



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

COMPORTAMENTO TÉRMICO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

*** Farith M Absi Salas Luis Adriano M. C. Domingues Frederico S. Moreira João Ignácio S. Filho**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

RESUMO

O Informe Técnico analisa o comportamento térmico de cabos ACSR a partir de medições experimentais de suas temperaturas internas e superficiais. A distribuição radial de temperatura foi medida por meio de termopares inseridos entre as camadas do condutor, no processo de fabricação do cabo. Para valores usuais de corrente, em regime permanente a diferença entre as temperaturas internas e externas é pequena, sendo a alma do cabo mais quente. Porém, em regime dinâmico, o gradiente de temperatura é irregular, com a temperatura maior na camada intermediária do condutor, diminuindo na direção da camada externa e da alma, sendo que a camada mais interna tem a menor temperatura. Foram feitas medidas experimentais da emissividade térmica média, por meio de uma câmera de termovisão, em cabos expostos com diferentes tempos de operação e condições atmosféricas. Com base nessas medidas experimentais, é feita uma análise da influência da emissividade no resfriamento de cabos, comparando-se esta influência para um cabo condutor de um mesmo tipo, com dois valores extremos de emissividade de 0,35 e 0,97, respectivamente.

Palavras-Chave: Ampacidade, distribuição radial de temperatura, emissividade térmica, termopares, medições termográficas

1.0 - INTRODUÇÃO

Diversos modelos de ampacidade encontrados na literatura [1,2,3], validados experimentalmente, calculam a temperatura de cabos, considerando aspectos climatológicos, tais como, o vento, a temperatura do ar, o sol, a chuva etc; aspectos físicos, tais como os efeitos eletromagnéticos; e parâmetros térmicos efetivos, tais como a condutividade térmica radial.

A maioria dos modelos térmicos considera uma distribuição uniforme da corrente na seção transversal do cabo [3,4,5]. Entretanto, para condições dinâmicas, modelos mais recentes têm considerado uma distribuição irregular de corrente, causada por efeitos eletromagnéticos, entre eles o efeito skin [10,11]. Em testes laboratoriais com um cabo ACSR Grackle foram encontradas distribuições irregulares da densidade corrente, chegando a correntes 30% maiores na camada intermediária do condutor [11]. Essa distribuição irregular de corrente no cabo tem uma influência considerável na distribuição radial da temperatura. Em [11] tem-se os resultados de estudos, com base em elementos finitos, de um cabo ACSR 490/65 mm² submetido a curto-circuito, mostrando que a maior temperatura está na camada intermediária do condutor, diminuindo na direção da camada externa e da alma, sendo que a camada mais interna tem a menor temperatura.

Outros modelos, [3,6,7,9], consideram a seção transversal do cabo constituída pelos fios dos materiais e os espaços e micro-espaços entre os mesmos. Esta configuração heterogênea (fios-ar) da seção transversal do cabo define a condutividade térmica radial efetiva. Estes modelos adotam nos cálculos de ampacidade uma condutividade térmica efetiva menor, em aproximadamente 100 vezes a condutividade do material do condutor. Estes resultados foram validados com medidas das temperaturas internas [6,7,8], e mostram que para condições de corrente elevadas, a diferença das temperaturas do núcleo e da superfície do cabo pode variar entre 20% e 30% do aumento da temperatura do cabo em regime permanente para a corrente aplicada.

O presente IT apresenta medições de temperaturas no interior de um cabo tipo Tern submetido a correntes dinâmicas, feitas com termopares inseridos entre as camadas do condutor durante o processo de fabricação. A aplicação de altos valores de corrente durante pequenos intervalos de tempo, as medidas mostram uma

distribuição irregular da temperatura radial. Cabe ressaltar que medições internas de temperatura podem auxiliar na validação de modelos mais precisos para cálculos de temperatura interna de cabos, obtendo-se uma melhor caracterização das tensões térmicas e, com isto, evitar problemas, tais como engaiolamento dos fios, que afetam a vida útil dos cabos.

A temperatura dos cabos é também fortemente influenciada pela sua capacidade de resfriamento. No caso de cabos aéreos, as perdas por convecção são as mais influentes no seu resfriamento. Com isso, na maioria dos cálculos as perdas por radiação atuam com um papel secundário e, conseqüentemente, fatores inerentes às propriedades físicas da superfície externa dos cabos, como emissividade térmica e absorvidade, têm assumido valores conservativos subestimando em vários casos a capacidade de transporte das linhas de transmissão.

A emissividade térmica é o parâmetro mais relevante para o cálculo da radiação térmica emitida pela superfície do cabo, sendo importante caracterizá-la em função do tempo de uso do cabo e das condições atmosféricas em que foi inserido, para o cálculo correto da capacidade da linha. Existem poucos registros de medições experimentais de emissividade térmica da superfície de cabos usados em linhas de transmissão [12,13], sendo um dos motivos a dificuldade inerente para obtenção destas medidas. Todavia, as atuais tecnologias têm facilitado e aumentado a precisão das medidas, incentivando novos estudos experimentais. Uma das técnicas é o uso de câmeras de termovisão, pela sua grande flexibilidade e boa precisão, que medem temperatura de qualquer superfície e sem restrições de local.

Resultados experimentais de emissividade térmica usando uma câmera de termovisão serão apresentados para vários tipos de cabos ACSR. Será também mostrado que para altos valores desta propriedade, as perdas por radiação tornam-se importantes, principalmente considerando elevados carregamentos de corrente que ocasionam um aumento de temperatura na superfície do cabo.

2.0 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DE CABO

2.1 Metodologia Experimental

As medições das temperaturas internas foram realizadas em um cabo ACSR do tipo TERN. Durante o processo de sua fabricação, foram colocados entre suas camadas 9 termopares tipo J, com precisão de 0,2 °C, em três seções transversais do cabo equidistantes ao longo de 11 m. Em cada seção os termopares foram colocados entre a alma e a primeira camada de alumínio, entre a primeira e segunda camadas e entre a segunda e terceira camadas. Foram utilizados termopares com o menor diâmetro disponível no mercado, minimizando os possíveis desarranjos entre os fios das camadas. Este procedimento, aparentemente inovador, de instalar os termopares na fabricação do cabo permite realizar medidas mais precisas da temperatura entre as camadas, pois evita danificar o condutor com furos ou afastamento dos fios para a instalação dos termopares, o que pode causar perturbações implícitas das medições experimentais da temperatura.

Os ensaios foram realizados em um laboratório fechado, com temperatura ambiente controlada de 25 °C e sem fontes externas de calor e de vento. Utilizou-se um transformador de corrente para induzir uma corrente de valor controlado no condutor, que variou entre 0 e 2000 A. O cabo foi pendurado no ar com cordas isolantes presas no teto, mantendo constante a distância do condutor ao piso do laboratório. Além dos termopares instalados no interior do cabo, foram instalados termopares em vários pontos da superfície do cabo.

Normalmente, as medições com termopares são precisas, desde que sejam tomados alguns cuidados, sendo um dos mais expressivos o bom contato entre a extremidade do termopar e o corpo-de-prova. Para minimizar possíveis erros, os termopares foram firmemente fixados com arame e foi utilizada uma pasta térmica para homogeneizar a região medida. O intervalo mínimo de coleta do sistema de aquisição de dados utilizado é de 3 segundos.

Paralelamente às medidas com termopares, foram realizadas medidas de temperatura com uma câmera de termovisão P65 da Flir Systems com detector tipo Matriz Plano Focal (FPA), microbolométrico não refrigerado com resolução 320 x 240 pixels e precisão de ± 2 °C ou 2 % de leitura. Algumas pequenas seções do cabo foram pintadas com tinta preta fosca de emissividade conhecida (0,97) para aumentar a precisão das medidas com a câmera. Para realizar medições precisas com a câmera é necessário conhecer alguns parâmetros que são utilizados no ajuste da câmera. Entre estes parâmetros cita-se a emissividade térmica, a temperatura ambiente, umidade relativa, distância do objeto, etc. Com exceção da emissividade térmica, cuja determinação é objeto deste IT, no laboratório os demais parâmetros são bem conhecidos.

Com esse arranjo experimental monitoraram-se as temperaturas internas e externas do cabo submetido a vários ciclos térmicos, onde se variou os valores de corrente e o tempo de duração.

2.2 Resultados e Discussões de Temperatura Interna do Cabo

Para facilitar a referência à posição dos termopares, o termopar entre a alma e a primeira camada será nomeado de T1, entre a primeira e a segunda de T2, entre a segunda e a terceira de T3 e o da superfície de T4.

Na Figura 1 está apresentado um exemplo do procedimento utilizado nos ciclos térmicos. Neste caso, aplicou-se uma corrente inicial de 500A até que as temperaturas do condutor se estabilizassem, ou seja, atingissem o regime permanente. Em seguida a corrente foi elevada para 700A, até atingir novamente o regime permanente, procedimento repetido para a corrente de 900A. Após o terceiro ciclo o transformador foi desligado e a temperatura do cabo foi monitorada até atingir a temperatura ambiente. Os gráficos da Figura 1 mostram o comportamento no tempo da temperatura para 4 termopares posicionados numa mesma seção, 3 internos e 1 na superfície. Visualmente, na Figura 1(a) existem duas curvas, a curva inferior (na cor azul) refere-se aos termopares T1 e T2 e a curva superior (na cor verde) aos termopares T3 e T4. Estas curvas indicam que há uma diferença entre as temperaturas medidas ao longo da seção transversal do cabo. Em valores absolutos as diferenças variaram em função da corrente, sendo de aproximadamente 1°C a 5°C, para as correntes de 500A e 900A, respectivamente, o que representa em valores relativos diferenças de até 5% na temperatura de uma mesma seção.

Embora esta diferença possa ser negligenciada para a operação de uma linha em regime normal o mesmo não deve acontecer na operação de emergência, onde as correntes são bem maiores, quando uma diferença de temperatura acima de 5% pode desencadear problemas relacionados a perdas de tensão e engaiolamento do cabo. A literatura tem citado estudos com altas correntes onde a diferença da temperatura radial pode chegar de 15°C a 30°C [7].

Na Figura 1(b) observa-se que, para a corrente de 900A, a diferença entre T1 e T2 é de aproximadamente 1°C, acontecendo o mesmo entre T3 e T4.

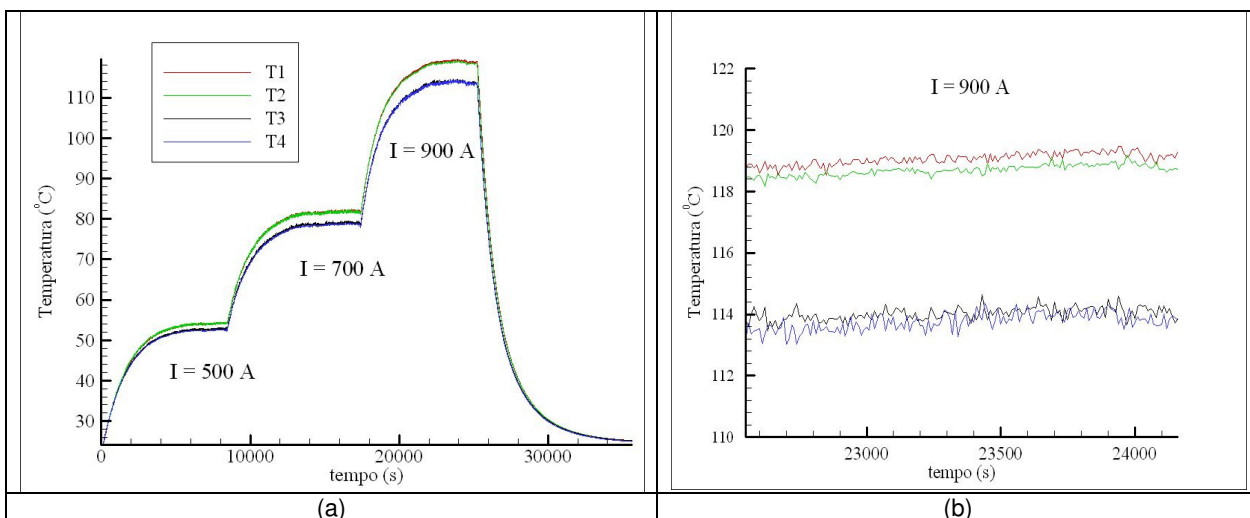


FIGURA 1 – Exemplo dos ciclos térmicos utilizados

Apesar de não serem aqui apresentados, os resultados dos ensaios mostraram que para baixas correntes, da ordem de 350 A, as diferenças entre os 4 termopares são praticamente desprezíveis.

Os resultados para um carregamento transitório de corrente estão mostrados nos gráficos da Figura 2, sendo que neste ensaio foram utilizados somente os termopares internos. No exemplo da figura, inicialmente foi aplicada a corrente de 350A até que fosse atingida a temperatura de regime permanente, elevando-se em seguida a corrente para 2000A durante 2 minutos, retornando-se novamente para 350A até que a temperatura volta-se ao regime permanente.

Na Figura 2(b) é possível observar com mais detalhes as temperaturas no período em que a corrente foi de 2000A, onde nota-se que as maiores temperaturas foram do termopar T2, seguidas dos termopares T3 e T1. Lembrando a posição dos termopares constata-se que a maior temperatura está na camada intermediária e a menor na camada mais interna. Neste período a diferença entre as temperaturas dos termopares T1 e T2 chegou a 7,5°C. A ordem dos condutores (T2 T3 e T1) em função da maior para a menor temperatura, pode ser atribuída à distribuição não uniforme da densidade de corrente ao longo das camadas do condutor, devido aos efeitos eletromagnéticos tais como o pelicular. Resultados numéricos de estudos de curtos-circuitos com 30 kA_{ef} e

duração de 1 segundo em cabos ACSR e OPGW levaram a esse mesmo comportamento radial da temperatura [22]. Todavia, os autores não apresentam comparações experimentais.

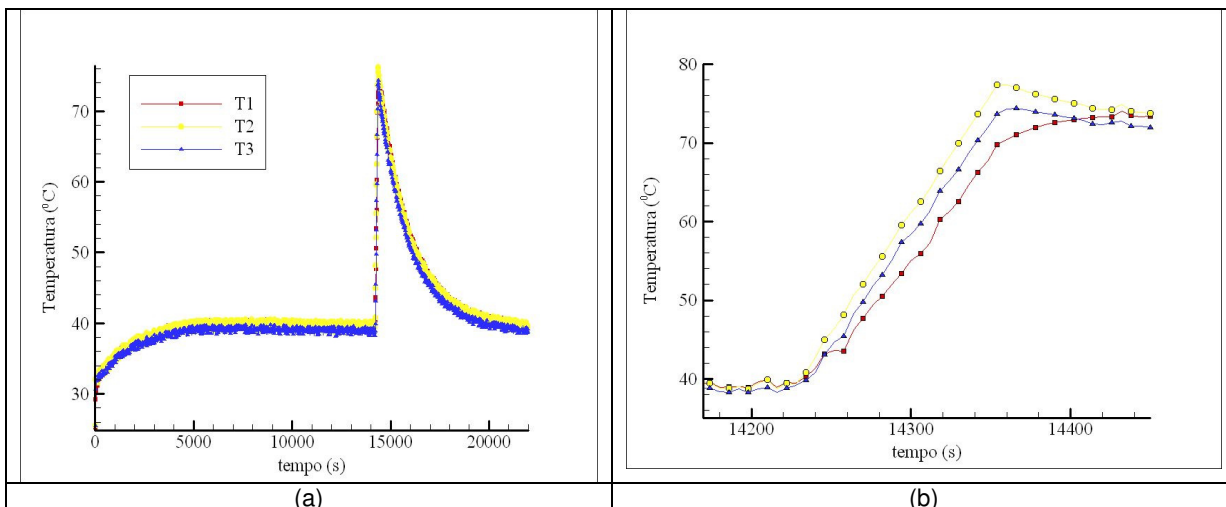


FIGURA 2 – Resultados de estudos em regime transitório.

Na Figura 3 tem-se os resultados de outro ensaio com corrente transitória, onde a corrente inicial foi de 650A. Nos resultados da Figura 3(a) a corrente transitória foi de 1600A e na Figura 3(b) foi de 2000A, ambas com duração de 1 minuto. Esses resultados repetem o que foi observado nos ensaios anteriores no que diz respeito ao comportamento radial das temperaturas, mas, como novidade estes resultados mostram que as diferenças entre as temperaturas aumentam com a corrente transitória, chegando a pouco mais de 20% para a corrente de 2000A.

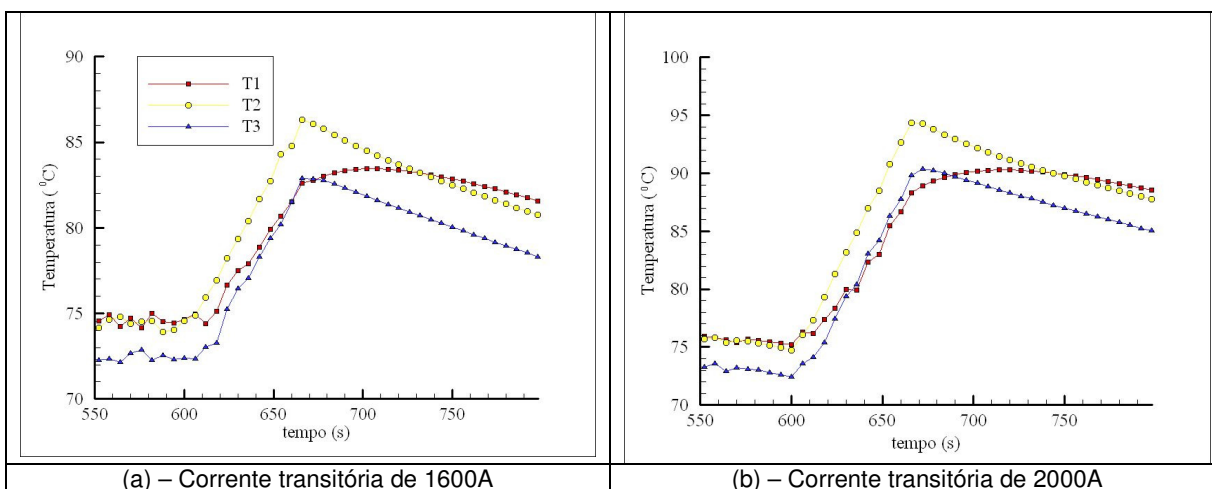


FIGURA 3.

3.0 - MEDIÇÕES DE EMISSIVIDADE TÉRMICA DA SUPERFÍCIE EXTERNA DE CABOS

3.1 Metodologia Experimental

A emissividade térmica dos cabos foi medida experimentalmente através da câmera de termovisão. Foram ensaios vários tipos de cabos, com diferentes tempos de uso em linhas aéreas de transmissão. No arranjo experimental, os cabos foram colocados na forma de um semi-círculo e sustentados por apoios isolados, de forma a manter uma distância constante ao piso do laboratório. Ao longo do cabo foram instalados diversos termopares, que serão lidos no mesmo instante da aquisição dos dados pela câmera de termovisão. Para possibilitar repetir diversas vezes o mesmo ensaio, foram marcados pontos fixos no piso do laboratório que foram usados como referência para as medições termográficas com a câmera. Para verificar a precisão dos valores medidos, uma pequena parte da superfície do cabo foi pintada com uma tinta spray grafite preta fosca que tem emissividade conhecida ($\epsilon = 0,97$). Na Figura 4 tem-se uma visão geral do arranjo no laboratório.

Conforme dito anteriormente, o laboratório tem a temperatura ambiente controlada e não há fonte de vento, tendo-se, portanto, somente a convecção livre ou natural.. A luz do laboratório é desligada durante o ensaio para evitar

possíveis reflexões de radiação. Devido ao equilíbrio entre a energia interna gerada pela resistência do cabo e as perdas por convecção e radiação, no regime permanente a temperatura ao longo do cabo é constante e uniforme. No ensaio, é aplicada uma dada corrente durante 2 horas, o que garante que a temperatura do cabo se estabilizou e o fenômeno está em regime permanente. Após este tempo, monitora-se simultaneamente com os termopares e com a câmera de termovisão a temperatura na superfície do cabo, nos pontos marcados no piso. A câmera é cuidadosamente posicionada a uma distância de 50 cm, com um ângulo de 90 graus, da área do cabo a ser medida.

A emissividade térmica foi medida indiretamente tomando-se como referência a temperatura média dos termopares, instalados na superfície do cabo. Simultaneamente com as medidas dos termopares faz-se a leitura da temperatura com a câmera, ajustando-se o valor de entrada referente à emissividade até as temperaturas se igualem. Para minimizar erros inerentes a medidas experimentais, como, por exemplo, o mal contato do termopar com a superfície do cabo, no cálculo da temperatura média dos termopares foram considerados apenas os valores com variação de até 3% da temperatura máxima medida pelos termopares.

Ressalta-se que, devido o cabo ser formado por fios a sua superfície não é uniforme, o que interfere no ângulo entre a câmera e a superfície, sendo possível causa de erros. Sabendo-se deste problema, selecionaram-se pontos na superfície do cabo que não apresentassem deformações espúrias.



FIGURA 4. – Arranjo do ensaio no laboratório para medição indireta da emissividade do cabo

3.2 Resultados e Discussões da Emissividade Térmica de Cabos

Foram ensaiados 4 cabos retirados de linhas de transmissão localizadas em diferentes condições ambientais e um cabo novo, vindo diretamente da fábrica. Os cabos e o seu tempo de uso nas linhas foram: Grosbeak-1 com 24 anos, Grosbeak-2 com 33 anos, Rail com 26 anos e Magnólia com 31 anos. O cabo novo é o Tern. Na Figura 5 tem-se fotos da superfície dos cabos ensaiados mostrando o envelhecimento da superfície causado pelo uso no campo. Nas fotos observa-se que as superfícies apresentam envelhecimentos diferentes, isto deve ao fato de terem tido diferentes tempos de uso e de condições ambientais.

A análise visual dessas fotos, cabo por cabo, mostra que o desgaste da superfície não ocorreu por igual, o que acena com a possibilidade de encontrar nos ensaios uma emissividade variando ao longo do cabo, o que foi confirmado na prática. Na inspeção visual do cabo também foram observadas diferenças consideráveis no envelhecimento entre a superfície voltada para o céu com a voltada para o solo.

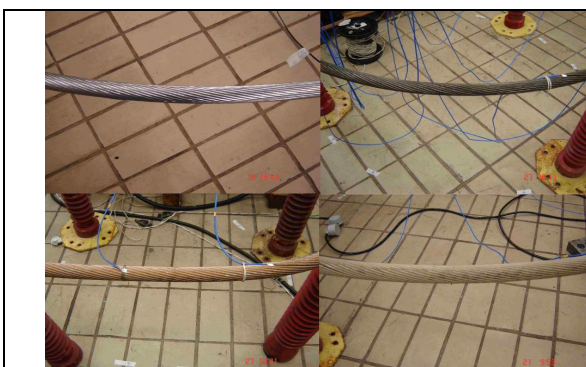


FIGURA 5. Fotos das superfícies dos cabos

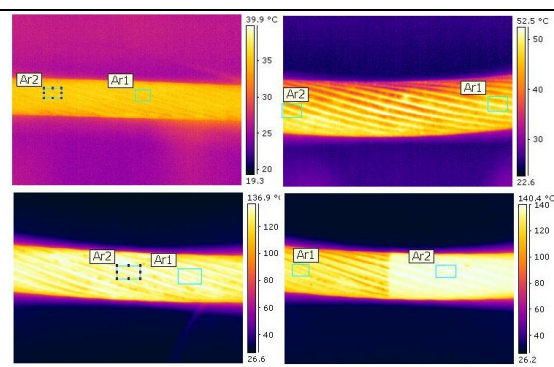


FIGURA 6. Imagens termográficas obtidas com a

envelhecidos no campo.	câmera
------------------------	--------

Na Figura 6 encontra-se algumas imagens termográficas obtidas com a câmera. A imagem acima à esquerda mostra o cabo aquecido com temperatura uniforme em todo cabo de aproximadamente 40°C. Já, nas demais imagens a temperatura na superfície varia de 53 °C a 140 °C. Para os cabos com temperaturas mais altas é possível visualizar com detalhes cada fio do cabo, manchas e amassados na superfície do cabo. Nota-se que, a medida que a temperatura do cabo aumenta, o fluxo de calor por radiação emitida pela superfície aumenta, tornando mais clara as imagens e dessa forma as medições são mais precisas. Na imagem abaixo à direita tem-se a parte do cabo pintado de preto, onde se vê uma imagem mais uniforme do cabo devido à característica isotrópica da emissividade térmica em se tratar de uma superfície negra.

Os resultados dos ensaios para medir indiretamente a emissividade dos cabos estão apresentados na Tabela 1. Para cada cabo foram realizados 3 ensaios, considerando correntes diferentes, onde após a temperatura entrar em regime permanente mediu-se a emissividade em vários pontos do cabo. Na Tabela 1 tem-se os valores das corrente e a faixa de valores encontrados para a emissividade ao longo do cabo.

TABELA 1 – Resultados dos ensaios para determinar a emissividade térmica dos cabos

Cabo	Idade	ensaio 1		ensaio 2		ensaio 3	
		I	ϵ	I	ϵ	I	E
Grosbeak 1	24	605	0.87 – 0.89	800	0.87 – 0.90	1050	0.87 – 0.89
Grosbeak 2	33	575	0.81 – 0.84	760	0.81 – 0.84	1050	0.80 – 0.83
Rail	26	575	0.66 – 0.69	760	0.64 – 0.68	1050	0.63 – 0.67
Magnólia	31	605	0.86 – 0.89	800	0.84 – 0.89	1050	0.84 – 0.88
Tern	0	575	0.32 – 0.34	760	0.31 – 0.35	1050	0.30 – 0.35

Na tabela acima, verifica-se que há um aumento considerável da emissividade térmica dos cabos usados em relação ao cabo novo. Entre os cabos testados, o cabo Grosbeak 1, com menor tempo de operação, tem uma faixa de emissividade maior com relação aos outros cabos. Certamente, é consequência do tipo de região no qual ele foi operado, mostrando uma superfície muito enegrecida provavelmente pela poluição da região. Por outro lado, o cabo Rail tem uma emissividade térmica relativamente baixa em comparação com os demais cabos, denotando uma superfície sem efeitos profundos de envelhecimento, provavelmente como consequência da região mais límpida no qual ele operou.

A variação da emissividade térmica com o tempo de operação de cabos e a influência das condições ambientais nesta grandeza foram medidas em [13,14] para cabos considerando tempos de operação entre 0 e 40 anos. Nestes estudos foi mostrada uma faixa de variação da emissividade entre 0.3 e 0.95 para as amostras de cabos testados. Inclusive é deduzida uma expressão aproximada para o cálculo da emissividade térmica em função do tempo de operação e as condições ambientais da região. Os resultados obtidos em [12, 13] estão em concordância com os resultados obtidos neste trabalho. Entretanto, o arranjo experimental descrito neste IT usando uma câmera de termovisão são de fáceis reproduções em laboratório, e abrem a possibilidade de reproduzir estas medidas em campo sem necessidade de retirar uma amostra do cabo para testes em laboratório.

3.3 Influência da Emissividade Térmica na Ampacidade de Cabos

A capacidade de resfriamento do cabo condutor é determinante para estabelecer o carregamento elétrico a ser imposto à linha de transmissão, pois, quanto maior for o resfriamento do cabo, menor será a sua temperatura e conseqüente poder-se-á aumentar o carregamento elétrico.

Dois mecanismos são relevantes para o resfriamento do cabo: a convecção e a irradiação térmica. O primeiro depende do vento, sendo, portanto, uma variável aleatória no tempo e no espaço, o que implica na impossibilidade de tê-lo sobre controle. Já a irradiação, que depende das características do material, pode, teoricamente, ser controlada e quando necessário é calculada com razoável precisão a partir do conhecimento da emissividade térmica de sua superfície.

Com o objetivo de analisar a influência da emissividade térmica na capacidade de resfriamento dos cabos, foram ensaiados dois cabos Tern, um com a superfície totalmente nova e outro com a superfície pintada com uma tinta preta fosca, representando um cabo com o envelhecimento máximo. Conforme mostrado anteriormente, a emissividade do cabo novo é de 0,30 a 0,35 e a do cabo pintado de preto é de 0,97. Os cabos foram ensaiados aplicando-se 3 ciclos térmicos, sendo que a corrente dos ciclos foram de 500A, 700A e 900A. Durante o ensaio foram monitoradas as temperaturas internas e externas dos cabos.

Os resultados dos ensaios, apresentados na Figura 7, indicam que para a corrente de 500 A, a diferença entre as temperaturas dos cabos pintado e novo é de 16,5%, sendo a temperatura mais baixa a do cabo pintado. As diferenças para as correntes de 700 A e 900 A são de 22% e 27%, respectivamente. Os resultados levam a conclusão que este aumento de eficiência no resfriamento do cabo preto aumenta com a corrente. Verificou-se também, que a diferença entre as temperaturas externa e interna não se modificam pelo fato do cabo ser pintado.

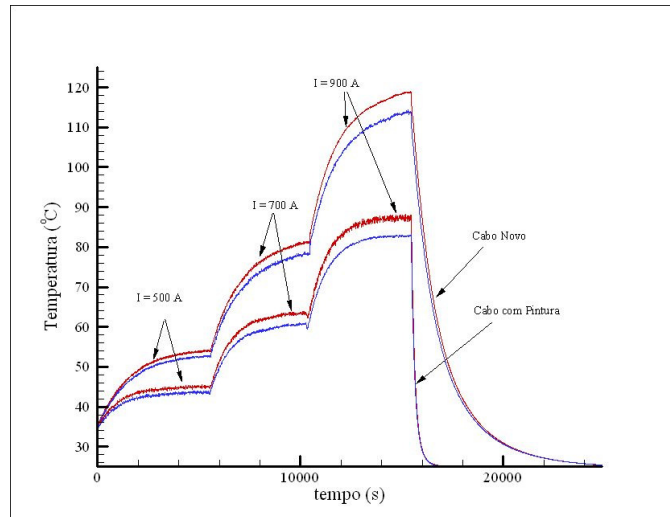


FIGURA 7. Temperatura interna (curva vermelha) e superficial (curva azul) para dois cabos tipo Tern para diferentes correntes aplicadas. Um cabo novo com emissividade 0,35 e outro pintado com tinta preta de emissividade 0,97

Outro fato marcante nos resultados é que com o cabo pintado o tempo necessário para atingir o regime permanente é consideravelmente menor que o do cabo novo. Quando a corrente é diminuída, o resfriamento do cabo pintado é mais rápido. Deste ensaio conclui-se que para condições de vento calmo e sem aquecimento solar (noite), cabos com emissividade alta têm melhor desempenho que os de baixa emissividade.

4.0 - CONCLUSÕES

Neste informe técnico foram apresentadas medições de temperatura interna e superficial de cabos condutores ACSR. O procedimento de monitoração da temperatura interna do cabo foi cuidadosamente planejado desde seu processo de fabricação, visando obter medidas de temperatura mais precisas minimizando a interferência causada pelos termopares na configuração estrutural do cabo. Da mesma forma, seguindo um procedimento adequado que possibilita medições precisas de temperatura na superfície de cabos, utilizou-se uma câmera de termovisão e junto com termopares firmemente colocados na superfície, obteve-se resultados de emissividade térmica de cabos com diferentes graus de envelhecimento. Este arranjo experimental mostra vantagens por sua relativa simplicidade e boa precisão, permitindo também a possibilidade de obter medidas de emissividade térmica em campo sem necessidade de retirar da linha uma amostra de cabo.

A partir deste arranjo experimental, monitorou-se a distribuição de temperatura radial com termopares no interior de um cabo condutor de 3 camadas. Em condições transitórias a distribuição irregular de temperatura mostra um aquecimento maior na camada intermediária do condutor, originando uma diferença interna de temperatura do cabo, cujo valor depende da corrente aplicada. Medições da emissividade térmica para vários cabos ACSR mostram uma forte dependência desta propriedade com o tempo de operação e as condições atmosféricas da região em que operaram. Notou-se também que mesmo para cabos de poucos metros de comprimento, sua superfície não homogênea reflete em valores de emissividade que variam ao longo do cabo. Finalmente uma comparação de dois casos extremos de emissividade, em que um cabo novo de emissividade baixa 0,35, e um cabo do mesmo tipo pintado com tinta preta de emissividade máxima 0,97 são testados sob as mesmas condições. Estes últimos resultados mostram a relevância da emissividade térmica para o resfriamento do cabo, obtendo-se uma alta eficiência térmica do cabo preto principalmente em condições de elevados carregamentos de corrente, vento calmo e sem influência do aquecimento solar.

5.0 - RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como continuação e complementação deste trabalho, algumas propostas considerando novos aspectos são sugeridos para ensaios subseqüentes. Assim por exemplo, a possibilidade de reproduzir os ensaios considerando a aplicação de vento e o aquecimento solar. Estudos ao respeito mostram que a diferença de temperatura interna de cabos pode ser afetada pela aplicação de ventos intensos [7,8].

As limitações do laboratório impossibilitaram a aplicação de tensão mecânica nos cabos ensaiados. Sabe-se que esta tensão mecânica proporciona um melhor contato entre as camadas podendo influenciar na distribuição de temperatura radial dos cabos. Os dados experimentais de distribuição radial de temperatura de cabos podem ser usados para a caracterização da condutividade térmica efetiva, contudo, valores mais precisos desta propriedade devem ser calculados considerando a aplicação de tensão mecânica nos ensaios.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes empresas:

CHESF e FURNAS, que forneceram os corpos de prova, material essencial para caracterizar a evolução das condições superficiais dos cabos condutores em serviço.

NEXANS, que produziu a amostra de cabo condutor com conjuntos de termopares embutidos, o que foi fundamental para realizar a pesquisa apresentada.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) MORGAN V. T.: Rating of bare overhead conductors for intermittent and cyclic currents. Proc. IEE. 1969.
- (2) MORGAN V. T.: "Thermal Rating of Overhead-Line Conductors – Part I. The Steady State Thermal Model". Elect Power Sys. Research 1982."
- (3) FOSS S. D., LIN S. H., FERNANDES R. A.: "Dynamic Thermal Line Ratings – Part I – Dynamic Ampacity Rating Algorithm"; IEEE, 1983.
- (4) BLACK W. Z., BYRD W. R.: "Real-Time Ampacity Model for Overhead Lines". IEEE, 1983.
- (5) BLACK W. Z., RENBERG R. L.: "Simplified Model for Steady State and Real-Time Ampacity of Overhead Conductors". IEE. TPAS. 1985.
- (6) DOUGLAS D. A.: Radial and Axial Temperature Gradients in Bare Stranded Conductor". IEEE. TPS. 1986.
- (7) FOSS S. D., LIN S. H., CARBERRY R.: "Significance of the Conductor Radial Temperature Gradient within a Dynamic Rating Methodology." IEEE.; 1987.
- (8) HALL J. F., SAVOULLIS J., DEB A. K.: "Wind Tunnel Studies of Transmission Line Conductor Temperatures". IEEE. 1988.
- (9) MORGAN V. T.: "Radial Temperature Distribution and Effective Radial Thermal Conductivity in Bare Solid and Stranded Conductors". IEEE. 1990.
- (10) MORGAN V. T., BO ZHANG, FINDLAY R. D.: "EFFECT OF MAGNETIC INDUCTION IN A STEEL-CORED CONDUCTOR ON CURRENT Distribution Resistance and Power Loss" IEEE, 1997.
- (11) MIRO ZUNEC, IGOR TICAR: "Determination of Current and Temperature Distribution in Overhead Conductors by Using Electromagnetic-Field Analysis Tools. IEEE, 2006.
- (12) TAYLOR C. S., HOUSE H. E.: Emissivity and Its Effects on the Current-Carryng Capacity of Stranded Aluminum Conductors. AIEE, 1956.
- (13) RIGDON W. S., HOUSE H. E., GROSH r. j., COTTINGHAM W. B.: Emissivity of Weathered Conductors After Service in Rural and Industrial Environments. IEEE, 1963.