



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

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

**GRUPO -III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**CONFIABILIDADE NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO MONITORAMENTO TÉRMICO  
DAS LINHAS SUBTERRÂNEAS**

**Juliana Sanchez Morine  
CTEEP**

**Tarcisio Misael de Lima  
CTEEP**

**RESUMO**

O aquecimento excessivo das Linhas Subterrâneas de Energia Elétrica é prejudicial ao seu estado físico, podendo gerar envelhecimento do papel e diminuição da vida útil da Linha. Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo térmico para as Linhas Subterrâneas de Transmissão com cabos OF, bem como analisar a confiabilidade destas, através dos fatores térmicos encontrados. Para tanto, utiliza-se os modelos térmicos propostos pela norma IEC 60287-1-1 e pelo método Neher and McGrath.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linhas Subterrâneas de Transmissão, Modelo Térmico, Confiabilidade, Manutenção de Linhas de Transmissão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Na cidade de São Paulo estão localizadas três Linhas de Transmissão Subterrâneas, sendo uma no centro da cidade, uma na zona norte e outra na zona sul. Estas três Linhas de Transmissão são compostas por cabos do tipo OF (papel impregnado de óleo fluído a baixa pressão).

Pode-se afirmar que a manutenção preventiva aplicada nestas linhas é hoje uma das melhores ferramentas para se assegurar que não haja descontinuidade na Transmissão de Energia neste grande pólo industrial e comercial. Atualmente a manutenção preventiva das Linhas Subterrâneas de Transmissão é feita através de tarefas técnicas em equipamentos, de monitoramento da pressão do óleo existente no cabo e de vistoria motorizada ao longo dos trechos de Linha. Todavia, esta manutenção ainda não prevê qualquer tipo de proteção a fatores térmicos que possam ocorrer na Linha.

Segundo estudos, o aquecimento excessivo das Linhas Subterrâneas de Energia é prejudicial ao seu estado físico, podendo gerar envelhecimento do papel isolante e diminuição da vida útil da linha (1;2).

Desta forma, a execução do monitoramento térmico pode garantir que estes fatores citados não interfiram no Sistema de Transmissão de Energia, evitando possíveis descontinuidades ao Sistema.

Utilizando-se os modelos propostos por (3) e (4), desenvolveu-se um modelo específico para as Linhas de Transmissão da CTEEP, onde é possível estimar a temperatura do condutor do cabo através da carga e da temperatura média do ambiente. Em um sistema sincronizado, os dados podem ser analisados em tempo real.

**2.0 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CABOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA**

A elaboração do modelo térmico depende essencialmente do estudo em transferência de calor, seja esta através dos componentes dos cabos, através dos demais cabos que constituem o circuito, e através do solo.

Os cabos analisados, Figura 1, são constituídos por um condutor metálico provido de um canal interno, necessário para manter o óleo isolante sob pressão, que irá impregnar totalmente a camada de papel (isolação), preenchendo todo o volume contido pela blindagem metálica. Sobre a blindagem é construída uma capa não metálica que atua como proteção anti-corrosiva.

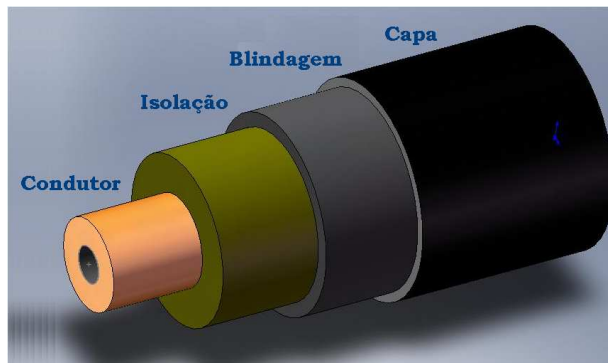


FIGURA 1- Constituição do Cabo de Transmissão Subterrânea de Energia

A corrente que percorre os cabos de energia age como fonte de calor, assim o calor é difundido do condutor para a capa do cabo, e quando tratamos de cabos enterrados, este calor também é transmitido aos demais cabos do circuito que estão na vizinhança através do solo por condução. Uma vez que o solo encontra-se no caminho entre o cabo e o ambiente externo, o solo comporta-se como uma resistência térmica.

Assim, a profundidade a que o cabo se encontra enterrado, bem como a distância entre os cabos em análise e os demais cabos do circuito se torna de grande importância para o modelamento do comportamento térmico (5).

### 3.0 - MODELO TÉRMICO

Os cabos da Linha de Transmissão Subterrânea analisados neste estudo são do tipo OF modelo unipolar, enterrados em Backfill, com tensões de 230KV (Linha CTT Centro-CTR Centro) e 345KV (Linha Xavantes-Bandeirantes e Norte-Miguel Reali), e seu sistema trifásico possui geometria plana.

Para a elaboração do modelo, utiliza-se uma ferramenta bastante difundida em estudos de transferência de calor que é a criação de um circuito elétrico equivalente, Figura 2. Neste modelo, as fontes de calor são substituídas por fontes de corrente, as resistências térmicas por resistências elétricas e as capacitâncias térmicas por capacitâncias elétricas.

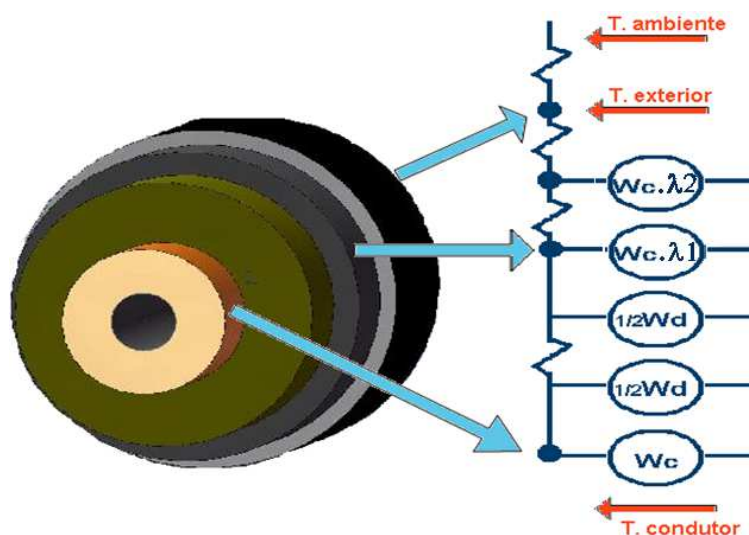


FIGURA 2 - Circuito Elétrico análogo ao modelo Térmico dos cabos de Transmissão de Energia

A transferência de calor, ocorre no sentido do condutor para a capa, assim, o condutor é o componente que mais se aquece no cabo. O calor gerado pelo efeito joule no condutor, o calor gerado pela corrente induzida na blindagem e o calor gerado no material isolante são considerados no modelo elétrico análogo ao térmico como fontes de corrente.

Neste modelo, o principal mecanismo de transferência de calor é por condução, assim, segundo (3), estas transferências de calor podem ser relacionadas através da equação:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{W_d}{2}\right)T_1 + [(1 + \lambda_1) \cdot W_c + W_d] \cdot n \cdot T_2 + [(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot W_c + W_d] \cdot n \cdot (T_3 + T_4) \quad (1)$$

Onde:

- $\Delta\theta$  é o diferencial entre a temperatura do condutor (TC) e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ );
- $W_c$  é a Taxa de calor no condutor e é gerado devido a corrente que passa no condutor (w/m);
- $W_d$  é a Taxa de calor no dielétrico e é gerado devido ao campo elétrico (W/m);
- $T_1$  é a Resistência Térmica do condutor;
- $T_2$  é a Resistência Térmica da capa;
- $T_3$  é a Resistência Térmica da blindagem;
- $T_4$  é a Resistência Térmica do solo;
- $\lambda_1$  é o fator de perda na blindagem;
- $\lambda_2$  é o fator de perda na armação
- $n$  é o numero de condutores que o cabo possui.

Com base nas informações supracitadas e nos modelos de (3) e (4), adotando-se os valores geométricos e elétricos fornecidos pelo projeto de cada linha, o modelo térmico para as Linhas de Transmissão Subterrâneas Xavantes-Bandeirantes, Norte-Miguel Realli e CTT Centro-CTR Centro foi desenvolvido e pode ser representado através das seguintes equações:

#### Linha de Transmissão Xavantes-Bandeirantes

$$TC = 1,287 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 + 2,775 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 \cdot T_4 + 12,207 \cdot T_4 + 3,502 + T_{amb} \quad (2)$$

#### Linha de Transmissão Norte-Miguel Realli

$$TC = 2,799 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 + 4,094 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 \cdot T_4 + 7,680 \cdot T_4 + 3,037 + T_{amb} \quad (3)$$

#### Linha de Transmissão CTT Centro-CTR Centro

$$TC = 1,167 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 + 2,700 \cdot 10^{-5} \cdot FC^2 \cdot \left(\frac{IA + IB + IV}{3}\right)^2 \cdot T_4 + 6,079 \cdot T_4 + 1,587 + T_{amb} \quad (4)$$

Onde a Temperatura do Condutor (TC), depende do Fator de carga (FC), das correntes nas fases Azul, Branca e Vermelha do circuito (IA, IB e IV), da Resistência Térmica do Solo ( $T_4$ ) e da Temperatura Ambiente ( $T_{amb}$ ).

Este modelo possui uma margem de segurança de 10% de seus valores teóricos, isto ocorre devido à propagação de erros nos cálculos do modelo, devido ao uso de valores estáticos e não dinâmicos para as resistências em corrente alternada durante a elaboração do modelo e devido aos locais de medição das temperaturas da capa.

## 4.0 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O modelo elaborado descreve a temperatura no condutor do cabo através da carga e da temperatura ambiente, devido a impossibilidade de se obter os valores físicos da temperatura do condutor e com a finalidade de se verificar a eficácia do modelo térmico, utilizou-se os valores físicos de temperatura da capa e o modelo térmico adaptado a temperatura da capa para se comparar os valores teóricos e físicos. Após esta verificação, foram instaladas as unidades de monitoramento no sistema de supervisão da CTEEP (SAGE) para teste.

### 4.1 Implantação do Sistema de Monitoramento Térmico

Com a finalidade de implementar o sistema de monitoramento térmico ao sistema SAGE, fixou-se o valor do fator de carga para 0,75 (valor atual) para as três Linhas de Transmissão.

Assim, considerando que o sistema SAGE possui as leituras em tempo real da carga existente no cabo, foram instaladas três unidades de monitoramento térmico ambiente nas respectivas subestações das Linhas de Transmissão analisadas.

A instalação do monitoramento térmico ambiente foi realizada utilizando a Termo-Resistência PT 100 e o Transmissor de Temperatura TT-101 Sensy, conforme mostra a Figura 3.

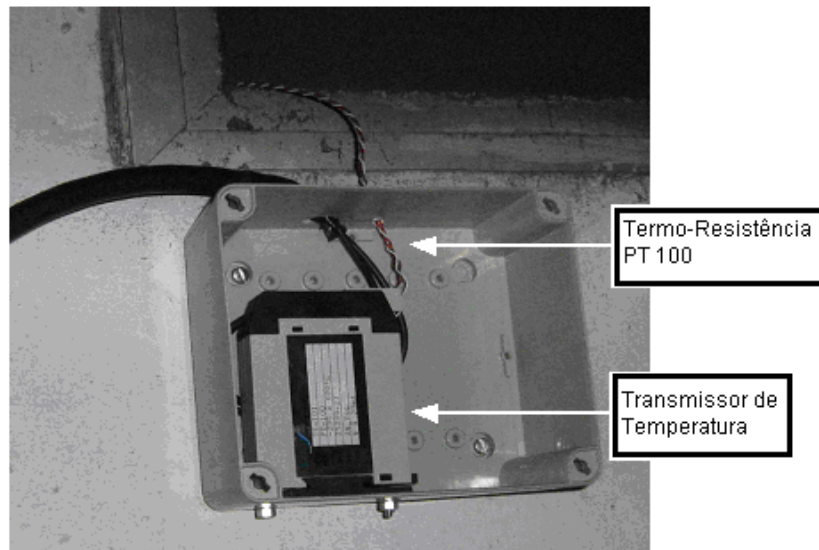


FIGURA 3 - Sensor Térmico implantado, Transmissor ligado à Termo-resistência e cabeamento ligando o sistema à UTR, Subestação Xavantes.

Após a implantação dos sensores, foi realizada a ligação dos mesmos às UTR's das subestação de Xavantes, Norte e CTT Centro, e também a implementação das variáveis no sistema SAGE.

#### 5.0 - ANÁLISE DO MODELO

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam o comportamento térmico fornecido por este modelo e os valores medidos fisicamente. Através destes é possível se observar a relação entre o aumento da temperatura da capa do cabo de cada Linha com relação ao aumento da carga da Linha e do aumento da temperatura ambiente.

A Figura 4 apresenta o comportamento térmico da Linha de Transmissão Norte-Miguel Realli, esta Linha possui dois circuitos trifásicos que operam na tensão de 345KV e as medições físicas foram feitas em seu túnel.

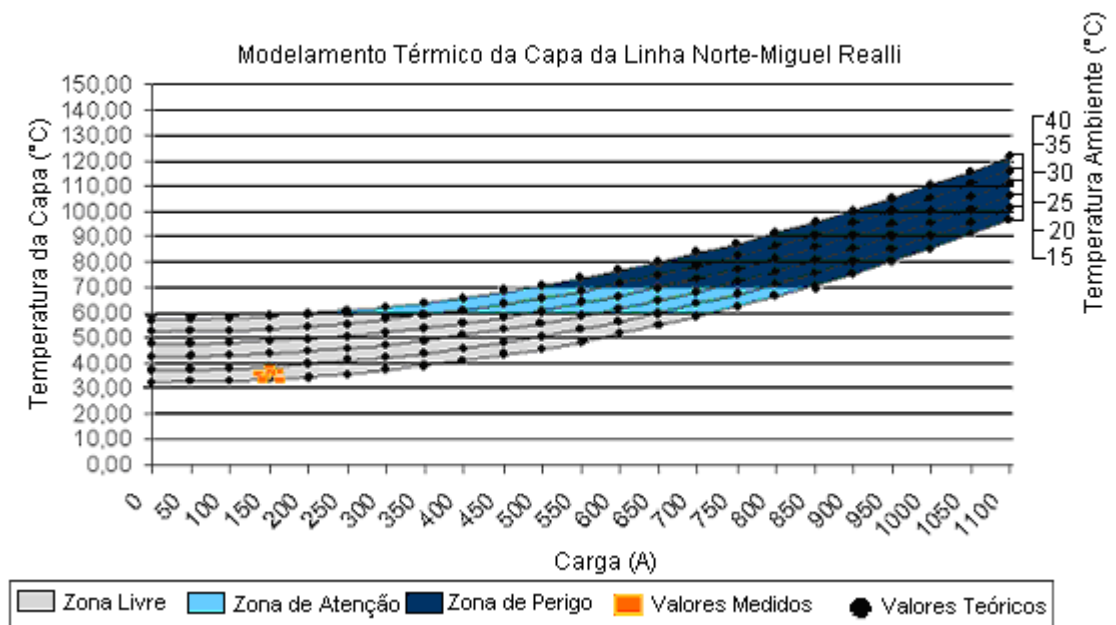


FIGURA 4 - Amostragem do comportamento Térmico da capa da Linha de Transmissão Norte-Miguel Realli, comparação entre os valores obtidos através do modelo e os valores medidos.

Através da Figura 4 é possível se observar que os valores medidos fisicamente se encontram dentro do modelo térmico apresentado. Também é possível se observar que a Linha opera atualmente sem problemas de aquecimento, e assim poderia, sobre o ponto de vista térmico, ter sua carga aumentada.

A Figura 5 apresenta o comportamento térmico da Linha de Transmissão Xavantes-Bandeirantes, esta Linha possui três circuitos trifásicos que operam na tensão de 345KV e as medições físicas foram feitas em seu túnel. Através da Figura é possível se observar que os valores medidos fisicamente se encontram dentro do modelo térmico apresentado.

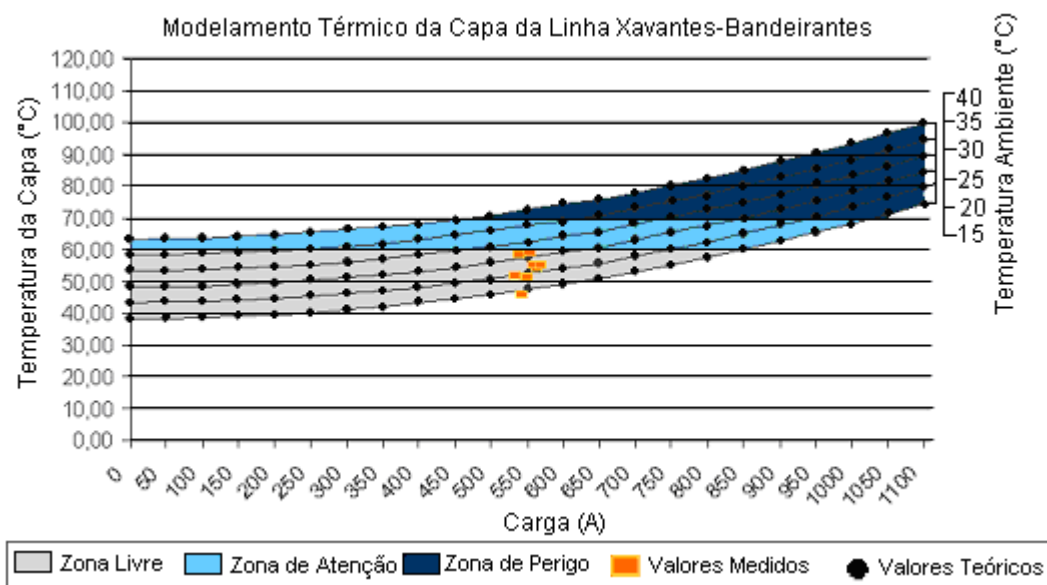


FIGURA 5- Amostragem do comportamento Térmico da capa da Linha de Transmissão Xavantes-Bandeirantes, comparação entre os valores obtidos através do modelo e os valores medidos.

Sobre seu comportamento térmico é possível se observar que a Linha opera na zona livre, no entanto já possui valores próximos a zona de atenção ao se considerar que este modelo possui uma margem de segurança de 10% sobre seus valores.

A Figura 6 apresenta o comportamento térmico da Linha de Transmissão CTT Centro-CTR Centro, esta Linha possui dois circuitos trifásicos que operam na tensão de 230KV.

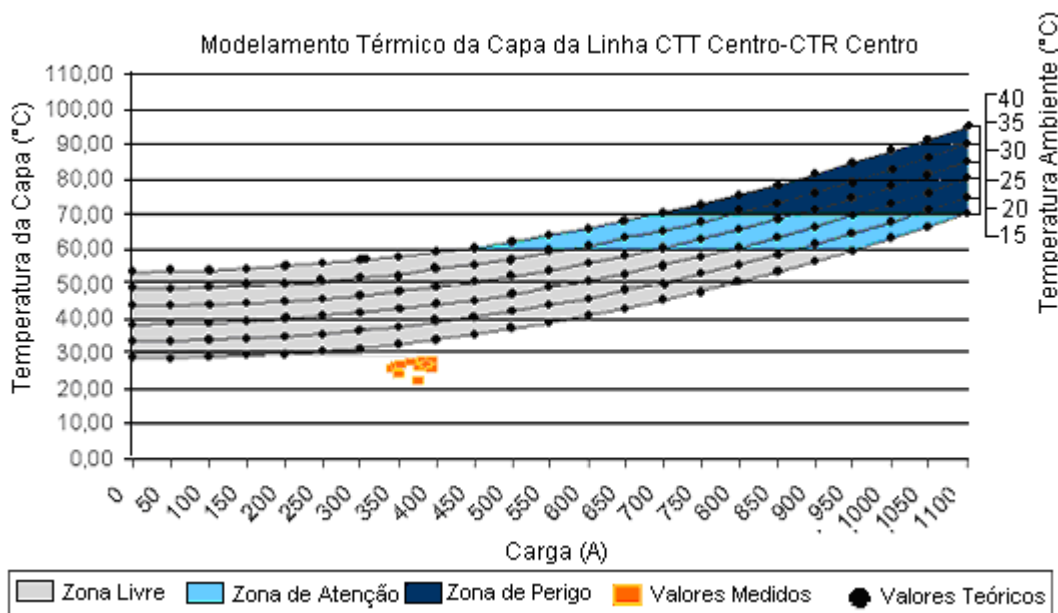


FIGURA 6- Amostragem do comportamento Térmico da capa da Linha de Transmissão CTT Centro-CTR Centro, comparação entre os valores obtidos através do modelo e os valores medidos.

Através da Figura 6 é possível se observar que os valores medidos fisicamente se encontram abaixo do modelo térmico apresentado, isto acontece, pois o local onde foram mensurados os valores físicos de temperatura da capa

desta Linha possui correntes de ar (porão de cabos), o que gera uma maior dissipação do calor entre os cabos. Outros fatores estão relacionados a margem de segurança de 10% entre os valores teóricos e físicos supracitados. A Linha de Transmissão CTT Centro-CTR Centro opera sem problemas de aquecimento, e assim poderia, sobre o ponto de vista térmico, ter sua carga aumentada.

## 6.0 - SIMULADOR DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A partir do modelo térmico elaborado, foi desenvolvido um programa de simulação térmica para cada uma das três Linhas estudadas. Este programa possui como variáveis o fator de carga da Linha, a temperatura ambiente, e a carga que passa na Linha, e como resultado o programa calcula a temperatura do condutor do cabo. A Figura 7 representa o programa de simulação da Linha de Transmissão Xavantes-Bandeirantes.

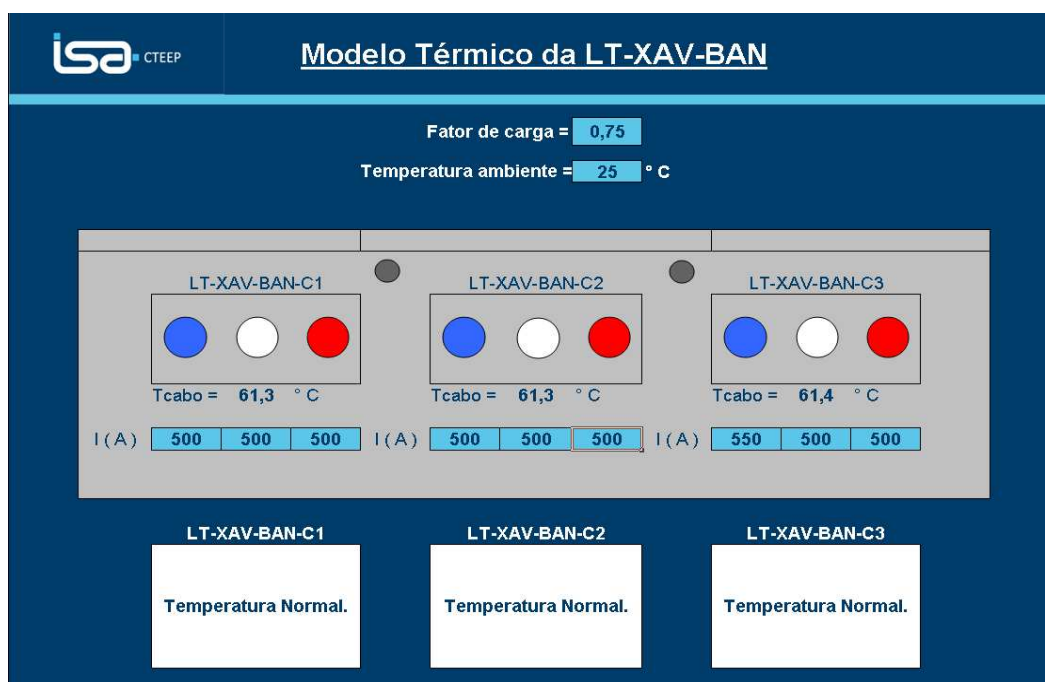


FIGURA 7 - Programa de Simulação Térmica da Linha Xavantes-Bandeirantes.

Além das características acima citadas, este programa também avalia as situações onde existem um, dois ou três circuitos trifásicos em funcionamento, ou seja, mesmo se houver a necessidade de desligar um ou mais circuitos de uma Linha, o programa continuará a ser processado de maneira correta.

O programa de simulação também avalia as situações de risco para o cabo, assim se o circuito entrar em uma temperatura que esteja em uma zona de atenção, ou além da temperatura permitida segundo seu projeto, o programa irá gerar alarmes.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Com base nos estudos deste projeto pode-se concluir que o modelo térmico desenvolvido é eficiente e pode ser utilizado tanto para estudos de capacidade térmica das Linhas, como também para a análise de carga da Linha. Ponderando-se apenas que seus valores teóricos se ajustam a uma margem de segurança de 10% em relação aos possíveis valores reais.

O modelo térmico desenvolvido agrega ao Sistema de Transmissão de Energia o valor de confiabilidade visto que o Monitoramento Térmico atua como agente preventivo à possível Redução da Vida útil das Linhas de Transmissão. Pode-se também concluir que o desenvolvimento do simulador térmico para as Linhas de Transmissão foi eficaz e este pode ser utilizado para os diversos estudos de engenharia.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) GEMIGNANI, M. OBTENÇÃO DO MÁXIMO CARREGAMENTO DAS REDES SUBTERRÂNEAS PELA ANÁLISE TÉRMICA E ELÉTRICA INTEGRADA DE SEUS COMPONENTES, Expo e Fórum redes Subterrâneas de Energia Elétrica, 2010. São Paulo.

- (2) PIAZZA, F. SISTEMA ISOLANTE DE TRANSFORMADORES, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- (3) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 60287-1-1, Electric cables – Calculation of The Current Rating – Part 1-1: Current Rating Equations (100 % load factor) and Calculation of Losses – General, 2006.
- (4) NEHER, J. H. MCGRATH M. H. The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems, AIEE Transactions, Part III, Volume 76, pp 752-772, Outubro, 1957.
- (5) LOUREDO, N. H. G. R. Curso de Linhas de Transmissão Subterrâneas. Projeto, Construção, Instalação e Manutenção - Noções Básicas de Planejamento de Sistema e Estudos de Viabilidade de Linhas de Transmissão Subterrâneas. CIGRE, 2010.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

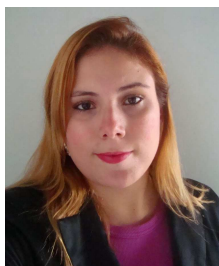
Juliana Sanchez Morine

Nascida em São Paulo, SP em 17 de Abril de 1988

Graduando em Engenharia de Energia na Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, SP

Atua na área de Energia, de 2007 a 2008 foi bolsista CNPq com trabalhos em Células a Combustível Óxido Sólido, em 2009 foi Bolsista UFABC com trabalhos em Qualidade de Energia Elétrica e atualmente estagia na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica (CTEEP)

Membro Estudante IEEE.



Tarcisio Misael de Lima

Nascido em São Paulo, SP em 2 de Setembro de 1975

Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia São Paulo (FESP), São Paulo, SP, Brasil, em 2000. Desde 2007 coordena o Centro de Manutenção de Linhas Subterrâneas da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP). Atualmente gerencia um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da CTEEP envolvendo cabos subterrâneos e é aluno de Mestrado em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Potência, da Universidade de São Paulo (USP). Sua principal área de pesquisa é: Localização de defeitos em cabos subterrâneos de alta tensão.

