DOI10.48011/asba.v2i1.1244

Gêmeos Digitais e Método dos Elementos Finitos, um Estudo de Caso: Mapeamento Térmico de Transformador

Gustavo Aragão Rodrigues* Tarso Vilela Ferreira**
Bruno Vinicius Silveira Araujo***

**Universidade Federal de Sergipe (e-mail: gustavo.aragao.rodrigues@gmail.com).*
*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe,*
Membro do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande
(e-mail: tarso@academico.ufs.br).
**** Universidade Federal de Sergipe (e-mail: bruno-vinicius-silveira@hotmail.com).*

Abstract: The monitoring of electrical equipment prevents faults and promotes the reliability of the electrical system. In this context, transformers are among the most important equipment, due to their wide application in power conversion associated with a high cost. In this work, a digital twin was developed, based on a 3D model, to simulate in real time the temperature of a low power transformer (440 VA, 220/150 V). The model input data are: voltage, current and environmental conditions. A *software* based on the finite element method was employed to discretize the continuous domain and find the numerical solution of the heat transfer equations. The results were validated through temperature variation experiments, monitored by a thermal imager. For a point in the center of the winding, the average error was below 5% in all experiments. For a point in the core of the equipment, this error was less than 3.5%.

Resumo: O monitoramento de equipamentos elétricos previne falhas e corrobora com a confiabilidade do sistema elétrico. Nesse contexto, os transformadores estão entre os equipamentos mais importantes, devido a sua ampla aplicação na conversão de potência associada a um elevado custo. Perante o exposto, neste trabalho, foi desenvolvido um gêmeo digital, a partir de um modelo 3D, para simular em tempo real o comportamento térmico de um transformador de baixa potência (440 VA, 220/150 V). Os dados de entrada do modelo são: tensão, corrente e condições ambientais. Um *software* baseado no método dos elementos finitos foi empregado para discretizar o domínio contínuo e encontrar a solução numérica das equações de transferência de calor. Os resultados foram validados por meio de experimentos de variação de temperatura, monitorados por uma câmera termovisora. Para um ponto no centro do enrolamento, o erro médio ficou abaixo dos 5% em todos os experimentos. Já para um ponto no núcleo do equipamento, esse erro foi inferior a 3,5%.

Keywords: Digital Twin, Finite Element Method, Transformers, Electrical Equipment Monitoring, Thermal Imager.

Palavras-chaves: Gêmeo Digital, Método dos Elementos Finitos, Transformadores, Monitoramento de Equipamentos Elétricos, Termovisão.

1. INTRODUÇÃO

O transformador é um dispositivo com o propósito de desenvolver corrente elétrica de alto potencial (Tesla, 1897). Sua aplicação permitiu a transmissão de energia elétrica em alta tensão, reduzindo as perdas e viabilizando economicamente a construção de longas linhas de transmissão. Atualmente, são os equipamentos mais caros e importantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Transformadores de alta potência são construídos sob demanda e, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), devem ser especificados para expectativa de vida útil de 40 anos.

Para manter essa longevidade são implementados diversos sistemas de proteção e monitoramento, além de manutenções regulares. Essas condutas têm como objetivo evitar falhas que prejudiquem a continuidade do fornecimento de energia ou que danifiquem os dispositivos do sistema. As principais origens de falhas em transformadores, segundo Bastos (2013) estão expostas na Fig. 1.

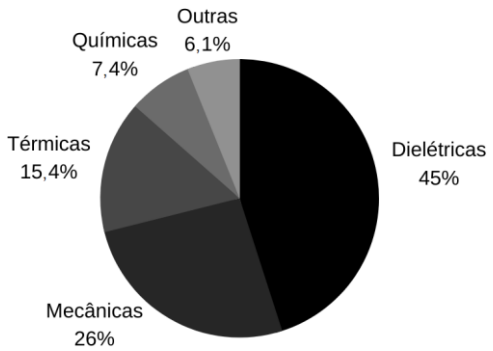

Fig. 1. Principais origens de falhas em transformadores.

A capacidade de conversão de potência dos transformadores está diretamente relacionada ao limite térmico dos seus condutores e do óleo isolante. Dessa forma, assim como tensão

e corrente, a temperatura precisa ser monitorada constantemente e fornece informações cruciais para correta operação do sistema.

O monitoramento térmico de transformadores de potência ainda é um desafio. O uso de termopares e termo resistores é a estratégia mais disseminada atualmente. Apesar da ampla utilização, esses sensores convencionais sofrem interferências eletromagnéticas e não podem ser introduzidos no interior das bobinas, pois prejudicariam seu isolamento (Faria, 2012). Além disso, para um mapeamento térmico volumétrico, seriam necessários muitos sensores e cabos, o que elevaria a complexidade e o caráter invasivo do sistema de monitoramento.

O aprimoramento das técnicas de estimação da temperatura de transformadores é objeto de inúmeras pesquisas. Freitas (2002) e Almeida (2005) demonstraram a viabilidade em aplicar Redes Neurais Artificiais (RNA) para realizar essa predição. Já Josue (2012) e Martíniz (2019) demonstraram que o método das equações diferenciais do IEC possui bom desempenho, mas que pode ser melhorado.

Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi aplicado por Silva (2015) e Sousa (2018), cujos estudos demonstraram que o método é eficaz em encontrar a solução numérica nesse tipo de problema. Contudo, em casos com geometrias complexas, o alto custo computacional é uma desvantagem.

Neste artigo, é apresentada uma contribuição ao monitoramento térmico de transformadores, na qual propõe-se um método não invasivo de estimação das temperaturas internas a partir das condições ambientais e da medição de corrente e tensão. O MEF, com o auxílio de um *software* especializado, é usado como ferramenta computacional para estimação das temperaturas. Simulações em tempo real, a partir da medição dos parâmetros de entrada, tornam essa metodologia capaz de estimar a temperatura interna, em qualquer ponto do transformador, inclusive diante de variações de carga.

Para confirmação prática dos resultados, um transformador monofásico de baixa potência foi usado nesse estudo de caso. A partir da sua geometria e dos seus materiais constituintes, além de outras condições de contorno, as simulações foram desenvolvidas. Em seguida, os resultados simulados foram validados por meio de ensaios de variação de temperatura.

Este artigo é fruto de uma pesquisa iniciada como Trabalho de Conclusão de Curso, cujo objetivo final é avaliar a viabilidade das simulações em tempo real e acurácia dos dados mimetizados pelo gêmeo digital, para posterior modelagem de transformadores de maior potência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção estão apresentados os principais conceitos teóricos aplicados ao longo desse trabalho, relacionados ao MEF, às origens de perdas em transformadores e ao conceito de gêmeo digital.

2.1 Método dos Elementos Finitos

Dividir para conquistar (Sun Tzu, 2006) é um princípio secular simples, porém eficaz. Resolver um problema complexo subdividindo-o em problemas mais simples é também a estratégia chave do MEF. O método discretiza o domínio contínuo do problema com um número finito de elementos e resolve, não o problema original, mas sim um problema que lhe é associado, a forma fraca (Giacchini, 2012). Com isso, obtém-se uma solução numérica e aproximada, mas que satisfaz o problema original.

Muitos problemas físicos podem ser descritos por Equações Diferenciais Parciais (EDP), como por exemplo, as equações de Poisson, Laplace, Helmholtz e Navier-Stokes (Ferreira, 2007). A importância do MEF está associada diretamente à dificuldade de encontrar soluções analíticas exatas para essas EDP. Dessa forma, a solução numérica, mesmo com alto custo computacional, costuma ser a forma mais eficiente de estudar o fenômeno físico em questão. Segundo Sadiku (1989), a aplicação do MEF segue quatro etapas:

i. Discretização da região de solução em um número finito de sub-regiões (ou elementos);

ii. Derivação das equações que governam um elemento típico;

iii. Agregação de todos os elementos na região de solução;

iv. Solução do sistema de equações resultante.

Neste trabalho foi empregado um *Software* Baseado no Método dos Elementos Finitos (SBMEF) para modelar e resolver o problema caracterizado pelo conjunto de equações que rege o aquecimento e resfriamento de um transformador em operação.

2.2 Gêmeo Digital (Digital Twin)

Segundo Boschert (2006), o conceito de gêmeo, aos olhos da engenharia, surgiu na NASA durante o programa *Apollo*. Na época, pelo menos dois veículos espaciais idênticos eram construídos durante uma missão. Um deles era mandado ao espaço, enquanto o seu gêmeo permanecia na Terra. Antes da decolagem, o gêmeo era usado extensivamente para treinar os astronautas. Durante a missão, auxiliava a tripulação em situações críticas, ao simular as condições de voo, a partir de dados reais recebidos da outra nave.

Diferente do caso da missão *Apollo*, o gêmeo digital não existe fisicamente, mas é capaz de espelhar o comportamento do sistema real. Conceitualmente, é uma simulação multifísica, multiescala, ultra realista e probabilística de um determinado componente, produto ou sistema (Glaessgen, 2012).

O gêmeo digital, para replicar as condições do sistema real, incorpora uma variedade de sensores, que fornecem os dados de entrada para as simulações. Sob a ótica da engenharia elétrica, essa tecnologia pode auxiliar na construção e operação de equipamentos, redes de distribuição, linhas de transmissão, e até mesmo usinas de geração.

2.3 Perdas em Transformadores

As perdas nos transformadores são, em geral, divididas em dois grupos: perdas no núcleo e perdas nos enrolamentos. As primeiras são causadas pela histerese e pelas correntes de Foucault (ou correntes parasitas), enquanto as perdas nos enrolamentos são resultantes do efeito Joule (Sen, 2014).

2.3.1 Perdas por Histerese

A histerese, no contexto eletromagnético, refere-se à tendência dos domínios magnéticos de conservar sua polarização mesmo na ausência do campo magnético que a gerou. As perdas por histerese ocorrem pois, durante um ciclo histerético, uma quantidade de energia é gasta na orientação dos domínios magnéticos e é dissipada na forma de calor (Fitzgerald, 2003). Esse trabalho realizado é proporcional a área sob a curva de histerese e se eleva com o aumento da frequência.

2.3.2 Perdas por efeito Joule

As perdas por efeito Joule ocorrem tanto no enrolamento primário quanto no secundário. Dada uma corrente variável (i), que atravessa um resistor (R) em um intervalo de tempo (t_1, t_2), a quantidade de calor gerada em [J] é calculada por (Alexander, 2013):

$$Q = R\int_{t_1}^{t_2} i(t)^2 dt. \quad (1)$$

Para uma fonte senoidal, pode-se simplificar a equação (1) usando o valor eficaz da corrente. Dessa forma, a potência dissipada no resistor em [W] é calculada por

$$P = Ri^2. \quad (2)$$

Em um transformador, a resistência dos enrolamentos pode ser medida ou estimada por meio de experimentos.

2.3.3 Perdas por Correntes de Foucault

As correntes parasitas surgem devido a indução de tensão provocada pela variação de fluxo magnético (Griffiths, 2010). Esse efeito ficou conhecido como Lei de Faraday, sendo regida pela equação

$$E = -\frac{\partial \emptyset}{\partial t}, \quad (3)$$

em que E é a tensão induzida em [V], $\emptyset$ é o fluxo magnético em [Wb] e t é o tempo em [s].

A Lei de Lenz postula que a corrente induzida cria um fluxo magnético que se opõe ao fluxo que a originou, o que explica o sinal negativo da equação (3). Na prática, as perdas por correntes parasitas também ocorrem por efeito Joule, visto que as correntes induzidas aquecem o núcleo ferromagnético do transformador conforme a equação (1).

2.4 Dissipação do calor gerado

O limite operacional de um transformador está associado diretamente ao seu limite térmico (Frontin, 2013). Dessa forma, é importante compreender como o calor produzido no interior de transformadores é direcionado ao meio ambiente. A dissipação dessa potência perdida ocorre por condução, convecção e radiação.

A condução é a transferência de energia térmica entre as moléculas de um material submetido a um gradiente de temperatura. Esse processo também pode ocorrer entre materiais diferentes, desde que haja contato físico entre eles ou que um terceiro material faça esse contato.

A convecção é resultado do movimento de fluidos sob gradiente térmico. O ar nas proximidades da carcaça do transformador tende a esquentar e, consequentemente, perder densidade. Isso cria um fluxo de ar que troca de calor constantemente com o equipamento. Para um transformador imerso em óleo, a convecção também ocorre internamente. O óleo esquenta ao entrar em contato com os enrolamentos e núcleo e resfria ao passar pelos radiadores.

O processo de radiação (ou irradiação) ocorre do lado externo do transformador. Nesse fenômeno, ondas eletromagnéticas, proporcionais a temperatura do equipamento e à sua emissividade, fazem a transferência do calor.

2.5 Modelo Elétrico do Transformador

Na Fig. 2 encontra-se ilustrado o modelo elétrico simplificado de um transformador real. Nesse circuito equivalente, estão representadas todas as formas de perdas discutidas na seção 2.3, além de outras características não ideais como a corrente de magnetização e as indutâncias de dispersão.

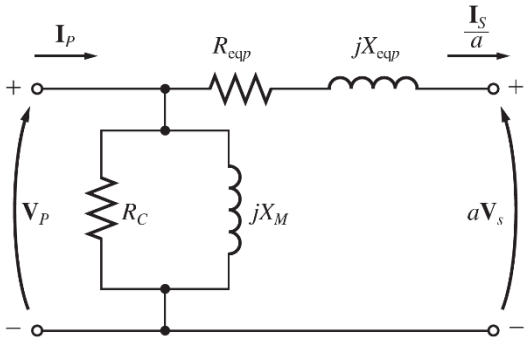

Fig. 2. Circuito equivalente simplificado (Chapman, 2013).

A denominação de cada elemento do circuito e o seu significado físico estão expressos a seguir:

R_{eqp}: resistência dos enrolamentos, modela as perdas por Efeito Joule nos enrolamentos.

X_{eqp}: reatância devido às indutâncias de dispersão.

R_c: resistência que representa as perdas no núcleo magnético. Modela tanto as perdas por correntes parasitas, quanto as perdas por histerese.

X_M: reatância de magnetização. Por ela, circula a corrente de magnetização, responsável pela excitação do núcleo ferromagnético.

Os parâmetros desse modelo podem ser determinados experimentalmente por meio dos ensaios de circuito aberto e curto-circuito, conforme Chapman (2013).

3. METODOLOGIA

Para a execução das simulações térmicas algumas etapas preliminares precisaram ser cumpridas. Inicialmente, caracterizou-se o transformador eletricamente e geometricamente. Em seguida, um modelo virtual 3D foi desenhado em um *software* tipo *Computer Aided Design* (CAD). A seguir, modelou-se o problema de transferência de calor no SBMEF. Um módulo de instrumentação foi desenvolvido para medir a corrente e a tensão do transformador em funcionamento. Por fim, experimentos de variação de temperatura, monitorados por uma câmera termovisora, serviram para validar o modelo proposto. Na Fig. 3 consta um diagrama de blocos que resume a concepção da metodologia proposta.

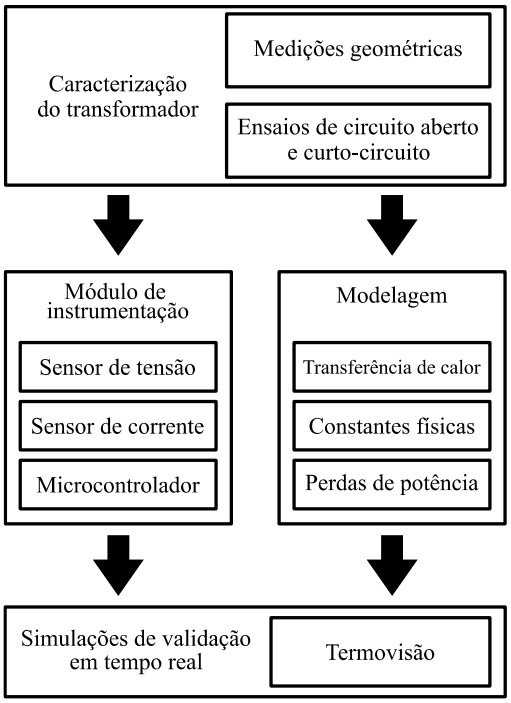

Fig. 3. Diagrama de blocos da metodologia proposta.

Neste trabalho, o SBMEF empregado foi o *COMSOL Multiphysics*. O computador responsável pelas simulações possuía processador de CPU rodando a 3 GHz e 8 Gb de memória RAM. Nas subseções a seguir está apresentada de forma mais detalhada cada uma das etapas da Fig. 3.

3.1 Caracterização do Transformador

Um transformador monofásico com potência nominal de 440 VA, tensões 220 V_{RMS}/150 V_{RMS} e frequência de operação de 60 Hz foi utilizado. Seu núcleo ferromagnético é do tipo "EI", isolado da bobina mais interna por uma fina camada de Policloreto de Vinila (PVC). As bobinas são do tipo sobrepostas e separadas entre si por papel isolante.

O modelo 3D do transformador, desenhado no *software* CAD e discretizado pelo SBMEF, está ilustrado na Fig. 4.

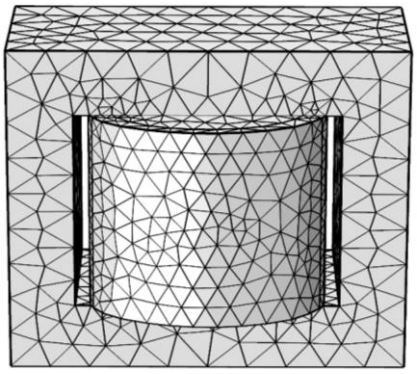

Fig. 4. Modelo 3D discretizado em elementos finitos.

Os ensaios de circuito aberto e curto-circuito realizados com um wattímetro modelo *Minipa Et-4091*, permitiram determinar o modelo elétrico do transformador.

3.2 Modelagem no SBMEF

No SBMEF foram definidos os materiais que compõe cada parte do transformador. O núcleo foi considerado de aço-silício de grão não orientado (Bohn, 2005), e os enrolamentos de cobre. Na Tabela 1 constam as propriedades de cada material usado.

Tabela 1. Propriedades dos materiais usados.

Domínio	ρ	C_p	κ	Є
Enrolamentos	8940	390,00	394	0,99[c]
Núcleo	7650,00[a]	490,00[a]	30,00[a]	0,55[c]
Papel	-	-	0,07[b]	-
PVC	-	-	0,05	-

ρ – Densidade em [kg/m^3];
C_p – Capacidade térmica a pressão constante em [J/(kg.K)];
κ – Condutividade térmica em [W/(m.K)];
Є – Emissividade.
(a) Kowal (2013); (b) Klinklow (2013);
(c) Determinados experimentalmente conforme FLIR (2017).

Informações sobre o papel e o PVC que não constam na tabela não foram necessárias às simulações. Os parâmetros cujas referências não são indicadas na Tabela 1 tiveram suas características obtidas no banco de dados do próprio SBMEF.

No *software* foram impostas às superfícies do transformador a dissipação de calor causada pelo fluxo convectivo natural do ar. Da mesma maneira, as simulações contemplaram as trocas de calor por irradiação, proporcionais as emissividades das superfícies.

Antes do início dos ensaios, a temperatura do transformador desenergizado foi medida com o termovisor. A temperatura ambiente também foi medida com o auxílio de um termômetro. Os valores registrados serviram como temperaturas iniciais para a execução do primeiro passo de simulação.

Uma vez iniciada a simulação, após seu primeiro passo, as temperaturas obtidas como saída foram usadas como condição inicial para o passo posterior, e assim sucessivamente. Nesse

processo, calculam-se as perdas (Chapman, 2013) para cada passo. Para executar esse procedimento de forma automática, foi desenvolvida uma rotina que interage com o SBMEF.

3.3 Módulo de Instrumentação

Ao longo dos experimentos, a corrente e tensão foram medidas por um módulo de instrumentação. O sensor de corrente escolhido foi o ACS712 (calibre 5 A), baseado em efeito *Hall* (Allegro, 2007).

A tensão na entrada do transformador foi medida por meio de um divisor de tensão acoplado a um retificador de precisão construído a partir de amplificadores operacionais. Essa combinação garante tensão contínua inferior a 5 V na entrada analógica do microcontrolador (ATMEGA328). Este foi responsável pela conversão analógico digital (A/D) dos sinais e pelo cálculo dos seus valores eficazes.

3.4 Ensaios de Validação

Para validar o resultado das simulações, realizaram-se dois experimentos de variação de temperatura. Em ambos, o transformador foi energizado conforme a Fig. 5. A carga variável citada nessa figura é puramente resistiva.

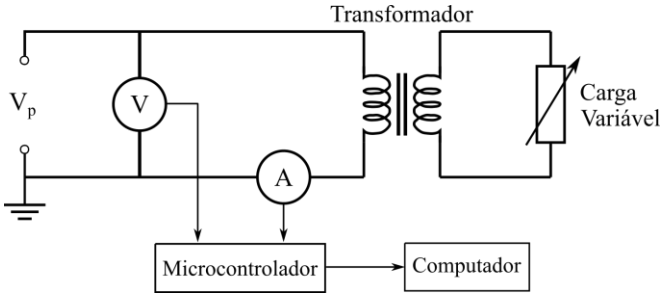

Fig. 5. Circuito para o experimento de validação.

Durante os ensaios, o transformador foi monitorado com uma câmera termográfica (modelo *FLIR T440*). Para garantir a correta medição da temperatura, mesmo para superfícies com emissividades diferentes, pequenos retângulos de fita isolante preta foram colados no núcleo e no enrolamento do transformador. Dessa forma, o termovisor pôde ser ajustado para emissividade da fita, que é igual a 0,96 (FLIR, 2017). A comparação entre os resultados de medição e simulação foi feita apenas para os locais marcados com a fita.

No primeiro experimento, a tensão de alimentação foi mantida constante, e variou-se a carga. No segundo experimento a carga foi mantida constante, e variou-se a tensão de alimentação. Em ambos os casos, as simulações ocorreram em tempo real, alimentadas pelos dados provenientes do módulo de instrumentação. A duração de cada passo de simulação foi de 30 segundos e, para preservar o sincronismo, cada passo contemplou 30 segundos de aquecimento ou resfriamento.

No diagrama de blocos da Fig. 6 observa-se o ensaio de validação sob o ponto de vista do fluxo de dados, de forma resumida.

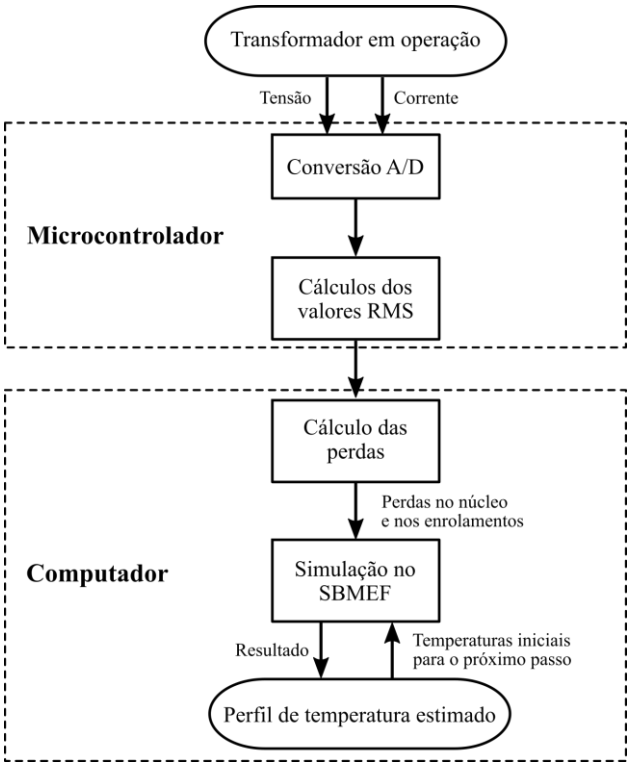

Fig. 6. Fluxo de dados dos experimentos de validação.

3.4.1 Detalhamento do experimento I

A carga do transformador foi alterada três vezes ao longo do ensaio, conforme etapas mostradas abaixo:

- Etapa 1: 0 h < t < 4 h – S ≅ 440 VA;
- Etapa 2: 4 h < t < 7 h – S ≅ 303,6 VA;
- Etapa 3: 7 h < t < 10 h – S ≅ 158,4 VA.

A temperatura ambiente foi considerada constante e igual a 27ºC, dado que o laboratório é climatizado. A temperatura inicial do transformador, medida com termovisor e imposta como valor inicial à simulação, foi de 28ºC.

3.4.2 Detalhamento do experimento II

No segundo experimento foi aplicada carga nominal ao transformador e variada a sua tensão de alimentação. O objetivo deste teste foi verificar a robustez e aderência do modelo proposto considerando-se variações na tensão fornecida, em vez de variações de carga. Além disso, este experimento permite avaliar o comportamento do método frente a variações bruscas nas perdas do transformador. A exemplo do caso anterior, foram realizadas três etapas:

- Etapa 1: 0 h < t < 3 h – V_p ≅ 127 V;
- Etapa 2: 3 h < t < 6 h – V_p ≅ 220 V;
- Etapa 3: 6 h < t < 10 h – V_p = 0 V.

Para esse ensaio a temperatura ambiente registrada foi de 28ºC e a temperatura inicial do transformador foi de 29ºC.

4. RESULTADOS

A caracterização do transformador foi realizada, assim como a modelagem do equipamento no SBMEF. Para cada um dos ensaios de variação de temperatura, as medições do termovisor foram comparadas com os resultados das simulações, a fim de validar o modelo virtual.

4.1 Ensaios de circuito aberto e curto-circuito

Os ensaios de circuito aberto e curto-circuito permitiram determinar o circuito equivalente do transformador. Os dados obtidos estão contidos na Tabela 2.

Tabela 2. Dados dos ensaios de circuito aberto e curto-circuito.

Parâmetro medido	Circuito aberto	Curto-circuito
V_p [V]	220,30	6,80
I_p [A]	0,29	2,00
P [W]	11,70	13,30

Os parâmetros do circuito equivalente, referidos ao lado primário do transformador, foram obtidos por meio das equações descritas em (Chapman, 2013): R_c= 4,15 kΩ, X_M = 0,71 kΩ, R_{eqp} = 3,32 Ω e X_{eqp} = 0,71 Ω.

4.2 Experimento I: carga variável

Na Fig. 7 consta uma das imagens térmicas feitas ao longo desse experimento. Os pontos P1 e P2 foram usados para comparar as temperaturas medidas e simuladas em ambos os ensaios. Vale ressaltar que a simulação calculou a temperatura em todo o volume do transformador, contudo como o termovisor é capaz de fornecer apenas temperaturas superficiais, a validação se deu a partir de dois pontos superficiais do transformador, sendo um no núcleo e outro no enrolamento.

Na Fig. 8 encontram-se graficamente representados os sinais de corrente e tensão medidos ao longo das 10 h de experimento. Como apenas a carga foi variada, a tensão permanece em torno dos 220 V, sofrendo apenas oscilações da rede elétrica local.

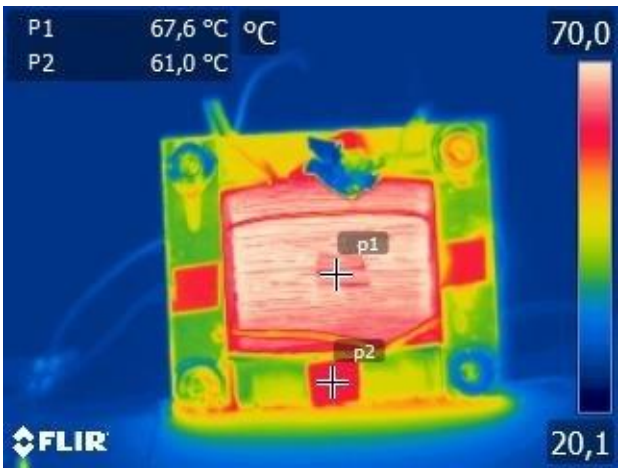

Fig. 7. Exemplo de termografia obtida durante a validação do modelo.

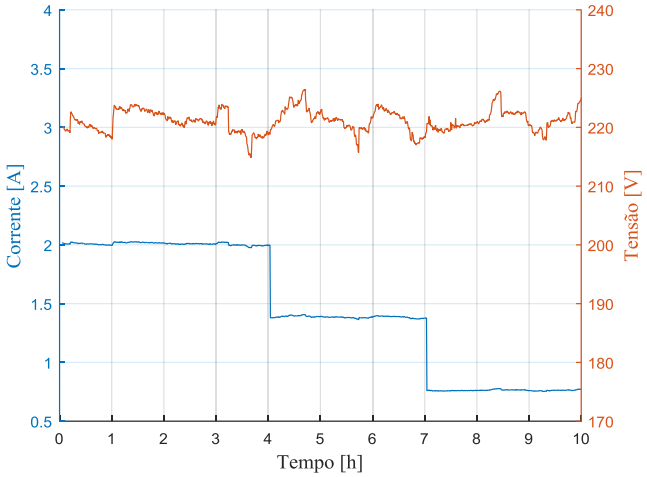

Fig. 8. Tensão e corrente medidas durante o experimento I.

Com essas medições, as perdas no núcleo e nos enrolamentos foram calculadas e constam graficamente na Fig. 9.

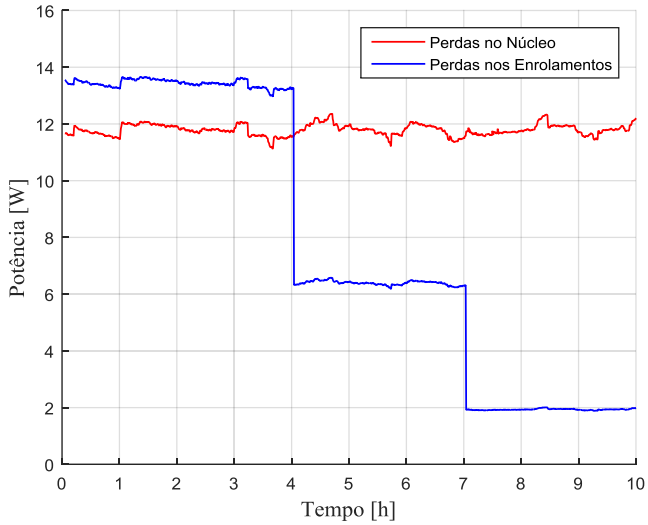

Fig. 9. Perdas calculadas durante o experimento I.

Percebe-se na Fig. 9 que as perdas no núcleo são praticamente constantes. Este resultado é esperado, pois tais perdas dependem apenas de R_c e da tensão no primário do transformador, que é praticamente constante nesse experimento.

As temperaturas em P1 e P2, medidas e simuladas, junto ao erro absoluto calculado, encontram-se representados na Fig. 10.

Observa-se que a simulação replica com notável proximidade o comportamento do sistema real. O erro absoluto médio calculado foi de 3,08% para P1 e 1,93% para P2. O gráfico deixa claro que o erro é maior durante os transitórios e tende a diminuir ao aproximar-se do regime permanente.

As regiões do gráfico da Fig. 10 com maior erro absoluto evidenciam que as constantes físicas aplicadas ao gêmeo digital não são suficientemente aderentes à realidade. Além disso, alguns materiais, como o papel e o PVC que constituem o transformador não foram representados em total nível de detalhes, visando reduzir o esforço computacional.

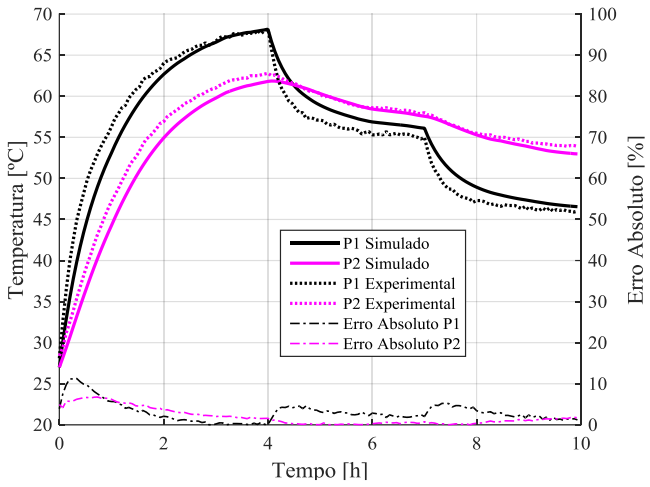

Fig. 10. Temperatura e erro absoluto do experimento I.

4.3 Experimento II: tensão variável

No gráfico apresentado na Fig. 11 podem-se observar os valores de tensão e corrente presentes no transformador durante as três etapas do ensaio.

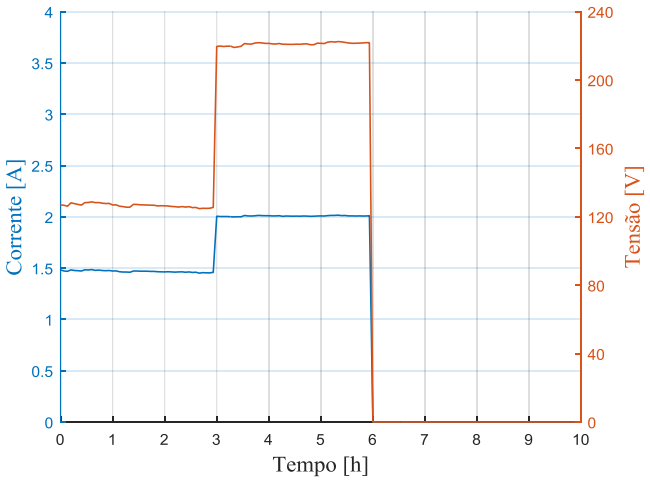

Fig. 11. Tensão e corrente medidas durante o experimento II.

A variação de tensão nesse experimento permitiu avaliar o desempenho do modelo diante de variações nas perdas no núcleo e nos enrolamentos. Essas perdas podem ser visualizadas graficamente na Fig. 12.

O resultado comparativo entre medição e simulação pode ser visto na Fig. 13. Os mesmo pontos P1 e P2 foram usados nesse experimento. Novamente, a partir da simulação foi possível reproduzir o comportamento térmico do transformador. Nas primeiras 6h a simulação apresentou desempenho melhor que no Experimento I. Nesse intervalo de tempo, o erro médio foi de 1,58% para P1 e 1,91% para P2.

Nota-se que desligar a alimentação do transformador no seu pico de temperatura (t = 6h) causou um transitório de grande amplitude. Foi nessa região que se registrou o maior erro, máximo de 13,1% para P1 e 7,29% para P2. Já o erro médio total (considerando as 10 h de experimento) foi de 4,92% para P1 e 3,25% para P2.

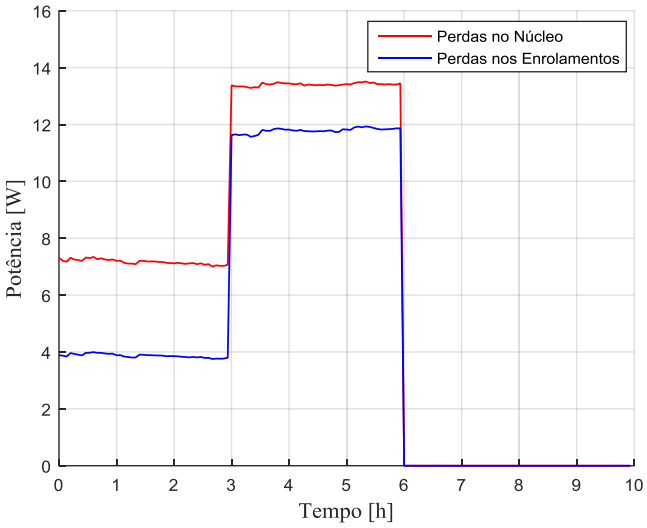

Fig. 12. Perdas calculadas durante o experimento II.

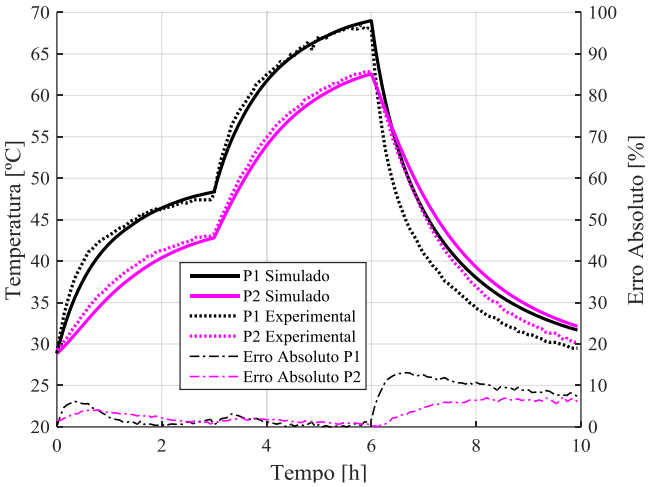

Fig. 13. Temperatura e erro absoluto do experimento II.

De maneira geral, conclui-se que o transformador real responde um pouco mais rápido à entrada de potência que o seu gêmeo digital, mas ambos tendem à mesma temperatura em regime estacionário.

5. CONCLUSÕES

Nesse artigo, o MEF foi aplicado para resolver numericamente as equações diferenciais do gêmeo digital de um transformador de baixa potência. O equipamento precisou ser caracterizado e modelado, a fim de reproduzir - em ambiente virtual - o seu comportamento térmico.

Nos experimentos de validação, foram obtidos resultados satisfatórios e as simulações demonstraram-se precisas em reproduzir o comportamento térmico do transformador. Para um ponto no centro do enrolamento, os erros médios absolutos foram de 3,08% e 4,92%, respectivamente para os experimentos 1 e 2. Já para um ponto na parte inferior do núcleo, esses erros foram 1,93% e 3,25%.

Os maiores valores de erros médios pronunciam-se nos enrolamentos, o que é um indicativo que o modelo consegue mimetizar de forma mais aderente o núcleo do equipamento. De fato, ao representar enrolamentos e núcleo como objetos

maciços espera-se uma imperfeição maior nos enrolamentos, pois estes, na realidade, possuem regiões ocas.

A técnica proposta pode ser aprimorada ao realizar a medição, também em tempo real, da temperatura ambiente e umidade, bem como realizar uma modelagem mais fidedigna das bobinas, do papel isolante e do PVC presentes no transformador. Além disso, as simulações térmicas podem evoluir para simulações multifísicas (termoelétricas).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Automação Controle e Simulação (LACS) e aos seus membros pelo apoio durante a pesquisa, e ao professor Ângelo Márcio Formiga de Almeida pelo o auxílio nos ensaios.

REFERÊNCIAS

ALLEGRO, MicroSystems, *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kV_{RMS} Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*, *ACS712 datasheet*, 2007.

ALEXANDER, Charles A. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. 5. ed. [S. l.]: AMGH, 2013.

ALMEIDA, O. M. et al. *Monitoramento de Temperatura e Modelos Térmicos de Transformadores*, 2005.

BASTOS, Gilson et al. *Avaliação do desempenho de transformadores de potência e reatores no sistema elétrico brasileiro*. Cigré - Brasil, 2013.

BOHN, Felipe. *Magnetostricção do ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado*. Orientador: Rubem Luís Sommer. 2005. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BOSCHERT, S. e ROSEN, R. Digital Twin —The Simulation Aspect. *Mechatronic Futures*, 59–74, 2016.

GIACCHINI, Breno. *Uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos*. 2012.

CHAPMAN, Stephen J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. [S. l.]: AMGH Editora LTDA, 2013.

BOSCHERT, S. e ROSEN, R. Digital Twin —The Simulation Aspect. Mechatronic Futures, 59–74, 2016.

FARIA, Ivan. *Proposição e Comparação de Técnicas de Mapeamento Térmico Volumétrico para Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. User's manual.

FITZGERALD, A. E. *Electric Machinery*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 688 p.

FLIR Tools/Tools+. *Manual de utilização do FLIR Tools*. Ed Intertek, 2017.

FERREIRA, Tarso. *Estudo do trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

FREITAS, Antônio et al. Aplicação de Redes Neurais na Estimação da Temperatura Interna de Transformadores de Distribuição Emersos em Óleo. *Revista Controle & Automação*, v. 13, n. 3, p. 266-274, 2002.

GRIFFITHS, David J. *Eletrodinâmica*. São Paulo: Pearson, 2011.

GLAESSGEN, E. e STARGEL, D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd Structures, *Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012

FRONTIN, Sergio O. *Equipamentos de Alta tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. [S. l.]: Goya Editora LTDA, 2013.

KLINKLOW, Nattida et al. Development of a Kraft Paper Box Lined with Thermal-Insulating Materials by Utilizing Natural Wastes. *Key Engineering Materials*, Switzerland, v. 545, p. 82-88, 2013.

KOWAL, Damian et al. The Effect of the Electrical Steel Properties on the Temperature Distribution in Direct-Drive PM Synchronous Generators for 5 MW Wind Turbines. *IEEE Transactions on Magnetics*, [S. l.], v. 49, n. 10, p. 5371-5377, 2013.

MARTÍNEZ, Daniel et al. Evaluación de Modelos Térmicos usados para Estimar la Temperatura del Punto Caliente en Transformadores de Distribución. *Informacion Tecnológica*, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 295-306, 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos*. [S. l.], 11 nov. 2011.

SADIKU, M. A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems, in *IEEE Transactions on Education*, vol. 32, no. 2, pp. 85-93, May 1989.

SEN, P. C. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 3. ed. Chennai, India: John Wiley & Sons, 2014.

SILVA, Juliano. *Avaliação "on-line" de Temperatura do Transformador de Potência Através de Modelagem Numérica Magnética e Termodinâmica*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUSA, Antônio. *Análise Multifísica Via Método de Elementos Finitos para o Auxílio à Manutenção Preditiva em Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

TZU, Sun. *A Arte da Guerra*. Porto Alegre: L&PM Pocket, 2006.

TESLA, Nikola. *Electrical transformer*. Depositante: Nikola Tesla. USA nº 593,138. Depósito da patente: 20 mar. 1897. Concessão: 2 nov. 1897.