector em bom estado). Cabe ressaltar que as medições de termografia são realizadas em ambientes externos e estão sujeitas às condições ambientais do local, como: radiação solar, atenuação atmosférica, temperatura, velocidade do vento, precipitação e variação de umidade. Esses fatores devem ser considerados como fontes de incertezas em tais medições (3)-(5). Além disto, a eficácia da técnica depende da utilização correta de equipamentos de alta tecnologia (neste caso, o termovisor) e de mão-de-obra qualificada para execução correta da medida e do diagnóstico da conexão sob avaliação.

(\*) Rodovia BR 116, km 98, n° 8813 – Centro Politécnico da UFPR – CEP 81531-980 Curitiba, PR – Brasil  
Tel: (+55 41) 3361.6845 – Email: [cunha@lactec.org.br](mailto:cunha@lactec.org.br)

Em função dos fatores supracitados foi realizada pesquisa para o desenvolvimento de um protótipo de sensor termosensível que tem por objetivo avaliar o sobreaquecimento de conectores de forma visual e sem a utilização de equipamentos. Entre as tecnologias avaliadas para composição do protótipo estão: fitas termoindicadoras, tintas termocromicas irreversíveis e sistemas termocromicos compostos por cera de polietileno ou parafina com adição de pigmentos.

O termocromismo é o fenômeno de alteração de coloração de determinados tipos de material em resposta a mudanças de temperatura. Esse fenômeno pode ser observado em compostos inorgânicos ou orgânicos. Nos compostos inorgânicos a ocorrência do termocromismo pode ser ocasionada por transições de fase, variações na esfera de coordenação, entre outros [6]. Já nos compostos orgânicos o termocromismo pode ocorrer devido a reações químicas, rearranjos moleculares ou mudanças conformacionais (6). Essa mudança de coloração é geralmente reversível. No entanto, pigmentos termocrômicos podem ser fabricados para mudar de coloração apenas uma vez, quando uma determinada temperatura pré-selecionada é atingida, denominada mudança irreversível (7)-(9). O sistema termocrômico orgânico possui vantagens como: transição de cor sensível a pequenas mudanças na temperatura; flexibilidade na escolha da temperatura de ativação por escolha do solvente (desde -10°C a 70°C) e grande variedade de cores como, por exemplo, amarelo, vermelho, azul e verde (10).

Ao utilizar sistemas com ceras e pigmentos, cria-se um dispositivo termocrômico baseado na fusão desses materiais. As ceras abrangem uma ampla gama de produtos, podendo ser de origem orgânica natural (animal, vegetal ou mineral) ou sintética (11).

O desenvolvimento do protótipo aqui apresentado faz parte de um projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento de protótipo de sensor termosensível para diagnóstico e monitoramento de sobreaquecimento em conexões de redes de distribuição de energia elétrica”, realizado pelas empresas COELBA e LACTEC dentro do programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL.

## 2.0 - EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do protótipo de sensor termosensível foi inicialmente realizada uma avaliação de distintas tecnologias com potencial para sinalização de sobreaquecimento em conexões elétricas. Das tecnologias avaliadas uma foi selecionada para montagem do sensor. Foi previamente estabelecido que a tecnologia selecionada necessita possuir duas características principais: a) bom desempenho em ambiente externo, principalmente em relação às intempéries e b) atuação nas faixas de temperatura características de sobreaquecimento de conexões.

Para identificação das faixas de temperatura da conexão foi realizado junto à concessionária um levantamento de histórico de falhas em conectores, no qual foi possível identificar que a maior parte das falhas ocorrem na faixa de 60 °C a 100 °C, sendo registradas poucas falhas em temperaturas inferiores a 60 °C e superiores a 100 °C.

As tecnologias avaliadas neste projeto foram: fitas termoindicadoras, tintas termocrômicas irreversíveis e sistemas termocromicos compostos por cera de polietileno com pigmento e parafina industrial com pigmento.

### 2.1 Fitas termoindicadoras

As fitas termoindicadoras são sistemas termocrômicos irreversíveis, ou seja, após atingirem a temperatura de ativação a cor muda e não altera mais. Sua coloração modifica de branco para preto quando a temperatura do nível é atingida. As faixas de temperatura das fitas avaliadas estão detalhadas na Tabela 1.

TABELA 1 - Faixas de temperatura das fitas termoindicadoras.

FITA	NÍVEIS	FAIXAS DE TEMPERATURA (°C)
<b>A</b>	10	40, 42, 44, 46, 49, 54, 60, 62, 65 e 71
<b>B1</b>	8	71, 77, 82, 88, 93, 99, 104 e 110
<b>B2</b>	10	77, 82, 88, 93, 99, 104, 110, 116, 121 e 127

Para avaliação de desempenho das fitas termoindicadoras foram realizados diversos ensaios, entre os quais: ensaio de aquecimento e ensaio de resistência à fotodegradação. O ensaio de aquecimento foi realizado na seguinte condição: a temperatura do circuito de teste foi estabilizada em diferentes patamares (75 °C, 85 °C, 95 °C e 105 °C) durante 24 horas e realizada documentação fotográfica. Para avaliação da resistência à fotodegradação as fitas termoindicadoras foram colocadas na câmara de intemperismo artificial durante 168 horas.

## 2.2 Tintas termocrômicas

As tintas termocrômicas avaliadas possuem a característica de serem irreversíveis e resistentes à água. Estão compostas de pigmentos orgânicos microencapsulados que quando ativados tornam-se coloridos. As temperaturas de transição de cor estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 - Temperaturas de transição de cor das tintas termocrômicas

COR	TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO DE COR (°C)
Vermelho	60 a 65
Vermelho	70 a 75
Azul	80 a 85

Para avaliação de desempenho das tintas termocrômicas foram realizados diversos ensaios, entre os quais: ensaio de aquecimento e ensaio de resistência à fotodegradação. O ensaio de aquecimento das tintas foi realizado na seguinte condição: a temperatura do circuito foi ajustada para 25 °C e realizada documentação fotográfica. A partir de então a temperatura foi elevada de 10 °C em 10 °C e realizado o registro fotográfico. Para avaliação da resistência à fotodegradação as tintas termocrômicas foram ativadas termicamente e colocadas na câmara de intemperismo artificial durante 168 horas.

## 2.3 Protótipo de sensor termosensível com cera de polietileno e parafina

Em função dos resultados obtidos (ver item 3.0. Resultados) foram selecionados os sistemas termocrômicos compostos por cera de polietileno com pigmento e parafina industrial com pigmento para o desenvolvimento do protótipo do sensor termosensível. O protótipo desenvolvido (ver Figura 1) é integrado ao conector elétrico e é constituído por: a) uma camada de cera polietileno com pigmento, b) uma camada de cera de polietileno sem pigmento e c) uma capa de proteção composta por um filme de policarbonato.

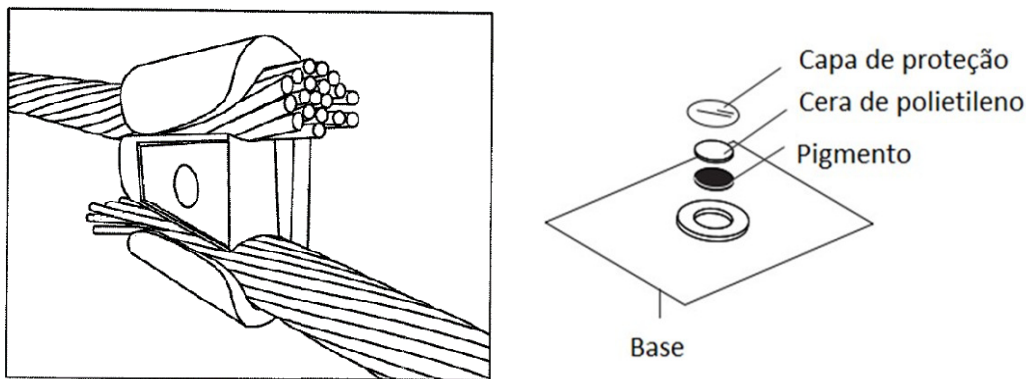


FIGURA 1 - Representação esquemática do protótipo de sensor termosensível.

Quando o conector elétrico apresenta-se em bom estado de funcionamento, sem ocorrência de sobreaquecimento, a coloração observada no sensor termosensível é branca. Com o incremento na temperatura gerado pelo sobreaquecimento da conexão elétrica ocorre a fusão das duas camadas de cera (com e sem pigmento) e o sensor termosensível torna-se colorido. Ressalta-se que uma das principais características do sensor termosensível é que a sua mudança de coloração ocorre de forma totalmente irreversível, ou seja, uma vez que ocorra o sobreaquecimento do conector elétrico este é identificado pela mudança de coloração de forma permanente. Para validação do sensor termosensível foram realizados testes em laboratório e testes em rede piloto. Tal rede foi instalada em área externa e instrumentada para monitoramento da temperatura e resistência das conexões. Foram aplicados ciclos de aquecimento para validação da faixa de atuação do protótipo de sensor termosensível.

O ensaio de aquecimento foi realizado, com base na norma ABNT NBR 9326 (12), na seguinte condição: a temperatura do circuito de teste foi estabilizada em diferentes patamares durante 24 horas e realizada documentação fotográfica. A temperatura de início de registro foi 25 °C, sendo aumentada em patamares de 10 °C até 105 °C. Também foi realizado ensaio de resistência frente à fotodegradação em câmara de intemperismo avaliada em intervalos de 0, 250, 500, 1000 e 1500 horas. A influência da adição de aditivos como antioxidantes e fotoestabilizantes também foi avaliada. Todos os ensaios de resistência à fotodegradação foram realizados em câmara Atlas, modelo Ci65, conforme norma ASTM G155 (13). Foi utilizada lâmpada de xenônio de 4500-6500 W resfriada por água pura, a temperatura do painel preto foi de  $63 \pm 2$  °C, em umidade relativa de  $50 \pm 10$  %, intensidade de radiação de  $0,35 \pm 0,05$  W/m<sup>2</sup> a 340 nm, com sistemas de filtros interno e externo de borossilicato. Os ciclos foram contínuos de 102 min de luz e 18 min de luz e aspersão.

### 3.0 - RESULTADOS

#### 3.1 Fitas termoindicadoras

A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de aquecimento realizado nas fitas termoindicadoras. As fitas apresentaram descoloração em temperaturas superiores a 90°C, dificultando a leitura da temperatura.

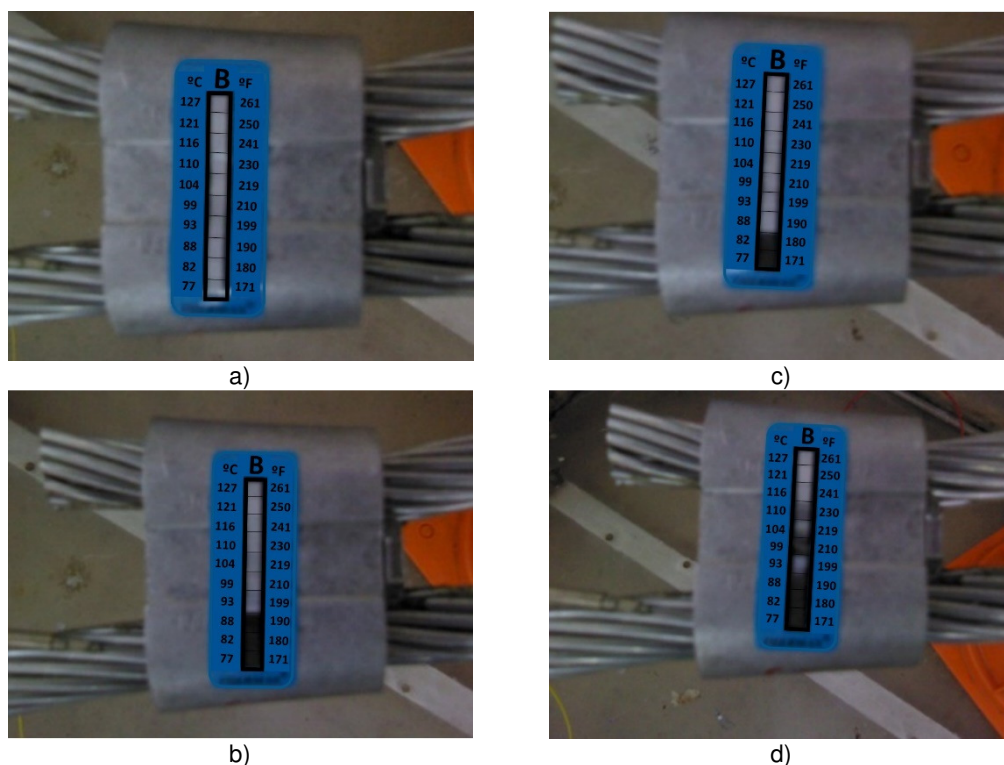


FIGURA 2 - Ensaio elétrico com aquecimento das conexões com as fitas termoindicadoras (tipo B2), nas temperaturas de: a) 75 °C; b) 85 °C; c) 95 °C; e) 105 °C

A Figura 3 apresenta o estado das fitas termoindicadoras após 168h de envelhecimento em câmara de intemperismo. É possível observar que com a exposição à radiação ultravioleta as fitas apresentam marcas amareladas em algumas faixas de temperatura, o que dificulta a leitura correta da temperatura sinalizada. O resultado também indica que esta tecnologia não é adequada para uso em ambiente externo, tendo sua aplicação restrita para uso em ambiente interno.

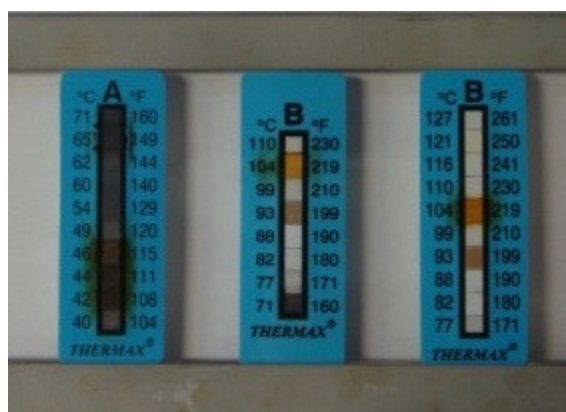


FIGURA 3 - Fitas termoindicadoras após 168 horas de envelhecimento na câmara de intemperismo artificial.

#### 3.2 Tintas termocromicas

A Figura 4 apresenta o resultado do ensaio elétrico para a tinta termocrômica irreversível azul, com faixa de atuação na temperatura de 80 °C a 85 °C. Nota-se que a transição de cor apresentada por esta tinta é bastante

sutil, tornando difícil visualizar o sobreaquecimento. Resultados similares foram obtidos para a tinta irreversível vermelha.

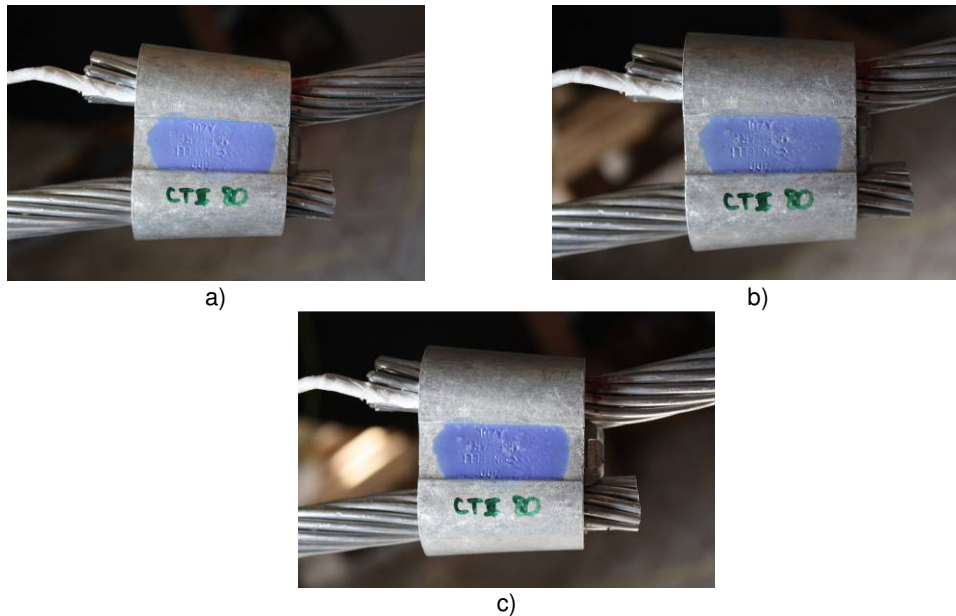


FIGURA 4 - Conector com tinta termocrômica irreversível azul no ensaio elétrico com aquecimento das conexões, nas temperaturas de: a) 25 °C; b) 55 °C; c) 85 °C .

O resultado de desempenho frente à fotodegradação está ilustrado na Figura 5. Observa-se que a tinta não perdeu aderência ao substrato de alumínio, nem foi solubilizada. Todavia, a radiação ultravioleta afetou de forma significativa a coloração final, sendo este um indício de que tal tecnologia não é adequada para uso em ambiente externo, tendo sua aplicação restrita para uso em ambiente interno.



Antes do envelhecimento



Após 168 h de envelhecimento

FIGURA 5 - Tinta azul previamente ativada antes e após exposição ao ensaio de intemperismo artificial.

### 3.3 Protótipo de sensor termosensível com Cera de polietileno e parafina

A Figura 7 apresenta os resultados de testes realizados no protótipo de sensor termosensível desenvolvido com cera de polietileno para a temperatura de 100°C, antes e após ativação. Antes da ativação o sensor apresenta coloração branca e após a ativação este apresenta coloração roxa. Vale ressaltar que também foram desenvolvidos protótipos de sensores com temperaturas de ativação de 50 °C e 80 °C.





FIGURA 7 – Protótipo de sensor termosensível: antes e após ativação (cores branca e roxa, respectivamente).

Quando submetidas ao envelhecimento acelerado, conforme mostrado na Figura 8, as composições de cera de polietileno (na presença ou não de antioxidantes e fotoestabilizantes) não apresentaram sinais de alterações de coloração que comprometessem a atuação do sensor de forma significativa.

	0 h	250h	500 h	1000 h	1500 h
1					
2					
3					

1. Puro 2. 0,5% antioxidante 3. 0,5% antioxidante + 0,5% fotoestabilizante

FIGURA 8 – Cera de polietileno, antes e após exposição ao ensaio de intemperismo artificial.

O protótipo desenvolvido teve patente depositada junto ao INPI, registro BR 10 2013 021700 0, sob o título “Sensor termosensível para monitoramento de sobrequecimento em conexões elétricas”.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Para temperaturas de até 90 °C houve uma boa correlação entre a temperatura de ensaio e a indicada pela fita termoindicadora. Estas fitas não mostraram ser resistentes à radiação ultravioleta. Desta forma, é recomendável a aplicação desta tecnologia somente em ambiente interno.

A visualização da transição de cor nas tintas termocrômicas irreversíveis foi bem sutil, dificultando afirmar se há ou não aquecimento. Apesar da coloração das tintas não apresentarem completa degradação sob efeito da radiação ultravioleta, não houve diferença significativa de comportamento nos períodos antes de passar pela transição de cor e depois da ativação. Diante disso, a identificação de aquecimento fica prejudicada, inviabilizando sua utilização em conectores elétricos.

Os sensores desenvolvidos, tanto de cera de polietileno com pigmento quanto de parafina com pigmento mostraram-se eficientes quanto à sinalização de aquecimento na temperatura de fusão dos materiais que os compõem. Além disso, estes possuem também como característica a irreversibilidade. O envelhecimento acelerado não ocasionou mudanças morfológicas relevantes na estrutura destes materiais, assim como não acarretou mudança significativa de coloração. Este fator fez com que fosse definido esta tecnologia para confecção do protótipo de sensor termosensível. Vale ressaltar que diferentes composições de cera de polietileno e parafina permitem ajustar a faixa de atuação do sensor.

Foi desenvolvido e validado em laboratório e em rede piloto um protótipo de sensor termosensível para sinalização de sobreaquecimento de conexões elétricas. Foram desenvolvidos protótipos para atuação em diferentes

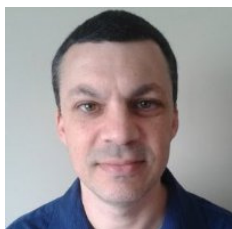
temperaturas, entre as quais 50 °C, 80 °C e 100 °C. Algumas vantagens do protótipo desenvolvido são: a) não necessita de fonte de alimentação externa, b) baixo custo, c) livre de manutenção, d) monitoramento contínuo da conexão e d) facilidade de diagnóstico (visual).

Sugere-se a continuidade da pesquisa para fins de otimização dos materiais do sensor e melhoria do *design* do produto final. Com isto será possível levar o produto a campo para testes na rede de distribuição.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BRAUNOVIC, M.; MYSHKIN, N. K.; KONCHITS, V. V. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology. CRC press, 2006.
- (2) BRAUNOVIC, M. Aluminum connections: legacies of the past. IEEE Conference on Electrical Contacts, v. 44, p. 1-31, 1994.
- (3) PELIZZARI, E. Aplicações da termografia como ferramenta de manutenção preditiva em conectores elétricos. CBECimat- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 6315-6325, 2006.
- (4) SUESUT, T. Emissivity Measurements on Material and Equipment in Electrical Distribution System. 11<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and Systems, 2011.
- (5) NETO, E. T. W.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A.. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments: Thermal Imaging. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 1-4, 2006.
- (6) LINDQUIST, T. M.; BERTLING, L.; ERIKSSON, R.. Estimation of disconnector contact condition for modelling the effect of maintenance and ageing. Power Tech, IEEE Russia, p. 1-7, 2005.
- (7) WHITE, M. A.; LE BLANC, M. Thermochromism in Commercial Products. Journal of Chemical Education, v. 76, p. 1201-1204, 1999.
- (8) LAKIO, S.; HEINAMAKKI, J.; YLIUUSI, J. Colorful Drying. AAPS PharmSciTech, v. 1, p. 46-53, 2010.
- (9) OGRODNIK, W. Use of color-changing pigment to detect wire and cable hazards. Wire Journal International, p. 150-155, 2008.
- (10) MARK, H. F.; KROSCWITZ, J. I. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 12, 2003.
- (11) MAJCZAK, R.; MARSZALEK, G. Polyethylene wax: preparations, modification and applications. Polimer, v. 57, p. 640-645, 2012.
- (12) ABNT NBR 9326. Conectores para cabos de potência – ensaio de ciclos térmicos e curtos-circuitos, 1986;
- (13) ASTM G155. Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non Metallic Materials, 2013.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Guilherme Cunha da Silva nasceu na cidade de Porto Alegre/ RS em 14 de agosto de 1973. Possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela FURB/SC (1997) e mestrado e doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela UFPR/PR (2000 e 2005, respectivamente). É Pesquisador Sênior nos Institutos LACTEC, atuando nas seguintes áreas: novos materiais e diagnóstico de envelhecimento e degradação de dielétricos aplicados em equipamentos e acessórios de linhas de transmissão e redes de distribuição.