

Monitoramento de Transformador de Baixa Potência Baseado em Internet das Coisas e Gêmeos Digitais

Rodrigues L. A.*. Santos M, A.**, Rodrigues G, A*** Ferreira T, V****

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, (e-mail: aragao135lucas@academico.ufs.br)

**Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, (e-mail: muu14@academico.ufs.br)

***Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, (e-mail: gustavoaragao@academico.ufs.br)

**** Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande

São Cristóvão, Sergipe, Brasil (e-mail: tarso@academico.ufs.br)

Abstract: In this work it is proposed to improve, using the internet of things, a monitoring system based on a digital twin of a low power transformer. A new data acquisition and sending system was developed to communicate with an online database, as well as adding environmental conditions as new inputs in simulations and protection measures performed remotely. To perform the tests a sensor/actuator module was developed to send the data of ambient humidity, ambient temperature, transformer's current and voltage. All this data was digitized, pre-processed, and forwarded to the simulator, by means of the internet of things. Thus, even though they are physically separated, they exchange information over the internet of things data that was used by the simulation's module, in which it runs the simulation of the digital twin. In this way, thermal simulations were performed, and, from the interpretation of the results, action commands can be executed to protect the equipment from overload. To validate the results, a thermographic camera was used, measuring the temperature of the transformer in operation. Two points on the equipment were chosen for temperature analysis, one on the winding and one on the core. In the better experience, the mean absolute error between what was measured and what was calculated came 6.18% at the first point and 3.93% at the second point. The improvement of the technique to estimate the transformer temperature with the use of the internet of things, showed the feasibility of this technology with the temperature tests and the system runtime.

Resumo: Neste trabalho é proposto aprimorar utilizando a internet das coisas, um sistema de monitoramento baseado em um gêmeo digital de um transformador de baixa potência. Desenvolvimento de um novo sistema de aquisição e envio de dados para comunicação com um banco de dados online, além de adicionar as condições ambiente como novas entradas nas simulações e medidas de proteção executadas remotamente. Para realização dos ensaios foi desenvolvido um módulo sensor/atuador para o enviar os dados de umidade ambiente, temperatura ambiente, corrente e tensão no transformador. Todos esses dados foram digitalizados, pré-processados e encaminhados ao simulador, por meio da internet das coisas. Assim, mesmo separados fisicamente, trocam informações pela internet de dados que foram utilizados pelo módulo de simulações, na qual executa a simulação do gêmeo digital. Dessa forma, as simulações térmicas foram realizadas e, a partir da interpretação dos resultados, comandos de ação podem ser executados para proteger o equipamento de sobreaquecimento. A fim de validar os resultados, uma câmera termográfica foi utilizada, medindo a temperatura do transformador em funcionamento. Foram escolhidos dois pontos no equipamento para análise da temperatura, um no enrolamento e um no núcleo. No melhor experimento, a diferença entre o que foi medido e o que foi calculado chegou há 6,18% no primeiro ponto, e 3,93% no segundo ponto de erro absoluto médio. O aprimoramento da técnica para estimar a temperatura do transformador com o uso da Internet das coisas, mostrou a viabilidade desta tecnologia com os ensaios de temperatura e com o tempo de execução do sistema. As medidas de proteção com o uso do relé, mostrou-se uma solução eficiente para proteger o equipamento.

Keywords: internet of things; digital twins; transformer; electrical equipment monitoring; *online database*.

Palavras-chaves: internet das coisas; gêmeos digitais; transformador; monitoramento de equipamentos elétricos; banco de dados *online*

1. INTRODUÇÃO

A internet das coisas (IoT, do inglês *internet of things*) pode ser entendida como uma rede de dispositivos interconectados que permitem que algoritmos tomem decisões e pautem avaliações e ações que antes eram tomadas por humanos (Magrini, 2018). Essa tecnologia foi desenvolvida com os avanços de várias áreas como: sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. Por isso, a IoT está em constante desenvolvimento tanto no meio acadêmico quanto na indústria e demonstra potencial nas mais diversas áreas das atividades humanas, entre elas, monitoramento de equipamentos elétricos (Fabricio, 2018).

Os sistemas de proteção e monitoramento de equipamentos elétricos, previnem falhas e contribuem com a durabilidade desses equipamentos, conseqüentemente, esses sistemas garantem a confiabilidade e segurança para o Sistema Elétrico de Potência (SEP). A produção de transformadores de alta potência é realizada sob demanda, sendo os equipamentos mais caros e importantes dos sistemas elétricos. O uso dos transformadores é primordial para a transmissão de energia elétrica em alta tensão por longas distâncias. As propriedades elétricas do transformador de potência, idealmente, convertem um nível de tensão CA em outro nível de tensão sem afetar a potência elétrica real fornecida. Contudo, uma estrutura ferromagnética no núcleo, geralmente feito de aço laminado, e enrolamentos geralmente de cobre, as perdas de potência acontecem em diferentes pontos ocasionando o aquecimento do equipamento que podem gerar danos irreparáveis (Chapman, 2013).

O uso dos gêmeos digitais (DT, do inglês *digital twin*) pode ser explicado como construção digital de um objeto com os seus parâmetros físicos e geométricos (Boschert, 2016). A representação de forma digital, possibilita simular os comportamentos reais de um equipamento. Assim, pode-se realizar simulações multifásicas, multiescala, probabilística e ultrarrealista (Glaessgen, 2012). Para a engenharia elétrica, essa tecnologia possibilita estimar dados de funcionamento essenciais, que em operação real seriam de obtenção mais complexa, cara, ou simplesmente inviável, como campo elétrico, potencial elétrico e comportamento térmico.

A confiabilidade no funcionamento de um transformador está diretamente ligada ao seu comportamento térmico, segundo Basto (2013), 15,4% das falhas são causadas por problemas térmicos. Dessa forma, são necessários sistemas que sejam capazes de prevenir tais falhas.

Nesse contexto, o estudo do aprimoramento de técnicas de estimação de temperatura em transformadores é objeto de pesquisas como em Freitas (2022) e Almeida (2005), que demonstraram a viabilidade em aplicar redes neurais artificiais para estimar temperatura.

Neste trabalho busca-se aprimorar o monitoramento através da criação de um gêmeo digital colocando os parâmetros de um transformador real de baixa potência (220 V, 440 VA) e alimentando-o apenas com dados elétricos de entrada (Tensão e corrente) e com condições do ambiente (Temperatura e umidade). Assim, comparando o comportamento térmico do

modelo digital com o equipamento em funcionamento. Além da criação de um sistema de aquisição e envio de dados para um banco de dados online baseado no conceito de IoT, com atuação caso a temperatura ultrapasse níveis pré-estabelecidos.

A implementação do IoT possibilita comunicação bidirecional e armazenamento de dados, e o DT é utilizado nas simulações para estimar a temperatura do transformador. Sendo assim, o sistema proposto tem a intenção de proteger a máquina elétrica de sobreaquecimento (sobrecarga).

2. METODOLOGIA

O sistema consiste na medição dos dados de entrada do transformador em funcionamento, além das condições do ambiente, que são enviados através de um microcontrolador (ATMEGA328) para um módulo de WiFi (NodeMCU – ESP32). A partir disso, eles são enviados para um banco de dados online, onde serão coletados para alimentar as simulações. Todo este processo pode ser visto na Figura 1 e os elementos presente neste serão discutidos após. Para validação dos resultados foi utilizado em três ensaios com duração de 10 horas uma câmera termográfica para comparar os resultados de temperatura estimada.

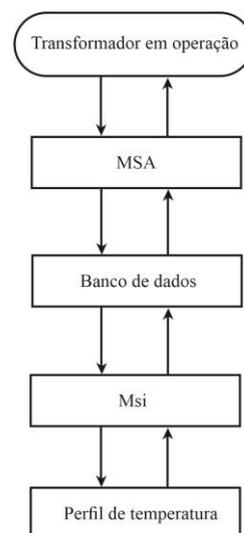


Fig. 1 Diagrama de blocos da metodologia proposta.

Para realizar o monitoramento do transformador foi desenvolvido um sistema dividido em dois módulos. O primeiro, o módulo sensor/atuador (MSA) responsável pela medição das principais variáveis relacionadas ao comportamento elétrico e térmico do transformador, e pelo envio para um banco de dados *online*, este módulo é composto pelos microcontroladores e os sensores. O segundo, o módulo simulador (MSi) é responsável por acessar o banco de dados e alimenta um DT, executado em tempo real. Para as simulações o DT que será utilizado foi desenvolvido e validado por Rodrigues (2020), utilizando as medidas geométricas e físicas do transformador estudado. Na seção 2.1 as características do DT são apresentadas. Neste trabalho foi realizado uma atualização do DT, que passou a considerar a temperatura ambiente e umidade ambiente como entrada para simulação.

Todos estes dados serão gerados pelo MSA, responsável pelo sensoriamento, e encaminhamento de dados ao MSi por meio da rede. As entradas para o MSi são correntes e tensões no transformador, umidade e temperatura ambiente.

O MSi possibilita executar simulações térmicas aplicando os dados de entrada no DT e, a partir da interpretação dos resultados gerados, comandos de atuação poderão ser tomados em tempo real, visando proteger o equipamento de sobreaquecimentos. Todo o sistema é representado na figura 1 de forma geral.

2.1 Gêmeo digital

O gêmeo digital utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Rodrigues (2020) e nesta seção serão mostrados os seus parâmetros. O transformado utilizado é monofásico com potência nominal de 440 VA e frequência de 60 Hz. O seu núcleo é do tipo EI, isolado da bobina mais interna por uma fina camada de PVC. As bobinas são do tipo sobrepostas e separadas entre si por papel isolante. Para modelagem do transformador no *Software* Baseado no Métodos dos Elementos Finitos (SBMEF), o material do núcleo considerado foi o aço silício de grão não orientado (Bohn, 2005), e os enrolamentos de cobre. Os parâmetros de dos materiais podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados obtidos nos experimentos com o tempo de execução do sistema (Rodrigues,2020).

Domínio	ρ	C_p	κ	ϵ
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 $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

C_p – Capacidade térmica a pressão constante em $[\text{j}/(\text{kg} \cdot \text{k})]$;

κ – Condutividade térmica em $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$;

ϵ – Emissividade.

(a) Kowal (2013); (b) Klinklow (2013);

(c) Determinados experimentalmente conforme FLIR (2017).

As informações do PVC não foram necessárias para a simulação e os parâmetros que não foram informados na Tabela 1, constam na base dados do próprio SBMEF. A construção 3D do transformador foi realizada no software do tipo *computer aided design* (CAD).

A técnica para definir as perdas no transformador que foi utilizada necessitou realizar ensaios para obter o circuito equivalente, com os ensaios de circuito aberto e curto-circuito. Os parâmetros determinados são referidos ao lado primário do transformador, foram obtidos por meio das equações descritas em (Chapman, 2013) e podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do circuito equivalente do transformador (Rodrigues, 2020).

	R_{eqp}	X_{eqp}	R_c	X_M
Parâmetros	0,71 k Ω	0,71 Ω	4,15 k Ω	0,71 k Ω

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.

X_M : Reatância de magnetização. Por ela, circula a corrente de magnetização.

2.2 Sistema de medição

Para realizar as simulações foram usadas quatro medidas de entrada no sistema. Na medição de corrente foi escolhido o sensor ACS712 (faixa de medição -5 A a 5 A), baseado em efeito Hall, com tensão de saída de 0 V a 5 V, proporcional à corrente medida, seja ela alternada ou contínua (Allegro, 2007). Para a medição de tensão, propõe-se um circuito divisor de tensão associado a um retificador de precisão construído a partir de amplificadores operacionais. Este circuito mantém a tensão na saída sua saída abaixo de 5V, possibilitando a conversão analógico/digital do sinal pelo microcontrolador ATEMEGA328 (ARDUINO UNO R3). O diagrama ilustrado na Fig. 2 é a simplificação do sistema montado para medição dos parâmetros do transformador e atuação do sistema de proteção.

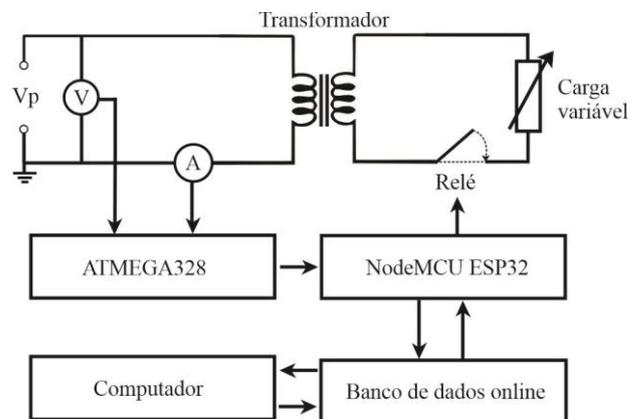


Fig. 2 Circuito do transformador para ensaios de validação.

Para as medidas de temperatura ambiente e umidade ambiente, foi utilizado o dispositivo DHT11, que possui um termistor com coeficiente negativo de temperatura e um sensor de umidade do tipo HR202 (Aosong, 2010). A comunicação entre o DHT11 e o ATMEGA328 se dá por meio das portas seriais dos microcontroladores.

2.2 Módulo sensor/atuador

Para implementação do MSA foram utilizados microcontroladores para a captação e pré-processamento de dados, e posterior envio para o banco de dados online (nuvem).

Essas funções foram divididas entre dois microcontroladores, cujas funções são detalhadas a seguir.

O microcontrolador ATMEGA 328 é responsável pela captação de dados digitais do sensor DHT11 e dos dados analógicos dos sensores de tensão e corrente. Então, os dados obtidos de tensões e correntes CA são convertidos do analógico para o digital. A partir desses, os valores eficazes são calculados.

Os dados, são enviados para um segundo microcontrolador NodeMCU-ESP32 (Espressif), por meio da comunicação entre as portas seriais dos microcontroladores. Foram necessários dois microcontroladores pois o NodeMCU-ESP32 possui quantidade insuficiente de portas lógicas. Para programar ambos os microcontroladores foram utilizados o software de programação Arduino IDE.

Em sua interface sem fio, o ESP-32 tem acesso ao banco de dados online, a nuvem ThingSpeak, está é uma nuvem online gratuita com o intuito de contribuir com projetos tecnológicos. A escolha desta plataforma online, é motivada por ser já ser conectada com o Software de Tratamento e Processamento de dados (STPD), assim os dados serão armazenados e enviados para o simulador, da mesma forma, resultados obtidos pela simulação do DT são armazenados na nuvem pelo STPD, possibilitando que o ESP-32 possa acessá-las e, se for o caso, acionar o relé de proteção que desenergiza o transformador, protegendo-o de sobrecargas e sobreaquecimentos.

2.4 Armazenamento de dados em plataforma IoT

A implementação da IoT nesse sistema demanda uma plataforma de armazenamento de dados online. Para armazenar as entradas e saídas do MSi, e os comandos dados pelo STPD.

Na plataforma online são armazenadas todas as grandezas envolvidas na operação do sistema: tensão (RMS), corrente (RMS), temperatura (°C), umidade (%), um flag com a situação do transformador (desligada ou ligada) e os resultados das temperaturas estimadas.

2.5 Módulo simulador

É utilizado o Software de Tratamento e Processamento de Dados (STPD) para importar os parâmetros da nuvem durante os ensaios. Assim, para cada passo do MSi serão calculadas as perdas no núcleo e no enrolamento do transformador, a partir da tensão e corrente do transformador (Chapman,2013).

O sistema é iniciado com condições ambiente e com o transformador desenergizado antes dos ensaios. Durante os ensaios o MSi, é alimentado com as entradas para o DT no software especializado em tempo real utilizando o SBMEF. O SBMEF empregado neste trabalho é o COMSOL Multiphysics, responsável por gerar as simulações que fornecerão como resultado as temperaturas estimadas em qualquer ponto do transformador. Dessa forma, o sistema funciona de forma automática com os dois softwares operando em paralelo, sendo que o conjunto de temperaturas estimadas na iteração atual servirá como condição inicial para o próximo passo iterativo (Rodrigues, 2020). O STPD, após cada iteração, envia os

resultados das simulações (temperaturas) para o banco de dados na nuvem. Tais dados são acessíveis ao ESP-32, que pode operar o relé de proteção conforme status do flag, definido pelas temperaturas obtidas pelo SBMEF.

O tempo de simulações é definido pela capacidade de processamento do computador e pela complexidade do modelo. Devido às constantes térmicas envolvidas e às variações relativamente lentas de temperatura, foi possível operar-se em tempo real. A configuração do computador no qual rodaram o STPD e o SBMEF possuía um processador AMD FX-6300-Six-Core-Processor e 8 GB de memória RAM.

2.6 Ensaios de variação de temperatura

Para validação do sistema de aquisição de dados IoT nos ensaios de variação de temperatura, foram escolhidos dois pontos no equipamento: um ponto no centro do enrolamento (P1) e outro na parte inferior do núcleo (P2), que podem ser visualizados na Fig. 3.

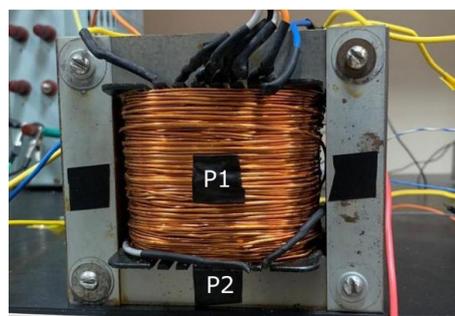


Fig. 3 Foto do transformador usado nos ensaios.

A fim de medirem-se os valores das temperaturas nos pontos P1 e P2 do transformador, foi utilizada uma câmera termográfica modelo FLIR T440 (sensibilidade térmica de 0,04°C). Para garantir a equivalência de emissividade nos dois pontos de medição (0,96) (FLIR, 2017), dois pedaços de fita isolante foram colados no núcleo e no enrolamento do transformador, como pode-se observar na Fig. 2.

Para a obtenção da temperatura nestes pontos, são necessários ensaios com variação de temperatura no transformador, dessa forma, é necessária uma carga variável com a potência próxima da nominal do transformador. Utilizou-se um conjunto de 12 lâmpadas incandescentes, com alto consumo energético, resultando em uma potência máxima de 440 VA. Serão realizados 3 ensaios, no ensaio I, será aplicado a tensão nominal no transformador, possibilitando a análise do regime transitório e o regime permanente. O ensaio II, será definido uma condição de desligamento do transformador, para validar a comunicação bidirecional. Por fim, o ensaio III será definido uma nova condição de desligamento e será adicionado uma condição de religamento.

Na Fig. 4 apresenta-se um diagrama de blocos do fluxo completo de dados dos ensaios de validação. O sistema inicia-se nas medições no transformador e finaliza-se nas condições de acionamento para o relé. Os resultados enviados para o banco de dados pelo computador são as temperaturas nos pontos P1 e P2, e a partir dessas medidas microcontrolador

NodeMCU-ESP32 executa o acionamento do relé de proteção. As condições para o desligamento do transformador são definidas para os ensaios II e III, no algoritmo do ESP-32. Condicionando o acionamento do relé ao resultado da simulação. Portanto, caso a temperatura no escolhido ponto passar da condição estabelecida, o relé é acionado podendo atuar no transformador. Esta medida também pode ser tomada, a qualquer momento pelo operador do sistema de forma remota.

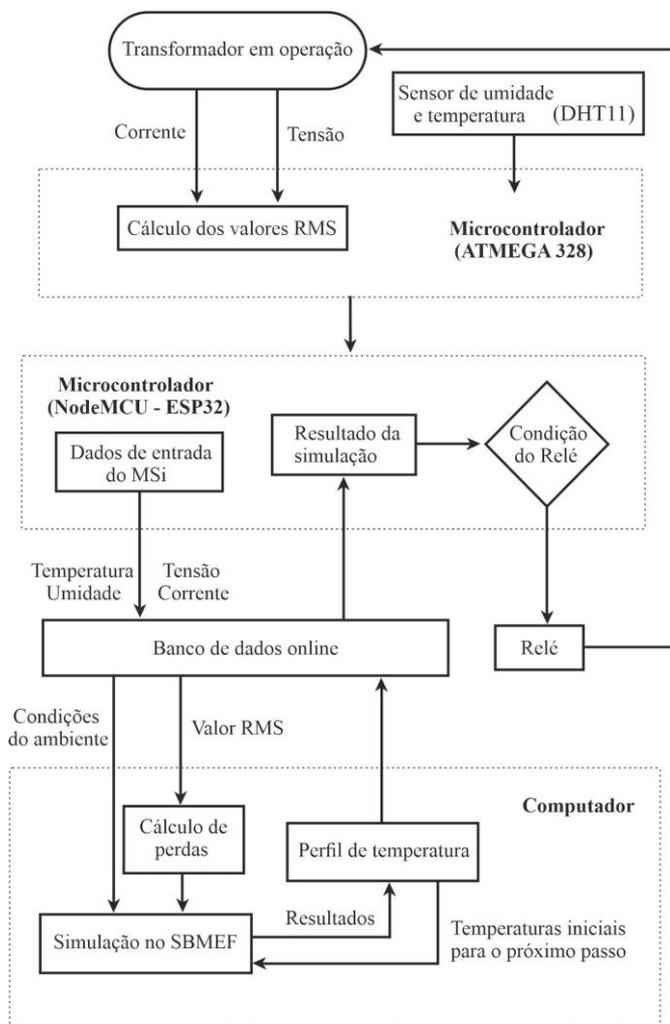


Fig.4- Fluxo de dados dos ensaios de validação.

Para avaliar o funcionamento da comunicação bidirecional com os resultados da simulação as condições de atuação serão: no ensaio II, quando a temperatura estimada no ponto P2 alcançar 65°C, o transformador deve ser desligado. Para o ensaio III, deve desligar quando a temperatura em P1 chegar a 65°C e religar quando a temperatura resfriar até 40°C em P2.

3. RESULTADOS

Para realização dos ensaios foi montado em bancada o MSA como pode ser visto na Fig. 5. O relé está posicionado nos cabos de alimentação do transformador, assim é possível desligar ou ligar o transformador.

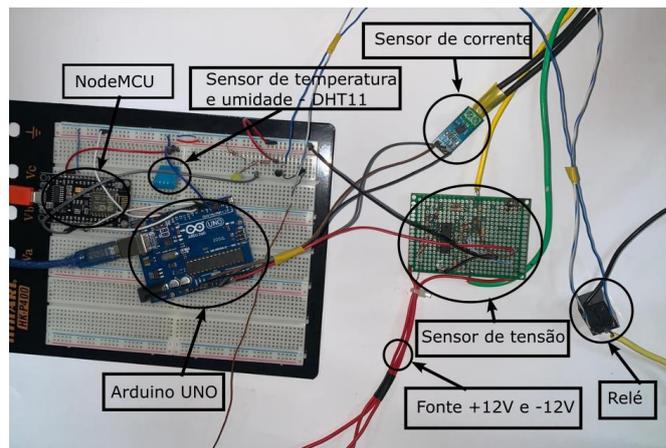


Fig. 5 MSA montado em bancada.

Com a finalidade de verificar a eficiência na comunicação entre MSA, nuvem e MSI foram cronometrados os tempos de simulação no computador utilizado, de acionamento do relé e de envio de dados. Estes resultados podem ser observados na Tabela 3. Esses dados demonstram que a média de tempo total de comunicação é de 38,02 segundos.

Tabela 3. Dados obtidos nos experimentos com o tempo de execução do sistema.

Medição	Simulação (s)	Envio de dados (s)	Acionamento do relé (s)
1	20,76	18,67	1,70
2	18,69	19,89	2,11
3	18,70	17,41	1,14
4	18,39	14,15	1,53
5	18,55	20,06	1,76
6	18,36	18,11	1,59
7	18,84	22,43	1,32
8	18,39	15,15	1,49
9	18,83	25,71	1,33
10	18,48	23,98	1,69
Média	18,79	19,55	1,56

3.1 Ensaio I: tensão e carga constantes

O experimento teve duração total de aproximadamente 10 horas (9 horas, 51 minutos e 36 segundos). O transformador passou todo este tempo conectado à sua carga nominal, com tensão no primário em torno de 220V resultando em uma potência aparente de 440VA.

Conforme a Fig. 6, as medições de umidade e temperatura se mantiveram constantes, com máxima de 96% da umidade, enquanto na temperatura a máxima foi de 30°C. Esses dados serviram de entrada nesta simulação.

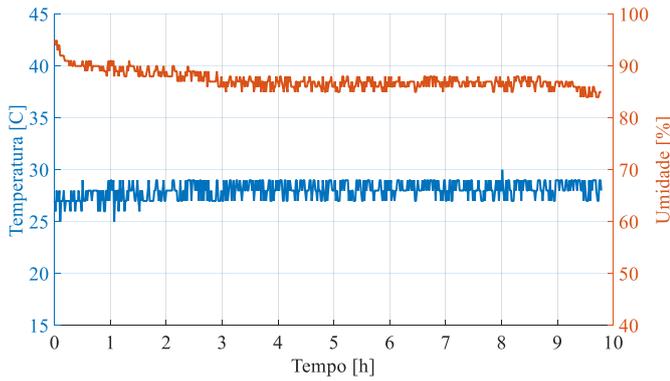


Fig. 6 Temperatura e umidade ambiente no Ensaio 1

As medições das condições ambiente se mantiveram praticamente constantes. Esse é resultado esperado pois experimento foi realizado em ambiente fechado e com ar-condicionado.

Na Fig. 7, observa-se a tensão e corrente de alimentação do transformador. Para cada aquisição destas grandezas foram calculadas as perdas no enrolamento e no núcleo.

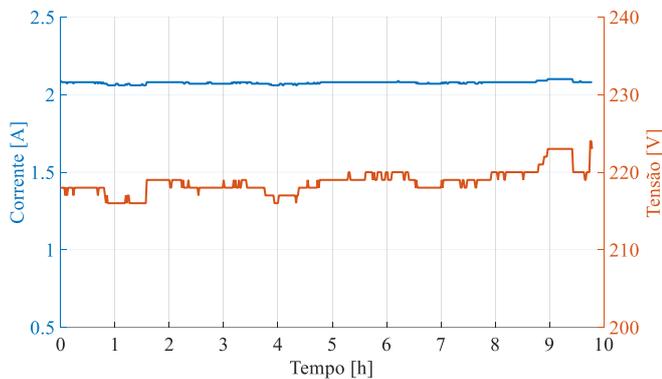


Fig. 7 Tensão e corrente do transformador no Ensaio 1.

Na Fig. 8, são representados graficamente os resultados do experimento. As temperaturas em P1 e P2, medidas e simuladas, junto com o erro absoluto calculado. As linhas na cor rosa representam os resultados em P2, e as linhas na cor preta representam os resultados em P1. O mesmo padrão de gráfico serve para os resultados dos outros experimentos. Observa-se no gráfico que os valores simulados acompanham os medidos, mostrando um comportamento próximo do sistema real.

Assim, o erro absoluto médio no ponto P1 foi de 7,53% e no ponto P2 foi de 5,39%. O gráfico deixa claro que o maior erro ocorreu durante o período transitório em P1 causado pelo atraso dos dados, porém durante o regime permanente as temperaturas se aproximaram da real. Enquanto no ponto P2, o erro esteve maior no regime permanente.

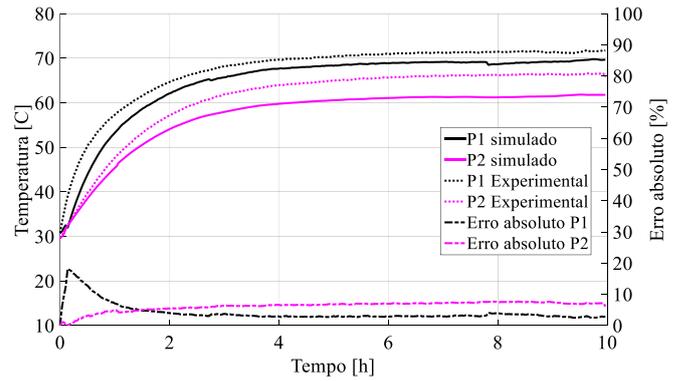


Fig. 8 Temperatura e erro absoluto Ensaio 1.

3.2 Ensaio 2: acionamento do relé I.

Neste experimento, busca-se validar a comunicação bidirecional entre MSA e MSi, desenvolvido para proteção contra sobreaquecimento do transformador. Este experimento teve 10 horas de duração, a umidade e temperatura ambiente tiveram máximas de 33°C e 93%, como pode ser observado na Fig. 9.

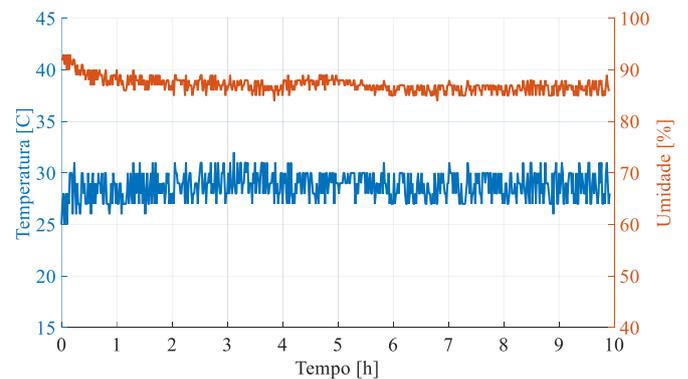


Fig. 9 Temperatura e umidade ambiente no Ensaio 2.

Na Fig. 10, observa-se o momento em que foi desligado o transformador. Em 3 horas e 48 minutos de ensaio, a temperatura simulada no MSi chegou a 65°C, portanto, o transformador foi desenergizada pelo acionamento do relé. Neste período a tensão e corrente são nulas.

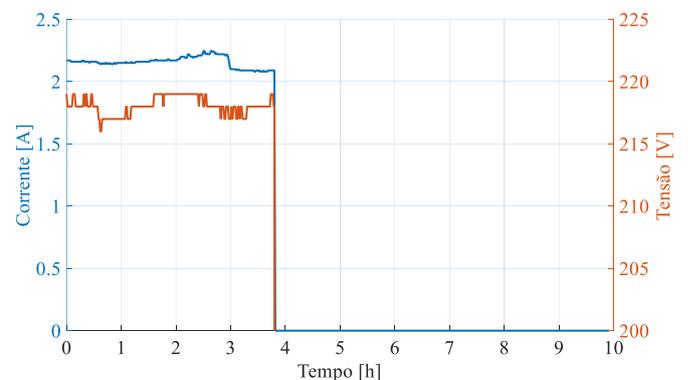


Fig. 10 Tensão e corrente do transformador no Ensaio 2.

Neste experimento, nota-se na fig. 11 que durante os períodos transitórios térmicos de aquecimento e resfriamento foi

observado um maior distanciamento entre as linhas comparativas, o que implica em um maior erro. O erro no transitório ocorre devido ao atraso da temperatura simulada que possui um comportamento mais lento que a temperatura estimada. Porém ao aproximar o regime permanente as temperaturas simuladas se aproximam das reais.

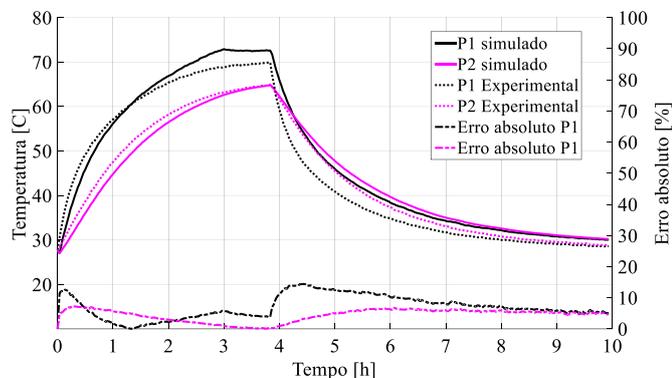


Fig. 11 Resultados de temperatura e erro absoluto ensaio 2.

Na comparação entre os resultados da simulação e da medição, o maior erro registrado para P1 ocorreu no transitório do resfriamento com 14,43%, isso é explicado pelo atraso na estimativa da temperatura neste ponto da simulação. Já para P2, o pico do erro ocorreu durante o início do transitório no aquecimento, caindo significativamente ao longo do regime. O erro absoluto médio durante o experimento foi de 7,07% no enrolamento (P1) e de 4,43% no núcleo (P2).

3.3 Ensaio 3: acionamento do relé II

Neste ensaio, o sistema foi programado para desligar o transformador quando P1 chegasse à temperatura de 65°C e religar quando P2 chegasse a 40°C.

Os resultados de umidade e temperatura podem ser visualizados na Fig. 12. Neste experimento a temperatura máxima foi 34°C e umidade máxima de 87%.

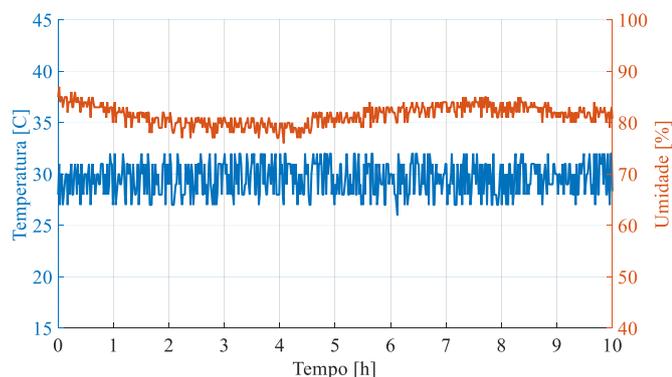


Fig. 12 Temperatura e umidade ambiente Ensaio 3.

As medições de tensão e corrente podem ser vistas na Fig. 13, o momento que o transformador foi desligado as 4 horas e 12 minutos e ligada as 8 horas e 54 minutos.

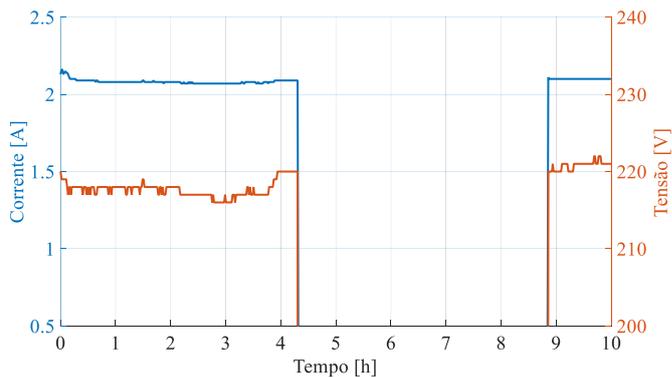


Fig. 13 Tensão e corrente do transformador Ensaio 3.

Os resultados deste experimento expostos na Fig. 14, demonstram comportamento similar ao Ensaio 2. O erro absoluto médio em P1 de 6,18%. Já em P2, o erro foi de 3,93%.

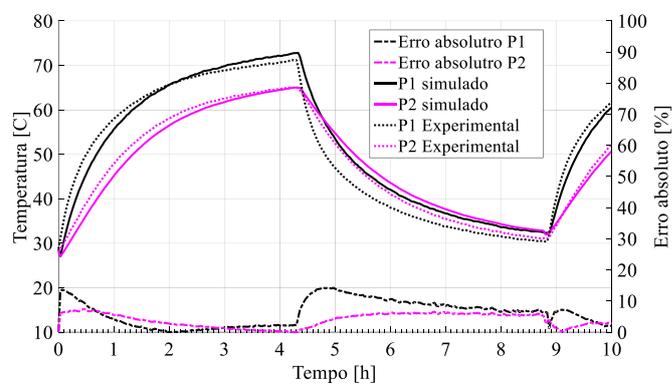


Fig. 14 Resultados do terceiro experimento

Assim como foi definido anteriormente, o transformador foi desligado quando P2 chegou em 65°C e religada quando P1 chegou em 40°C. É nítido neste ensaio, que quando inicia um período transitório há um aumento no erro absoluto.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma interface IoT foi desenvolvido para viabilizar a comunicação remota bidirecional em um sistema de monitoramento em tempo real de um transformador, com base em um DT. A simulação foi executada visando a estimação da temperatura utilizando as grandezas elétricas (tensão e corrente), além da umidade ambiente e da temperatura ambiente. Para validação da técnica foi utilizado um termovisor

Com base nos resultados obtidos nos três experimentos, no ponto P1 (centro do enrolamento) obteve-se os seguintes erros absolutos médio: 5,39%, 7,07% e 6,18%, respectivamente nos experimentos 1, 2 e 3. Neste ponto foi observado que os maiores erros ocorreram no início dos transitórios térmicos, isto explica por que o Ensaio 1 teve os menores erros absolutos médio. Já no ponto P2 (núcleo do transformado), os erros obtidos foram 7,53%, 4,43% e 3,93%, respectivamente nos experimentos 1, 2 e 3, demonstrando uma resposta melhor quando houve mais períodos transitórios.

Como os transformadores não trabalham com variação de carga muito intensas, os erros no transitório não trazem um impacto significativo para o modelo proposto. A validação dos resultados para todo o transformador é generalizada devido as temperaturas serem uniformes em todo o equipamento

Portanto, os ensaios demonstraram que no ponto P1 do DT, a reação da estimativa da temperatura ocorre de forma mais lenta nos momentos em que o transformador foi ligado ou desligado. As mudanças de carga com as condições de acionamento do relé durante os experimentos funcionaram como esperado.

Dessa forma, pode-se concluir que todo MSA mostrou eficiência, apresentando dados condizentes com o esperado. A implementação no MSi de dados de condições ambientais mostrou-se útil para os resultados, além da utilização do IoT e da comunicação bidirecional para realização dos experimentos que funcionou como esperado e com o tempo de atuação total com média de 38,02 segundos.

Assim o modelo se mostrou uma alternativa viável para o monitoramento do transformador, já que estima a temperatura a distância com auxílio do IoT em qualquer ponto do equipamento. Esse sistema pode ser implementado para o monitoramento de outros equipamentos como motores elétricos de indução.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao professor Edmar Candeia Gurjão e ao engenheiro Ellyakin Jesse Santos Figueiredo, da Universidade Federal de Campina Grande, que desenvolvem o projeto “Gerência inteligente de consumo de energia” e generosamente contribuíram com sua experiência para este trabalho. Também gostariam agradecer aos colaboradores do Laboratório de Automação Controle e Simulação (LACS), da Universidade Federal de Sergipe, pelo apoio durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Allegro. (2007). *MicroSystems, Fully Integrated, Hall EffectBased Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*, ACS712 datasheet.
- Almeida, O. M. (2005) *Monitoramento de Temperatura e Modelos Térmicos de Transformadores*. (S. 1.).
- Aosong (Guangzhou) Electronics Co. (2010) *Temperature and Humidity Module*. DHT11 Product Manual, DHT11 datasheet.
- Arduino. (2022) *Arduino Uno-ATmega328 P Microcontroller Based Smart Systems*. Arduino.cc, Arduino UNO R3 datasheet.
- Bohn, Felipe (2005). *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.
- Boschert, S. e Rosen, R. (2016). *Digital Twin —The Simulation Aspect*. Mechatronic Futures, 59–74.
- Chapman, S.J. (2013) *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. (S. 1.), AMGH Editora LTDA.
- Espressif. (2021). *ESP32 Series, Espr. Syst.* pp. 1–65. Datasheet.
- Fabricio, M. A. (2018) *Monitoramento de equipamentos Elétricos Industriais utilizado IoT*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, PUC campinas.
- Faria, I. (2012) *Proposição e Comparação de Técnicas de Mapeamento Térmico Volumétrico para Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. User’s manual.
- FLIR Tools/Tools. (2017). Manual de utilização do FLIR Tools. Ed Intertek,
- FLIR. (Acesso em fevereiro de 2021) *Manual user 's: Flir T4xx series*. Pag. 122. Disponível em direct.com/pdfs/cache/www.flir-direct.com/t440/manual/t440-manual.pdf.
- Freitas (2002), Antônio et al. *Aplicação de Redes Neurais na Estimção da Temperatura Interna de Transformadores de Distribuição Emersos em Óleo*. Revista Controle & Automação, v. 13, n. 3, p. 266-274.
- Klingklow, N, (2013). *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.
- Kowal, D. (2013). *et al. The Effect of the Electrical Steel Properties on the Temperature Distribution in DirectDrive PM Synchronous Generators for 5 MW Wind Turbines*. IEEE Transactions on Magnetics, [S. 1.], v. 49, n. 10, p. 5371-5377.
- Magrini, E. (2018) *A Internet das Coisas*. FGV Editora.
- Norma Técnica CELG D (2016) *Transformador de Potência Especificação*, [S. 1.].
- Rodrigues, G.A. (2020) *Aplicação do método de elementos finitos no mapeamento térmico de transformadores*. Orientador: Tarso Vilela Ferreira, 70f, TCC (Graduação), Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe.