



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO GLT

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

**AUMENTO DA EFICIÊNCIA NO RESFRIAMENTO DE CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE
UMA TECNOLOGIA INOVADORA**

Farith M. Absi Salas (*)
CEPEL

Luis A. M. C. Domingues
CEPEL

João Ignácio da Silva Filho
CEPEL

RESUMO

No presente informe técnico (IT) é apresentado um procedimento para modificar as propriedades termo-radiativas da superfície externa de cabos condutores aéreos, e com isto aumentar a capacidade de resfriamento de cabos condutores. O procedimento consiste na aplicação de uma fina camada de revestimento na superfície externa do cabo, o que modifica as propriedades térmicas da sua superfície relativas à emissão de radiação térmica e à absorção solar. Com esta técnica aumenta-se a capacidade de emissão de radiação térmica na superfície do cabo, mantendo-se, ao mesmo tempo, baixa a sua capacidade de absorção solar. Para validar a eficiência do procedimento, foram realizados ensaios em laboratório que comparam os comportamentos térmicos de cabos condutores com e sem revestimentos. Os resultados experimentais mostraram que em cabos com altas temperaturas, a eficiência no resfriamento é significativamente maior nos cabos revestidos. Estes resultados são promissores para a aplicação na operação de linhas de transmissão em condições adversas, situações em que as temperaturas dos cabos são elevadas. Estas condições adversas podem resultar, entre outros, do aumento da corrente elétrica nos horários de pontas ou da operação em condições de contingência, e de condições atmosféricas críticas, tais como ventos fracos ou alta radiação solar.

PALAVRAS-CHAVE: Emissividade térmica, Absortividade, Radiação térmica, Radiação solar, Revestimento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Na crescente expansão do setor elétrico, o transporte da energia elétrica de forma mais eficiente e segura tornou-se um desafio para a tecnologia de cabos condutores, onde a meta é proporcionar uma maior ampacidade as linhas de transmissão. Nesse contexto, o surgimento de novos tipos de cabos de transmissão tem aumentado significativamente, proporcionando ao setor uma variedade de opções de cabos aéreos inovadores, tais como os cabos ACCR, ACCC, T-ACSR, entre outros. Uma característica comum a estes cabos é o aumento da capacidade de transmissão devido às modificações na estrutura física dos materiais que compõem o cabo, permitindo que o mesmo opere em altas temperaturas sem, contudo, degradar as suas propriedades metalúrgicas, mecânicas, e elétricas.

O comportamento térmico dos cabos aéreos é de suma importância para o dimensionamento das correntes máximas admissíveis na linha de transmissão (LT) que são limitadas por fatores tais como a dilatação térmica, flecha, degradação das propriedades mecânicas e metalúrgicas e perdas relacionadas ao efeito Joule. A ampacidade do cabo é definida pela temperatura máxima de operação, que é governada pela corrente elétrica, características dos materiais, condições da superfície externa e meio ambiente. Dois mecanismos são importantes na troca térmica do cabo com o meio ambiente: a convecção e a radiação térmica. A convecção, que pode ser natural ou forçada pela ação do vento, resfria o cabo condutor aéreo. A convecção forçada é um mecanismo de difícil modelagem, devido à alta variabilidade da velocidade e direção do vento. A radiação térmica é ditada pelas

(*) Av. Horácio Macedo, n° 354 – Cidade Universitária– CEP 21.941-91 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6423 – Fax: (+55 21) 2520-4189 – Email: farith@cepel.br

propriedades térmicas da superfície do cabo condutor, e dependendo de seu valor ela pode ser relevante na temperatura do cabo, principalmente em situações adversas de corrente e de condições ambientais críticas. A radiação térmica é caracterizada através da emissividade térmica, cujo valor representa a eficiência de uma superfície emitir calor por meio de ondas eletromagnéticas. Por outro lado, tem-se a absorção solar que é a capacidade de uma superfície absorver a energia solar incidente, e seu valor é expresso pela absorptividade térmica.

Na literatura existem diversos modelos térmicos para o cálculo da temperatura superficial de cabos condutores, sendo que todos consideram a emissividade e a absorptividade térmica da superfície do cabo (1). Devido a dificuldade de obter valores reais, é comum adotar valores conservativos para esses dois fatores. Vários estudos experimentais procuraram caracterizar a emissividade térmica de cabos, resultando em uma ampla faixa de valores (2, 3). Via de regra, os procedimentos utilizados nesses estudos experimentais são complexos e de difícil execução.

Na referência (4) encontra-se descrito um novo método de ensaio, de mais fácil execução, que foi aplicado a diversas amostras de cabos, novos e com vários tempos de uso no campo. Nesses ensaios foram encontrados valores de emissividade variando entre 0,3 e 0,9, para períodos de uso entre 0 e 30 anos e expostos a diversos tipos de poluição ambiental. Pode-se observar nos ensaios a influência da emissividade na temperatura do cabo condutor com diferentes tipos de superfície. As observações levaram a pensar que caso fosse possível modificar ou controlar a emissividade ter-se-ia uma interferência direta na temperatura do cabo condutor, principalmente para as temperaturas mais altas. O procedimento aqui apresentado de modificar a emissividade do cabo é uma aplicação inovadora, e consiste do uso de uma fina camada de revestimento na superfície do cabo condutor, alterando suas propriedades térmicas. A alteração pode ser controlada de acordo com as características do revestimento utilizado.

A outra propriedade de interesse que é a absorptividade, não foi monitorada no laboratório, mas na prática, existem varias aplicações que consideram esta propriedade térmica de revestimentos. Por exemplo, os painéis solares utilizam em seus coletores materiais com alta absorptividade (~1); a escolha do carro de acordo com a cor pintura externa; na cor de uniformes usados em condições de exposição solar intensa. Neste assunto existem na literatura descrição de ensaios que estudam a influência da cor do revestimento de superfícies metálicas na absorptividade (5).

No presente IT, são apresentados os resultados de análises experimentais que quantificam a influência do tipo de revestimento da camada externa na temperatura superficial do cabo condutor. Os resultados são apresentados levando em consideração a temperatura final e a energia dissipada em cabos com e sem revestimento. Os ensaios foram realizados em laboratório fechado e com condições ambientais controladas. Para suportar conclusões a respeito da absorptividade, foram calculadas por modelo de equilíbrio térmico as temperaturas de cabos condutores considerando o efeito da radiação solar em cabos condutores revestidos com materiais de baixa e alta capacidade de absorção.

2.0 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE CABOS CONDUTORES

O processo térmico de cabos condutores de linhas de transmissão tem seu início com o fluxo de corrente em suas camadas de fios condutores. Uma parcela da energia elétrica é convertida em energia térmica devido à resistência dos materiais dos cabos à circulação da corrente. Parte da energia térmica gerada, adicionada da energia devido a absorção da radiação solar, é dissipada para o meio ambiente por convecção e radiação e o restante provoca um aumento da temperatura do cabo condutor.

A convecção, que pode ser natural ou forçada pela ação do vento, é um dos fenômenos responsáveis pelas perdas de calor e é o mecanismo preponderante no resfriamento dos cabos. Entretanto, este mecanismo é um fenômeno com caráter aleatório, cuja intensidade e direção podem variar de forma significativa em curtos períodos de tempo, limitando muitas vezes o aumento da capacidade de transmissão, por não resfriar de forma suficiente o cabo e com isto tem-se cabos com altas temperaturas. Como toda variável meteorológica é impossível controlar a velocidade do vento no meio ambiente.

Por outro lado, o resfriamento dos cabos pela irradiação térmica emitida, q_R é um mecanismo que teoricamente pode ser controlado, pois depende de uma propriedade do material que é a emissividade térmica. O aumento da emissividade traz consigo a diminuição da temperatura, pois há uma liberação mais intensa da energia térmica. Esta mudança da perda por irradiação térmica torna-se mais efetiva quanto maior for a temperatura do cabo, situação em que a LT tem a sua confiabilidade operacional diminuída.

Da mesma forma, a capacidade de absorção da radiação solar pelo cabo depende das características de sua superfície externa e é expressa pela sua absorptividade térmica. Quanto maior for a absorção maior será a temperatura do cabo.

Na maior parte do tempo, a temperatura atingida pelos cabos em regime de operação normal da LT não chega a ser elevada, e neste caso as contribuições para o aquecimento por radiação solar e o resfriamento por irradiação térmica podem não serem relevantes. Entretanto, existem situações onde a ocorrência de carregamentos máximos previstos para a LT podem ocorrer simultaneamente com condições climáticas desfavoráveis, tais como vento fraco ou radiação solar intensa, elevando a temperatura a valores indesejáveis.

2.1 Radiação térmica - emissividade

A radiação térmica é um mecanismo de perda de calor inerente a qualquer superfície. Um corpo acima do zero absoluto irradia calor por meio da sua superfície em forma de ondas eletromagnéticas, na faixa de comprimento de onda dos infravermelhos (aproximadamente de $0,75\mu\text{m}$ - $15\mu\text{m}$). A intensidade da irradiação depende da temperatura do material e das características da sua superfície externa. A troca térmica pode ser quantificada em termos da energia irradiada efetiva através da Lei de Stefan-Boltzman; $q_R \approx \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4)$, onde ε é a emissividade térmica do material, T_s e T_∞ são as temperaturas da superfície do material e do meio ambiente, respectivamente. A emissividade térmica é determinada pela razão entre a radiação emitida pela superfície em questão e pela superfície de um corpo negro, variando entre 0 e 1. Esta propriedade pode ser interpretada como uma medida da eficiência da capacidade de emissão térmica da superfície do corpo. A Lei deixa explícita que quanto maior for a diferença entre as temperaturas do material e do ar, maior será a importância de uma boa caracterização da emissividade.

Para a operação da LT sob condições desfavoráveis, é possível que seja alta a temperatura do cabo, tornando importante que o processo de resfriamento do cabo seja o melhor possível. Como não é possível interferir no vento, a alternativa única é tornar a superfície do cabo mais emissora de energia. Em cabos de alumínio novos a emissividade é da ordem de 0,3 e aumenta gradativamente com o envelhecimento da sua superfície, que sofre todo o processo de poluição, natural ou não (4). Esta constatação levou a propor um revestimento na camada superficial do cabo para aumentar sua capacidade de resfriamento por emissão de calor. No revestimento aplicado em um cabo novo (Figura 1), foi possível alterar a emissividade de 0,3 para 0,95. Com isto, obteve-se uma redução significativa na temperatura do cabo, conforme será apresentado mais à frente.

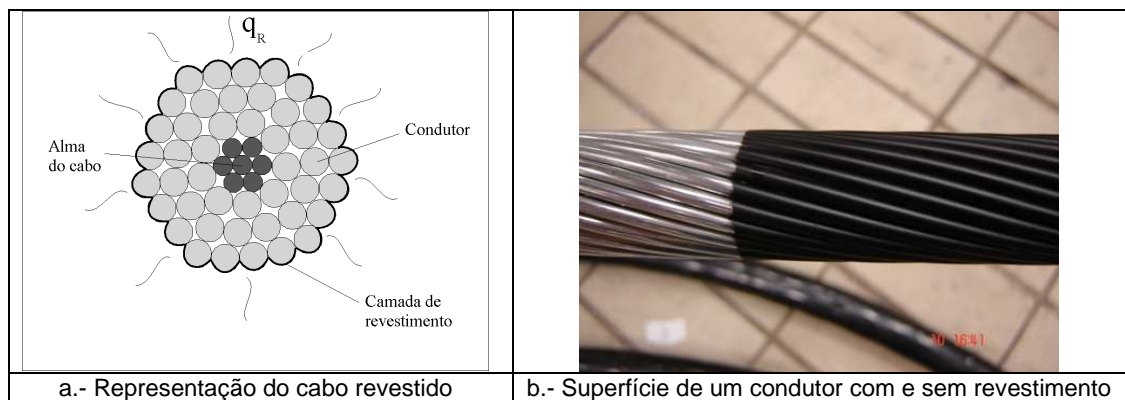


FIGURA 1 – Cabo revestido para aumentar sua eficiência de resfriamento.

2.2 Radiação solar - Absortividade

A radiação solar incidente na superfície de um corpo pode ser absorvida, refletida ou transmitida, sendo esta última aplicável a materiais transparentes ou semitransparentes (como o vidro). Para materiais denominados opacos, como é o caso de metais, uma parcela do raio incidente é refletida e a outra absorvida pela superfície, causando o aumento da temperatura do corpo. No caso de cabos condutores, o cálculo do aquecimento devido à radiação solar não é uma tarefa simples e depende de diversas variáveis, tais como: absortividade térmica, altura solo-cabo, ângulo de inclinação do cabo, ângulo do raio incidente, albedo, refletividade do solo, céu claro, presença de nuvens etc. (6)

A parcela da energia absorvida pelos cabos (q_{sol}) proveniente da radiação solar efetiva incidente pode ser calculada pela fórmula $q_{sol} = \alpha G$, onde α é a absortividade térmica, e G é a energia solar efetiva incidente (direta e difusa). A absortividade térmica representa a capacidade da superfície do condutor absorver a energia solar. Para valores baixos desta grandeza, a energia solar G não é relevante para o aumento de temperatura do cabo, mas torna-se considerável para valores altos. Em cabos de LT esta propriedade tem inicialmente valores baixos (~ 0.2) que vai aumentando com o envelhecimento da sua superfície externa, podendo chegar a 1 (6). Tal qual a emissividade, a absorção pode ser controlada ou alterada, sendo esta dependente da cor do revestimento.

3.0 - ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES

Ensaio foram conduzidos com o objetivo de comparar o comportamento térmico de cabos condutores aéreos com e sem revestimento. Os ensaios foram realizados em um laboratório fechado com temperatura ambiente de 25 °C e demais condições atmosféricas constantes. No arranjo experimental foram utilizados cabos com aproximadamente 11 metros de comprimento, dispostos segundo um semicírculo e mantidos no ar através de cordas isolantes fixadas no teto, de forma a manter uniforme a distância cabo-piso (Figura 2). A temperatura da superfície ao longo dos cabos foi medida com termopares tipo J firmemente fixados na superfície dos cabos. Para homogeneizar o contato entre o termopar e a superfície do cabo utilizou-se uma pasta térmica. A temperatura entre as camadas dos fios do cabo condutor foi monitorada através de termopares instalados no interior do condutor, no momento de sua fabricação. Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados com medição a cada 5 segundos.

Além dos termopares, a temperatura superficial dos condutores foi monitorada através de uma câmera de termografia por infravermelho. O monitoramento com câmera de termovisão permite medir em um mesmo instante a temperatura ao longo do cabo condutor, de forma não intrusiva e com excelente resolução espacial e alta frequência de medição. Com o monitoramento simultâneo das temperaturas interna e externa foi possível analisar o comportamento térmico dos cabos com e sem revestimento, verificando a influência do revestimento na temperatura final, no tempo de aquecimento (ou resfriamento) e na variação do gradiente radial na seção do cabo.



FIGURA 2. Arranjo experimental para monitoramento do comportamento térmico de cabos.

Para verificar a influência da emissividade e absorvidade na temperatura dos cabos foram ensaiados cabos com diversos valores desses parâmetros, que variam entre 0 e 1. O objetivo principal dos ensaios foi verificar a eficiência no resfriamento dos cabos por irradiação térmica ao variar as características térmicas de sua superfície. Para isto, dois revestimentos diferentes foram aplicados na camada externa do condutor, através da pintura com uma fina camada de tinta nas cores preta e branca, ambas foscas (Figura 3). A esses corpos de prova foram aplicadas correntes variando na faixa de 300 a 2000 A. Para cada corrente aplicada monitorou-se a temperatura do condutor até que a mesma se estabilizasse, ou seja atingisse o estágio de regime permanente.

As emissividades térmicas dos cabos foram determinadas experimentalmente através da câmera de termovisão (Figura 4). Com os cabos na temperatura de regime permanente, foram medidas, simultaneamente, as temperaturas através dos termopares e da câmera, ajustando-se o valor da emissividade do cabo indicado na câmera até que as temperaturas medidas no termopar e na câmera fossem iguais. Isto possibilitou determinar o valor médio da emissividade do cabo ensaiado. Mais detalhes deste método podem ser obtidos em (4). Na Figura 4 estão apresentados os cabos ensaiados e suas respectivas imagens termográficas. No caso do cabo sem revestimento, a emissividade térmica determinada variou entre 0,3 e 0,35. Para o revestimento de cor preta fosca a emissividade foi de aproximadamente 0,95. Para o revestimento branco fosco foi de aproximadamente 0,9. Comparando-se as imagens termográficas apresentadas na Figura 4, é possível verificar visualmente a diferença entre as emissividades dos cabos com e sem revestimentos. A emissão de energia nos cabos revestidos é mais intensa e apresenta nas imagens uma cor mais brilhante e uniforme, demonstrando que há uma temperatura superficial constante e uniforme ao longo do cabo, o que não acontece no cabo sem revestimento.

Ressalta-se que, nos ensaios, os revestimentos dos cabos foram executados por meio de pintura. Todavia, a modificação da emissividade pode ser feita através de outras técnicas de revestimentos, como por exemplo, a anodização da camada externa do condutor, o que pode ser feito no processo de fabricação do cabo.

Devido às limitações do laboratório, a capacidade de absorção dos cabos ensaiados foi analisada através de um programa computacional denominado PLT (Perdas em Linhas de Transmissão). Para verificar a influência do revestimento na absorção solar foram utilizados dados reais medidos em uma estação meteorológica.

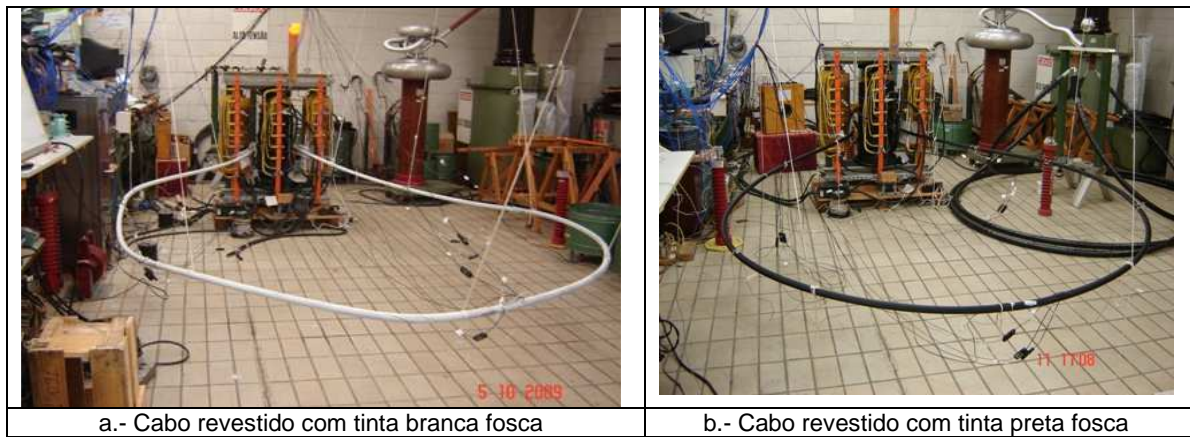


FIGURA 3. Ensaios experimentais em cabos com revestimento

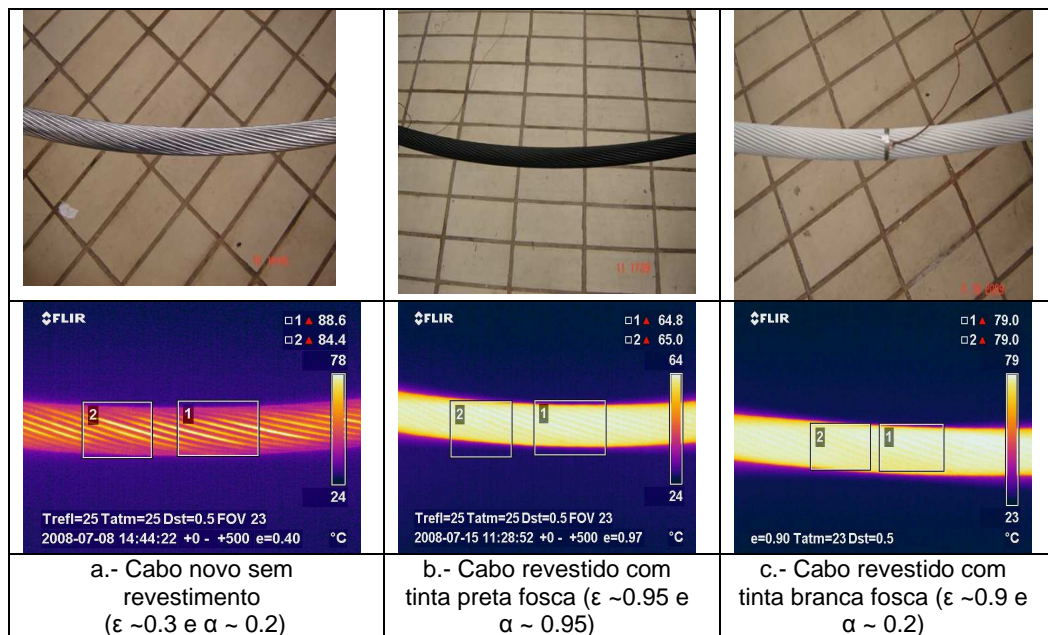


FIGURA 4. Superfícies externas dos cabos ensaiados e suas imagens termográficas.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais

Os ensaios foram realizados em laboratório fechado com temperatura ambiente constante de 25 °C, em regime de convecção natural (sem vento) e sem radiação solar, em cabos ACSR-Tern. Para os cabos sem revestimento a emissividade térmica medida experimentalmente foi de aproximadamente 0,3. No caso dos cabos com revestimento as emissividades térmicas foram de aproximadamente 0,9 e 0,95, para os revestimentos branco fosco e preto fosco., respectivamente. O ambiente do laboratório representa as condições atmosféricas de operação de cabos expostos em locais sem influência da radiação solar e sem vento. Como o interesse principal é estudar a emissividade e a absorção em cabos com altas temperaturas, a não incidência de vento é um dos fatores que conduzem a elevadas temperaturas.

A energia térmica emitida pelas superfícies dos cabos com e sem revestimento está apresentada graficamente na Figura 5a, para correntes variando entre 300 A e 900 A. Esta energia foi medida para a temperatura do cabo estabilizada, isto é, em regime permanente. Nota-se na Figura 5a que a energia térmica aumenta com a corrente e a diferença entre as energias irradiadas pelos cabos com e sem revestimentos é praticamente constante para qualquer valor de corrente. Porém a capacidade de resfriamento (maior emissão de energia) é consideravelmente maior nos cabos com revestimento.

Na Figura 5b está apresentada a energia térmica emitida em função da emissividade térmica da superfície dos

cabos, para correntes de 500 A, 890 A e 1200 A. A linha tracejada corresponde a emissividade térmica dos cabos novos (~ 0.3). A medida que a emissividade térmica aumenta, a capacidade de resfriamento dos cabos é maior, pois, a dissipação de energia térmica é mais intensa. Para os 3 valores de correntes considerados na Figura 5b, a energia emitida é aproximadamente 3 vezes maior nos cabos com revestimento quando comparadas com cabos novos.

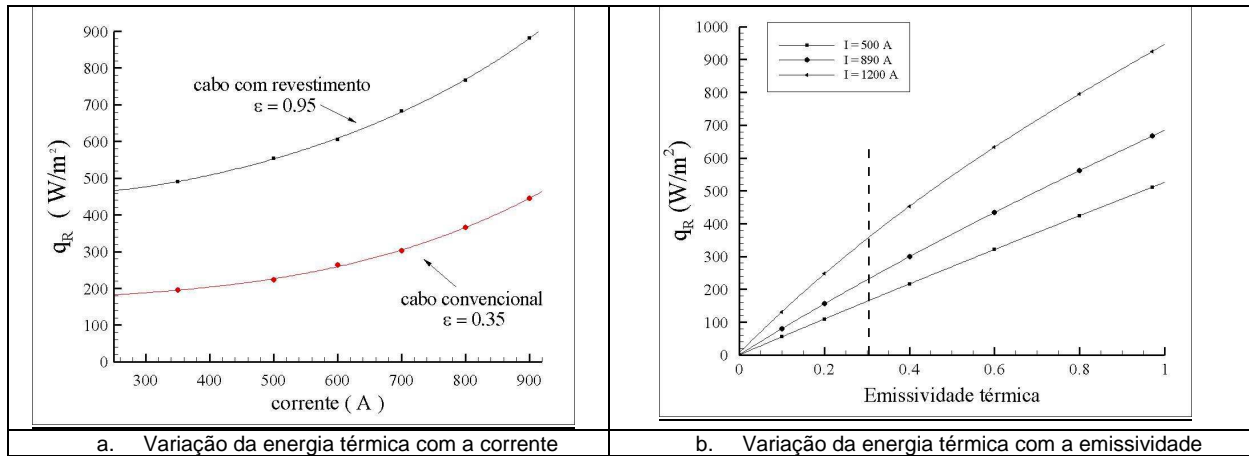


FIGURA 5. Energia térmica emitida pelas superfícies dos cabos em função da corrente e da emissividade térmica

Um dos efeitos mais importantes advindos do aumento da emissão de energia térmica é o resfriamento do cabo, e, conseqüentemente na diminuição da sua temperatura, o que está representado graficamente na Figura 6, para cabos com e sem revestimentos submetidos a correntes de 500 A, 700 A e 900 A. A comparação entre as temperaturas dos cabos leva a concluir que os cabos revestidos têm temperaturas bem menores que as do cabo sem revestimento. Percentualmente obteve-se uma redução de 16%, 22% e aproximadamente 30% para as correntes de 500 A, 700 A e 900 A, respectivamente.

Os ensaios demonstraram que a cor do revestimento não tem um efeito significativo no valor da sua emissividade térmica. Em outras palavras, para baixas temperaturas a diferença entre as temperaturas dos cabos revestidos é desprezível chegando a $4^\circ C$ para as temperaturas mais altas. Verifica-se, ainda, que o tempo para que a temperatura se estabilize é menor nos cabos com revestimentos. O mesmo ocorre para o decaimento da temperatura com o desligamento da fonte. Estas duas constatações permitem especular que para uma variação brusca de corrente ou de condições climáticas a resposta da temperatura dos cabos se dá de forma mais rápida, o que é interessante em situações de ocorrência de curto circuito, pois o cabo atingirá uma menor temperatura além de ser mais rápido o decaimento para a temperatura de regime permanente.

Conforme dito anteriormente, nos ensaios foram medidas as temperaturas nas camadas internas dos cabos. Nos dados medidos nos ensaios não se observou mudanças significativas dos gradientes radiais das temperaturas das camadas internas entre os cabos com e sem revestimentos.

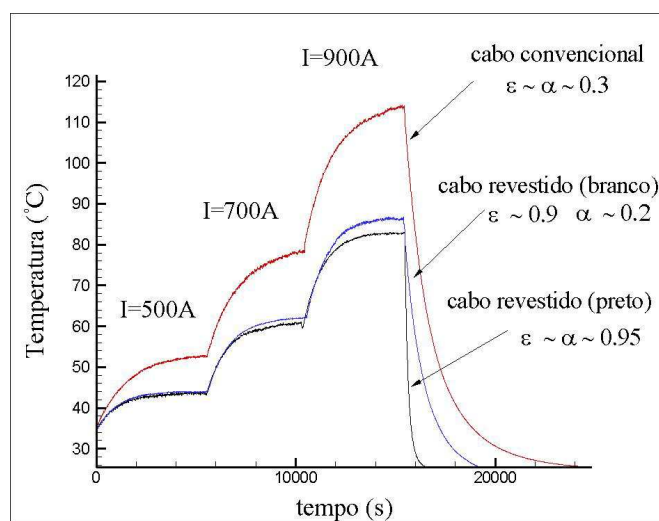


FIGURA 6 - Variação no tempo das temperaturas em cabos com e sem revestimentos

As vantagens obtidas com o revestimento, também, podem ser estendidas para os cabos termo-resistentes, que são aplicados para a operação de LT com altas temperaturas. Chama-se a atenção de que os maiores ganhos dos

revestimentos estão associados às altas temperaturas, que é esperado em cabos termo-resistentes. Com a diminuição da temperatura dos cabos termo-resistentes têm-se uma redução nas perdas elétricas, pois a resistência elétrica do cabo estará a uma menor temperatura.

Outro possível uso dos resultados dos ensaios está relacionado ao diâmetro do condutor, pois como a resistência elétrica será menor (referenciada a uma temperatura mais baixa) é possível o uso de um cabo com menor resistência, ou seja menor área de alumínio.

4.2 Resultados simulados com dados reais

Com o objetivo de comparar o desempenho térmico de cabos com e sem revestimento, quando submetidos aos efeitos da radiação solar (absortividade), foram calculadas as temperaturas para um condutor ACSR utilizando dados atmosféricos reais. Para isso foi utilizado o programa PLT, considerando uma linha trifásica de 230kV com um condutor GROSBEAK por fase. As condições ambientais de temperatura ambiente, velocidade e direção do vento e radiação solar estão apresentadas na Tabela 1, juntamente com a corrente considerada a cada hora.

Tabela 1 – Dados meteorológicos reais e corrente utilizados

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (graus)	Radiação (W/m ²)	Corrente (A)	Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento (graus)	Radiação (W/m ²)	Corrente (A)
0	20,3	1,2	57	0	674	13	27,3	3,4	118	519,3	767
1	19,9	1,2	36	0	635	14	28,1	4,2	96	1033,9	790
2	19,7	1,4	161	0	609	15	28,6	5,4	111	1010,6	814
3	20,3	0,9	135	0	596	16	27,3	4,7	92	554,1	810
4	20,0	1,6	105	0	581	17	26,6	4,2	110	372,5	781
5	20,3	1,6	87	0	599	18	24,7	4,7	96	139,5	750
6	20,2	1,7	109	1,4	598	19	23,0	3,7	99	0,1	838
7	20,6	1,7	111	56,1	632	20	21,8	2,7	94	0	799
8	20,9	4,1	100	173,3	712	21	20,6	1,0	84	0	797
9	22,0	4,3	93	403,5	766	22	20,8	3,5	65	0	773
10	23,3	3,6	116	517,3	779	23	20,3	2,8	88	0	745
11	25,2	3,0	51	592,2	789	24	20,2	2,7	76	0	703
12	25,8	3,3	38	960,4	772						

Na Figura 7a estão apresentadas as temperaturas da superfície de cabos com e sem revestimento, calculadas com os dados da Tabela 1. Conforme pode ser visto, as temperaturas foram inferiores a 55°C, consequência das condições climáticas favoráveis e da baixa corrente. Mesmo para os ventos fracos (≤ 1 m/s) ocorridos às 03h e 21h as temperaturas dos cabos ficaram abaixo de 60°C que é um valor usual no projeto de LT.

Nos ensaios de laboratórios observaram-se as diferenças entre as temperaturas, quando os cabos tinham altas temperaturas. Contudo, mesmo para as baixas temperaturas calculadas com os dados da Tabela 1 verifica-se que o desempenho dos cabos revestidos é melhor na maioria das horas que os sem revestimentos. O revestimento preto manteve o cabo com menor temperatura, exceto quando a radiação solar foi mais intensa, quando o mesmo absorveu mais radiação solar, mas, ainda assim a diferença não superou em 2°C a temperatura do cabo novo.

No revestimento branco ($\epsilon \sim 0.9$; $\alpha \sim 0.2$), a temperatura foi menor em todos os horários. No revestimento preto ($\epsilon \sim 0.95$; $\alpha \sim 0.95$), a eficiência no resfriamento é mais marcante com a radiação solar de baixa intensidade. A maior temperatura atingida pelos cabos foi no horário das 21h, quando a velocidade do vento foi de 1 m/s. Neste horário, os cabos com revestimento atingiram uma temperatura 6 °C menor que a do cabo novo ($\epsilon \sim 0.3$; $\alpha \sim 0.2$).

Com o objetivo de comparar a eficiência do resfriamento entre os cabos operando com correntes mais altas e condição meteorológica de vento fraco, foram feitas as seguintes modificações dos dados da Tabela 1, nos horários de 3h, 12h, 14h, 15h e 21h a corrente foi de 1200 A, e no horário de 15h considerou-se a velocidade do vento de 1,0 m/s. Para esses novos valores as temperaturas estão apresentadas graficamente na Figura 7b, onde pode ser visto que quando da ocorrência das maiores temperaturas os cabos revestidos têm temperaturas menores de até 30 °C quando comparadas com o cabo novo, mesmos para o horário de 15h quando a radiação foi intensa.

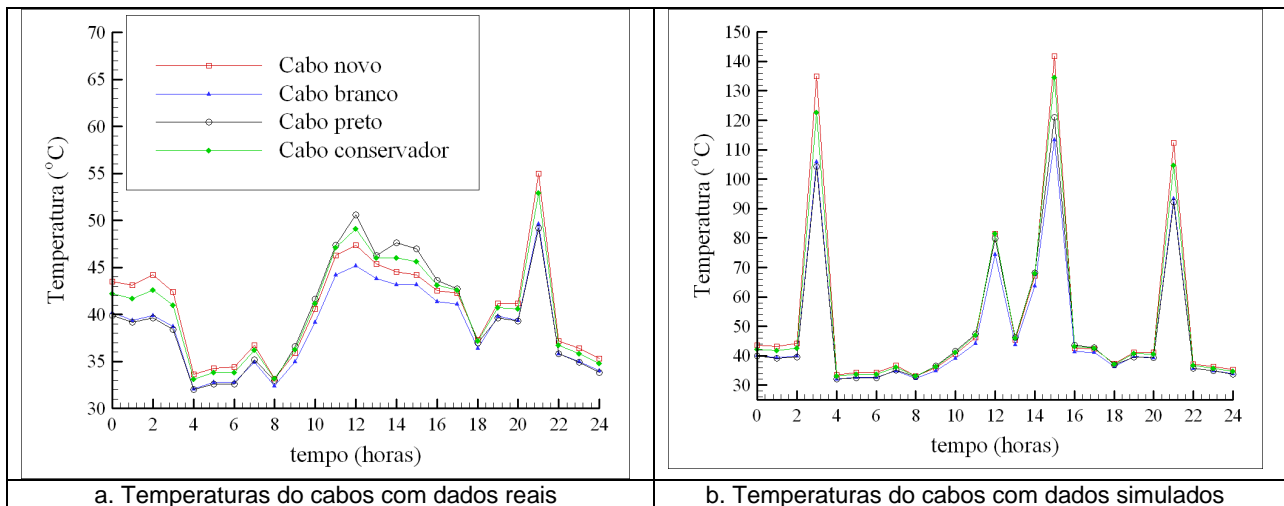


FIGURA 7. Temperaturas calculadas com dados da Tabela 1, para cabos: novo ($\epsilon \sim 0.3$; $\alpha \sim 0.2$), revestido de branco ($\epsilon \sim 0.9$; $\alpha \sim 0.2$), revestido de preto ($\epsilon \sim 0.95$; $\alpha \sim 0.95$) e usado ($\epsilon \sim 0.5$; $\alpha \sim 0.5$).

5.0 - CONCLUSÕES

O IT analisou o comportamento térmico de cabos condutores aéreos ao se alterar as suas propriedades de emissividade e absorvidade, visando aumentar a eficiência de resfriamento dos cabos. Ensaios de laboratórios e dados de campo permitem concluir que ao alterar essas propriedades do cabo têm-se uma significativa diminuição na temperatura dos cabos, em especial para cabos com altas temperaturas.

A modificação das duas propriedades foi possível através da aplicação de um revestimento na superfície do cabo, o que é um procedimento inovador no caso de cabos condutores. Nos ensaios os revestimentos constaram da aplicação de uma fina camada de tinta, branca e preta foscas, mas para o uso na prática o revestimento poderia ser, por exemplo, a anodização dos fios de alumínio da camada externa.

A cor do revestimento é preponderante no que diz respeito à absorvidade, mas, não é para a emissividade térmica. Para as cores utilizadas no estudo, preta e branca, constatou-se que as emissividades são aproximadamente de 0,95 e 0,90, respectivamente, o que faz com que a diferença entre as temperaturas dos cabos com esses revestimentos sejam insignificante. Quanto à absorção, observou-se que ao variar o fator de absorvidade entre valores extremos (0,2 a 0,95) o desempenho do revestidos foi superior a os cabos sem revestimentos.

A melhoria da eficiência de resfriamento obtida com o procedimento de revestir os cabos, além de aumentar a confiabilidade de operação das LT no que diz respeito às flechas, abre novas frentes para estudos. Por exemplo, no uso de cabos termo-resistentes diminuirá as perdas Joule, pois a resistência elétrica do cabo estará referenciada a uma menor temperatura.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa NEXANS que produziu as amostras de cabos com termopares embutidos, fundamental para o monitoramento da suas temperaturas internas, e, ao pesquisador do Cepel Marcio Antonio Sens responsável pela realização dos ensaios.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MORGAN V. T.: "Thermal Rating of Overhead-Line Conductors – Part I. The Steady State Thermal Model". Elect Power Sys. Research 1982:"
- (2) TAYLOR C. S., HOUSE H. E.: Emissivity and Its Effects on the Current-Carrying Capacity of Stranded Aluminum Conductors. AIEE, 1956.
- (3) 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.

(4) ABSI SALAS, F. ; DOMINGUES, L. A. M. C. ; MOREIRA, F. S. ; S. FILHO, J. I., 2010. Comportamento Térmico em Cabos de Linhas de Transmissão- Medições Experimentais., EletroEvolução (Rio de Janeiro), v. Março, p. 17-24, 2010.

(5) FRAGATA L. F.; SEBRÃO Z. MAURO; SENS M. A. CAVALCANTI E. C.: A Influência da Cor das Tintas na Absorção e Dissipação de Calor.

(6) MORGAN V. T., 1991, "Thermal Behavior of Electrical Conductors. Steady, Dynamics and Fault-Current Ratings." John Wiley & Sons Inc. New York.