ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Aplicação de sensores de umidade para o monitoramento do patrimônio cultural construído

Application of humidity sensors for monitoring built cultural heritage

Pedro Oscar Pizzetti Mariano
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | pedro.pm@hotmail.com
Felipe Bruno Lima da Silva
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | felipebrunolima@gmail.com
Yasmin Silva Sônego
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | minsonego@gmail.com
Geovana de Souza Machado
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | geovanamachado@hotmail.com
Ana Regina Mizrahy Cuperschmid
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | cuper@unicamp.br
Carlos Eduardo Verzola
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | cevv@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta um estudo sobre o uso de sensores de umidade para monitorar os fenômenos de umidade ascendente e descendente, visando se construir um sistema de monitoramento para edifícios de alvenaria considerados patrimônios materiais. O sistema em questão consiste na instalação de uma rede de sensores de umidade nas fachadas dos edifícios, que interage com um modelo digital da construção que monitora patologias no ambiente construído, com o objetivo de se criar um protótipo de gêmeo digital. Durante o processo de pesquisa, foi realizada a implantação das camadas de coleta de dados, comunicação (rede sem fio, por meio do microcontrolador ESP32) e a interface com o modelo BIM. Os resultados preliminares da pesquisa demonstram que, por meio da utilização de sensores de baixo custo, é viável combinar tecnologia de sensoriamento avançado com a conservação do patrimônio cultural construído. Além disso, é possível evitar problemas que podem comprometer a integridade do edifício, custos significativos de reparo, bem como representar riscos à saúde dos ocupantes devido à presença de mofo e fungos.

Palavras-chave: Sensor. Patrimônio cultural construído. Umidade. Gêmeo Digital.

Como citar:
MARIANO, P.; /silva, F.; SONEGO, Y.; MACHADO, G.; CUPERSCHMID, A. VAZ, C. Aplicação de sensores de umidade para o monitoramento do patrimônio cultural construído. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

This article presents a study on the use of capacitive humidity sensors to monitor rising and falling humidity phenomena in historic masonry buildings. The proposed system consists of installing a mesh of capacitive humidity sensors on the facades of buildings, which communicate with a digital model of the building dedicated to monitoring pathologies in the built environment. During the research process, the layers of data collection, communication (wireless network) and the interface with the BIM model — "Building Information Modeling" were implemented. The microcontroller used for the integration between the physical and digital object was the ESP32, a low-cost and low-power integrated board. Preliminary research results demonstrate that, through the use of low-cost sensors, it is feasible to combine advanced sensing technology with the conservation of built cultural heritage. Furthermore, it is possible to avoid problems that could compromise the integrity of the building, incur significant repair costs, as well as pose risks to the health of occupants due to the presence of mold and fungi.

Keywords: Sensor. Built Cultural Heritage. Moisture. Digital Twin.

INTRODUÇÃO

A inspeção das Construções Históricas (CH) envolve um conjunto de ações colaborativas e multidisciplinares, nas quais diferentes profissionais utilizam diversas técnicas e métodos para o levantamento de dados relacionados aos danos e patologias, para produzir conhecimento abrangente sobre o estado de conservação do Patrimônio Cultural Construído.

Apesar das atividades relacionadas à Conservação e Restauração do Patrimônio Construído possuir princípios teóricos, metodologia e procedimentos técnicos que lhe são próprios — e resultando da reflexão sobre os motivos pelos quais se preserva e de experimentações seculares — o que se altera na prática, são os meios postos em ação quando se passa à parte operacional [1].

É difícil prescrever um conjunto padrão de diretrizes e técnicas para a inspeção das CH, devido à variedade de tipologias construtivas, significância cultural e o avanço tecnológico instrumental [2]. Por outro lado, dentre as diversas etapas que devem anteceder o projeto de intervenção, a caracterização dos danos e patologias por meio de inspeção visual tradicional ou aumentada, desempenha papel importante no diagnóstico do estado de conservação [3].

A umidade ascendente é um dos fatores de maior degradação dos revestimentos de paredes de edificações históricas, resultado do processo de cristalização/dissolução de sais e ocorre quando as paredes estão em contato com água ou solo úmido, devido à capilaridade dos materiais e a falta de barreira hídrica [4].

Algumas pesquisas têm utilizado sensores para termografia infravermelha como um recurso eficaz para revelar umidade ascendente por capilaridade em construções históricas [5; 6; 7; 8; 9; 10]. No entanto, a implementação dessa ferramenta para o registro da umidade ascendente ou descendente, utilizando um modelo digital, poderia exigir um desempenho gráfico computacional para fins de monitoramento em tempo real.

Dessa forma, o objetivo principal deste estudo é avaliar a viabilidade de utilizar sensores de umidade capacitivos como recurso de coleta de dados de umidade

ascendente e descendente em uma parede de alvenaria; e de que forma esses dados poderiam ser transmitidos para um protótipo de um gêmeo digital de uma construção histórica.

Presume-se, portanto, que o uso dessas tecnologias como ferramentas de inspeção e monitoramento das CH em tempo real, possam favorecer uma compreensão mais abrangente e temporal dos danos e patologias decorrentes da umidade, contribuindo para o processo de digitalização de dados no campo do patrimônio cultural construído.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A implementação de tecnologias de "inspeção visual aumentada" em Construções Históricas [11] – 3D "Laser Scanning" e Fotogrametria por Drones [12] — potencializam as atividades de inspeção das CH, possibilitando uma coleta de dados mais eficiente sobre as deformações e desgastes decorrentes do ciclo de vida dessas construções [13; 14]. Os avanços dessas tecnologias para o levantamento cadastral são ações que colocam novos especialistas no campo do Patrimônio Construído; que somado a virtualização das informações, causam impactos nos processos de estudo dos bens culturais [15].

No que diz respeito aos métodos de investigação para avaliação do estado de conservação, podem ser classificados em três tipos: direto, indireto ou misto. No método direto, realizam-se as explorações pelo contato e manipulação direta sobre a CH, a partir de ações invasivas e destrutivas [16]. Em casos excepcionais, faz-se o uso do método misto — na utilização restritiva de técnicas invasivas [16] associadas a novas tecnologias de investigação indireta — como a termografia infravermelha pulsada, utilizada para a prospecção estratigráfica para identificar repinturas em uma variedade de tipos de artefatos do patrimônio cultural [17].

Por outro lado, desde a promulgação da Carta de Lausanne e "Declarações de Sofia" que recomenda que as metodologias de levantamento e diagnóstico devam, sempre que possível, utilizar técnicas não intrusivas e não causar danos ao bem cultural [18; 19; 20]. Os métodos não destrutivos são mais recomendados e adequados atualmente pela sua capacidade de obter parâmetros diretamente nos bens culturais sem subtração de amostras, preservando sua integridade e autenticidade [21].

Apesar da variedade de métodos e técnicas de inspeção disponíveis atualmente, como os Ensaios Não Destrutivos (END) [22; 23; 24; 25], há uma dificuldade em agrupar essas informações — em sua maioria derivadas de fontes diversas, analisadas de forma independente e por diferentes equipes — tornando desafiador a verificação e gestão desses dados, com possíveis efeitos negativos no planejamento das intervenções nas CH.

Portanto, novas tecnologias para o levantamento de dados por sensores e o desenvolvimento de modelos Gêmeos Digitais, apresentam-se como soluções promissoras para a gestão, monitoramento e diagnóstico das CH, a partir da aplicação de tecnologias de eletrônica e microeletrônica avançadas, Internet of Things (IoT) e

Inteligência Artificial (IA), que poderiam otimizar processos de análise e comparação de muitas informações.

O início do termo Digital Twin (DT) é sinteticamente conceituado como uma representação virtual de um objeto físico, com suas origens no campo da gestão do ciclo de vida do produto [26].

Posteriormente, o conceito foi expandido por Grieves com base em três componentes-chave para caracterizar um DT: (1) um produto físico; (2) uma representação virtual desse produto; e (3) as conexões de dados bidirecionais que alimentam dados da representação física para a virtual, e informações e processos da representação virtual para a física [27].

No caso de aplicações ao Patrimônio Cultural Construído, os dados do ambiente real podem ser obtidos por meio de sensores de monitoramento. Isso porque o acompanhamento das CH pode ser compreendido como um processo de aquisição de dados [28]. Como exemplo de aplicações de métodos não destrutivos, pode-se citar um estudo que caracterizou por medições indiretas com ultrassom em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços da Igreja de Nossa Senhora do Rosário dos Pretos em Aracati–CE, Brasil [29].

No entanto, os desafios recentes para a integração de sensores com um modelo DT surgem a partir de resoluções espaço-temporais [30]; ou seja, exige a integração bem sucedida de sensores de diferentes capacidades, frequências de leitura, acurácias, localizações e as interdependências entre grupos e redes [31].

Na perspectiva do gradual preenchimento destas lacunas, o desenvolvimento de ferramentas computacionais analíticas e avançadas com DT torna-se extremamente necessário para o monitoramento de ativos na fase de Operação e Manutenção. Fundamentado nisso, é possível inferir que a possibilidade de transformar um processo de inspeção tradicional, baseado em observações no seu lugar original, em uma inspeção virtual baseada num modelo DT e em técnicas computacionais avançadas de análise de dados, poderia contribuir significativamente para um diagnóstico mais eficiente e completo.

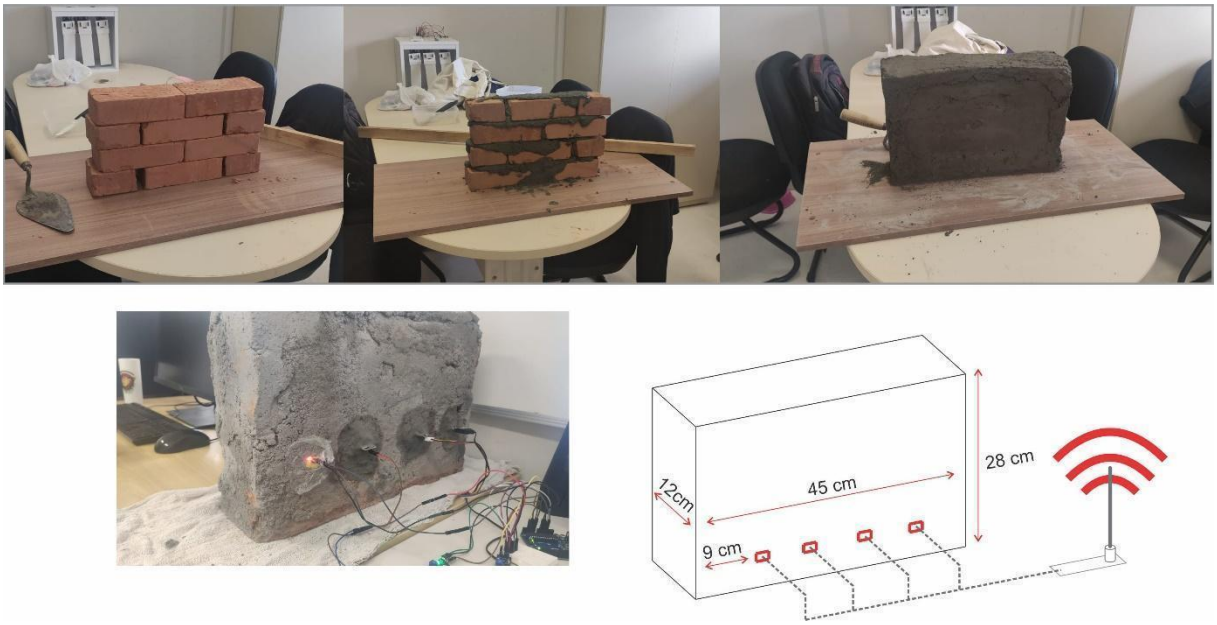
DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Para avaliar a viabilidade de usar sensores de umidade capacitivos como recurso de coleta de dados de uma parede de construções históricas, o presente estudo procura um protótipo de um gêmeo digital para que, futuramente, o experimento possa ser ampliado e se tornar uma ferramenta de monitoramento para bens culturais edificados. Para a criação do modelo, uma série de tarefas foi executada, como: (1) a escolha e materialização de uma parede para testes; (2) a construção da parte eletrônica, cujo objetivo é coletar e transmitir dados; (3) o desenvolvimento do ambiente digital para a leitura e tratamento dos dados; e, por fim (4), o estudo dos dados, analisando, possíveis aplicações e mudanças.

Para dar início ao experimento, foi realizado um estudo para seleção do local de instalação dos sensores. Devido ao caráter experimental da pesquisa, optou-se pela construção de um trecho de alvenaria para simular uma edificação histórica, para não causar danos a uma edificação real em caso de falha.

Após selecionar os materiais, é iniciada a construção da parede onde serão instalados os detectores de umidade. Esta foi executada com tijolos cerâmicos maciços, complementados com argamassa cimentícia -com traço 1:8 — 1 parte de cimento para 8 de terra. Ao final, a parede apresentou uma altura de 28 cm de altura, 45 cm de comprimento e 12 cm de largura. Para encaixar os sensores, foram feitas quatro perfurações, afastadas aproximadamente 9 cm uns dos outros e dos limites. A figura 01 mostra como a parede foi construída e um esquema com as medidas.

Figura 1: Processo de construção da parede e encaixe dos sensores.



Fonte: os autores.

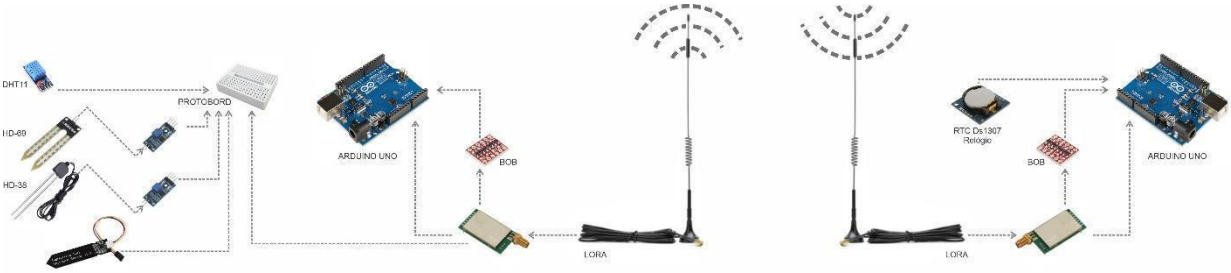
Além da construção da parede, o protótipo com a leitura da umidade e a captação dos sinais pelo rádio foi desenvolvido a partir da utilização de placas de prototipagem eletrônica e um módulo de radiofrequência (LoRa). O primeiro, que une um conjunto de sensores por meio de uma placa de prototipagem eletrônica e envia o sinal por rádio, foi utilizado. Os sensores utilizados para a medição foram:

- O DHT11, um sensor de temperatura e umidade do ar, pode medir temperaturas de 0 °C a 50 °C com precisão de 2 °C e a umidade do ar entre 20% e 90% com uma precisão de 5%.
- Os sensores HD-69 e HD-38, para medir a umidade de solo resistivo, são compostos por uma sonda condutora que atua como um resistor variável — potenciômetro.
- O último sensor, o capacitivo, mede as alterações na capacitância — qualidade de um sistema de armazenar carga elétrica quando há uma diferença de

potencial. Quando o dielétrico (material que dificulta a passagem da corrente elétrica) entra em contato com umidade, a constante dielétrica do material varia segundo a quantidade de umidade.

Os dados coletados por esses sensores são transmitidos por meio de transmissões de rádio utilizando o protocolo de comunicação LoRa, uma tecnologia de rede ampla e de baixa potência, por meio do módulo E32-91530T da Ebyte. O módulo opera na frequência 915 MHz, podendo atingir até 8 Km, utilizando o protocolo de comunicação serial RX/TX. Cabe ressaltar, que a transmissão em rádio também foi escolhida por não haver livre acesso a redes Wi-Fi da instituição e das proximidades. A figura 2 apresenta um esquema simplificado dos sensores e seu funcionamento.

Figura 2: Uma simplificação do funcionamento do protótipo.



Fonte: os autores.

Os dados tratados são armazenados e salvos em um computador externo para, depois, serem enviados para um programa de modelagem paramétrica e, então, serem ajustados. No presente experimento, optou-se por não transmitir dados diretamente para o computador e programa que realizará o tratamento de dados, uma vez que os protótipos continuam em fase de testes. O objetivo é prevenir falhas e perdas de dados devido a problemas externos ao experimento. Devido à segurança dos testes, a parede e o computador empregados foram mantidos em um ambiente controlado em um laboratório no campus universitário.

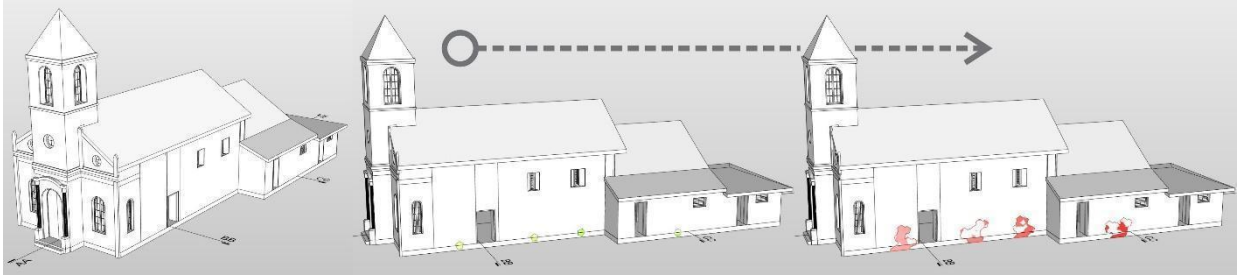
A partir do momento em que os dados são enviados para o computador, estes são abertos no programa Rhinoceros 3D [32] para serem desenvolvidos no componente paramétrico Grasshopper [33]. Para os dados serem processados no programa, é usado um plugin para o Grasshopper que permite a interpretação das informações geradas pelos sensores, o Firefly [34]. O plugin também pode ser usado futuramente para receber as informações por radiofrequência, dispensando a necessidade de um terceiro computador e permitindo o acompanhamento em tempo real das leituras dos sensores.

No Firefly, as informações são transformadas em “strings”, organizados separando os dados numéricos referentes à data e hora dos que descrevem os leitores. Essas bases são repassadas para uma programação desenvolvida no Grasshopper que mostra, em uma modelagem arquitetônica em BIM, o progresso da umidade em quatro pontos. Cada um desses pontos representa um dos sensores testados.

Para a visualização dos dados, uma construção que representa um patrimônio cultural construído foi recriada, a Igrejinha da Universidade Federal Santa Catarina — UFSC. A

construção, de 1859, é relevante no cenário local, fazendo parte de um complexo de três edificações de valor histórico que estão próximas ao espaço da universidade [35]. A modelagem em BIM foi feita por meio do programa VisualArq [36], possibilitando uma conexão direta entre alguns de seus componentes com o Grasshopper. Dessa forma, foi possível discriminar um ponto qualquer para exemplificar o aumento da umidade, visto na edificação, que varia de tamanho e cor segundo a leitura dos dados disponibilizados pelos sensores. A figura 3 apresenta a modelagem da Igrejinha da UFSC e um teste para ver o tratamento dos dados transmitidos pelos sensores.

Figura 3: Modelagem em BIM da Igrejinha da UFSC e o teste para o tratamento dos dados.



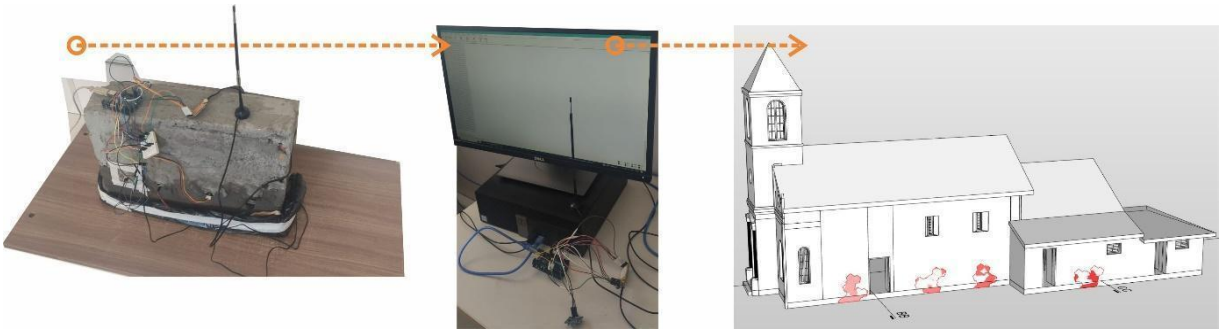
Fonte: os autores.

Após o desenvolvimento da programação, o teste principal é iniciado com a transmissão dos dados da parede para um primeiro computador, e, logo após, a análise e a transmissão dos dados. O protótipo foi fixado em um suporte rígido, com os sensores ligados e transmitindo os dados por uma semana. O objetivo era determinar se haveria uma estabilização da leitura após a secagem da argamassa. Depois de cerca de três dias, os valores permaneceram os mesmos para os quatro sensores. Os testes continuaram com a parede seca, a fim de confirmar se a transmissão por rádio estava funcionando seguramente. Após esta etapa inicial, a seção de parede foi colocada sobre um tecido protegido por plástico para permitir a adição de água sem a possibilidade de perda de umidade. A partir do momento em que o protótipo foi molhado, os dados foram armazenados em um arquivo TXT. Ao tecido foi adicionada água até que a leitura se estabilize novamente ou novas alterações significativas nas leituras. A partir deste momento, a proteção de plástico e o tecido foram retirados para a parede secar gradualmente e, assim, as medições retornassem ao ponto inicial.

Os gráficos devem apresentar essa umidificação da estrutura até o terceiro dia e, logo após, uma diminuição da leitura. Para evitar interferências no experimento externo, todo o sistema foi montado na parte interna do laboratório. O experimento foi realizado durante cinco dias úteis, no mês de abril de 2024. Nos três primeiros dias, o tecido foi umedecido e, posteriormente, seco sem interferência.

Durante esse tempo, a transmissão de dados se manteve, registrando se a parede estava absorvendo umidade ou não. Após a coleta de dados, esses foram enviados para a programação paramétrica para verificar se os sensores apresentaram um funcionamento adequado, registrando os dados cronológicos e de leitura. A figura 4 exemplifica a aplicação do teste inicial do protótipo, com a captação e transmissão das leituras dos sensores e o recebimento e tratamento dessas informações.

Figura 4: Amostra do mecanismo eletrônico do protótipo e o modelo que trata as informações.



Fonte: os autores.

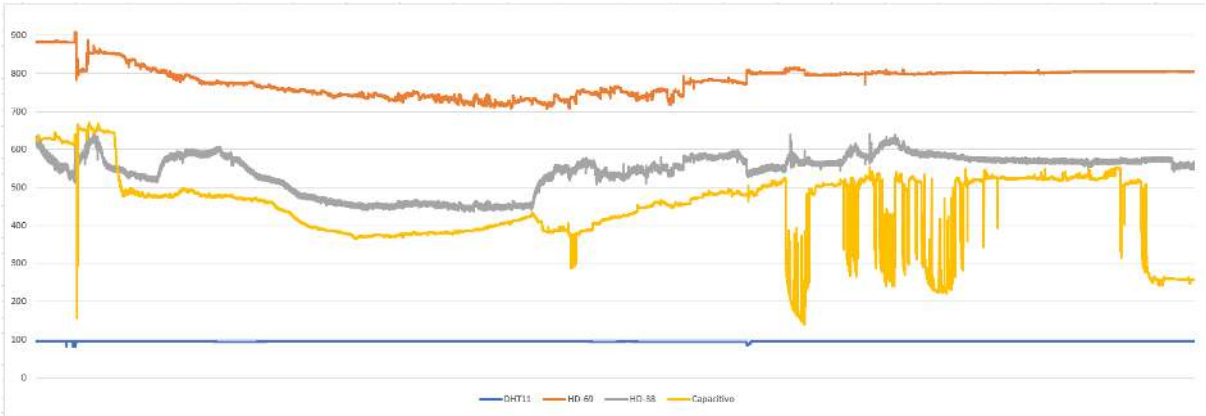
RESULTADOS

A análise dos dados coletados mostrou resultados orientados ao funcionamento dos sensores e do protótipo geral, mas também sobre as melhorias que podem ser feitas para minimizar os erros encontrados nesse primeiro teste. Em relação aos dados quantitativos e ao seu tratamento mais conciso, mediante gráficos, foi possível identificar erros na leitura da umidade e na transmissão dos dados. O sensor com mais variações que não condizem com o cenário montado para os testes foi o sensor capacitivo, que apresentou variações significativas após o terceiro dia do experimento — período em que a estrutura parou de umedecer. Outro sensor que não apresentou resultados satisfatórios nos testes foi o DHT-11, que, ao ser instalado na parede, com uma esponja para coletar a umidade do ar, atingiu o seu máximo em poucos instantes e permaneceu assim até o final do teste, apresentando uma variação pequena e insignificante em relação às outras leituras.

Os HD-69 e HD-36 apresentaram resultados mais verossímeis devido às variações provocadas pela parede ao diminuir sua tensão elétrica, indicando que a umidade estava aumentando. No terceiro dia, a umidade diminuiu e estabilizou-se, seguindo uma tendência em suas leituras. A figura 5 apresenta os dados dos 4 sensores coletados ao longo dos 5 dias do teste.

De todos os dados coletados, alguns poucos foram perdidos devido a fatores externos — como a qualidade dos computadores utilizados — que impediram o salvamento em horários específicos no final do quarto dia e início do quinto. A falha pode também ter alguma responsabilidade pela inconstância na coleta de dados.

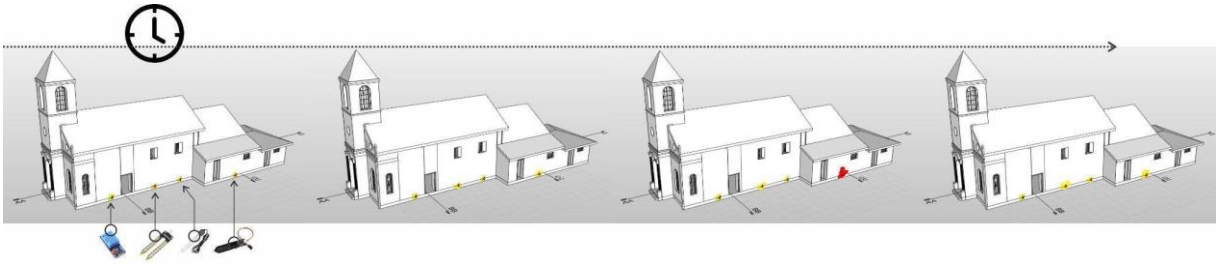
Figura 5: Dados coletados, transmitidos e salvos pelo protótipo.



Fonte: os autores.

Outro resultado foi o tratamento dos dados salvos repassados para a programação desenvolvida no Grasshopper. O programa mostrou as variações coletadas pelos sensores de umidade. Essa ação não ocorreu simultaneamente à leitura dos dados, mas, com o progresso de mais testes, pode ser incorporada, permitindo que os dados coletados sejam enviados para um computador com conexão direta ao receptor de rádio. A figura 6 mostra como as manchas de umidade mudam de tamanho e cor conforme a leitura.

Figura 6: Amostra do tratamento dos dados no modelo virtual.



Fonte: os autores.

CONCLUSÕES

O protótipo de um gêmeo digital que monitora o patrimônio cultural construído obteve êxito em todas as fases do sistema, incluindo a coleta de informações, transmissão, análise e tratamento de dados [37; 38]. Dessa forma, o conjunto eletrônico desenvolvido foi capaz de, por meio de sensores, medir a umidade de uma parede de material semelhante à de patrimônios culturais edificados. Transmitir as leituras pelo sinal de rádio para um computador e, depois, tratar e analisar as alterações físicas que ocorreram na parede. Após cumprir essas etapas, o sistema de medição mostrou-se promissor para aprofundar a investigação, para ampliar a capacidade de leitura e transmissão de informações, podendo ser usado em testes em construções históricas reais. Entretanto, cabe ressaltar que com o desenvolvimento do experimento, mesmo se mostrando potencialidades em relação ao baixo custo, o

emprego desse monitoramento acaba por ser invasivo a construção, devido às perfurações necessárias em pontos de seus fechamentos.

Utilizando diferentes sensores com técnicas de funcionamento distintas, foi viável avaliar os que estavam funcionando corretamente, uma vez que, embora a variação da porcentagem de umidade a ser identificada possa variar devido à materialidade da parede, o comportamento dos medidores tende a ser semelhante quando estão próximos uns dos outros. No entanto, isso não ocorreu com o DHT11, que, logo após ser instalado na parede, registrou o seu limite de medição e não variou mais, ou apresentou variações não condizentes com o esperado. Ao contrário dos outros, HD-69, HD-38 e sensor capacitivo, que, ao longo do experimento, registraram constantemente o aumento da umidade.

Dessa forma, a continuação da pesquisa e a expansão do protótipo para um modelo mais próximo de um gêmeo digital deve apresentar melhorias direcionadas ao uso e instalação dos sensores e ao monitoramento em tempo real dos dados captados. É possível ampliar o estudo ao monitorar uma edificação histórica real, instalando uma malha na parte superior e inferior da parede, a fim de monitorar as alterações físicas que estão ocorrendo na construção. Dessa forma, para futuros estudos, é necessário ampliar os experimentos na camada de coleta e tratamento de dados, para que, ao contrário do protótipo, possa-se comparar os dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catariana -UFSC e ao Grupo de Modelagem Avançada da UFSC pelo espaço concedido para o desenvolvimento da pesquisa. Além disso, agradecem à CAPES, FAPESC e à CASAN pelo apoio financeiro que possibilitou à aquisição das ferramentas e materiais necessários à pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] KÜHL, B. M. Preservação de Bens Culturais. **PosFAUUSP**, São Paulo, Brasil, v. 19, n. 31, p. 202-209, 2012. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v19i31p202-209

[2] HESS, M. et al. Informing Historical Preservation with the Use of Non-destructive Diagnostic Techniques: A Case Study at Ecab, Quintana Roo, Mexico. In: IOANNIDES, M. et al. (Eds.) **Digital Heritage - Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection.** EuroMed 2014. Lecture Notes in Computer Science, v. 8740. Springer, Cham, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-13695-0_67

[3] BRUNO S.; FATIGUSO, F. Building conditions assessment of built heritage in historic building information modeling. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 13, n. 1, p. 36-48, 2018. DOI: https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N1-36-48

[4] FREITAS, V. P.; GUIMARÃES, A. S. Tratamento da humidade ascensional no património histórico. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 1, p. 1-13, 2014.

[5] ALEXAKIS, E. et al. NDT as a monitoring tool of the works progress and the assessment of materials and rehabilitation interventions at the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 512–526, 2018.

[6] CARDINALE, T.; BALESTRA, A.; CARDINALE, N. Thermographic mapping of a complex vernacular settlement: the case study of Casalnuovo District within the Sassi of Matera (Italy). **Energy Procedia**, v. 76, p. 40-48, 2015.

[7] GARRIDO, I. et al. Algorithms for the automatic detection and characterization of pathologies in heritage elements from thermographic images. In: 27th CIPA International Symposium "Documenting the past for a better future", 1-5 September 2019, Ávila, Spain. **Anais [...]**. Ávila: ISPRS, 2019. p. 497-501.

[8] GEORGESCU, M. S. et al. Heritage and Climate Changes in Romania: the St. Nicholas Church of Densus, from Degradation to Restoration. **Energy Procedia**, v. 133, p. 76–85, 2017.

[9] KILIC, G. Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy. **Journal of Cultural Heritage**, v. 16, p. 526–535, 2015.

[10] LERMA, C. et al. Quantitative Analysis Procedure for Building Materials in Historic Buildings by Applying Infrared Thermography. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 54, n. 8, p. 601–609, 2018.

[11] DE FINO, M. et al. 'Augmented diagnostics' for the architectural heritage. **International Journal of Heritage Architecture**, v. 2, n. 2, p. 248-260, 2018. DOI: https://doi.org/10.2495/HA-V2-N2-248-260

[12] KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. A**utomation in Construction**, v. 21, p. 161-171, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.023

[13] GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Um panorama sobre o uso de nuvens de pontos para criação de modelos BIM. In: II Seminário Nacional de Documentação do Patrimônio Arquitetônico com o Uso de Tecnologias Digitais, 2012, Belém. **Anais […]** Belém: ARQ.DOC, 2012, p. 1-12.

[14] SALGADO, M. S.; CANUTO, C.; RIBEIRO, L. Possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais na preservação do patrimônio arquitetônico. In: RIBEIRO, R. T. M.; NÓBREGA, C. C. L. (Orgs.) **Projeto e Patrimônio: Reflexões e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Rio Book's, 2016.

[15] ASTORGA, J. Projeto de Restauração: Prática e modernidade. In: RIBEIRO, R. T. M.; NÓBREGA, C. C. L. (Orgs.) **Projeto e Patrimônio: Reflexões e Aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Rio Book's, 2016.

[16] TINOCO, J. E. L. Mapa de Danos – Recomendações Básicas. **Textos para Discussão - Série 2: Gestão de Restauro**, v. 43. Olinda: Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada (CECI), 2009.

[17] MERCURI, F. et al. Pulsed Thermography Applied to the Study of Cultural Heritage. **Applied Sciences**, v. 7, n. 1010, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/app7101010

[18] ICOMOS. **Charter for the Protection and Management of the Archaeological Heritage (1990)**. In: 9th General Assembly, International Committee for the Management of Archaeological Heritage (ICAHM), Lausanne, 1990.

[19] ICOMOS. **Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites (1996)**. In: 11th ICOMOS General Assembly in Sofia, Sofia, 1996.

[20] ICOMOS. **Charter on the Protection and Management of Underwater Cultural Heritage (1996)**. In: 11th ICOMOS General Assembly in Sofia, Sofia, 1996.

[21] DEL LAMA, E. A. **Estudos de Conservação em Pedra**. Tese (Livre-Docência em Mineralogia e Geotécnica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: https://doi.org/10.11606/T.44.2017.tde-21022017-095626

[22] LIÑÁN, C. R. et al. Application of Non-Destructive Techniques in the Inspection of Wooden Structures of Protected Buildings: The Case of Nuestra Señora de los Dolores Church (Isla Cristina, Huelva). **International Journal of Architectural Heritage**, v. 9, n. 3, p. 324-340, 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2013.771292

[23] SFARRA, S. et al. Santa Maria di Collemaggio Church (L'Aquila, Italy): Historical Reconstruction by Non-Destructive Testing Techniques. **International Journal of Architectural Heritage**. v. 9, n. 4, p. 367–390, 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/15583058.2013.794376

[24] TAVUKÇUOĞLU, A. Non-Destructive Testing for Building Diagnostics and Monitoring: Experience Achieved with Case Studies. **MATEC Web of Conferences**, v. 149, n. 01015, 2018. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901015

[25] VALERO, L. R.; SASSO, V. F.; VICIOSO, E. P. In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic buildings using non-destructive techniques. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, n. e00228, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00228

[26] JONES, D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 29, part A, p. 36–52, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002

[27] GRIEVES, M. (2015). **Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication. Acesso em: 12 abril 2024.

[28] MESQUITA, E. et al. Boletim Técnico 11 - Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas. **ALCONPAT**, p. 1-18, 2015. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1445.1606

[29] MESQUITA, E. et al. Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 172–180, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.011

[30] TOMKO, M.; WINTER, S. Beyond digital twins – A commentary. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 46, n. 2, p. 395-399, 2019. DOI: https://doi.org/10.1177/2399808318816992

[31] BOJE, C. et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, n. 103179, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

[32] MCNEEL, R. Associates. **Rhinoceros 3D modelling Software**. v. 5, 2014.

[33] RUTTEN, D.; MCNEEL, R. **Grasshopper 3D**. www.grasshopper3d.com. 2014.

[34] PAYNE, A.; JOHNSON, J. K. **Firefly. Go from Code to Nodes — and back**. 2015.

[35] VOIGT, A. F. Memória do Bairro Trindade em Florianópolis. **Revista Ágora (Florianópolis)**, v. 21, n. 43, p. 111-123, 2011.

[36] ASUNI (Barcelona). **VisualARQ 2: Flexible BIM**. 2024. Disponível em: https://www.visualarq.com/features/. Acesso em: 13 mar. 2024.

[37] DEMBSKI, F. et al. Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. **Sustainability**, v. 12, n. 6:2307, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12062307

[38] BATTY, M. Digital Twins. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 45, n. 5, p. 817–820, 2018. DOI: https://doi.org/10.1177/2399808318796416