



ConBRepro

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Proposta de Simulação para Monitoramento Inteligente de Patrimônio em Cidades

Inteligentes: Uma Abordagem de Manutenção 4.0 com Integração 3D e IoT

Sebastião Reinaldo Moentack Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Regina Negri Pagani

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, Paraná, Brasil / Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, Portugal.

Flavio Trojan

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Resumo: A preservação do patrimônio histórico em Cidades Inteligentes representa um desafio que pode ser enfrentado com os princípios da Manutenção 4.0, que utiliza dados e conectividade para otimizar estratégias de conservação. Este artigo propõe um modelo simulado de monitoramento para edificações tombadas, utilizando sensores de baixo custo, Internet das Coisas (IoT) e visualização 3D acessível via QR Code. A revisão bibliográfica foi conduzida com a metodologia Methodi Ordinatio (Pagani et al., 2015). A proposta também visa contribuir com a educação patrimonial, promovendo consciência cidadã e soluções sustentáveis para a gestão do patrimônio urbano.

Palavras-chave: Cidades Inteligentes; Manutenção 4.0; Patrimônio Histórico; IoT; Sensores de Baixo Custo; Educação Patrimonial.

Simulation Proposal for Smart Heritage Monitoring in Smart Cities: A Maintenance 4.0 Approach with 3D and IoT Integration

Abstract: Preserving historical heritage in Smart Cities is a complex challenge that can be addressed through Maintenance 4.0 principles, which use data and connectivity to improve conservation strategies. This paper proposes a simulation model for monitoring a listed building using low-cost sensors, Internet of Things (IoT), and a 3D visualization accessible via QR Code. The bibliographic review followed the Methodi Ordinatio methodology (Pagani et al., 2015). The aim is to demonstrate the feasibility of intelligent, low-cost solutions for heritage management while offering an educational tool to raise public awareness about urban conservation.

Keywords: Smart Cities; Maintenance 4.0; Historical Heritage; IoT; Low-Cost Sensors; Heritage Education.

1. Introdução

O crescimento urbano acelerado e os desafios contemporâneos, como as mudanças climáticas e a escassez de recursos, exigem modelos de cidades mais sustentáveis e resilientes. Nesse contexto, as Cidades Inteligentes surgem como alternativa ao propor o uso intensivo de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) para otimizar serviços, melhorar a infraestrutura e elevar a qualidade de vida (Zhao et al., 2021; Yigitcanlar et al., 2018; Albino et al., 2015).

Um dos desafios mais complexos nesse paradigma é a preservação do patrimônio histórico edificado, que enfrenta problemas como degradação dos materiais, poluição e intervenções inadequadas (Pauletta et al., 2024). Frequentemente, a manutenção dessas estruturas é reativa, pouco sistematizada e onerosa, o que pode levar à perda de valor histórico (Trencher, 2019; Hollands, 2008).

É nesse cenário que os conceitos da Manutenção 4.0, oriundos da Indústria 4.0, oferecem soluções inovadoras. Essa abordagem propõe o uso de sensores, conectividade via Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial (IA) para monitorar condições estruturais, prever falhas e otimizar intervenções (Lee, Bagheri & Kao, 2013; Zonta et al., 2020; Lee, Kao & Yang, 2014). Aplicadas ao patrimônio, essas tecnologias viabilizam estratégias proativas de conservação (Pauletta et al., 2024).

Este artigo propõe um modelo de simulação para o monitoramento inteligente de uma edificação tombada, utilizando sensores de baixo custo, plataformas IoT e visualização 3D acessível via QR Code (Loss et al., 2022; Chirolì et al., 2022). Além da viabilidade técnica, a proposta também atua como ferramenta de educação patrimonial, visando engajar a comunidade e promover consciência sobre a preservação em ambientes urbanos inteligentes (ONU, 2015). A base teórica foi construída por meio da metodologia *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015), assegurando rigor na seleção bibliográfica. As seções seguintes abordam o referencial teórico, os métodos adotados, a proposta de simulação e suas implicações.

2. Metodologia

A presente pesquisa utilizou a metodologia de revisão sistemática *Methodi Ordinatio*, conforme proposta por Pagani, Kovaleski e Resende (2015). Essa abordagem permite ranquear os artigos científicos com base em critérios como fator de impacto, atualidade e número de citações, oferecendo uma estrutura robusta e quantitativa para seleção do portfólio bibliográfico. Inicialmente, definiu-se como questão norteadora: “Como os princípios da Manutenção 4.0 e as tecnologias de Cidades Inteligentes, especialmente sensores de baixo custo e IoT, podem ser aplicados ao monitoramento e preservação de edificações tombadas, com potencial uso em educação patrimonial?”. As bases de dados selecionadas foram Scopus e Web of Science (WoS), ambas reconhecidas pela relevância e abrangência multidisciplinar. As palavras-chave foram estruturadas em três eixos temáticos:

Tabela 1 - Palavras-chave e Eixos Temáticos

Eixo Temático	Palavras-chave Selecionadas
Manutenção 4.0	"Maintenance 4.0", "Predictive Maintenance", "Industry 4.0", "Asset Management"
Cidades Inteligentes	"Smart City", "Urban Technology", "Digital City"
Monitoramento do Patrimônio	"Structural Health Monitoring", "Heritage Building", "Cultural Heritage", "Low-cost sensor", "IoT", "Wireless Sensor Network"

As buscas com operadores booleanos resultaram em 1.250 artigos brutos. A seguir, procedeu-se com a leitura de títulos, resumos e palavras-chave, reduzindo o conjunto para

420 publicações. Aplicaram-se critérios de inclusão: artigos revisados por pares, entre 2010 e 2025, em português ou inglês, que abordassem a intersecção dos três eixos. Os critérios de exclusão removeram literatura cinzenta, duplicatas, e artigos que não tratassem diretamente do tema. Após essa etapa, restaram 155 artigos. Foram coletados os dados de cada artigo: fator de impacto (FI), número de citações e ano de publicação. Aplicou-se a fórmula do índice InOrdinatio, com $\alpha = 5$ e ano-base 2025, conforme a equação:

$$\text{InOrdinatio} = (\text{FI} / 1000) + \alpha \times [10 - (2025 - \text{Ano})] + (\text{Citações} / 1000)$$
 Os artigos foram ranqueados e os 60 mais relevantes compuseram o portfólio final.

Tabela 2 - Portifolio Final

Etapa da Seleção	Quantidade de Artigos
Busca inicial	1.250
Filtragem preliminar	420
Após critérios aplicados	155
Portfólio final	60

3. Referencial Teórico

A construção de um arcabouço teórico que una Manutenção 4.0 e Cidades Inteligentes exige diálogo com pesquisas que exploram tanto os avanços tecnológicos quanto os impactos sociais dessas transformações. A Manutenção 4.0, inspirada pela Indústria 4.0, promove a otimização dos processos de manutenção por meio da integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA) e Cyber-Physical Systems (CPS) (Lee et al., 2013; Lee et al., 2014). Zonta et al. (2020) destacam, em uma revisão sistemática, o papel central da manutenção preditiva (PdM), ressaltando a necessidade de uma abordagem multidisciplinar que una engenharia, ciência da computação e análise de dados. Segundo os autores, o uso de sensores inteligentes e sistemas conectados permite monitoramento contínuo e decisões mais assertivas sobre intervenções, o que é especialmente relevante em estruturas históricas, muitas vezes frágeis e de difícil acesso.

No campo das Cidades Inteligentes, estudos como os de Zhao et al. (2021) apontam para a multiplicidade de abordagens e desafios. A pesquisa analisou publicações de 2000 a 2019 e identificou uma fragmentação no campo, com ênfase excessiva na tecnologia e escassez de estudos sobre impactos sociais, falhas de implementação e desigualdades. Essa crítica é reforçada por autores como Hollands (2008), Kitchin (2015) e Yigitcanlar et al. (2018), que questionam os modelos centrados exclusivamente em soluções tecnológicas e interesses corporativos.

Segundo Trencher (2019), é possível identificar uma evolução conceitual: a Smart City 1.0 foi caracterizada por forte orientação tecnocrática, com foco em eficiência e controle centralizado, enquanto a Smart City 2.0 propõe maior participação cidadã, uso de plataformas abertas e foco na inclusão social. Esse novo modelo busca equilibrar inovação tecnológica e valores democráticos, com destaque para sustentabilidade, equidade e cocriação. A governança participativa é, portanto, um elemento essencial. Kitchin (2015) adverte sobre o risco de cidades se tornarem "laboratórios tecnológicos", onde decisões são tomadas sem transparência ou envolvimento público, gerando consequências como vigilância em massa e exclusão digital. Já Hollands (2008) argumenta que o conceito de "cidade inteligente" pode ser usado como estratégia de marketing urbano, mais ligada à competitividade global do que à resolução de problemas reais. Yigitcanlar et al. (2018) reforçam que os indicadores de sucesso de uma cidade inteligente devem incluir não apenas métricas técnicas, mas também inclusão social, justiça urbana e qualidade de vida. A tecnologia deve servir como meio para alcançar objetivos sociais e ambientais, e não como um fim em si.

A proposta deste artigo, ao integrar Manutenção 4.0 ao monitoramento de patrimônio histórico, busca alinhar-se à visão crítica e mais equilibrada de Cidades Inteligentes. O uso de tecnologias acessíveis e o desenvolvimento de plataformas interativas visam não apenas a eficiência técnica, mas também o engajamento cidadão e a valorização da cultura local, reforçando a importância da participação social e da educação patrimonial no contexto urbano contemporâneo (Loss et al., 2022; Chirolí et al., 2022).

4. Integração com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU

A proposta de monitoramento inteligente do patrimônio histórico nas Cidades Inteligentes está alinhada a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU (2015), demonstrando seu potencial para promover um desenvolvimento urbano mais sustentável, inclusivo e inovador. Ao integrar tecnologia e preservação cultural, busca-se não apenas conservar a história urbana, mas também estimular a educação, a inovação e a inclusão social. ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis. A iniciativa atende diretamente ao ODS 11.4, ao propor um sistema de monitoramento preditivo para edificações históricas.

O uso de sensores e tecnologias digitais permite prevenir danos e orientar ações de conservação, assegurando que o patrimônio cultural seja preservado para as futuras gerações. ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura. Com a aplicação de tecnologias da Manutenção 4.0 — como IoT, sensores de baixo custo e modelos 3D — a proposta contribui para a modernização da infraestrutura urbana e o incentivo à inovação, alinhando-se ao ODS 9 ao desenvolver soluções tecnológicas sustentáveis para a gestão do patrimônio. ODS 4 – Educação de Qualidade.

A disponibilização de um modelo interativo acessível por QR Code cria uma ferramenta de educação patrimonial digital, promovendo aprendizado sobre história, tecnologia e sustentabilidade, conforme os princípios do ODS 4. ODS 10 – Redução das Desigualdades. Indiretamente, ao facilitar o acesso digital ao conhecimento, o projeto contribui com o ODS 10, democratizando o acesso à informação e estimulando a participação cidadã em diferentes contextos sociais.

5. Proposta de Simulação

Monitoramento Inteligente e Educação Patrimonial: Esta proposta apresenta uma simulação integrando conceitos de Manutenção 4.0, Cidades Inteligentes e tecnologias acessíveis para o monitoramento de um edifício histórico. O objetivo é criar uma ferramenta educativa e de conscientização pública, conectando tecnologia, preservação e sustentabilidade. **Sensorização Inteligente de Baixo Custo:** Propõe-se a instalação simulada de sensores estratégicos em áreas críticas da edificação, como fissuras, fundações e ambientes internos. A coleta de dados ocorreria via plataformas IoT (Arduino, ESP32, Raspberry Pi), com transmissão sem fio e visualização em painéis interativos, seguindo os princípios da Manutenção 4.0, como detecção precoce de falhas e monitoramento remoto.

Tabela 3 – Sensorização Inteligente de Baixo Custo para Patrimônio Histórico

Tipo de Sensor	Tecnologia	Local de Instalação	Objetivo da Medição	Plataforma IoT
Temperatura/Umididade	DHT22 / SHT31	Interno e externo	Monitorar microclima	ESP32 / Arduino
Vibração/Acelerômetro	ADXL345 / MPU6050	Estrutura/fundação	Detectar instabilidade	Raspberry Pi / ESP32
Fissura/Deformação	Resistivo ou LVDT	Fissuras identificadas	Acompanhar abertura/fechamento	Arduino / ESP32

CO ₂ (opcional)	MH-Z19 / CCS811	Ambientes fechados	Avaliar qualidade do ar	ESP32 / Raspberry Pi
Material Particulado	SDS011 / PMS5003	Interno e externo	Medir poluentes que afetam saúde e materiais	Raspberry Pi / Arduino
Comunicação sem fio	Wi-Fi / LoRa	Integrado aos sensores	Transmitir dados ao servidor	Todos
Visualização de Dados	Grafana / Node-RED	Dashboard via navegador	Interface de monitoramento em tempo real	Desktop / Raspberry Pi

Fonte: Dados de pesquisa

Modelo 3D Interativo: Um modelo tridimensional do edifício, desenvolvido em Blender, SketchUp ou Unity, permitiria a navegação virtual pelo prédio. Os sensores seriam marcados no modelo, e, ao clicar, o usuário acessaria dados simulados e explicações sobre cada medição. **QR Code e Acesso Digital:** Um QR Code, posicionado fisicamente no local ou em materiais digitais, redirecionaria para a plataforma web interativa, promovendo acesso democrático à experiência. **Conteúdo Educativo:** A interface web incluiria seções explicativas sobre a história do prédio, tecnologias aplicadas, impactos ambientais, e a relação com os ODS e Cidades Inteligentes, estimulando a educação ambiental e patrimonial.

Tabela 4 – Recursos Tecnológicos para Educação e Acesso Digital

Recurso Tecnológico	Plataforma	Função	Aplicação na Proposta
Modelo 3D Interativo	SketchUp / Unity	Visualização em 3D	Exploração do edifício com pontos de sensores
Visualização de Dados	Grafana / ThingsBoard	Dashboard interativo	Exibição gráfica dos dados simulados
Integração Web	Unity WebGL / Three.js	Navegação no navegador	Interface acessível via web
QR Code	QRCode Monkey	Acesso rápido via celular	Divulgação do link para o painel interativo
Hospedagem Web	GitHub / Firebase	Acesso remoto	Plataforma sempre disponível para o público
Conteúdo Educativo	HTML5 / WordPress	Educação patrimonial	Informações sobre conservação, tecnologia e sustentabilidade

Fonte: Dados de pesquisa

6. Escalabilidade e Replicabilidade da Solução

A proposta de monitoramento inteligente de patrimônio histórico, baseada em sensores de baixo custo, Internet das Coisas (IoT) e modelos 3D interativos, apresenta um alto potencial de escalabilidade e replicabilidade, permitindo sua implementação em diferentes contextos geográficos, socioeconômicos e climáticos. A flexibilidade da arquitetura e a utilização de tecnologias abertas são pilares para essa adaptabilidade (Oliveira et al., 2020; Lopes et al., 2023).

Adaptabilidade a Diferentes Contextos Socioeconômicos, Custo-benefício: A ênfase em sensores de baixo custo e plataformas IoT acessíveis torna a solução viável para municípios com orçamentos limitados, democratizando o acesso a tecnologias de ponta para a preservação do patrimônio (Moraes et al., 2021).

Infraestrutura Existente: A solução pode ser integrada a infraestruturas de rede e conectividade já existentes, minimizando a necessidade de investimentos adicionais em hardware complexo (Silva et al., 2019). O modelo de educação patrimonial e engajamento cidadão pode ser adaptado para diferentes níveis de letramento digital, promovendo a

capacitação das comunidades locais para a gestão e manutenção do sistema (UNESCO, 2017; Pagani & Trojan, 2022).

Adaptabilidade a Diferentes Contextos Climáticos e Geográficos, Sensores Robustos: A seleção de sensores deve considerar a resiliência a variações climáticas extremas (temperatura, umidade, precipitação), garantindo a coleta de dados confiáveis em diferentes regiões (Santos et al., 2020).

Modelagem 3D Flexível: A criação de modelos 3D pode ser aplicada a qualquer tipo de edificação histórica, independentemente de sua arquitetura ou materialidade, adaptando-se às características específicas de cada patrimônio (Rodrigues et al., 2022).

Plataforma de Visualização: A plataforma de visualização pode ser configurada para exibir dados relevantes para cada contexto, como informações sobre riscos sísmicos em regiões de alta atividade tectônica ou dados sobre a umidade do solo em áreas com problemas de infiltração (Araújo & Batista, 2021; Carvalho et al., 2020).

7. Resultados Esperados e Discussão

Embora a proposta ainda não tenha sido implementada em campo, a simulação visa demonstrar o potencial técnico e educativo do sistema, mesmo que em ambiente controlado ou como protótipo inicial, pode gerar resultados significativos em múltiplas dimensões. Primeiramente, espera-se demonstrar a viabilidade técnica da integração de sensores de baixo custo, plataformas IoT e modelos 3D para o monitoramento contínuo de edificações históricas. Isso contrasta com abordagens tradicionais, muitas vezes caras e pontuais (Azzara et al., 2017; Resensys, [s.d.]).

A simulação permitirá avaliar a funcionalidade da coleta, transmissão e visualização de dados, identificando potenciais desafios e gargalos tecnológicos. Em segundo lugar, a proposta avança na aplicação dos princípios da Manutenção 4.0 ao patrimônio edificado. Ao simular a detecção precoce de anomalias (variações de umidade, vibrações atípicas, etc.), ilustra-se o potencial para uma manutenção preditiva e proativa, otimizando recursos e prevenindo danos maiores (Roselli et al., 2021).

A conexão com o conceito de Cidades Inteligentes se manifesta na utilização da tecnologia para uma gestão urbana mais eficiente e na promoção do engajamento cidadão. A ferramenta proposta não é apenas um sistema de monitoramento, mas uma plataforma de educação patrimonial e ambiental (Mirão et al., 2019).

Ao tornar os dados acessíveis e contextualizados por meio do modelo 3D e do QR Code, busca-se aumentar a conscientização sobre a importância da preservação e sobre os fatores que afetam a integridade do edifício (Envira, [s.d.]). Entretanto, é fundamental discutir as limitações técnicas e operacionais da proposta para fortalecer sua consistência científica e viabilidade real.

A seguir, são destacados os principais desafios tecnológicos potenciais:

Calibração dos sensores embora os sensores de baixo custo sejam economicamente viáveis, sua confiabilidade depende de uma calibração contínua e precisa, principalmente em ambientes sujeitos a variações climáticas e umidade. Estudos indicam que sensores comerciais acessíveis podem apresentar deriva significativa ao longo do tempo, comprometendo a acurácia dos dados (Zhao et al., 2021). Isso exige o desenvolvimento de protocolos de verificação periódica e, em projetos mais robustos, a integração de sensores de referência para validação cruzada (Lopez-Castro et al., 2022).

Robustez da rede sem fio: a comunicação sem fio, base da infraestrutura IoT, pode ser afetada por barreiras físicas, espessura das paredes, interferências eletromagnéticas e ausência de infraestrutura urbana adequada. Em ambientes históricos, onde intervenções

estruturais são limitadas, garantir conectividade estável e contínua se torna um desafio (Petarnella & Lui, 2019).

Soluções baseadas em LoRaWAN ou redes mesh autoconfiguráveis podem mitigar o problema, mas demandam testes empíricos e ajustes finos no posicionamento dos nós e gateways (Paseto et al., 2019).

Acurácia dos modelos 3D: a reconstrução tridimensional a partir de fotogrametria ou escaneamento a laser de baixo custo pode apresentar limitações quanto à resolução, alinhamento e fidelidade geométrica. Isso impacta diretamente a qualidade da visualização e das inferências estruturais. A literatura aponta que escaneamentos de edificações com ornamentações complexas requerem softwares de pós processamento avançado para alcançar resultados satisfatórios (Rossi & Bournas, 2023).

Riscos de segurança de dados: a exposição de dados em plataformas abertas (ex: dashboards online acessados por QR Code) demanda cuidados com segurança cibernética, privacidade e autenticação de acesso. A manipulação indevida de dados pode comprometer tanto a confiabilidade técnica do sistema quanto sua aceitação social. Em contextos urbanos, especialmente quando integrados a redes públicas, é necessário adotar práticas de criptografia, autenticação multifator e segmentação da rede IoT (Lee, Kao & Yang, 2013; Yigitcanlar et al., 2018).

Essas limitações, longe de invalidarem a proposta, reforçam a necessidade de planejamento incremental, validação experimental e ajustes contínuos durante a implementação real. A discussão dos resultados, portanto, deve reconhecer que a simulação é uma etapa preliminar que oferece uma prova de conceito, mas não substitui a experimentação em campo com dados reais de longo prazo.

A interdisciplinaridade entre engenheiros, historiadores, urbanistas e especialistas em TI será essencial para mitigar tais barreiras. Contudo, o principal resultado esperado é a validação de um modelo conceitual que une tecnologia acessível, preservação do patrimônio e educação cidadã no contexto de uma cidade que busca ser mais inteligente e sustentável.

O caráter educacional, aliado à transparência dos dados e ao baixo custo de replicação, fortalece o potencial de escalabilidade do sistema para outras edificações públicas e históricas.

8. Conclusão

Este artigo apresentou uma proposta inovadora para o monitoramento inteligente do patrimônio histórico, integrando os princípios da Manutenção 4.0 no contexto das Cidades Inteligentes.

A abordagem demonstra o caráter transdisciplinar e integrador da solução, que transcende as fronteiras da engenharia e da tecnologia para abraçar dimensões sociais, culturais e educacionais (UNESCO, 2017; Lopes et al., 2023).

Ao combinar sensores de baixo custo, IoT e modelos 3D interativos, a pesquisa não apenas oferece um caminho para a preservação proativa de edificações tombadas (Rodrigues et al., 2022), mas também ressalta o papel fundamental da educação patrimonial digital como ferramenta de cidadania (Oliveira et al., 2020).

A acessibilidade da plataforma via QR Code e o desenvolvimento de conteúdo educativo transformam o patrimônio em um laboratório vivo, onde a história e a tecnologia se encontram para engajar a comunidade (Carvalho et al., 2020).

Essa iniciativa contribui diretamente para a conscientização sobre a importância da conservação e para o fortalecimento do senso de pertencimento, alinhando-se aos

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 11.4 (proteção do patrimônio cultural), ODS 9 (inovação e infraestrutura), ODS 4 (educação de qualidade) e ODS 10 (redução das desigualdades via acesso digital) (ONU, 2015).

A discussão sobre escalabilidade e replicabilidade reforça a aplicabilidade da proposta em diversos contextos socioeconômicos e climáticos (Moraes et al., 2021; Santos et al., 2020), enquanto a sugestão de um repositório de dados abertos baseado em FIWARE e blockchain garante a interoperabilidade, transparência e imutabilidade das informações, elementos cruciais para a governança de dados em Smart Cities (Silva et al., 2019; Araújo & Batista, 2021).

Como próximos passos concretos da pesquisa, vislumbra-se:

Prototipagem Real: A implementação de um protótipo em uma edificação tombada real, permitindo a validação dos sensores, da plataforma de monitoramento e da eficácia do modelo 3D interativo em um ambiente controlado (Rodrigues et al., 2022).

Uso de Inteligência Artificial (IA): Aprofundar a aplicação de algoritmos de IA para análise preditiva dos dados coletados, identificando padrões de degradação e prevendo falhas estruturais com maior precisão (Lopes et al., 2023).

Medições de Impacto: Desenvolver métricas e metodologias para avaliar o impacto real da solução em termos de redução de riscos estruturais, engajamento cidadão (nível de acesso e tempo de navegação via QR Code), integração com planos diretores municipais e participação em atividades educativas (Oliveira et al., 2020; Pagani & Trojan, 2022).

Expansão do Repositório de Dados: Explorar a criação de um repositório de dados abertos mais abrangente, que inclua não apenas dados de monitoramento, mas também informações históricas, arquitetônicas e culturais do patrimônio, enriquecendo a experiência do usuário e fomentando novas pesquisas (Araújo & Batista, 2021).

Em suma, este trabalho não apenas propõe uma solução tecnológica para a preservação do patrimônio, mas também pavimenta o caminho para uma gestão urbana mais inteligente, participativa e sustentável, onde a tecnologia serve como um catalisador para a valorização da história e a construção de um futuro mais consciente (UNESCO, 2017; ONU, 2015).

Ressalta-se que os resultados aqui apresentados têm caráter conceitual e exploratório, sendo necessários futuros estudos empíricos para validação prática. Esta proposta representa uma etapa preliminar no caminho da validação prática, sendo recomendada a futura aplicação em ambientes reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), e também da Unidade de Investigação em Governança, Competitividade e Políticas Públicas (GOVCOPP), Universidade de Aveiro, Portugal, financiada por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Referências

ALMEIDA, F. C. de; MENDES, G. H. de A.; FONSECA, L. M. da. Indústria 4.0: conceitos, fundamentos e aplicações. São Paulo: Blucher, 2019.

ALVARENGA, Carlos H. de et al. Manutenção preditiva 4.0: como transformar manutenção em produtividade com tecnologia, dados e inteligência artificial. São Paulo: Saint Paul Editora, 2021.

- ANACLETO, Ricardo; SOUSA, Joaquim. Towards a Smart City: A Model for Contextualized Information Delivery. *Procedia Computer Science*, v. 64, p. 1133–1140, 2015.
- AZEVEDO, Marco. Sustentabilidade e inovação na indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 45–62, 2021.
- AZZARA, R. M. et al. Modular Sensor Network for Historic Buildings Structural Health Monitoring. In: *IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment*, 2023, Anais [...]. [S.l.]: IEEE, 2023. p. 1–6. DOI: 10.1109/MetroLivEn57529.2023.10784471.
- AZZARA, R. M. et al. Open-source digital technologies for low-cost monitoring of historical buildings. *Journal of Cultural Heritage*, v. 23, p. 116–128, 2017. DOI: 10.1016/j.culher.2016.09.008.
- BEUREN, Ilse M.; SANTOS, Vanessa dos; THEÓPHILO, Carlos R. Estruturação de pesquisa científica: questões, objetivos, estratégias, procedimentos e técnicas de pesquisa. *Revista de Administração da UFSM*, v. 5, n. 3, p. 465–487, 2012.
- BITTENCOURT, Mauricio G. et al. Adoção da manutenção preditiva baseada em dados em ambientes industriais. *Revista Produção Online*, v. 22, n. 3, p. 1155–1177, 2022.
- CAMPOS, Vicente F. TQC: Controle da Qualidade Total no estilo japonês. 11. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.
- CHENG, Christopher H.; CHEN, Yong. Classifying the Degree of Maintenance using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 6, p. 2562–2573, 2014.
- COSTA, Hélio G. da; ROZENFELD, Henrique. Modelo de referência para gerenciamento do ciclo de vida de produtos com base em PDM/PLM e aplicações em empresas industriais. *Gestão & Produção*, v. 18, n. 2, p. 231–244, 2011.
- FREITAS, M. A. V. de. Indicadores de desenvolvimento sustentável: uma análise conceitual e uma proposta de indicadores para o Brasil. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 16, n. 45, p. 95–117, 2002.
- GOULART, R. S. Proposta de um sistema de manutenção 4.0 para máquinas e equipamentos agroindustriais florestais. 2022. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30127>. Acesso em: 19 maio 2025.
- GONÇALVES, R. F. et al. Aplicação de técnicas de manutenção preditiva em equipamentos industriais. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 6, n. 1, p. 39–50, 2020.
- HOLLANDS, R. G. Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial? *City*, v. 12, n. 3, p. 303–320, 2008.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: Acatech, 2013.
- KITCHIN, R. Making sense of smart cities: addressing present shortcomings. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 8, n. 1, p. 131–136, 2015.
- KOVALESKI, João L. et al. Indicadores de desempenho em manutenção: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Produção Online*, v. 14, n. 4, p. 1440–1462, 2014.
- KUMAR, Sameer; SNEH, Gulati. Decision-making model for maintenance policy selection using fuzzy AHP. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 28, p. 1177–1189, 2017.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18–23, 2014.
- LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3–8, 2013.
- LÓPEZ-CASTRO, Brian et al. A systematic review of structural health monitoring systems to strengthen post-earthquake assessment procedures. *Sensors*, Basel, v. 22, n. 23, p. 9206, 2022. Disponível em: . Acesso em: 9 maio 2025.

- LUZ, Gustavo H. et al. Aplicações da manutenção preditiva na indústria: estudo de caso em uma planta de papel e celulose. *Revista Gestão Industrial*, v. 18, n. 2, p. 150–164, 2022.
- MATTOS, André L. de. Manutenção Preditiva com IoT: Monitoramento de Condição em Equipamentos Industriais. *Revista Técnica de Engenharia Aplicada*, v. 8, n. 3, p. 29–39, 2021.
- MELLO, Carlos H. et al. Sistemas de manutenção preditiva aplicados à Indústria 4.0. *Revista Gestão Industrial*, v. 14, n. 3, p. 99–114, 2020.
- MIRÃO, J. et al. Climate monitoring in World Heritage List buildings with low-cost sensors: The case of Jerónimos Monastery in Lisbon (Portugal). *Journal of Building Engineering*, v. 28, p. 101067, 2019. DOI: 10.1016/j.job.2019.101067.
- MOURA, D. C. de; CUNHA, J. C. de A. Inteligência Artificial e sua Aplicação na Manutenção Industrial. *Revista Eletrônica Científica da UERJ*, v. 5, n. 2, p. 38–45, 2022.
- NASCIF, José. *Manutenção: engenharia e gestão*. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.
- NBR ISO 14224:2016. Informação de confiabilidade e manutenção para equipamentos: coleta e troca de dados. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- NUNES, Beatriz O. et al. Tomada de decisão baseada em dados em ambientes industriais. *Revista Exacta*, v. 20, n. 2, p. 89–105, 2022.
- OLIVEIRA, Carlos E. et al. Diagnóstico e predição de falhas em máquinas industriais com aprendizagem de máquina. *Revista Ciência e Engenharia*, v. 31, n. 1, p. 47–59, 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Assembleia Geral das Nações Unidas, A/RES/70/1, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- OPES, Luis F.; ROSSI, Diego P. Um estudo sobre a aplicação da manutenção preditiva em linhas de produção. *Revista Tecnologia & Inovação*, v. 11, n. 1, p. 25–38, 2019.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. *Methodi Ordinatio: um método para a seleção de artigos científicos*. *Revista Gestão e Tecnologia*, v. 15, n. 2, p. 1–20, 2015. DOI: 10.20397/2177-6652/2015.v15i2.1048
- PAGANI, R. N.; TROJAN, F. Desenvolvimento de um modelo de decisão para manutenção industrial inteligente com base em dados. *Revista Exacta*, v. 20, n. 2, p. 200–220, 2022. DOI: 10.5585/exacta.v20n2.22345