



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

BR/GLT/19
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

**ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DENSIDADE DE CORRENTE DE CABOS CONDUTORES
POR MEIO DA METODOLOGIA DO PROBLEMA INVERSO**

Farith M. Absi Salas(*)
CEPEL

Helcio R. B. Orlande
UFRJ

Luis A. M. C. Domingues
CEPEL

João Ignacio S. Filho
CEPEL

RESUMO

No presente informe técnico é feita uma caracterização térmica de cabos ACSR em termos das estimativas das suas propriedades termofísicas e da influencia da redistribuição da densidade de corrente nestas propriedades e no campo de temperatura dos cabos. As estimativas das propriedades desconhecidas são obtidas por meio da metodologia do problema inverso. Esta inversão é possível com o auxílio de medições experimentais de temperatura interna e externa dos cabos e o uso de métodos estatísticos de forma a se ter estimativas precisas com suas incertezas. Este trabalho mostra que o conhecimento dos parâmetros envolvidos na modelagem térmica de cabos é fundamental para o cálculo correto da temperatura interna e externa de cabos.

PALAVRAS-CHAVE

Problema Inverso, Propriedades Termofísicas, Efeito Transformador, Cabos ACSR

1.0 - INTRODUÇÃO

Na atualidade pesquisas estão voltadas para a produção de novos cabos condutores visando maior capacidade de carregamento, menores custos e maior confiabilidade e segurança no transporte da energia elétrica. O estudo do comportamento térmico em cabos de linhas de transmissão é de suma importância para o dimensionamento da capacidade de carga dos mesmos. Esta capacidade de transmissão de energia elétrica está diretamente ligada às suas temperaturas de operação. Por exemplo, os condutores de alumínio convencionais podem operar em regime contínuo de trabalho a uma temperatura máxima de 90 °C. Acima desta temperatura, inicia-se o processo de recozimento e consequentemente, deterioração das suas características mecânicas. Portanto, o conhecimento da distribuição de temperatura interna dos cabos é relevante.

Uma caracterização térmica precisa de cabos de linhas de transmissão requer que os modelos térmicos considerem fatores como a seção transversal heterogênea e sua influencia nas propriedades termofísicas envolvidas na formulação do problema. Também é necessário considerar a densidade de corrente nas camadas do condutor, a qual será determinada por dois fenômenos, a saber: o efeito pelicular e o efeito transformador de corrente. Este último efeito eletromagnético será preponderando na redistribuição de corrente para cabos ACSR com número ímpar de camadas no condutor (1,2). Nos modelos térmicos encontrados na literatura (3,4,5) a distribuição de temperatura é calculada considerando a baixa condução radial de calor, atribuindo-se valores baixos para a condutividade térmica, assim como também é considerada a redistribuição de corrente somente considerando o efeito pelicular, mesmo para cabos ACSR. No presente trabalho será apresentadas estimativas das propriedades termofísicas de cabos de linhas de transmissão por meio da metodologia do problema inverso, mostrando-se como a modelagem térmica de cabos é mais precisa quando considerados os valores efetivos destas propriedades e a redistribuição de densidade de corrente quando se trata de cabos ACSR.

(*) Av. Horacio Macedo, n° 354 – sala J 123 - Bloco J – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6423 – Fax: (+55 21) 2598-6286 – Email: farith@cepel.br

O método de solução do problema inverso usado neste trabalho é baseado na estatística Bayesiana, em que funções de densidade de probabilidade para os parâmetros e as medidas são explicitadas e consideradas separadamente. A estimativa de parâmetros via inferência Bayesiana consiste basicamente na análise da função densidade de probabilidade a *posteriori* $\pi(\mathbf{P}|\mathbf{Y})$, que representa a distribuição de probabilidade dos parâmetros \mathbf{P} condicionada às medidas \mathbf{Y} . Embora os fundamentos da inferência Bayesiana tenham sido constituídos há bastante tempo, a teoria Bayesiana tem sido aplicada mais intensamente nos últimos anos para solução de problemas inversos (6,7,8). Esta ferramenta estatística tem sido fortemente explorada com o advento de poderosos computadores e com a necessidade de aumentar a confiabilidade e otimizar os modelos de estimativa inversa, considerando as incertezas envolvidas nos parâmetros e nas medições.

Quando expressões analíticas da distribuição de probabilidade a *posteriori*, $\pi(\mathbf{P}|\mathbf{Y})$ não podem ser obtidas, métodos numéricos são implementados a fim de aproximar esta distribuição e permitir a obtenção de uma amostra de $\pi(\mathbf{P}|\mathbf{Y})$. Com esse objetivo, o método de Monte Carlo via Cadeias de Markov é implementado. Este método é uma versão iterativa do método de Monte Carlo tradicional. Com este método é possível obter uma grande amostra da distribuição a *posteriori* e calcular estimativas amostrais das características desta distribuição usando técnicas de simulação iterativa, baseadas nas cadeias de Markov.

Uma cadeia de Markov é um processo estocástico $\{\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_n\}$ tal que a distribuição de \mathbf{P}_i , dados todos os valores anteriores $\{\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_{i-1}\}$ depende apenas de \mathbf{P}_{i-1} . Assim, para se obter os estados da cadeia num instante futuro só é necessário se conhecer os estados no presente e não estados passados (9).

2.0 - PROBLEMA INVERSO

A distribuição de temperatura em cabos ACSR pode ser calculada somente quando se conhecem as propriedades termofísicas presentes na formulação matemática que governa o problema de condução de calor, que em casos de materiais heterogêneos estas propriedades assumem valores efetivos. Entretanto, existem casos em que tais propriedades são desconhecidas ou conhecidas com pouca precisão. Estimativas destas propriedades desconhecidas podem ser obtidas com o auxílio de medições experimentais de temperatura, por meio da metodologia do problema inverso. Esta metodologia resolve o problema mal posto de calcular as propriedades termofísicas do modelo, juntando as medições experimentais de temperatura e informações disponíveis sobre os parâmetros com algum método estatístico ou determinístico, de forma a se obter uma estimativa das propriedades desconhecidas de interesse.

O método usado para a inversão do modelo térmico é baseado no método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) com o algoritmo de Metropolis-Hastings. Este método estatístico tem sido muito usado nos últimos anos devido a sua eficácia e com o aumento da capacidade de processamento de dados dos computadores.

2.1 Medições Experimentais de Temperatura

Medições experimentais de temperatura interna e externa de cabos foram obtidas com termopares inseridos entre as camadas do condutor durante seu processo de fabricação. A temperatura foi medida em um cabo ACSR do tipo Tern. Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Ensaios em laboratório fechado permitem ter um maior controle das condições ambientais e de corrente em que o cabo opera, obtendo-se assim medidas de temperatura mais uniformes e precisas. A temperatura do laboratório é mantida uniforme e constante a 25 °C. A sala em que os ensaios são realizados é isolada de fontes de vento e radiação, de forma a considerar convecção natural na superfície do cabo. A disposição dos termopares internos e externos está mostrada na Figura 1.

A temperatura de um cabo tipo Tern (ACSR) foi monitorada durante os ciclos térmicos quando diferentes valores de corrente foram aplicados no cabo. A temperatura interna foi medida ao longo do cabo com 9 termopares tipo J, inseridos entre as camadas de fios alumínio, durante o seu processo de fabricação. Adicionalmente foram instalados na superfície externa do cabo 6 termopares tipo J, totalizando 15 sensores monitorando a temperatura do cabo. Em cada seção, três termopares foram colocados entre a alma e a primeira camada de alumínio, T1, entre a primeira e segunda camadas, T2, entre a segunda e terceira camadas, T3, e na superfície externa, T4, como esquematizado na Figura 1.b.

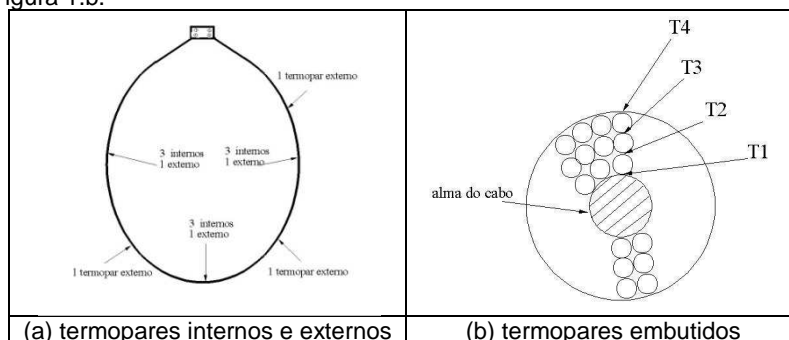


FIGURA 1 – Esquema ilustrando a configuração dos termopares internos e externos instalados no cabo ACSR.

O cabo foi colocado na forma de um semicírculo e pendurado no ar com cordas isolantes presas no teto, mantendo-se assim uma distância piso - condutor constante de 1 metro, como pode ser visualizado na Figura 3. Cabe ressaltar que numa linha de transmissão de energia existe uma tensão mecânica aplicada no cabo, gerando uma força de compressão entre as camadas do cabo, o que em teoria pode modificar os calores efetivos da emissividade térmica e capacidade térmica volumétrica. Porém, esta tensão mecânica diminui com o aquecimento e dilatação dos cabos, fazendo que a compressão entre as camadas diminua drasticamente.



FIGURA 3 - Arranjo experimental para medições de temperatura interna e externa para um cabo Tern revestido com tinta preta fosca de emissividade calculada, $\epsilon = 0.90$.

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 aproximadamente constante e uniforme. Esta condição de temperatura uniforme foi constatada com ajuda de seis termopares colocados na superfície externa ao longo do cabo, como mostrado na Figura 4. Nesta figura, apresenta-se a temperatura superficial do cabo medida com termopares espalhados de forma equidistante ao longo do seu comprimento, como mostrado no esquema da Figura 1.

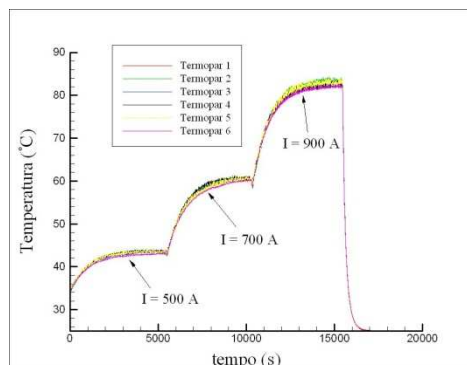


FIGURA 4 - Temperatura superficial ao longo do cabo obtida com termopares alocados ao longo do seu comprimento.

2.2 Problema Direto – Propriedades Termofísicas

O problema direto consiste em calcular a distribuição de temperatura da seção transversal do cabo, assumindo-se conhecidas as propriedades termofísicas envolvidas na formulação matemática do problema. A equação que governa a condução de calor do cabo é a equação de Calor. As propriedades envolvidas nesta formulação são: as condutividades térmicas da região da alma e do condutor, k_{st} e k_{al} , respectivamente, as capacidades térmicas volumétricas de ambas regiões C_{st} e C_{al} , o coeficiente de transferência de calor total h_t que engloba a emissividade térmica ϵ e o coeficiente de transferência de calor por convecção h_{cv} .

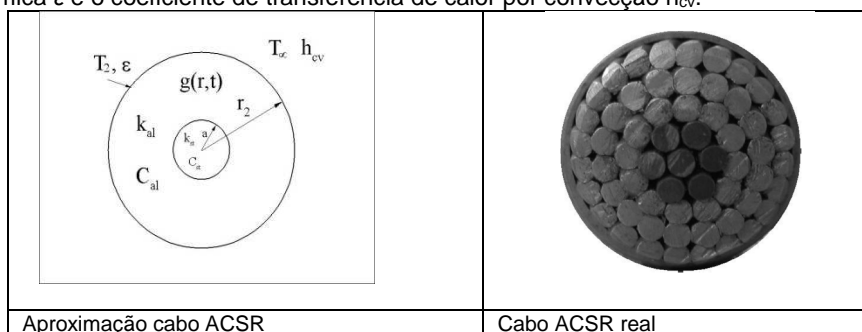


FIGURA 6 - Seção transversal de um cilindro bimetalico ilustrando a modelagem térmica

Como mostrado na Figura 6 a modelagem considera o cabo ACSR como duas regiões cilíndricas homogêneas, mas com propriedades térmicas efetivas para as condutividades térmicas e as capacidades térmicas volumétricas. O modelo térmico usado nos cálculos da distribuição de temperatura também considera a distribuição irregular da densidade de corrente. Esta distribuição irregular de densidade de corrente é calculada considerando o efeito transformador (1,2), o qual será sucintamente descrito a seguir.

2.3 Efeito transformador de corrente

Existem dois fenômenos eletromagnéticos que irão determinar a distribuição da densidade de corrente da seção transversal dos cabos: o efeito pelicular da corrente e o efeito transformador (1). Este último modelo é preponderante em cabos com alma de aço (ACSR) quando a corrente aplicada é alternada. Para o cálculo da distribuição da densidade de corrente considerando este efeito, o número de camadas do condutor será determinante. As camadas do condutor são sobrepostas uma sobre as outras, mas em sentidos diferentes. Em consequência disto, com um número de camadas pares do condutor, os campos eletromagnéticos gerados irão se anular, fazendo com que o efeito transformador não seja relevante. Porém, para um número de camadas ímpares, os campos magnéticos residuais, combinados com as propriedades ferromagnéticas da alma do cabo, produzirão uma distribuição irregular de corrente diferente daquela do caso anterior, quando o efeito pelicular é considerado.

Este efeito é resultado de fluxos magnéticos no interior do cabo, gerados pelo fluxo helicoidal de corrente alternada nas camadas dos fios condutores. Tais fluxos magnéticos adquirem intensidades elevadas devido às características ferromagnéticas da alma de aço. Por isso, este efeito é relevante principalmente para cabos tipo ACSR (10). Os cabos condutores do tipo ACSR são fabricados de forma que as camadas de alumínio são encordoadas sobre a alma de aço seguindo um caminho em espiral. Em corrente alternada, toda ou a maior parte da corrente flui pelas camadas de alumínio, percorrendo este caminho helicoidal e dando origem aos fluxos magnéticos longitudinal e circular (2). Estes fluxos magnéticos agem no cabo de forma a redistribuir a corrente entre as camadas do condutor de alumínio.

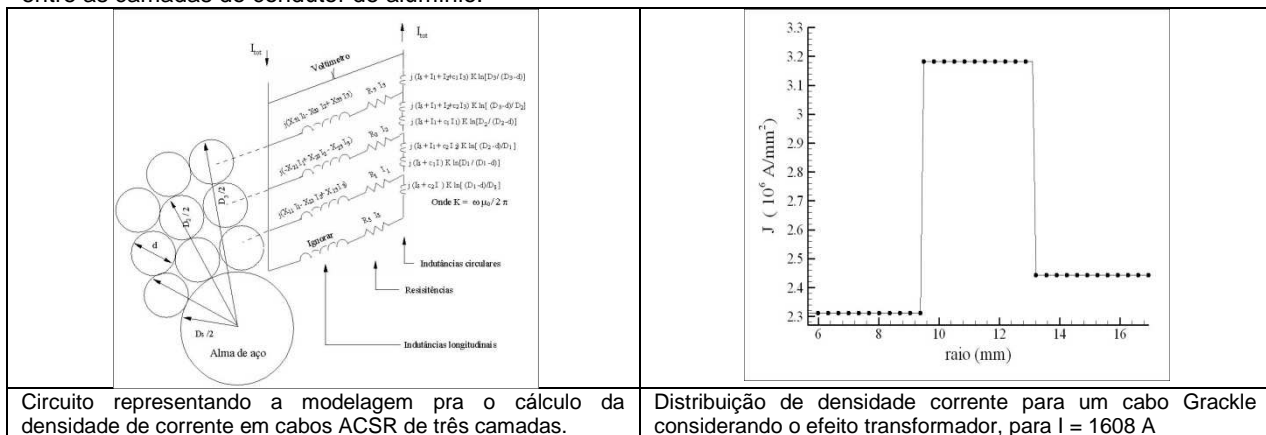


FIGURA 7 - Modelo Efeito transformador de corrente.

Assim, o circuito elétrico equivalente da Figura 7 considera resistências, indutâncias devido ao fluxo magnético longitudinal e indutâncias devido ao fluxo magnético circular. A modelagem do efeito transformador associa estes três elementos com a alma de aço e cada camada condutora de alumínio. Usando este circuito será possível obter um sistema de equações, o qual será resolvido para calcular a distribuição da densidade de corrente entre as camadas do condutor.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para um carregamento transitório de corrente em um cabo novo sem revestimento estão mostrados na Figura 8.a, sendo que neste ensaio foram utilizados somente os termopares internos. No exemplo da figura, inicialmente foi aplicada a corrente de 350 A até que fosse atingida a temperatura de regime permanente, elevando-se em seguida a corrente para 2000 A durante 2 minutos, retornando-se novamente para 350 A até a temperatura do cabo voltar ao regime permanente. Na Figura 8.b é possível observar com mais detalhes as temperaturas no período em que a corrente foi de 2000 A, 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 efeito transformador.

A seguir serão apresentados resultados das estimativas dos parâmetros termofísicos obtidas aplicando a metodologia do problema inverso. As estimativas dos parâmetros térmicos foram obtidas considerando que a distribuição da densidade de corrente nas camadas do condutor é irregular, isto é, a modelagem térmica considera que a corrente nas camadas do condutor se distribui segundo o efeito transformador.

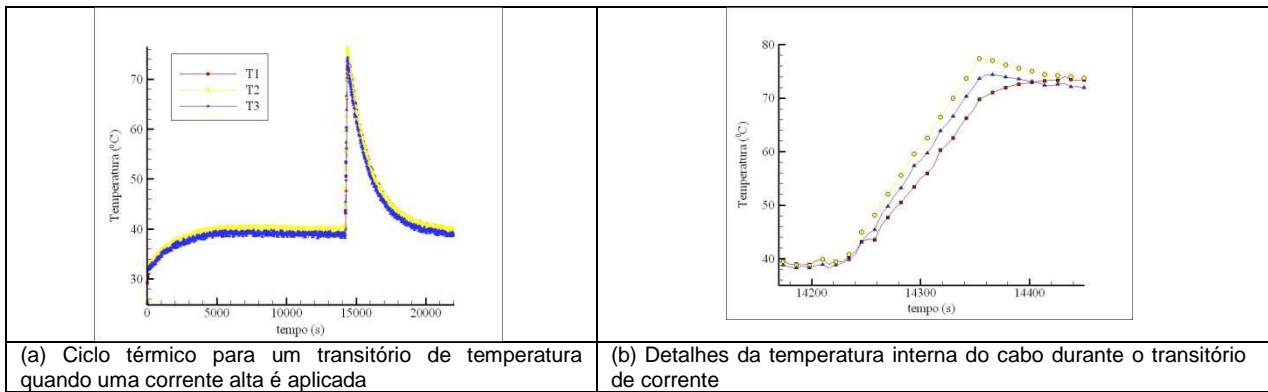


FIGURA 8 - Aumento da temperatura para uma corrente de 2000 A aplicada durante 2 minutos.

As estimativas das propriedades termo físicas k_{al} , k_{st} , C_{al} , C_{st} e h_t serão mostradas para três correntes diferentes de 600 A, 800 A e 1000 A. O cabo considerado neste problema é ACSR do tipo Tern, cabo bimetalico com alma de aço e condutor de três camadas de alumínio. As propriedades termofísicas foram consideradas homogêneas, mas com valores efetivos. Na modelagem térmica se considera as perdas Joule variando espacialmente, por conta da redistribuição de corrente determinada pelo efeito transformador, conforme descrito na seção 2.3. Para a solução do problema inverso são usadas as medidas transientes dos termopares internos, T1, T2 e T3, localizados entre a alma e a primeira camada, entre a primeira e segunda camadas, e entre a segunda e terceira camadas, respectivamente.

Os ensaios experimentais foram levados a cabo em um laboratório de condições climáticas controladas, isto é, temperatura ambiente uniforme de $T_{amb}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, e sem fontes de radiação nem vento, considerando-se convecção natural, tal que $h_{cv} = 6.71\text{ W/m}^2$ para $I = 600\text{ A}$, $h_{cv} = 7.63\text{ W/m}^2$ para $I = 800\text{ A}$, $h_{cv} = 8.43\text{ W/m}^2$ para $I = 1000\text{ A}$, de acordo com a correlação de Morgan (11). A superfície externa dos cabos ensaiados foi revestida com uma tinta preta fosca com uma emissividade térmica considerada uniforme, calculada segundo o método apresentado por Absi et al (12), tal que $\epsilon \approx 0.9$. O desvio padrão σ das medidas de temperatura é calculado considerando as ultimas 50 medições quando o regime permanente do cabo é alcançado, tal que: $\sigma = 0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, para $I = 600\text{ A}$, $\sigma = 0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $I = 800\text{ A}$, $\sigma = 0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $I = 1000\text{ A}$. Ressalta-se que foi escolhida uma das três seções em que os termopares foram embutidos, selecionada pelo menor ruído apresentado entre as medições das outras seções. O problema inverso para estimativa de parâmetros termofísicos consiste basicamente em correlacionar estatisticamente as medições de temperatura com alguma informação disponível (a priori) sobre os parâmetros desconhecidos. Os resultados das estimativas dos parâmetros termofísicos desconhecidos serão apresentados em termos das suas distribuições de probabilidade, denominadas cadeias de Markov. Estas cadeias de Markov serviram como base para se obter valores pontuais estimados, como a média e o desvio padrão dos parâmetros estimados. Para isto, os estados ou interações iniciais antes de atingir a distribuição de equilíbrio (distribuição em que a nuvem de pontos estabiliza em torno de um valor) são descartados. O número de estados ou interações usadas para o cálculo das médias e intervalos de confiança foi em média de 200 mil. Da mesma forma, o tempo computacional gasto nestas estimativas variou entre 2 e 3 horas, dependendo o número de estados considerados, isto para um computador com processador corel duo de 4 GB de memória RAM.

Como mostra a Figura 9, as cadeias das propriedades k_{al} e k_{st} atingem a distribuição de equilíbrio em torno do mesmo valor, aproximadamente $1\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, para as três correntes aplicadas. No caso do parâmetro h_t , os valores esperados para as estimativas dependem da temperatura final atingida pelo cabo. No caso de $I = 600\text{ A}$, a cadeias de Markov para h_t atinge a distribuição de equilíbrio em torno de aproximadamente $12,5\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, para $I = 800\text{ A}$ foi em torno de $13,9\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e no caso de $I = 1000\text{ A}$ foi de $14,1\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

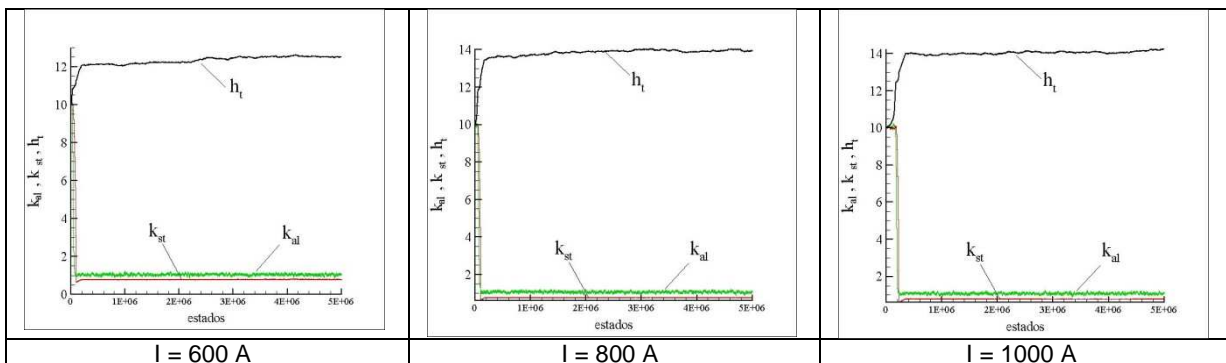


FIGURA 9 - Cadeias de markov para os parâmetros k_{al} , k_{st} e h_t , impondo a condição de $J_2 > J_3 > J_1$.

Na Figura 10 são mostradas as cadeias de Markov das capacidades térmicas volumétricas efetivas do condutor e da alma do cabo. Para as corrente $I = 600$ e $I = 800\text{ A}$, as cadeias para ambos parâmetros estabilizam na sua

distribuição de equilíbrio rapidamente e em torno de 1.7×10^6 no caso para C_{al} e para 2.8×10^6 no caso de C_{st} . No caso de $I = 1000$ A as cadeias de Markov para C_{al} e C_{st} estabilizaram em torno de 1.5×10^6 e 2.6×10^6 , respectivamente. Os valores efetivos para as propriedades termofísicas podem variar com a temperatura do cabo. Isto porque a medida que a temperatura aumenta, a dilatação da seção transversal do cabo pode fazer com que os interstícios entre os fios metálicos aumentem de tamanho, influenciando assim nos valores efetivos da condutividade térmica radial e da capacidade térmica volumétrica. Dessa maneira é esperado uma diminuição de tais propriedades efetivas. No caso de C_{st} e C_{al} , os valores efetivos caem consideravelmente quando comparado com os valores do alumínio, $C = 2,424 \times 10^6$, e do aço, $C = 3,728 \times 10^6$.

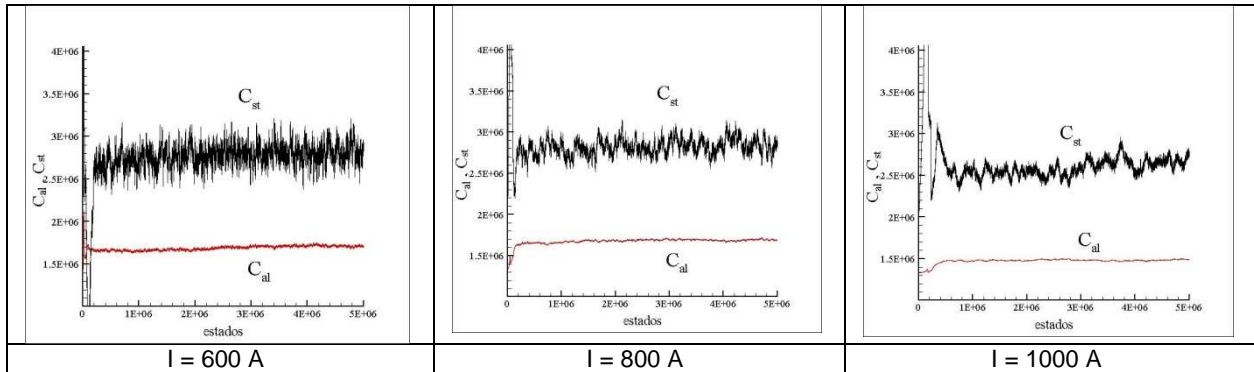


FIGURA 10 - Cadeias de Markov para os parâmetros C_{al} e C_{st} , impondo a condição de $J_2 > J_3 > J_1$.

Os valores de densidade de corrente em cada camada do condutor, $J_1 = I_1/A_1$, $J_2 = I_2/A_2$, $J_3 = I_3/A_3$, foram calculados segundo o modelo efeito transformador, tal como descrito na seção 2.3. Morgan et al (1997) obtiveram medidas da densidade de corrente, no qual comprovaram experimentalmente este efeito. Como previsto no modelo, as medidas mostraram que a maior densidade de corrente se encontra na camada intermediária de um cabo com alma de aço com condutor de alumínio (ACSR) de três camadas. As medições de densidade de corrente também mostram uma densidade maior na camada externa quando comparada à camada interna em contato com a alma de aço.

A densidade de corrente é modelada como uma função densidade de probabilidade (FDP), definida em termos de uma distribuição normal com média igual ao valor teórico calculado e desvio padrão de 5% desta média. caracterizando a densidade de corrente como uma FDP, adicionamos no modelo uma incerteza de 5% na densidade de corrente. Assim, faz-se uma análise das estimativas dos parâmetros térmicos considerando a incerteza dos valores de corrente em cada camada do condutor.

Nos gráficos da Figura 11 são mostradas as cadeias de Markov para as correntes em cada uma das três camadas do condutor. Estas cadeias estabilizam em valores que seguem o modelo transformador, tal que $J_2 > J_3 > J_1$, isto é, a densidade de corrente é maior na camada intermediária seguida da camada mais externa do condutor, tendo a menor densidade de corrente na camada mais interna do condutor J_1 .

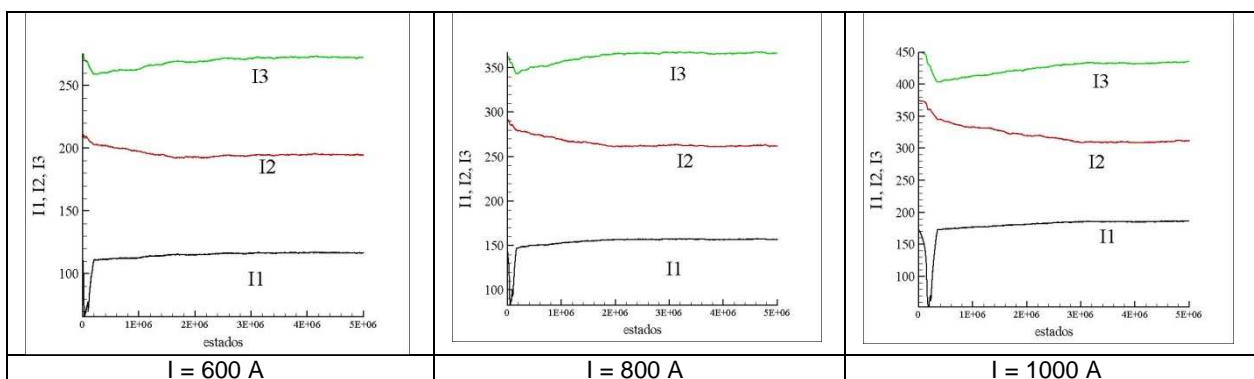


FIGURA 11 - Cadeias de Markov para os parâmetros I_1 , I_2 e I_3 , com a condição de $J_2 > J_3 > J_1$.

Para o cálculo da média e dos intervalos de confiança dos parâmetros foram considerados os últimos 100 mil estados das cadeias de Markov, uma vez atingidas as distribuições de equilíbrio. Na Tabela 1 são mostradas as médias das estimativas dos parâmetros desconhecidos obtidas a partir das suas cadeias de Markov. Como esperado, a condutividade térmica radial efetiva da região da alma e do condutor do cabo tem uma queda muito significativa quando comparada aos valores dos materiais, atingindo valores baixos em torno de $1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. a baixa condução radial de calor gera gradientes de temperatura interna no cabo, podendo atingir valores significativos para valores de sobrecarga de corrente.

Para um cálculo preciso da distribuição de temperatura de cabos são necessários o conhecimento das propriedades termofísicas da formulação do modelo térmico e a incorporação dos fenômenos eletromagnéticos que atuam na redistribuição da densidade de corrente nas camadas do condutor.

Tabela 1 – Médias estimadas e suas incertezas dos parâmetros termofísicos e as correntes nas camadas do condutor, com $J_2 > J_3 > J_1$.

Parâmetros	I = 600 A	I = 800 A	I = 1000 A
k_{al} [W/m °C]	0.79±0.01	0.77±0.01	0.78±0.01
k_{st} [W/m °C]	1.01±0.11	1.06±0.10	1.08±0.12
C_{al} [KJ/m ³ °C]	$1.712 \times 10^6 \pm 2.66 \times 10^4$	$1.690 \times 10^6 \pm 2.19 \times 10^4$	$1.481 \times 10^6 \pm 1.83 \times 10^4$
C_{st} [KJ/m ³ °C]	$2.806 \times 10^6 \pm 2.95 \times 10^5$	$2.851 \times 10^6 \pm 2.39 \times 10^5$	$2.658 \times 10^6 \pm 1.88 \times 10^5$
h_t [W/m ²]	12.52± 0.08	13.95±0.12	14.1±0.1
I_1 [A]	116.7±0.4	157.0±0,7	185.5±0.9
I_2 [A]	194.7±0.7	262.2±1,6	309.8±2.3
I_3 [A]	272.4±0.9	366.6±1,6	433.1±2.1

De uma forma geral, os modelos térmicos da literatura levam em conta a baixa condução radial de temperatura, assumindo valores efetivos para a condutividade térmica radial, tendo inclusive modelos mais complexos que levam em conta a redistribuição de corrente considerando apenas o efeito pelicular de corrente. Porém, para cabos ACSR o efeito transformador de corrente será preponderante ao efeito pelicular (2), principalmente para altos valores de corrente com condutores de camadas impares. Para visualizar o impacto de uma modelagem térmica mais complexa, a seguir se faz uma comparação entre um modelo térmico geral e um modelo que incorpora propriedades efetivas para as propriedades térmicas e uma redistribuição de corrente segundo o efeito transformador.

As Figuras 12 e 13 apresentam uma comparação entre as temperaturas experimentais e temperaturas calculadas para o cabo tipo Tern em duas posições: na superfície externa do cabo e na interface entre a alma de aço e o condutor. Nestas figuras, o modelo térmico calcula a distribuição de temperatura considerando uma distribuição de densidade de corrente uniforme e baixa condução radial de calor, fazendo $k_{al} = k_{st} = 1$ W/m °C. As curvas de temperatura mostram que no regime transiente de temperatura, existe uma discrepância entre as curvas de temperatura calculada e experimental, de tal maneira que quando as temperaturas experimentais atingem o regime permanente, as temperaturas calculadas ainda não atingiram este regime. Assim, mesmo que as temperaturas finais alcançadas sejam próximas entre o modelo e o experimento, a modelagem ainda é muito imprecisa, ressaltando-se a necessidade de modelos mais complexos, que levem em consideração valores efetivos das propriedades termofísicas e também as incertezas nestes parâmetros.

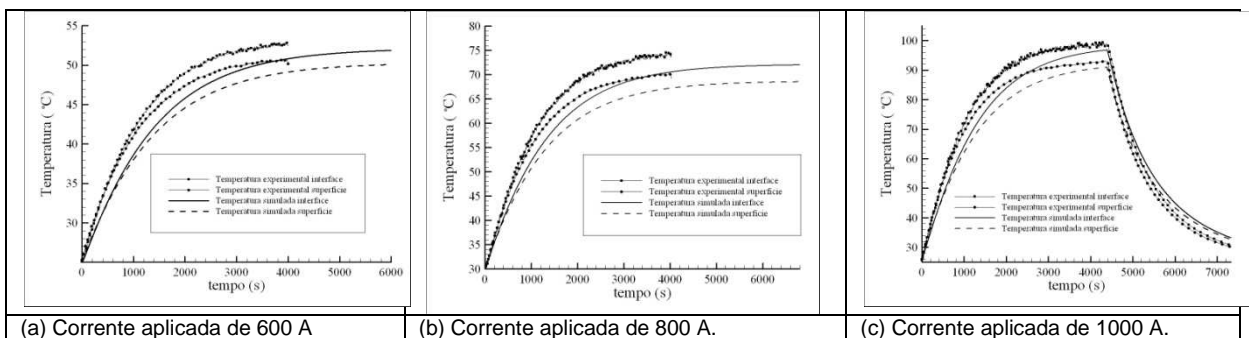


FIGURA 12 - Comparação de temperaturas experimental e calculada para um cabo ACSR tipo Tern.

Finalmente, na Figura 14 mostra-se a comparação de medições de temperatura com uma modelagem mais elaborada, usando-se os valores efetivos das propriedades k_{al} , k_{st} , C_{al} , C_{st} e h_t da Tabela 1, assim como também a densidade de corrente nas camadas do condutor foi calculada segundo o efeito transformador de corrente.

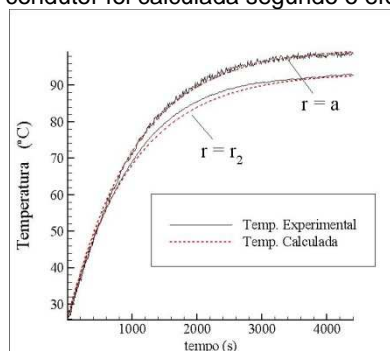


FIGURA 14. Temperaturas experimental e calculada com os parâmetros estimados na região mais interna $r=a$ e na superfície do cabo $r = r_2$, quando $I = 1000$ A.

As curvas da Fig. 14 mostram o aquecimento do cabo na superfície externa dos cabos, $r = r_2$ e na interface da

alma e do condutor do cabo, $r = a$, para uma corrente de $I = 1000$ A. Nesta modelagem as temperaturas experimental e calculada ficam muito próximas entre si, obtendo-se calculos mais precisos da distribuição de temperatura em cabos ACSR.

4.0 - CONCLUSÕES

A estimativa dos parametros físicos, inerentes da formulação matemática da modelagem térmica de cabos ACSR, foi apresentada usando a metodologia do problema inverso. Tais estimativas foram possíveis com ajuda de medições experimentais de temperatura interna e externa dos cabos. As medições de temperatura interna de cabos foram obtidas com termopares inseridos entre as camadas do condutor durante seu processo de fabricação. Com esta técnica inovadora de medição foi possível se obter medições de temperatura interna dos cabos mais confiáveis e precisas. Na modelagem térmica foi incorporada a distribuição irregular da densidade de corrente segundo o efeito transformador de corrente, o qual é preponderante em cabos ACSR de camadas ímpares.

As estimativas mostraram uma queda significativa dos valores efetivos da condutividade térmica radial e da capacidade térmica volumétrica das regiões da alma e do condutor do cabo, quando comparadas aos valores dos materiais de ambas regiões. As estimativas do coeficiente de transferência de calor total h_t , a qual engloba a emissividade térmica e o coeficiente de transferência de calor por convecção, foram obtidas para diferentes valores de correntes, obtendo-se estimativas próximas dos valores teóricos. As densidades de correntes nas camadas do condutor foram modeladas como variáveis estatísticas, possibilitando a adição de incerteza nesta grandeza.

Uma vez estimados os parametros termofísicos, estes valores foram incorporados no modelo matemático, obtendo-se resultados da distribuição de temperatura mais precisos, quando comparados com modelos térmicos mais conservadores. Em termos práticos isto representa um avanço nos estudos de cabos, abrindo assim novas frentes de estudo, de forma a possibilitar a fabricação de novos cabos considerando, por exemplo, uma área maior da camada intermediária (de um condutor de 3 camadas) de forma a equiparar o aquecimento diferenciado nesta camada devido ao efeito transformador. Os resultados apresentados neste informe técnico também servem como comprovação da necessidade de uma modelagem mais precisa dos cabos, no que se refere ao projeto dos mesmos, já que as grandezas envolvidas nos cálculos da ampacidade (corrente, dilatação, resistência mecânica, etc.) estão diretamente ligadas à distribuição de temperatura dos cabos, que na maioria dos casos é assumida tendo uma distribuição uniforme ou com diferenças de temperatura incorretas, devido ao vago conhecimento das propriedades envolvidas na modelagem térmica dos cabos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BARRET, J. S., FEHERVARI, C. J., FINDLAY, R. D., "A New Model of AC Resistance in ACSR Conductors.", IEE Transactions on Power Systems. Vol. PWRD-1, No. 2. , 1986.
- (2) 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.
- (3) MORGAN V. T., "Radial Temperature Distribution and Effective Radial Thermal Conductivity in Bare Solid and Stranded Conductors". IEEE., 1990.
- (4) BLACK W. Z., RENBERG R. L.; "Simplified Model for Steady State and Real-Time Ampacity of Overhead Conductors". IEE. TPAS. , 1985.
- (5) FOSS S. D., LIN S. H., FERNANDES R. A., "Dynamic Thermal Line Ratings – Part I – Dynamic Ampacity Rating Algorithm"; IEEE. , 1983.
- (6) Wang, J. and Zabaras, N., "A Bayesian Inference Approach to the Stochastic Inverse Heat Conduction Problem", Int. J. Heat Mass Transfer, 47, pp. 3927–3941. , 2004.
- (7) Zabaras, N., and Wang, J., "A Computational Statistics Approach to Stochastic Inverse Problems and Uncertainty Quantification in Heat Transfer", Proceedings of the VI World Conference on Computational Mechanics, September 5-10, Beijing, China. 2004.
- (8) ORLANDE H. R. B., "Inverse Problems In Heat Transfer: New Trends on Solution Methodologies and Applications", 14th International Heat transfer Conference. , 2010.
- (9) GAMERMAN, D., AND LOPES, H.F., "*Markov Chain Monte Carlo: Stochastic Simulation for Bayesian Inference*", Chapman & Hall/CRC, 2nd edition, Boca Raton, FL. , 2006
- (10) MORGAN V. T., "Thermal Behavior of Electrical Conductors. Steady, Dynamics and Fault-Current Ratings." John Wiley & Sons Inc. New York. , 1991.
- (11) MORGAN V. T., "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders." Advances in Heat Transfer 11, pp. 199 – 263. , 1975.
- (12) ABSI SALAS, F ; DOMINGUES, L. A. M. C. ; MOREIRA, F. S. ; S. FILHO, J. I. Comportamento Térmico em Cabos de Linhas de Transmissão- Medições Experimentais., EletroEvolução (Rio de Janeiro), v. Março, p. 17-24, 2010.