



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Modelagem térmica do sistema de resfriamento do transformador principal da unidade geradora da Usina Hidrelétrica de Itaipu

Christiano Wendt dos Santos, Rui Jovita Godinho Corrêa da Silva, Eduardo Moreira

Centro de Estudos Avançados de Segurança de Barragem /Usina Hidrelétrica de Itaipu /Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Brasil

RESUMEN

O presente trabalho tem como propósito avaliar as variações térmicas dos elementos do transformador, por meio, do entendimento a dinâmica do processo de transferência de calor do transformador principal da unidade geradora de Itaipu. A partir deste contexto, foi desenvolvido um modelo matemático do sistema de resfriamento do equipamento, através de equações de balanço global de energia, na qual se relacionou a transferência de calor dos componentes ativos, para o sistema de resfriamento, com a carga aplicada no transformador. A construção do modelo térmico foi obtida pela utilização das funções de transferências para cada componente do transformador, que foram representadas em diagramas de blocos pré-estabelecidos no *software Matlab/Simulink*. Como resposta, se obteve a dinâmica das temperaturas dos elementos do transformador principal no tempo. Para certificar-se das respostas do modelo, adquirindo maior credibilidade em seus resultados, foram realizadas simulações com o modelo térmico, confrontando-o com medições realizadas pelos sensores de temperatura. Logo, com a construção do modelo matemático pode-se aperfeiçoar a operação do equipamento, além de aumentar a credibilidade do monitoramento das temperaturas e, por fim, possibilitar o aprimoramento da atuação no sistema de resfriamento.

PALABRAS CLAVES

Transferência de calor. Transformadores de elevação de tensão. Sistemas dinâmicos.

1 INTRODUÇÃO

Com a preocupação de transmitir energia de forma econômica, as usinas hidrelétricas optaram pela adaptação na transmissão da energia em tensões elevadas, pois assim, minimizam-se as perdas elétricas, resultando em menores dissipações de potência na forma de calor. O equipamento construído com a finalidade de modificar os níveis de tensão é chamado de transformador, e deve apresentar uma alta confiabilidade, pois a sua falha pode apresentar grandes prejuízos para a rede elétrica.

Uma das restrições operativas que abrange grande parte dos transformadores é sua operação em determinados níveis de temperatura, ou seja, a limitação desse equipamento é causada pela capacidade de aquecimento dos materiais. Ao transformador exceder o limite de temperatura, quando este estiver em operação, poderá haver alterações tanto nas propriedades mecânicas da parte ativa do transformador quantas alterações das propriedades termodinâmicas do óleo isolante, podendo assim, comprometer a integridade do equipamento [1].

Para produzir tamanha energia, tanto as unidades geradoras quanto seus transformadores elevadores precisam suportar o ciclo térmico a que estão sujeitos. Desta forma, os transformadores das unidades geradoras, objeto deste trabalho, possuem um sistema de resfriamento, cuja finalidade, é aumentar as trocas térmicas para que não atinja seus limites de temperatura, evitando qualquer tipo de dano. Como cada unidade geradora de Itaipu é dotada de um conjunto de transformadores elevadores monofásicos, esses podem ser responsáveis pela indisponibilidade da unidade geradora caso apresentarem uma falha ou até mesmo uma não conformidade do seu sistema de arrefecimento. Logo, o sistema de resfriamento dos transformadores elevadores da unidade geradora apresenta uma grande importância na geração de energia. Ainda, com a utilização do modelo dinâmico do sistema de resfriamento do transformador principal da unidade geradora, será possível ter um melhor entendimento da dinâmica do processo, podendo desenvolver procedimentos operacionais, para tornar o equipamento mais eficiente, aumentando a confiabilidade e a disponibilidade do sistema. O objetivo deste trabalho, é desenvolver um modelo dinâmico térmico que relacione a transferência de calor do transformador principal da unidade geradora de Itaipu, com a respectiva energia elétrica fornecida pelo seu gerador.

2 METODOLOGIA

O sistema real de resfriamento do transformador principal de Itaipu, figura 1a, é apresentado por equações diferenciais parciais de segunda ordem, de grande complexidade, cuja solução analítica em casos práticos é de difícil obtenção [1]. Logo, o modelo matemático que irá quantificar essas variações de temperatura terá simplificações, e apresentará as seguintes características [2].

1. Contínuo.
2. Invariante no tempo.
3. Linear.
4. Dinâmico.
5. Causal.
6. Parâmetros concentrados.

Tanto a parte ativa do transformador quanto o próprio sistema de resfriamento terão o estudo concentrado entorno de um único ponto, onde se realizam as medições de temperatura dos elementos do transformador, pois assim, se preservam as características marcantes do sistema, sem invalidar o modelo. Atualmente, a Itaipu, tem como registro e monitoramento das temperaturas de um ponto dos enrolamentos de alta e baixa tensão e a temperatura do topo de óleo na parte superior do tanque. A partir desses pontos de monitoramento, será possível realizar comparações com as respostas do modelo desenvolvido neste trabalho, de modo a verificar a fidelidade do mesmo.

O modelo térmico tem como entrada a corrente induzida vinda do estator da unidade geradora, enquanto que a sua saída será um conjunto de temperaturas, quantificadas nos componentes do transformador, sendo elas, a temperatura dos enrolamentos de alta e baixa tensão, temperatura do núcleo, temperatura do óleo que

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

A relação entre a energia acumulada nas fronteiras do domínio e sua temperatura é resultado da eq.(2).

$$\frac{dE_{enr.bt}}{dt} = m_{enr.bt}c_p \frac{dT_{enr.bt}(t)}{dt} \quad (2)$$

As parcelas que representam a trocas térmicas no volume de controle, apresentadas na eq.(1), responsáveis pelo resfriamento do equipamento, bem como pela geração do calor obtida pela corrente, são representadas, pelas eq.(3), eq.(4) e eq.(5).

$$\dot{q}_{oleo.f}(t) = \dot{m}_{oleo.f}c_{p,oleo}T_{oleo.f}(t) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{enr.bt,conv}(t) = h_{oleo}A_{enr.bt} (T_{enr.bt}(t) - T_{oleo.f}(t)) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{enr.bt,ger}(t) = R_{enr.bt}i_{enr.bt}^2(t) \quad (5)$$

Para que se possa aplicar à transformada de Laplace e o princípio da superposição, deve realizar a linearização da equação (5) que representa umas das fontes de calor no equipamento, em razão da corrente que percorre o enrolamento BT, neste caso por meio da série de Taylor [4].

$$\begin{aligned} \dot{q}_{enr.br,disp}(t) &= R_{enr.bt}i_{enr.bto}^2 + \left. \frac{d(R_{enr.bt}i_{enr.bt}^2(t))}{dt} \right|_{i(t)=i_o} [i(t) - i_o] = \\ &= 2R_{enr.bt}i_{enr.bto}i_{enr.bt}(t) - R_{enr.bt}i_{enr.bto}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Substituindo, as expressões da eq.(3), eq.(4) e eq.(6) na eq.(1), se obtém a EDO (7), que governa o fenômeno físico no volume de controle em estudo.

$$\begin{aligned} m_{enr.bt}c_{p,enr.bt} \frac{dT_{enr.bt}(t)}{dt} &= -h_{oleo}A_{enr.bt} (T_{enr.bt}(t) - T_{oleo.f}(t)) + \\ &2R_{enr.bt}i_{enr.bto}i_{enr.bt}(t) - R_{enr.bt}i_{enr.bto}^2 + \dot{m}_{oleo.f}T_{oleo.f}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 Volume de controle do enrolamento de alta tensão

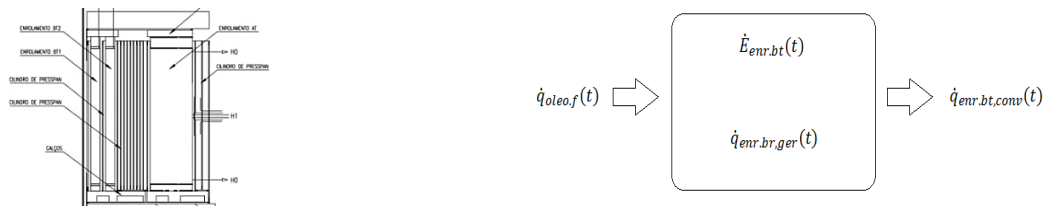


Figura 3: Volume de controle do enrolamento de alta tensão.

Fonte: Work Statement Weg e Siemens (p. 28, 2008)

Para o volume de controle do enrolamento de alta tensão, aplica-se metodologia semelhante à aplicada ao volume de controle do enrolamento de baixa tensão, detalhado no tópico 3.1 obtendo-se uma segunda equação diferencial ordinária (8) que descreve as trocas térmicas no volume de controle do enrolamento de alta tensão [3].

$$\begin{aligned} m_{enr.at}c_{p,enr.at} \frac{dT_{enr.at}(t)}{dt} &= -h_{oleo}A_{enr.at} (T_{enr.at}(t) - T_{oleo.f}(t)) + \\ &2R_{enr.at}i_{enr.ato}i_{enr.at}(t) - R_{enr.at}i_{enr.ato}^2 + \dot{m}_{oleo.f}T_{oleo.f}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 Volume de controle do núcleo de aço de silício

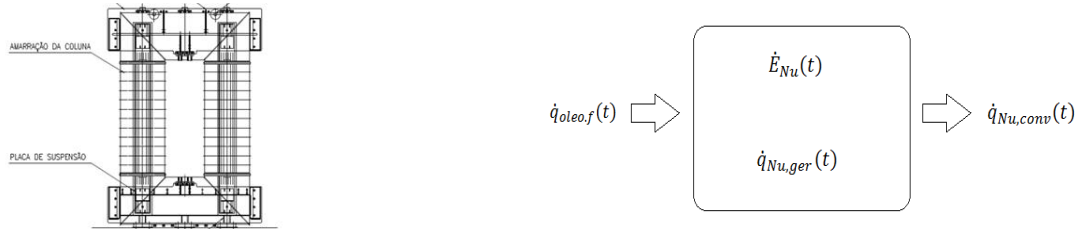


Figura 4: Volume de controle do núcleo de aço de silício.

Fonte: *Work Statement* Weg e Siemens (p. 23, 2008)

Reaplicando o equacionamento dos volumes de controle dos AT e BT, para o volume de controle do núcleo de aço de silício, pode-se determinar a terceira EDO, que descreve o comportamento das trocas térmicas deste domínio. A diferença encontrada neste volume de controle em relação às demais volumes de controle está na determinação das perdas no núcleo, sendo relacionados com o fenômeno de histerese e correntes de Foucault [5]. A parcela que quantifica essas perdas é denominada corrente de perdas, e é quantificada pela eq.(9).

$$\dot{q}_{Nuc,disp}(t) = P_c = R_c i_c^2(t) \quad (9)$$

E a EDO que descreve o comportamento térmico do volume de controle de núcleo de aço, é apresentada pela eq.(10).

$$m_{Nu} c_{p,Nu} \frac{dT_{Nu}(t)}{dt} = -h_{oleo} A_{Nu} (T_{Nu}(t) - T_{oleo,f}(t)) + R_{co} i_{co}^2 \quad (10)$$

3.4 Volume de controle do óleo isolante

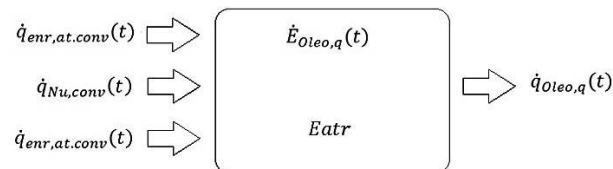


Figura 5: Volume de controle do óleo de resfriamento.

De forma, semelhante aos demais volumes de controle, primeiramente determinou os limites do volume de controle do óleo isolante, e em seguida aplicou-se um balanço de energia global sobre o óleo de resfriamento para contabilizar as diversas parcelas de troca de energia envolvidas no sistema, para enfim determinar a temperatura do ponto mais quente do óleo. Logo, a equação diferencial que rege as trocas térmicas sobre o volume de controle do óleo de resfriamento do transformador é expressa pela Eq. (11).

$$\frac{dE_{oleo,q}(t)}{dt} = \dot{q}_{enr,at.conv}(t) + \dot{q}_{enr,bt.conv}(t) + \dot{q}_{Nu,conv}(t) - \dot{q}_{oleo,q}(t) + Eatr \quad (11)$$

O óleo submerso no tanque do transformador tem como finalidade resfriar os três os componentes ativos do transformador para que operem a uma temperatura compatível, atendendo assim, a um maior desempenho. O volume de controle do óleo isolante é aquecido pelas partes ativas do transformador, e esse aquecimento do óleo é quantificado pela energia retirada dos três volumes de controle por convecção.

O calor que é transferido para o trocador de calor é quantificado pela eq.(12), ou seja, a energia que é retirada do volume de controle do óleo isolante é considerada como a entrada no trocador de calor.

$$\dot{q}_{oleo,q}(t) = \dot{m}_{oleo}c_{p,oleo}T_{oleo,q}(t) \quad (12)$$

Expandidos os termos que quantificam as trocas térmica do domínio óleo isolante, obtém a Eq. (13) que descreve o comportamento térmico deste volume de controle.

$$m_{oleo}C_{p,oleo} \frac{dT_{oleo}(t)}{dt} = h_{oleo}A_{sup,at} (T_{enr.at}(t) - T_{oleo,f}(t)) + h_{oleo}A_{sup,bt} (T_{enr.bt}(t) - T_{oleo,f}(t)) + h_{oleo}A_{sup,Nu} (T_{Nu}(t) - T_{oleo,f}(t)) + h_{oleo}A_{enr.at} (T_{enr.at}(t) - T_{oleo,f}(t)) + \dot{m}_{oleo}C_{p,oleo}T_{oleo,q}(t) \quad (13)$$

3.5 Volume de controle do trocador de calor

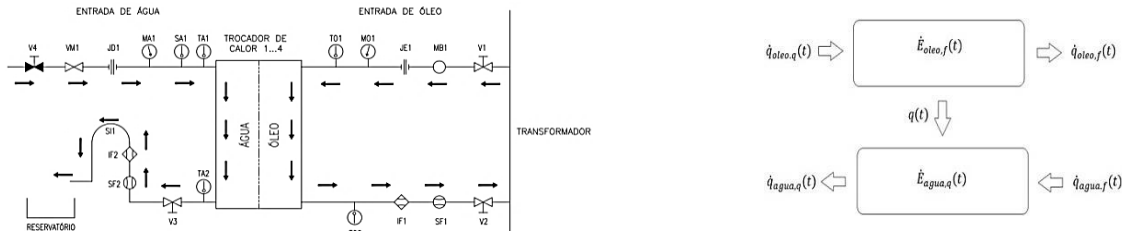


Figura 6: Volume de controle do trocador de calor.

Fonte: Arquivo técnico de Itaipu.

Este volume de controle representa os trocadores de calor que realizam o resfriamento do óleo isolante do transformador principal de Itaipu, sendo constituído de dois domínios, em que um deles é o fluido quente, que neste caso é óleo contido no trocador, e o outro domínio, que é atribuído ao fluido frio, representando a água bruta. A interação entre esses dois domínios é dada pela transferência de calor do fluido quente para o fluido frio, como exposto na figura 6. Assim, as equações que descrevem a troca de energia entre os dois fluidos, são representadas pelas eq.(14) e eq.(15), respectivamente.

$$\frac{dE_{oleo,f}(t)}{dt} = \dot{q}_{oleo,q}(t) - \dot{q}_{oleo,f}(t) - q(t) \quad (14)$$

$$\frac{dE_{agua,q}(t)}{dt} = \dot{q}_{agua,f}(t) - \dot{q}_{agua,q}(t) + q(t) \quad (15)$$

Ao caracterizar o trocador de calor como sendo do tipo contra correntes, a transferência de calor entre os fluidos é determinada pela eq.(16), em que a variável $LMTD(t)$, é identificada como média logarítmica das temperaturas dos fluidos presentes no trocador de calor. Dado a não linearidade desta variável, há a necessidade de sua linearização por meio da série de Taylor, tornando o princípio da superposição aplicável.

$$q(t) = U_{OleoAgua}A_{supTroc} \left\{ LMTD(\Delta T_{1o}, \Delta T_{2o}) + \frac{\partial f(LMTD(t))}{\partial \Delta T_1(t)} \Big|_{x_{1o}, x_{2o}} [\Delta T_1(t) - \Delta T_{1o}] + \frac{\partial f(LMTD(t))}{\partial \Delta T_2} \Big|_{x_{1o}, x_{2o}} [\Delta T_2(t) - \Delta T_{2o}] \right\} \quad (16)$$

Equacionado a transferência de calor entre o fluido quente e frio no trocador de calor, parte-se para o equacionamento individual dos domínios do volume de controle de controle do óleo isolante e da água bruta. Desse modo, obtém as equações diferenciais de primeira ordem, que descrevem o comportamento térmico do trocador de calor.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

$$m_{oleo}c_{p,oleo} \frac{dT_{oleo,f}(t)}{dt} = \dot{m}_{oleo}c_{p,oleo}(T_{oleo,q}(t) - T_{oleo,f}(t)) - q(t) \quad (17)$$

$$m_{agua}c_{p,agua} \frac{dT_{agua,q}(t)}{dt} = \dot{m}_{agua}c_{p,agua}(T_{agua,q} - T_{agua,f}) + q(t) \quad (18)$$

4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Ao determinar os modelos matemáticos do sistema de resfriamento do transformador principal, em seguida, agrupam-se as propriedades que são consideradas constantes do modelo. Esses coeficientes são determinados por meio da regressão linear múltipla, como um conjunto de técnicas estatísticas que possibilita o relacionamento entre múltiplas variáveis, ou seja, é um ajuste de curva que melhor se adapta ao um conjunto de dados [7]. Para que o seu uso da equação seja eficiente, devem-se examinar as coletas de dados como a sua quantidade. Com o auxílio da função “regress” disponível na biblioteca do *Matlab*. Os dados utilizados para obtenção desses parâmetros foram obtidos pelo Scada (Sistemas de supervisão e aquisição de dados). Sendo retiradas 13 medições no regime de operação do equipamento. Aplicando a Transformada de Laplace, obtém-se, o sistema de equações diferenciais (19) que governam o sistema de resfriamento do transformador.

$$\{Y\} - [A] \{X\} = 0 \quad (19)$$

$$\{Y\} = \{T_{enr.bt}(s) \quad T_{enr.at}(s) \quad T_{Nu}(s) \quad T_{oleo,q}(s) \quad Q(s) \quad T_{oleo,f}(s) \quad T_{agua,q}(s)\}^T \quad (20)$$

$$\{X\} = \{I_{enr.at}(s)I_{enr.bt}(s)T_{enr.at}(s) \quad T_{enr.bt}(s) \quad T_{Nu}(s) \quad T_{oleo,q}(s) \quad T_{oleo,f}(s) \quad T_{agua,f}(s) \quad T_{agua,q}(s) \quad Q(s) \quad 1\}^T \quad (21)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_3}{K_1S+K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{K_1S+K_2} & 0 & 0 & 0 & \frac{+T_{enr.bt}(0^+) - K_4}{K_1S+K_2} \\ \frac{K_7}{K_5S+K_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_6}{K_5S+K_6} & 0 & 0 & 0 & \frac{+T_{enr.at}(0^+) - K_8}{K_5S+K_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{23}}{K_{16}S + K_{21}} & 0 & 0 & 0 & \frac{+T_{Nu}(0^+) + K_{24}}{K_{16}S + K_{21}} \\ 0 & 0 & \frac{K_{17}}{K_{16}S + K_{21}} & \frac{K_{18}}{K_{16}S + K_{21}} & \frac{K_{19}}{K_{16}S + K_{21}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{16}T_{oleo,q}(0^+) + Eatr}{K_{16}S + K_{21}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{11} & -K_{12} & -K_{11} & K_{12} & 0 & \frac{K_{13}}{K_{13}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{10}}{K_9S + K_{10}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{K_9S + K_{10}} & \frac{K_9T_{oleo,f}(0^+)}{K_9S + K_{10}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{15}}{K_{14}S + K_{15}} & 0 & \frac{1}{K_{14}S + K_{15}} & \frac{K_{14}T_{agua,q}(0^+)}{K_{14}S + K_{15}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Tabla I: Valores de todos os parâmetros determinados pela regressão múltipla linear

$K_1 = m_{enr.bt}c_{p,enr.bt} = 7,0 \cdot 10^6$	$K_2 = h_{oleo}A_{enr.bt} = 2,27 \cdot 10^4$	$K_3 = 2R_{enr.bt}i_{enr.bto} = 50,01$
$K_4 = R_{enr.bt}i_{enr.bto}^2 = 1,61 \cdot 10^9$	$K_5 = m_{enr.at}c_{p,enr.at} = 1,80 \cdot 10^6$	$K_6 = h_{oleo}A_{enr.at} = 4,48 \cdot 10^4$
$K_7 = 2R_{enr.at}i_{enr.at}^2 = 143,95$	$K_8 = R_{enr.at}i_{enr.at}^2 = 1,53 \cdot 10^9$	$K_{22} = m_{Nu}c_{p,Nu} = 4,39 \cdot 10^7$
$K_{23} = h_{oleo}A_{Nu} = 4,48 \cdot 10^4$	$K_{24} = R_{co}i_{co}^2 = 3,48 \cdot 10^4$	$K_{16} = m_{oleo}c_{p,oleo} = 6,80 \cdot 10^7$
$K_{17} = h_{oleo}A_{sup,at} = 2,89 \cdot 10^5$	$K_{18} = h_{oleo}A_{sup,bt} = 2,27 \cdot 10^4$	$K_{19} = h_{oleo}A_{sup,Nu} = -5,69 \cdot 10^3$
$K_{20} = \dot{m}_{oleo}c_{p,oleo} = 7,06 \cdot 10^4$	$K_9 = m_{oleo}c_{p,oleo} = 1,36 \cdot 10^4$	$K_{10} = \dot{m}_{oleo}c_{p,oleo} = 7,06 \cdot 10^4$
$K_{14} = m_{agua}c_{p,agua} = 3,07 \cdot 10^5$	$K_{15} = \dot{m}_{agua}c_{p,agua} = 1,69 \cdot 10^4$	$K_{11} = K_{12} = -1,37 \cdot 10^4$ e $K_{13} \cong 0$

5 RESULTADOS OBTIDOS

Quando o modelo térmico foi sujeito a uma elevação de carga, houve aumento de temperaturas dos seus componentes transformador, como está expostos nas Figuras 7 (b), (c) e (d).

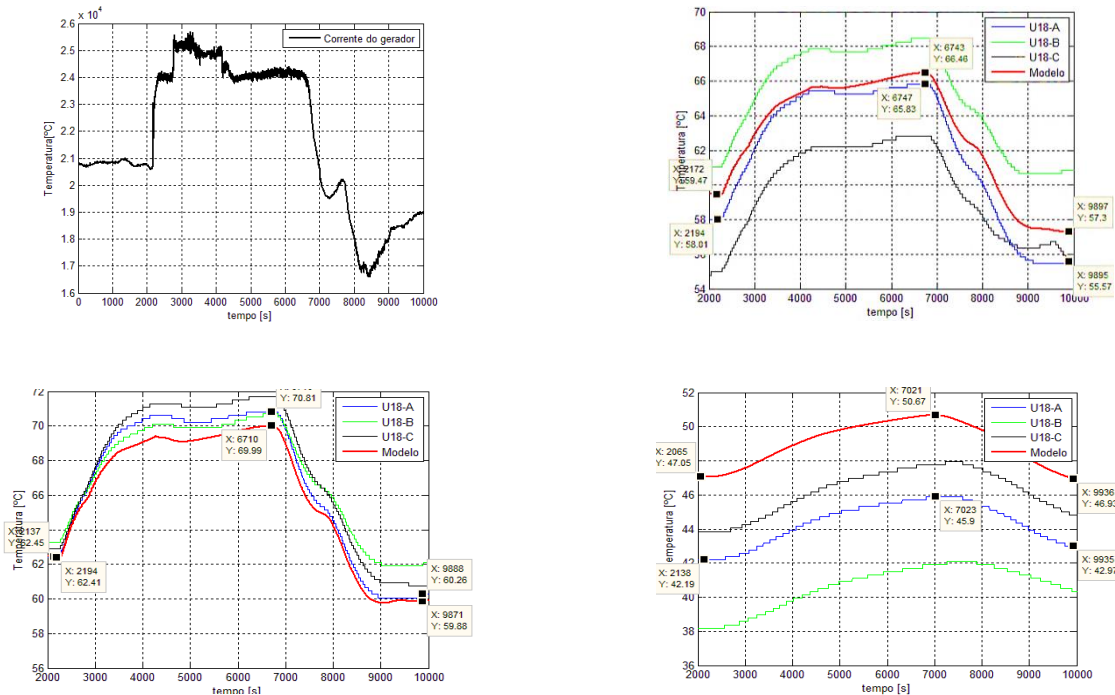


Figura 7: (a) Corrente do gerador (b) Temperatura do enrolamento de alta tensão (c) Temperatura do enrolamento de baixa tensão (d) Temperatura do topo de óleo

6 CONCLUSÃO

A modelagem térmica do sistema de resfriamento do transformador principal da unidade geradora de Itaipu se comportou de maneira adequada na análise da dinâmica da transferência calor entre os elementos do transformador e a corrente elétrica proveniente do gerador. Uma vez que, existe uma grande semelhança entre dinâmica da temperatura dos componentes, provocados por transitórios elétricos, quando comparado ao sistema real de monitoramento. Os resultados expostos no capítulo cinco, apresentaram uma pequena discrepância em seus valores, quando estes foram comparados com valores medidos, porém essas inexatidões nos resultados do modelo térmico se mostraram aceitáveis devido à diferença entre os valores de temperatura ser insignificantes pela grandeza da variável física.

Devem-se ressaltar duas restrições desse modelo térmico. A primeira esta na limitação de sua aplicação no regime de operação do equipamento, sendo impraticável a simulação de rejeições de carga, pois houveram as linearizações das equações. E a segunda restrição, é referente à obtenção dos coeficientes do modelo, que dependem de medições de temperatura e corrente do equipamento em operação, logo, é necessário que o equipamento esteja operando e que possuam sensores de temperatura instalados.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

7 REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, J. R. **Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento.** Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] GARCIA, CLAUDIO, **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos.** 2ed., São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2009.
- [3] INCROPERA, Franck P.; DEWITT D. P.; BERGMAN T. L.; LAVINE A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [4] OGATA KATSUHIKO., **Engenharia de controle moderno.** 4ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [5] WINDERS, J. J., **Power Transformers principles and Applications.** New York: Marcel Dekker, Inc 2002.
- [6] TABACHNICK, B. G., FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics.** New York, NY, HarperCollins College Publishers. 1996.



Comité Nacional Paraguay



Unión de Ingenieros de ANDE

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016
