

## **MODELAGEM NUMÉRICA DE CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA**

**Jaime Enrique Duarte, jaykex@gmail.com<sup>1</sup>**

**Farith M. Absi Salas, farith@cepel.br<sup>2</sup>**

**Hélcio R. Barreto Orlande, Hélcio@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>1</sup>**

**Luis Adriano M. C. Domingues, lamcd@cepel.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ/PEM/COPPE, Caixa Postal: 68503, Cidade Universitaria, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>2</sup>Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Cidade Universitaria, Rio de Janeiro, Brasil

*Resumo: O presente trabalho apresenta a modelagem numérica do comportamento térmico de cabos usados em linhas de transmissão de energia. O cabo considerado é constituído de dois materiais e modelado via diferenças finitas como dois cilindros concêntricos. O material mais interno é a alma de aço que é encarregado da sustentação mecânica do cabo. O segundo material é o condutor de alumínio. No transporte de energia por meio de cabos, aproximadamente 98% da eletricidade flui através das camadas do condutor, criando uma fonte de calor interna como consequência da resistência inerente do material. Este aquecimento interno em cabos, conhecido como efeito Joule, é função da resistência elétrica, da corrente aplicada e da área efetiva da seção transversal. Consideram-se perdas por convecção e radiação. São apresentados resultados em termos da distribuição de temperatura interna para diferentes correntes aplicadas, considerando-se a resistência de contato entre os dois materiais. Também é considerado o fato do cabo ser composto por camadas de fios condutores, o que resulta em uma seção transversal heterogênea composta pelo material em questão e os espaços entre os fios. Esta seção heterogênea implica numa diminuição da condutividade térmica radial da ordem de 100 vezes o valor do material condutor, que por sua vez é uma das causas dos gradientes de temperatura interna nos cabos. Em adição, resultados experimentais são mostrados e comparados com os resultados numéricos. Os ensaios experimentais foram levados a cabo dentro de um laboratório fechado para um cabo ACSR tipo Tern.*

**Palavras-chave:** *Equação de Calor, diferenças finitas, cabos de linhas de transmissão, condutividade térmica efetiva.*

### **1. INTRODUÇÃO**

O consumo de energia tem aumentado em um ritmo acelerado nas últimas décadas, forçando ao setor elétrico a aumentar sua capacidade de geração e transmissão de energia elétrica. A necessidade de transmitir a energia gerada através de milhares de quilômetros, de forma segura e eficiente, representou um enorme desafio para a tecnologia de cabos. Dentro desse contexto, o conhecimento preciso do comportamento térmico de cabos tornou-se objeto de intensos estudos, desde que a capacidade de transmissão esta diretamente ligada à temperatura atingida pelos cabos.

A corrente que flui por meio dos condutores aquece os cabos devido à resistência inerente dos materiais. Este aquecimento, conhecido como efeito Joule, atua como uma fonte de calor interna, a qual além de ser função da corrente, também é função da resistência elétrica e da área efetiva do condutor. Frente a essa limitação, a elevação de temperatura dos cabos não pode atingir valores críticos de forma a inviabilizar o transporte de energia com as perdas ocasionadas pelo aquecimento e pela degradação dos cabos causada pelas altas temperaturas.

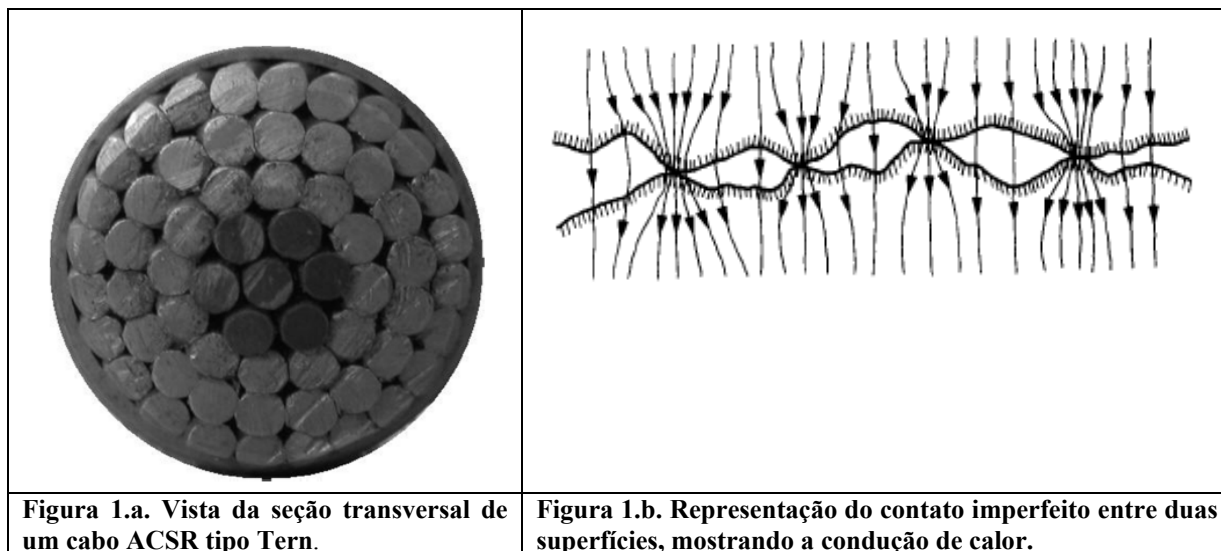
Entre os trabalhos publicados sobre o comportamento térmico de cabos energizados, encontram-se na literatura modelos teóricos nos quais foram obtidas soluções para determinar a distribuição de temperatura radial e variações de esta com respeito à corrente aplicada (Black et al, 1988; Morgan, 1990). Morgan (1990) chamou a atenção para a dissipação de energia considerando o cabo composto por camadas de fios. Nesse caso, o autor definiu a condutividade térmica efetiva a qual considera que a dissipação de calor na direção radial é afetada pelos espaços e micro-espaços que constituem a seção transversal do cabo. Nesse mesmo trabalho foram analisados todos os mecanismos de transferência de calor presentes na dissipação de calor dentro do cabo. Como resultado, Morgan concluiu que a condução é o principal mecanismo de transferência de calor entre as camadas do cabo, desprezando as contribuições de radiação e convecção para temperaturas menores a 300 °C. Ainda o autor argumenta, que a condução de calor acontece entre as asperezas dos fios em contato e os micro-espaços entre os dois materiais, ver Fig. (1.b) Em adição, Morgan (1991)

definiu uma expressão para o coeficiente de resistência de contato  $h_c$  como uma função de vários parâmetros inerentes da configuração do cabo, considerando duas superfícies de alumínio em contato com deformação plástica.

Mais recentemente, Miro et al (2006) apresentam um modelo numérico para obter a distribuição de temperatura considerando a seção transversal do cabo como camadas de fios (ver figura 1.a), e fenômenos eletromagnéticos, como o efeito pelicular, interagindo simultaneamente com os fenômenos térmicos. Como resultado, esse modelo apresentou uma distribuição irregular da temperatura ao longo do cabo, alertando a existência de altos gradientes de temperatura ao longo do raio. Por outro lado, resultados experimentais (Douglas, 1986, Foss et al, 1987, Absi et al, 2009) mostraram que os gradientes internos podem alcançar valores significativos, podendo chegar em alguns casos até 30 % do aumento da temperatura do cabo com respeito à temperatura ambiente.

Em condições normais de operação dos cabos, medições internas de temperatura são impraticáveis devido à dificuldade de obter tais medições sem interferir no processo de transmissão. Na prática, medidas de temperatura da superfície externa podem ser obtidas com o uso de equipamentos criados com esse propósito. Muitas vezes, a temperatura medida na superfície do cabo é usada para cálculos relacionados ao projeto das linhas de transmissão, desconsiderando os gradientes de temperatura internos. Entretanto, sob algumas condições, estes gradientes podem ser significativos e devem ser levados em conta para o cálculo correto das tensões térmicas e da dilatação efetiva dos materiais que compõem o cabo. Nesse sentido, as simulações numéricas são importantes para a modelagem do comportamento térmico de cabos, de forma a prever com precisão a distribuição de temperatura interna.

No presente trabalho é apresentado um modelo numérico para a determinação da distribuição da temperatura interna de cabos. Assumem-se algumas simplificações, entre as quais, considera-se a seção transversal do cabo composto de dois cilindros concêntricos, em que o mais interno corresponde à alma de aço encarregado pela sustentação mecânica do cabo e o cilindro externo correspondendo ao condutor, o qual é feito de alumínio na maioria dos cabos usados em linhas de transmissão. Resultados numéricos da distribuição de temperatura interna para algumas correntes aplicadas são comparados com resultados experimentais obtidos num laboratório fechado, para um cabo ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) com termopares embutidos entre as camadas do condutor.



## 2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O transporte de energia por meio de cabos é por definição um problema em 3 dimensões. Entretanto, desde que o comprimento do cabo é muito maior quando comparado com o diâmetro, o problema de transferência de calor pode ser reduzido a um problema de duas dimensões, isto é, a distribuição de temperatura do cabo será obtida na área da seção transversal.

Em cabos de linhas de transmissão parte da energia elétrica é convertida em energia térmica devido à resistência dos materiais ao passo da corrente. Enquanto que uma parte desta energia térmica ocasiona um aumento da temperatura do cabo, outra parte é dissipada pela convecção e pelas perdas radiativas inerentes à sua superfície. Com isso, o

problema de transferência de calor em cabos abrange os três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

O problema físico em questão é descrito esquematicamente na Fig. (2). Nesta figura é mostrada a seção transversal de um cabo representado por dois cilindros concêntricos de diferentes materiais. O material mais interno (alma de aço) tem como objetivo principal a sustentação mecânica dos cabos. O cilindro externo é o condutor propriamente dito e é feito de alumínio na maior parte dos cabos usados em linhas de transmissão.

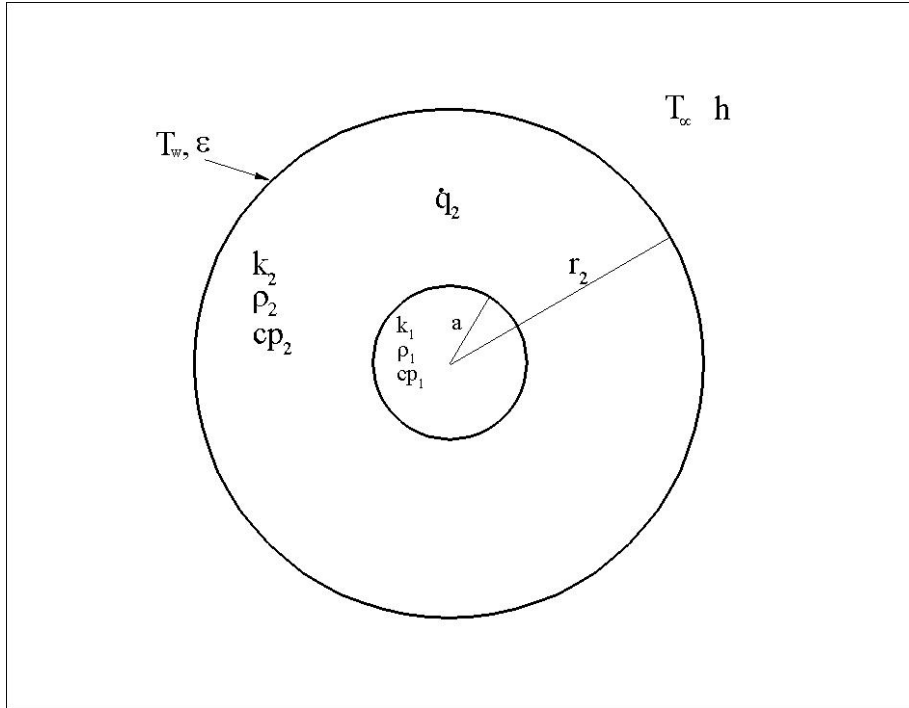


Figura 2. Seção transversal de um cilindro bimetalico.

Uma vez aplicada uma corrente I, a temperatura do cabo aumenta até atingir o regime permanente e dependendo do valor de I, gradientes de temperatura são formados criando uma diferença interna de temperatura, cujos valores podem influenciar de forma relevante o desempenho no transporte de energia.

Considerando-se a simetria axial do cabo bimetalico, a equação diferencial que governa o problema de transferência de calor em questão é a equação de calor unidimensional, expressa como:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q(T)}{k} \quad \text{em} \quad 0 < r < r_2, \quad \text{e} \quad t > 0, \quad (1.a)$$

com as condições de contorno:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{em} \quad r = 0 \quad \text{e} \quad t > 0, \quad (1.b)$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = h_c (T_2 - T_1) \quad \text{em} \quad r = a \quad \text{e} \quad t > 0, \quad (1.c)$$

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \quad \text{em} \quad r = a \quad \text{e} \quad t > 0, \quad (1.d)$$

$$-k_2 \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_w - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \quad \text{em} \quad r = r_2, \quad \text{e} \quad t > 0 \quad (1.e)$$

$$T(r, 0) = T_0 \quad \text{em} \quad t = 0 \quad \text{e} \quad 0 \leq r \leq r_2. \quad (1.f)$$

Em que  $k_1$  e  $k_2$  são as condutividades térmicas do aço e do alumínio, respectivamente,  $\alpha$  é a difusividade térmica do material em questão,  $h_c$  é o coeficiente de resistência de contato,  $\varepsilon$  é a emissividade térmica da superfície externa do condutor,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $T_1$  é a temperatura na interface dos materiais correspondente ao aço,  $T_2$  é a temperatura na interface correspondente ao alumínio,  $T_w$  é a temperatura da superfície externa do condutor,  $T_0$  é a temperatura na condição inicial em  $t = 0$  e  $T_\infty$  é a temperatura do meio externo envolto do cabo.

O coeficiente de transferência de calor convectivo  $h = Nu k_{ar}/D$  é calculado considerando convecção livre e é obtido a partir da expressão proposta por Morgan (1975) para o número de Nusselt total, considerando um cilindro circular isotérmico horizontal, da forma:

$$Nu = A(Ra_D)^m \quad (2)$$

Em que  $k_{ar}$  é a condutividade térmica do ar,  $D$  é o diâmetro total do cabo,  $Ra_D$  é o número de Rayleigh e é definido como  $Ra_D = Gr \cdot Pr$ , em que  $Gr$  é o número de Grashof e  $Pr$  o número de Prandtl. Os parâmetros  $A$  e  $m$  são definidos para uma faixa de  $10^{-10} \leq Gr.Pr \leq 10^{10}$  (Morgan, 1991).

O termo  $q(T)$  na equação (1.a) é a fonte de calor interna devido à resistência ao passo da corrente e é definida como:

$$q(T) = \frac{I^2 R(T)}{A_{ef}} \quad (3)$$

Em que  $I$  é a corrente aplicada, a qual é considerada uniforme em toda a área transversal do condutor  $A_{ef}$ . Esta aproximação não leva em conta o fato de fenômenos eletromagnéticos como o efeito pelicular causarem uma densidade de corrente variável ao longo do raio do condutor. A correção da resistência do alumínio  $R(T)$  é uma função linear da temperatura e é definida como  $R(T) = R_{ref} [1 + z(T - T_{ref})]$ , em que  $R_{ref}$  a resistência do alumínio na temperatura de referência  $T_{ref} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $z = 0.0039$  é o fator de correção do alumínio considerado constante.

### 3. METODOLOGIA NUMÉRICA

A metodologia numérica implementada neste trabalho é baseada no método de diferenças finitas. Para isto, o método implícito é aplicado na equação de calor (1.a), da forma:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = \frac{T_{j+1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j-1}^{n+1}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{T_{j+1}^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{2\Delta r} \right) + \frac{I^2 R_{ref} [1 + z(T_j^{n+1} - T_{ref})]}{A_{ef} k} \quad (4)$$

Em que  $n = 0, 1, \dots, t_f$  e  $0 < j < r_2$  representam os coeficientes da discretização no tempo e no espaço, respectivamente. Rearrmando os termos da equação (4), obtém-se o sistema tridiagonal geral:

$$A_j T_{j-1}^{n+1} + B_j T_j^{n+1} + C_j T_{j+1}^{n+1} = D_j \quad (5)$$

Em que

$$\begin{aligned} A_j &= \frac{\alpha \Delta t}{2r \Delta r} - \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \\ B_j &= 1 + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \alpha \Delta t \Omega_0 \\ C_j &= -\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{\alpha \Delta t}{2r \Delta r} \\ D_j &= T_j^n + \alpha \Delta t (\Omega_0 - \Omega_0 z T_{ref}) \end{aligned} \quad (6)$$

Em que  $\Omega_0 = I^2 R_{ref} / k A_{ef}$

Na forma matricial o sistema tridiagonal da Eq. (5) é representado como:

$$\begin{bmatrix} B_0 & C_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_j & B_j & C_j & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{k-1} & B_{k-1} & C_{k-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_k & B_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^{n+1} \\ T_j^{n+1} \\ \vdots \\ T_{k-1}^{n+1} \\ T_k^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_j \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ D_{k-1} \\ D_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

Os coeficientes do sistema tridiagonal para  $r = 0$ ,  $r = a$  e  $r = r_2$  são obtidos a partir das condições de contorno denotadas nas Eqs. (1.b – 1.e). Note-se que o coeficiente  $B_{j=r_2}$  é uma função não linear da temperatura devido à contribuição da radiação térmica, como mostrado na Eq. (1.e). Este termo é mantido constante em cada iteração aproximando-o como uma função da temperatura no passo de tempo anterior, isto é:

$$B_{r_2}(T_{r_2}^{n+1}) \approx B_{r_2}(T_{r_2}^n) + \Delta B_{r_2} \quad (8)$$

em que

$$\Delta B_{r_2} = 3T_{r_2}^n \left( \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{\alpha \Delta t}{2r \Delta r} \right) \frac{2\varepsilon \sigma \Delta r}{k} (T_{r_2}^n - T_{r_2}^{n-1}) \quad (9)$$

Uma vez definidos os coeficientes do sistema tridiagonal para todos os nós da malha, dada pela Eq. (5), incorpora-se no código numérico o solver DLSLTR da biblioteca IMSL 90 com o objetivo de resolver o sistema tridiagonal, obtendo-se como resultado as temperaturas calculadas em toda a malha.

#### 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As medições internas de temperaturas 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, tendo-se, portanto, somente a convecção livre ou natural. 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 colocado na forma de um semi-círculo e pendurado no ar com cordas isolantes presas no teto, mantendo constante a distância do condutor ao piso do laboratório, ver Fig. (3.a). Além dos termopares instalados no interior do cabo, foram instalados termopares em vários pontos da superfície do cabo. O intervalo mínimo de coleta do sistema de aquisição de dados utilizado é de 3 segundos.

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 na superfície foram firmemente fixados com arame e foi utilizada uma pasta térmica para homogeneizar a região medida, ver Fig. (3.b). 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.





Figura 3.a. Arranjo experimental para medições de temperatura interna e externa para um cabo Tern pintado com tinta preta fosca de emissividade conhecida,  $\epsilon = 0.95$ .

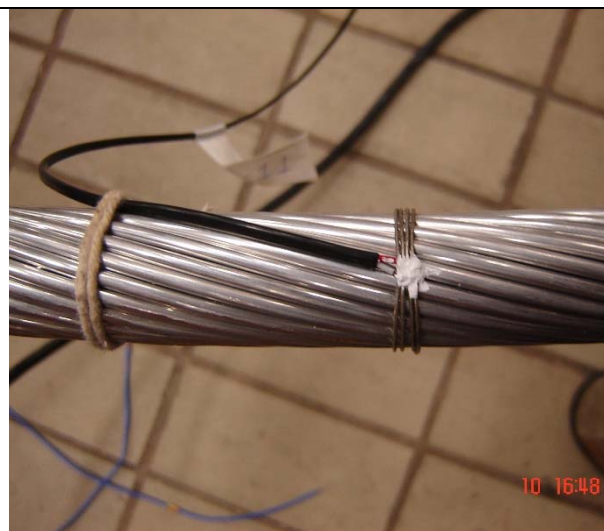


Figura 3.b: Termopar cuidadosamente colocado na superfície do cabo de forma a minimizar os erros por mal contato.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo numérico apresentado na seção anterior foi previamente validado com uma solução analítica obtida com a técnica transformada integral clássica para um cilindro monometálico de alumínio, como mostrado na Fig. (4). Esta figura mostra a temperatura na superfície do cabo até atingir o regime permanente, para uma corrente aplicada de 800 A. Nota-se que as temperaturas calculadas estão em excelente concordância com a solução analítica.

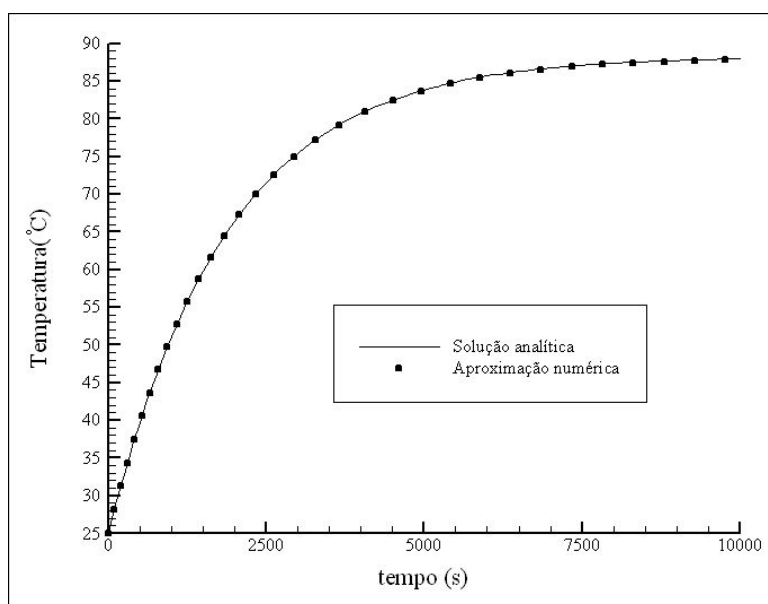


Figura 4. Comparação da solução analítica com a aproximação numérica para uma corrente de  $I = 800$  A.

A seguir são apresentados resultados em termos da distribuição de temperatura da seção transversal do cabo. Por sua vez, estes resultados são comparados com resultados experimentais obtidos em ensaios realizados no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel).

Vários valores de corrente foram aplicados ao cabo e simultaneamente foram obtidas medidas de temperatura interna e externa por meio de termopares embutidos entre as camadas do condutor e fixados na superfície externa do cabo. As medidas experimentais foram realizadas em um cabo ACSR tipo Tern. Para este cabo, o diâmetro da alma de aço é de  $d_1 = 0.00675$  m e o diâmetro nominal total é de 0.027 m. A resistência elétrica de referência para o alumínio é de  $R_{ref} = 0.0876 \Omega/\text{km}$ , na temperatura de referência  $T_{ref} = 75$  °C. A superfície externa do cabo foi revestido com uma tinta preta fosca de emissividade  $\epsilon = 0.95$ , como mostrado na Fig. (3.a). Para o cálculo do coeficiente de transferência

de calor por convecção  $h$ , as propriedades do ar em volta da superfície externa do cabo foram consideradas constantes e são dadas na Tab. 1.

**Tabela 1. Propriedades físicas dos materiais usados nos cálculos.**

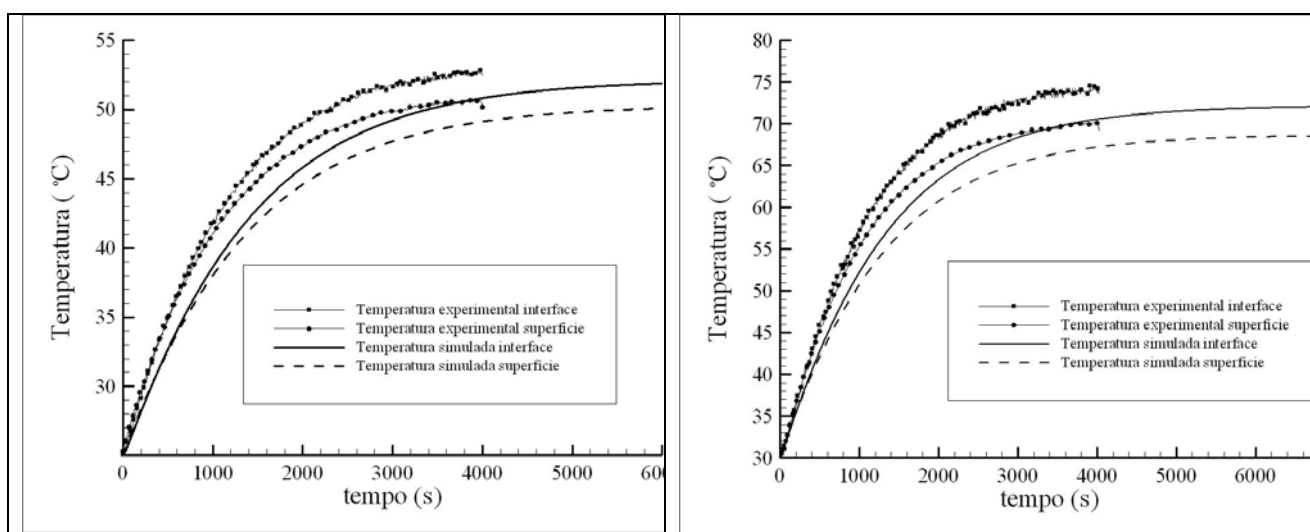
Propriedades Alumínio	$\rho = 2707 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 896 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$ $k = 204 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.95$
Propriedades de Aço	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 475 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$ $k = 44.5 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Propriedades do Ar	$\rho = 1.177 \text{ kg/m}^3$ $C_p = 1005.7 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ $k = 0.0264 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ $\mu = 1.983\text{E}10^{-5} \text{ kg/m s}$

Nas simulações numéricas considera-se que toda a corrente flui somente através do alumínio e a densidade de corrente é considerada uniforme e constante em toda a área do condutor. A massa específica  $\rho$  e o calor específico  $C_p$  do aço e do alumínio são dados na Tab. 1. O coeficiente de resistência ao contato  $h_c$  foi determinado seguindo as recomendações de Morgan (1991) para duas superfícies de alumínio em contato com deformação plástica, tal que  $h_c = 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

A malha utilizada nos cálculos é composta de 200 nós distribuídos uniformemente ao longo do raio. O passo de tempo foi definido em 1 s.

A figura (5.a) apresenta uma comparação entre as temperaturas experimentais e calculadas para o cabo Tern em duas posições: na superfície externa do cabo e na interface entre a alma de aço e o condutor. A corrente aplicada neste caso é de  $I = 600 \text{ A}$ . A Fig. (5.a) mostra que durante o aquecimento até atingir o regime permanente as temperaturas calculadas subestimam as medições experimentais. Contudo, no regime permanente as temperaturas experimentais e calculadas apresentam valores próximos, com uma diferença de menos de  $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , com a temperatura calculada na superfície de  $T_w = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Também é possível notar que o regime permanente foi atingido mais rapidamente nos testes experimentais.

As medições experimentais mostram a existência de um gradiente de temperatura na seção transversal do cabo, de forma a se ter uma temperatura maior no interior. No regime permanente, a diferença de temperatura radial entre a superfície e a interface dos materiais é de aproximadamente  $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Acredita-se que a causa principal deste gradiente interno seja a seção transversal heterogênea, composta do material do cabo e do ar contido nos espaços entre os fios. Como consequência disto, a condutividade térmica radial efetiva assume valores baixos, diminuindo a condução de calor no interior do cabo. Morgan (1990) recomenda o uso de valores da condutividade térmica efetiva entre  $1$  e  $2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ . Isto significa uma diminuição de quase 100 vezes o valor da condutividade térmica do material condutor. Considerando-se a condutividade radial efetiva  $k_{ef} = 1 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , a Fig. (5.a) mostra também um gradiente de temperatura calculado de aproximadamente  $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



**Figura 5.a. Temperatura calculada versus experimental para uma corrente aplicada de 600 A.**

**Figura 5.b. Temperatura calculada versus experimental para uma corrente aplicada de 800 A.**

Na Fig. (5.b) é mostrada uma comparação das temperaturas experimental e calculada quando uma corrente de 800 A é aplicada no cabo. Para esta corrente a temperatura calculada no regime permanente é de  $T_w = 68,5\text{ }^\circ\text{C}$ . A diferença de temperatura interna do cabo é maior que no caso em que  $I = 600\text{ A}$ , chegando a mais de  $4\text{ }^\circ\text{C}$  para o caso experimental e  $3,5\text{ }^\circ\text{C}$  para a diferença calculada.

Da mesma forma que no caso anterior, a temperatura calculada sempre subestima a temperatura experimental, principalmente no regime transiente em que a diferença entre a temperatura experimental e a calculada chega aproximadamente a  $5\text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto que no regime permanente esta diferença cai para aproximadamente  $2\text{ }^\circ\text{C}$ .

Dois causas possíveis podem contribuir para a diferença entre dados experimentais e calculados. A primeira é o fato da área real da seção transversal do condutor ser menor quando considerada a área efetiva sem os espaços entre os fios que constituem o condutor. Assim, considerando a definição da fonte de calor interno, dada pela Eq. (3), a geração interna de energia para a seção transversal real dos fios que constituem o condutor será maior que a gerada na seção transversal aproximada por dois cilindros concêntricos.

Outra causa que pode contribuir para o aquecimento maior nos ensaios experimentais é a interação entre fenômenos térmicos e elétricos, os quais se desenvolvem simultaneamente durante o transporte de energia elétrica. Devido a efeitos eletromagnéticos inerentes ao transporte de energia por cabos, como o efeito pelicular, o fluxo de corrente não é uniformemente distribuído na área efetiva do condutor e, portanto, existe uma densidade de corrente variável ao longo do raio. Com isso, existirá um aquecimento irregular entre as camadas do condutor (Miro, 2006; Absi et al, 2009).

Finalmente, na Fig (6) é apresentado um ciclo térmico do cabo para uma corrente de  $I = 1000\text{ A}$ . As temperaturas experimentais e calculadas são comparadas durante o aquecimento do cabo até atingir o regime permanente e no resfriamento em que a corrente é desligada. A diferença de temperatura interna do cabo chega a aproximadamente  $6\text{ }^\circ\text{C}$  tanto no caso experimental como no calculado. Comparando-se este ultimo caso com os casos anteriores, conclui-se que esta diferença de temperatura interna no cabo aumenta com o aumento da corrente aplicada.

No regime permanente e durante o resfriamento do cabo, a Fig. (6) apresenta resultados satisfatórios para o cálculo da distribuição de temperatura, chegando a uma diferença entre temperatura experimental e calculada de menos de  $1\text{ }^\circ\text{C}$ , com temperatura calculada na superfície de  $T_w = 92\text{ }^\circ\text{C}$ .

Cabe ressaltar que para altos valores de corrente aplicados, em que altos valores de temperatura do cabo são alcançados, a variação com a temperatura de alguns parâmetros como propriedades termo-físicas do cabo e do ar em volta tem que ser levados em consideração. Esta variação pode ser relevante nos cálculos da distribuição de temperatura dos cabos.

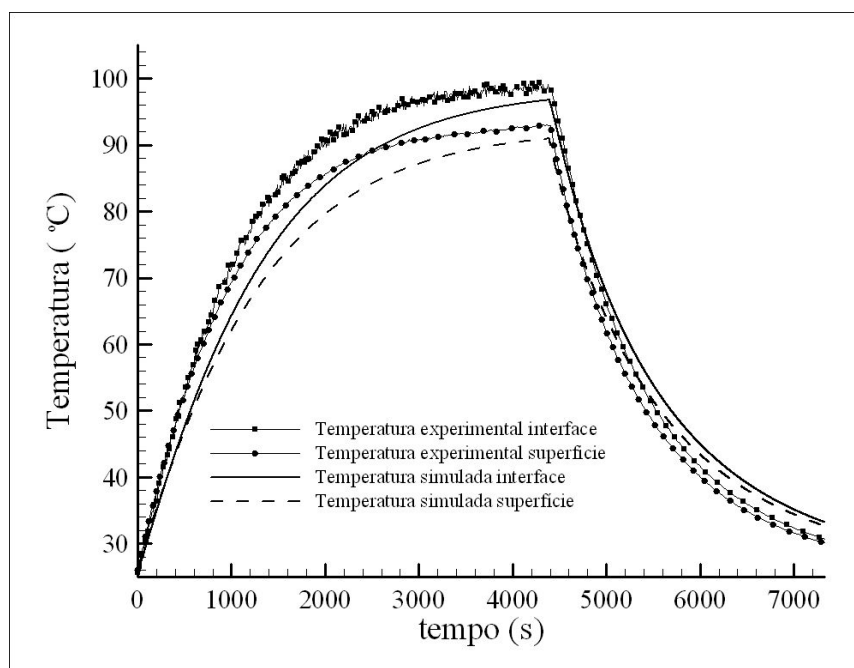


Figura 6. Ciclo térmico do cabo tipo Tern para  $I = 1000\text{ A}$ .



## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma modelagem numérica de cabos aéreos usados em linhas de transmissão. Tais cabos são constituídos por camadas de fios gerando uma seção transversal heterogênea composta por fios e pelo ar contido nos espaços entre os fios. O cabo modelado foi do tipo ACSR, em que a alma de aço se encarrega da sustentação mecânica do cabo enquanto que o condutor de alumínio é responsável pelo transporte de mais do 98% da corrente aplicada. Com essas considerações, um modelo simples foi implementado baseado no método de diferenças finitas com o objetivo de obter a distribuição de temperatura na seção transversal do cabo. No modelo apresentado, o cabo foi aproximado por dois cilindros concêntricos, assumiu-se uma densidade de corrente uniforme em toda a seção do condutor e se adotou uma condutividade térmica efetiva com o intuito de incorporar a diminuição da dissipação de energia causada pela presença de ar entre os fios do condutor.

Foram apresentados resultados em termos da distribuição de temperatura interna para algumas correntes aplicadas, considerando-se perdas por convecção e radiação. Os resultados numéricos mostraram um aumento dos gradientes de temperatura internos com o aumento da corrente aplicada. No regime permanente os resultados mostraram uma boa concordância com medições experimentais levadas a cabo dentro de um laboratório fechado. Entretanto, no regime transiente mostrou-se uma discrepância entre temperaturas calculadas e medidas, fato que foi atribuído à diferença de áreas efetivas de um cabo real com o cabo aproximado por dois cilindros e à interação simultânea entre fenômenos elétricos e térmicos.

## 7. REFÊRENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Absi S. F. M., Domingues L. A. M. C., Moreira F. S., Filho J. I. S., 2009, "Comportamento Térmico em Cabos de Linhas de Transmissão – Medições Experimentais." Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, XX SNPTEE, Recife – Brasil.

Black W. Z., Collins S. S., Hall J. F., 1988., "Theoretical Model for Temperature Gradients Within Bare Overhead Conductors", IEEE.

Douglass D. A., 1986., "Radial and Axial Temperature Gradients in Bare Stranded Conductor." IEEE. TPS.

Foss S. D., Lin S. H., Carberry R., 1987, "Significance of the Conductor Radial Temperature Gradient within a Dynamic Rating Methodology." IEEE.

Miro Zunec, Igor Ticar, 2006, "Determination of Current and Temperature Distribution in Overhead Conductors by Using Electromagnetic-Field Analysis Tools. IEEE.

Morgan V. T., 1975, "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders." Advances in Heat Transfer 11, pp. 199 – 263.

Morgan V. T., 1990, "Radial Temperature Distribution and Effective Radial Thermal Conductivity in Bare Solid and Stranded Conductors". IEEE.

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

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## NUMERICAL METHOD MODELLING BARE POWER CABLES

Jaime Enrique Duarte, jaykex@gmail.com<sup>1</sup>

Farith M. Absi Salas, farith@cepel.br<sup>2</sup>

Helcio R. Barreto Orlande, Hécio@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>1</sup>

Luis Adriano M. C. Domingues, lamcd@cepel.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Rio de Janeiro UFRJ/PEM/COPPE, Caixa Postal: 68503, Cidade Universitaria, Rio de Janeiro, Brazil.

<sup>2</sup>Electric Energy Research Center– CEPTEL, Cidade Universitaria, Rio de Janeiro, Brazil

**Abstract:** *In this work we introduce a numerical model of the thermal behavior of power cables. The bare cable is made up of two concentric materials and is modeled through the finite difference method. The inner material is made of steel and its main function is to provide mechanical support. The outer material is the aluminum conductor. In transmission lines 98% of electricity passes through the conductor, this causes an internal heat build up as a consequence of the electric resistance of the material. Such internal heating, known as Joule effect, is a function of the electrical resistance, current and the effective cross sectional area. The model herein presented takes into account radiation and convective losses. Results are presented in terms of internal temperature distribution for a given applied currents, where the resistance contact between the conductor wires is taken into consideration. The model also takes into account the fact that the power cables are composed of stranded conductor layers, resulting in a non-homogeneous cross sectional area. This non-homogeneous area, formed by the wires strands and air voids, causes reduction of the radial thermal conductivity. Such reduction could be up to one-hundred times lower than the conducting material and is responsible for the internal temperature gradients of the cable. In addition, experimental results are shown and compared with the numerical model. The experimental procedures were developed in an indoor lab facility for a Tern ACSR cable.*

**Keywords:** *Heat Equation, finite differences, bare power cables, effective thermal conductivity.*