

DOI: 10.5748/20CONTECSI/PSE/AIT/7279

eLocator: e207279

**INTERNET OF THINGS DATA STREAMING AND MAINTENANCE 40: A
LITERATURE REVIEW INTERNET DAS COISAS DADOS EM TEMPO REAL E
MANUTENÇÃO 40: UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Priscila Bayer De Oliveira Simões – <https://orcid.org/0000-0002-9827-862X>
Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo

Rogério Rossi – <https://orcid.org/0000-0003-3160-0335>
University Of São Paulo/Continuing Engineering Education Program (Pece)

INTERNET OF THINGS, DATA STREAMING, AND MAINTENANCE 4.0: A LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

Historically, maintenance-related actions and research received attention only when failures occurred. This situation led to an increase in operating costs in the medium and long term. However, due to market demands and the increasing complexity of new equipment, financial investments and maintenance research have gained emphasis. Maintenance 4.0 originated from Industry 4.0 and the consequent ubiquitous use of data in the operation and management of processes. Its purpose is to establish failure prevention actions based on communication between devices and data from different sources. The first objective of this article is to analyze the state of the art of research related to internet of things and real-time data as contributors to Maintenance 4.0. The second objective is to identify supporting technologies, industries, and contributions. The methods applied in this research are bibliometric studies and content analysis, in addition to specialized books, technology supplier websites and news portals.

Keywords: Internet of Things, Maintenance 4.0, Data Streaming.

INTERNET DAS COISAS, DADOS EM TEMPO REAL E MANUTENÇÃO 4.0: UMA REVISÃO DA LITERATURA

RESUMO

Historicamente, ações e pesquisas relacionadas à manutenção recebiam atenção apenas quando falhas aconteciam. Tal situação levou ao aumento dos custos operacionais a médio e longo prazo. Porém, por conta das exigências de mercado e da crescente complexidade dos novos equipamentos, investimentos financeiros e pesquisas em manutenção ganharam ênfase. A Manutenção 4.0 originou-se da Indústria 4.0 e da consequente utilização ubíqua de dados na operação e gestão de processos. Sua finalidade é estabelecer ações de prevenção de falhas baseadas na comunicação entre dispositivos e dados de diversas fontes. Analisar o estado da arte das pesquisas relacionadas à internet das coisas e a dados em tempo real como contribuidores para a Manutenção 4.0 é o primeiro objetivo deste artigo. O segundo objetivo é identificar tecnologias de apoio, indústrias e contribuições. Os métodos aplicados nesta pesquisa são estudos bibliométricos e análise de conteúdo, além de livros e páginas da internet.

Palavras-chave: Internet das Coisas, Manutenção 4.0, Dados em Tempo Real.

1. INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) é uma realidade em crescente expansão. Em 2020 existiam 11,3 bilhões de dispositivos conectados; a previsão para 2025 é que este número atinja 27,1 bilhões. O número real é ainda maior, já que a pesquisa não leva em conta a quantidade de sensores individuais existentes. Refere-se à quantidade de dispositivos que concentram sensores conectados via redes cabeadas, celulares, *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (do inglês, rede de baixa energia e longo alcance), *Wireless Personal Area Network* (WPAN) (do inglês, rede de área pessoal sem fio) e satélite (Sinha, 2021).

Apesar de ser uma atividade que não costuma receber a devida atenção em indústrias baseadas em modelos tradicionais, a gestão de manutenção é responsável por processos que visam corrigir e evitar efeitos de falhas. Historicamente a manutenção assumia formatos meramente corretivos; ou seja, ações eram tomadas apenas em caso de ocorrência de falha ou incidente (Nepomuceno, 2014). Posteriormente foram introduzidos métodos proativos, tais como a programação periódica de revisão de equipamentos e substituição de componentes. Na atualidade, o foco da manutenção gradualmente progride para métodos preditivos e utiliza tecnologias avançadas como apoio.

Segundo relatório divulgado em 2020, a manufatura era a indústria que mais possuía projetos de IoT (Lueth, 2020). A manutenção industrial compõe este campo; adotar processos baseados em IoT permite monitorar os equipamentos, coletar e armazenar dados e identificar oportunidades de melhorias a fim de evitar indisponibilidades no processo de produção. Interrupções podem ocorrer por diversos motivos, desde a substituição de peças em casos de falha até a programação periódica de atividades de manutenção. Tal monitoramento pode ser apoiado por processos baseados em dados e trazer benefícios para a operação e para o negócio (Stevan Jr et al., 2018).

A manutenção preditiva, também conhecida por termos tais como “Manutenção 4.0” ou “Manutenção Inteligente”, passa por um processo de expansão nos últimos anos (*Predictive Maintenance: Niche Topic to Killer Application in 10 Years*, 2021). Em 2016 era adotada em pequenos nichos. Poucos dispositivos eram conectados e o retorno sobre o investimento era desconhecido. O potencial crescimento previsto para 2025 é que a manutenção preditiva seja ampliada para modelos mais complexos, acessíveis a diferentes perfis de usuários e formada por conexões mais complexas entre dispositivos. Além disso, o investimento financeiro passará de US\$ 1,5 bilhões a US\$ 28 bilhões no intervalo de 2016 a 2025 (Bruegge, 2021).

Percebe-se, através dos números previamente citados, os desafios e oportunidades que a área de Manutenção 4.0 apresenta para os próximos anos. Por estar em transição entre o estado de domínio de aplicações restritas e atingir grande alcance e complexidade técnica, mais pesquisas e investimentos serão necessários. Tal evolução é baseada na ubiquidade e compartilhamento de dados em tempo real por toda a extensão da organização. Além disso, ao explorar bases da literatura científica, percebe-se que o interesse de pesquisa das relações entre “*data streaming*”, “internet das coisas”, “manutenção” e termos correlatos é significativo.

Este trabalho tem como objetivo apresentar, a partir de pesquisas na literatura científica, o estado da arte referente ao uso de dados em tempo real e IoT como insumo para aplicações de manutenção inteligente, a fim de detectar comportamentos anormais, viabilizar a atuação no tempo apropriado e minimizar a ocorrência de falhas ou interrupções do processo produtivo. Além disso, procura identificar as tecnologias emergentes relacionadas à Manutenção 4.0 apoiadas pela IoT. Para orientar o atingimento do objetivo foram formuladas duas questões de pesquisa:

QP1: qual é o estado da arte da pesquisa referente à utilização da IoT e *data streaming* em aplicações de manutenção?

QP2: quais são as tecnologias, indústrias e contribuições da IoT relacionadas à Manutenção 4.0?

É possível, por meio da busca de referências nas bases de artigos acadêmicos *Scopus* e *Web of Science*, verificar o crescente interesse em pesquisas relacionadas a *data streaming*. Além disso percebe-se, nos últimos anos, uma tendência de aumento nos esforços de pesquisa relacionados ao uso de *data streaming* na manutenção. Os indicadores já apresentados mostram que os investimentos em manutenção baseada em dados aumentarão nos próximos anos. Assim, pode-se concluir que é um tema relevante.

Neste artigo é proposta a identificação do estado da arte da pesquisa relacionada à interação entre IoT, dados em tempo real e Manutenção 4.0. Para tal, serão apresentados estudos de bibliometria e análise de conteúdo com base na literatura científica disponível.

A contribuição apresentada por este artigo relaciona-se à verificação da extensão do conhecimento disponível na literatura referente à relevância do tema para pesquisas futuras. Nota-se que é um campo pouco explorado na literatura, o que pode indicar um novo território de pesquisa. Verifica-se que a principal aplicação do tema, identificado pela pesquisa, é a manufatura. Foram citadas também as áreas de construção, energia, logística e transporte.

2. MÉTODO

O método selecionado para a construção deste artigo é a análise bibliométrica das referências encontradas após os processos de busca nos repositórios de artigos. A bibliometria é um método que utiliza os dados bibliográficos das referências a fim de apresentar graficamente os indicadores de produção científica, o desempenho de pesquisas de autores e fontes e a estruturação do conhecimento (Zupic&Čater, 2015).

1.1 Amostragem

A execução das buscas foi feita em 26 de novembro de 2023. Aplicaram-se *strings* de busca limitadas a *abstract*, título e palavras-chave no idioma inglês, sem limitação de período, a fim de refinar os resultados. O operador “*and*” combina os termos, enquanto o operador “*or*” busca publicações relacionadas a termos equivalentes.

A fim de verificar o estado da arte dos estudos relacionados à manutenção apoiada por dados em tempo real e IoT, foram escolhidos alguns termos para composição da *string* de busca inicial. Os resultados foram exportados das bases *Scopus* e *Web of Science (WoS)* em formato *bibtex* e analisados na aplicação *Biblioshiny*, uma ferramenta baseada na plataforma R que gera gráficos para representar as análises sobre os dados bibliográficos. Tal processo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Processo de busca das referências

String	Filtros	Scopus	WoS	Junção
("maintenance*" OR "smart maintenance" OR "maintenance 4" OR "predictive maintenance") AND ("analytics" or "stream*" or "real time") AND ("internet of things" or "industrial internet of things")	Inglês; artigos.	482	386	386

Fonte: autores (2023)

Após a consolidação da lista de referências, os títulos e *abstracts* de todos os artigos foram examinados a fim de utilizar apenas os relacionados ao tema. Remoções: artigos sem DOI, baixo número de citações antes de 2023 (abaixo de 20), sem ISSN, sem palavras-chave, apenas artigos, menos de dez de acessos nos últimos 6 meses, sem afiliações, sem e-mail de contato dos autores, campos de pesquisa irrelevantes para o tema, sem palavras-chave e baixa qualidade das fontes. Restaram 30 artigos para análise dos títulos e *abstracts* e mantidos apenas os relacionados ao tema e aos critérios de inclusão e exclusão. Este processo é ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Seleção dos artigos para análise

Crítérios de exclusão	Artigos removidos	Artigos restantes
Artigos sem DOI	15	371
Menos de 10 citações antes de 2022	84	287
Menos de 10 acessos nos últimos 6 meses	229	58
Sem afiliações	1	57
Áreas de pesquisa irrelevantes	11	46
Qualidade das fontes (apenas Q1)	10	36
Amostra final	6	30

Fonte: autores (2023)

O processo de busca completo, desde a definição da *string* de busca até a obtenção da amostra final é ilustrado pela Figura 1.

1.2 Análise dos dados (*Data Analysis*)

Segundo (Carvalho et al., 2013), a revisão de literatura pode utilizar diferentes abordagens, tais como bibliometria, metanálise e análise de conteúdo. No caso deste trabalho foram utilizados os métodos “bibliometria” e “análise de conteúdo”. O software *Biblioshiny*, uma interface *web* amigável ao usuário, foi empregado na construção da bibliometria. Os metadados extraídos das bases *Web of Science* e *Scopus* foram utilizados para realizar o trabalho (Secinaro et al., 2020). Em seguida foi construída a análise de conteúdo através da categorização e leitura dos artigos listados na base final. A Tabela 3 apresenta a aplicação dos métodos (bibliometria e análise de conteúdo) e ferramenta (*Biblioshiny*) na resposta às questões de pesquisa.

Tabela 3 – Questões de pesquisa, métodos e ferramentas

ID	Questão de pesquisa	Método	Ferramenta
1	Qual é o estado da arte da pesquisa referente à utilização da IoT e <i>data streaming</i> em aplicações de manutenção?	Bibliometria	<i>Biblioshiny</i>
2	Quais são as principais tecnologias, indústrias e contribuição da IoT em processos de manutenção?	Análise de conteúdo	-

Fonte: autores (2023)

1.2.1 Bibliometria

A bibliometria é um conjunto de métodos utilizados para extração de medições em um conjunto de dados bibliográficos. Diversas áreas de pesquisa utilizam métodos bibliográficos a fim de explorar impactos de área de pesquisa, grupo de pesquisadores ou até mesmo um artigo específico (Cobo et al., 2011).

Neste trabalho foram construídos gráficos e redes utilizando-se a ferramenta *Biblioshiny*, além de análises exploratórias no Excel. As análises desenvolvidas no *Biblioshiny* apresentamos principais *journals*, a produtividade e o impacto da produção por autor através do número de citações, mapa temático para verificar a relevância dos termos e redes de colaboração entre autores. Os gráficos foram gerados de acordo com o manual de uso da ferramenta (Aria & Cuccurullo, 2023). As análises exploratórias desenvolvidas no Excel demonstram o número de publicações por ano e por *journal*.

1.2.2 Análise de conteúdo

A análise de conteúdo é utilizada para explorar e descobrir o significado subjacente do texto por meio da quantificação do significado da língua falada ou escrita. Tal método fornece uma visão integrativa do texto e seus contextos relacionados para que o pesquisador compreenda o fenômeno de forma subjetiva (Renz et al., 2018).

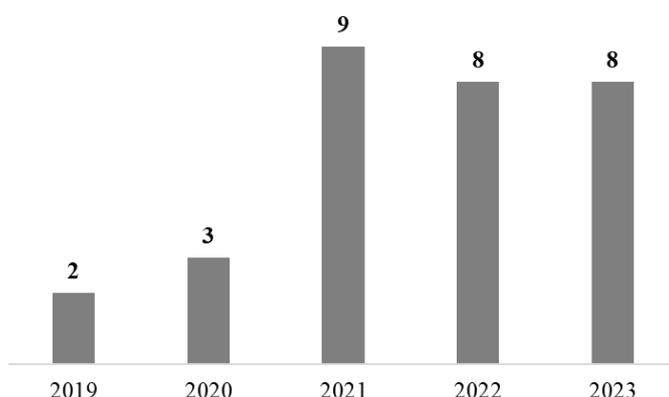
Foram considerados todos os artigos da amostra final para a elaboração da análise de conteúdo. Tal análise seguiu a metodologia previamente descrita, a partir da codificação dos principais conceitos identificados em cada um dos artigos, com a finalidade de fornecer base e direcionamento para a posterior apresentação dos resultados do estudo.

Para compor a análise final, foram identificados três principais códigos. São eles: tecnologias, indústrias e contribuições daIoT nos processos de manutenção. Cada código é formado por um conjunto de termos; foi feita a identificação de tais termos, contados os artigos e apresentada a listagem de tais artigos por autor. O produto desta análise é apresentado na seção Resultados. Algumas discussões apresentadas posteriormente são fundamentadas nesta análise de conteúdo.

2 Resultados

A fim de investigar a resposta à primeira questão de pesquisa, relacionada ao estado da arte, foram efetuadas algumas análises bibliométricas. Construiu-se, inicialmente, uma análise exploratória com base na amostra bibliográfica final a fim de verificar, agrupar e quantificar a produção científica. A Figura 3 apresenta a quantidade de publicações relacionadas ao tema por ano. O gráfico foi construído na ferramenta Excel. Nota-se que é um campo de pesquisa razoavelmente recente, com o maior número de publicações concentrado em 2021. Em 2022 e 2023 a ordem de grandeza manteve-se estável e as quantidades de artigos foram as mesmas. Porém, o razoavelmente baixo número de publicações demonstra uma possível oportunidade de pesquisa em um campo ainda não suficientemente explorado. Além disso, os anos de 2022 e 2023 apresentam o mesmo número de artigos. Por ocasião da escrita deste artigo, o ano de 2023 não havia terminado. Assim, pode existir uma linha crescente de número de artigos nos próximos anos.

Figura 3 – Número de publicações por ano



Fonte: autores (2023)

Após ser verificada a quantidade de artigos por ano, apresenta-se uma análise exploratória da base de dados. Os resultados são apresentados na Figura 4, também construída na ferramenta *Biblioshiny*.

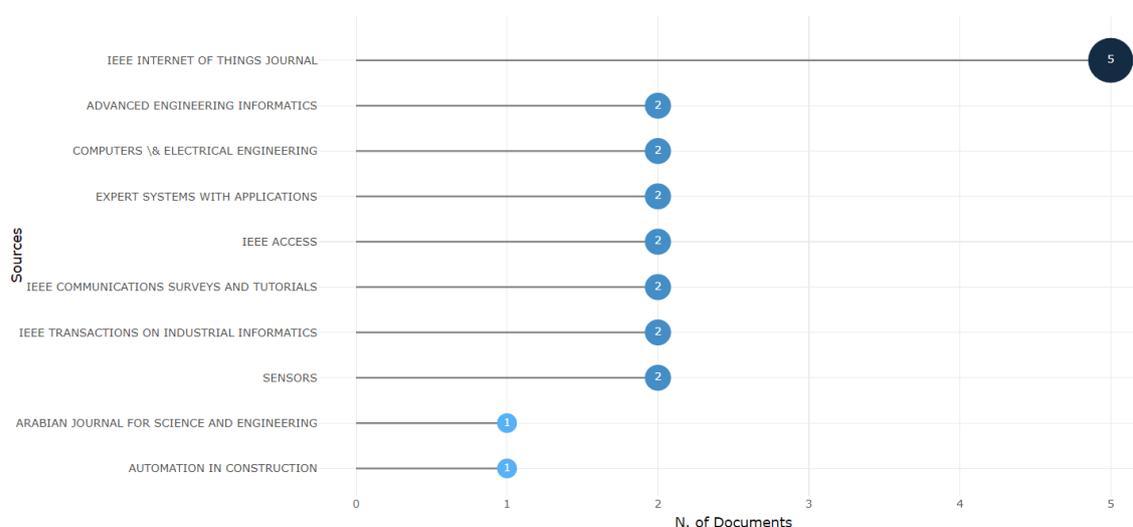
Figura 4 – Número de publicações por ano



Fonte: autores (2023)

A Figura 4 apresenta as características da base de dados. Dezenove *journals* publicaram as pesquisas de 129 autores; apresentou-se uma taxa de crescimento anual de 41%. As parcerias internacionais constituem 37% dos artigos. Foram identificadas 193 palavras-chave no estudo de todos os artigos e, por conta de os artigos serem recentes, os artigos possuem, aproximadamente, 1.4 anos de idade de publicação.

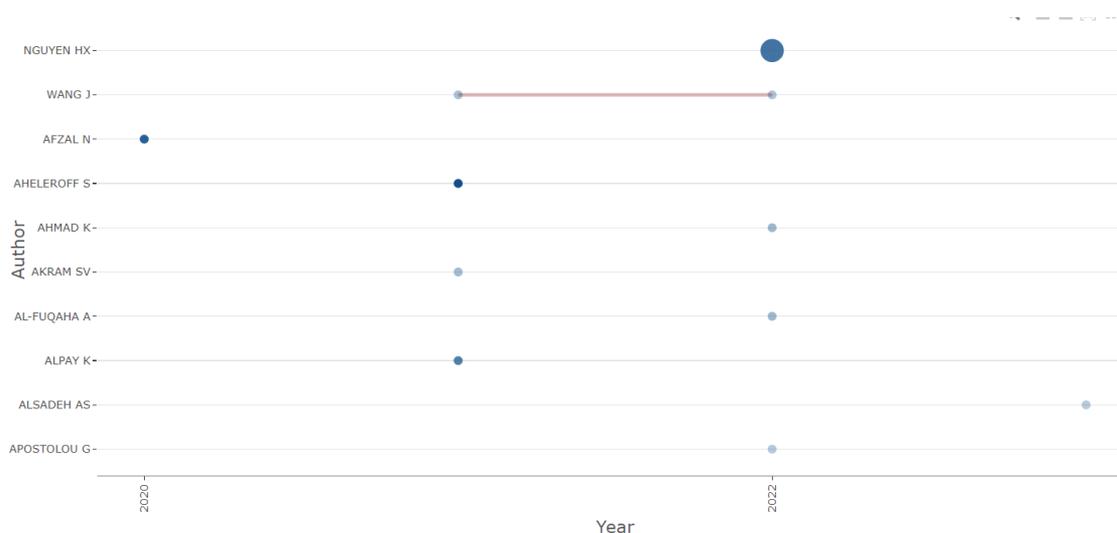
Diversas áreas exploraram o assunto e houve concentração de *journals*. A *IEEE Internet of Things Journal* publicou 5 artigos. O escopo de tal *journal* são os últimos avanços referentes a diversos aspectos da IoT, tais como arquitetura, tecnologias viabilizadoras, protocolos de conexão, serviços, aplicações e impactos sociais, além de gestão de dados e futuros projetos de uso da IoT. Sete *journals* publicaram dois artigos cada uma e são especializadas em engenharia de informática, engenharia elétrica, sistemas especialistas, redes e sensores. Dois *journals* que tratam de engenharia e construção publicaram dois artigos. A relação de *journals* que publicaram sobre o tema é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Número de publicações por *journal*

Fonte: autores (2023)

A Figura 6 apresenta a relação dos autores mais produtivos durante todo o período. Graficamente, o tamanho do círculo é diretamente proporcional ao número de artigos publicados, enquanto a cor do círculo ilustra o número de citações por ano. Assim, quanto maior o círculo, maior a quantidade de documentos publicados; quanto maior a transparência da cor do círculo, menor o número de citações do autor em determinado ano. A reta vermelha representa o período em que cada autor produziu. O autor Nguyen, HX. é um pesquisador experiente e recebeu, em 2022, citações de seus artigos relacionados ao tema. O autor Wang, J. é o que esteve em atividade de produção de pesquisas por mais tempo, de 2021 a 2022. Os demais autores publicaram, de forma esparsa, um artigo.

Figura 6 – Produção dos autores através do tempo



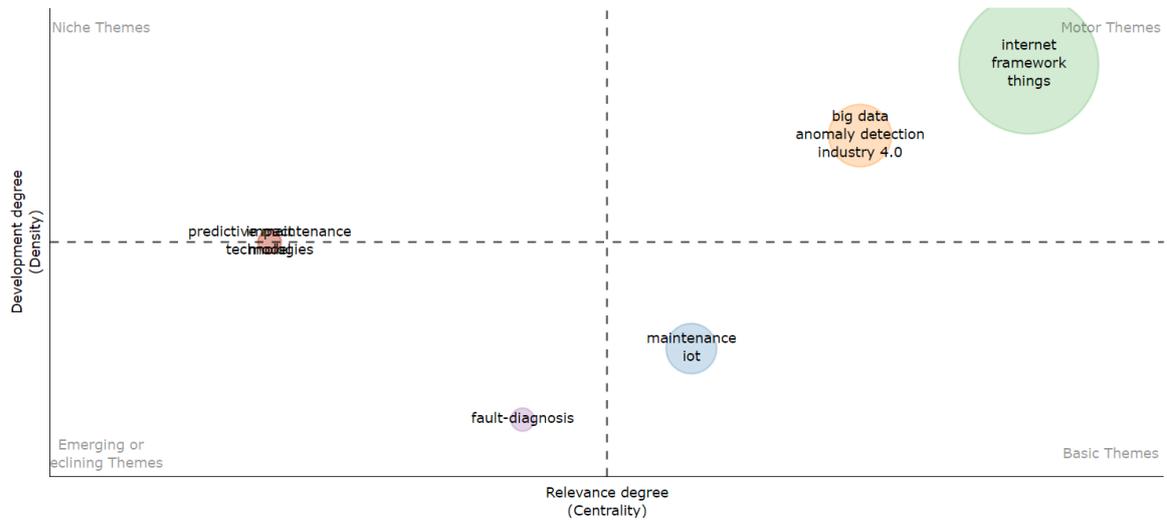
Fonte: autores (2023)

Ao pesquisar sobre os campos de atuação dos dois primeiros autores, verifica-se que o primeiro, Huan Xuan Nguyen, obteve seu título de PhD em *University of New South Wales, Sydney*. Atualmente trabalha na *Middlesex University* como professor de engenharia de comunicações digitais, diretor da *London Digital Twin Research Centre* e head do *5G & IoT Research Group*. Possui h-index de 21, com 134 artigos publicados e 1588 citações.

Não foi possível encontrar muitas informações sobre Junkai Wang; apenas seu h-index de 6, publicação de 17 artigos e 108 citações. É parceiro de pesquisa assistente na *Tongji University* (Eletrônica e Engenharia da Informação). Suas pesquisas estão relacionadas a energia renovável, economia e conservação de energia, além de ferro e aço.

A análise do mapa temático (ou diagrama de copalavras) distribui as palavras-chave de acordo com a sua ocorrência em um diagrama bidimensional. A Figura 7 apresenta o mapa temático da pesquisa. Os temas são divididos em quatro quadrantes: temas motores, temas básicos, temas emergentes e temas muito especializados ou de nicho. Assim, os temas de maior interesse são os temas motores e os temas de nicho. Os temas motores são os que orientam as pesquisas atualmente; ou seja, aqueles mais explorados no momento. Os temas de nicho são temas especializados e com maior potencial para exploração, mas que neste momento têm pouca bibliografia desenvolvida. Com base na Figura 7 é possível observar que os temas motores e básicos estão relacionados a discussões sobre *maintenance*, *anomaly detection*, *big data*, *IoT* e *frameworks*. O tema emergente, no caso, está relacionado a *fault-diagnosis*.

Figura 7 – Mapa temático

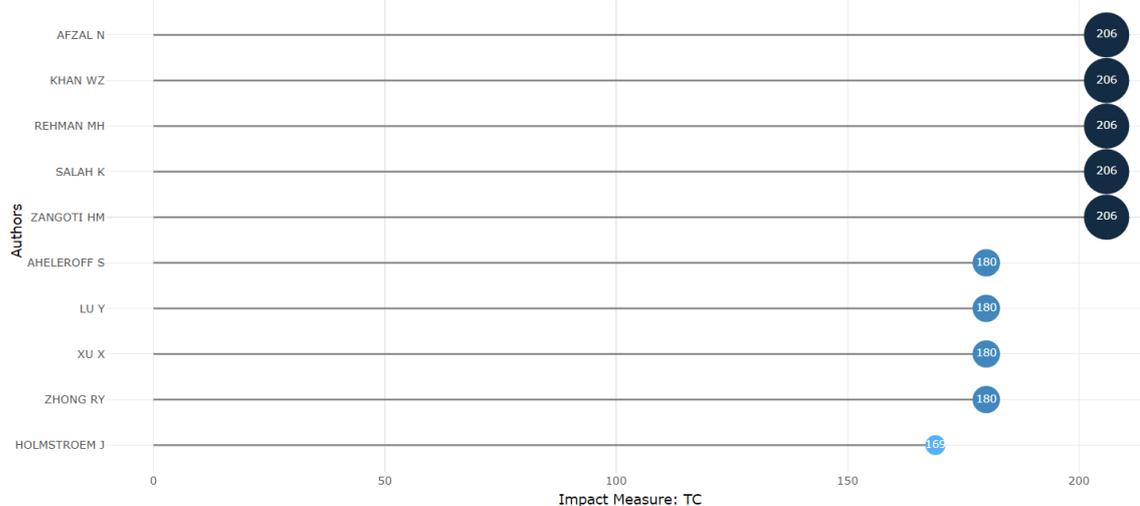


Fonte: autores (2023)

Os temas estão separados em *clusters*, representados pelos círculos. Cada um desses círculos pode ser composto por outros termos, além dos apresentados no gráfico. Por exemplo, o círculo verde de maiores dimensões apresenta os termos “internet”, “framework” e “things”. Além destes, os termos “system”, “design”, “information modeling bim”, “industry”, “integration”, “performance” e “product life cycle” fazem parte do *cluster*. Desta forma, são também temas motores. Além disso, conclui-se que “fault-diagnosis” é um tema emergente e pode representar uma oportunidade de pesquisa a ser explorada.

A Figura 8 apresenta a influência dos autores com base no número de citações. Os mais influentes, com 206 citações cada, são Afzal, N., Khan, WZ., Rehman MH., Salah K., e Zangotti, HM. As informações sobre cada autor foram pesquisadas via *Orcid* e *Scopus*.

Figura 8 – Impacto dos autores por número de citações



Fonte: autores (2023)

Afzal, N. (Muhammad Khalil Afzal), o primeiro autor da lista, possui 2358 citações, 86 documentos e h-index de 25. Atualmente trabalha como professor assistente no *Department of Computer Science at COMSATS, Wah Cantt Pakistan*. Seu PhD foi obtido em 2014, no *Department of Information and Communication Engineering, Yeungnam University, South Korea*. Possui como foco de pesquisa os termos “Redes de Sensores sem Fio”, “Cidades Inteligentes”, “5G” e “IoT”.

W. Z. Khan (Wazir Zada Khan) trabalha em conjunto com a instituição *Faculty of Computer Science and Information System, Jazan University, Arábia Saudita*. Seu PhD foi obtido no *Electrical and Electronic Engineering Department, Universiti Teknologi Petronas, Malásia*. Seus campos de pesquisa são Segurança, Privacidade, IoT, Internet Industrial das Coisas e Rede de Sensores sem Fio. Atua como membro sênior do Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica no IEEE. Possui 3525 citações, 96 documentos publicados e h-index de 28.

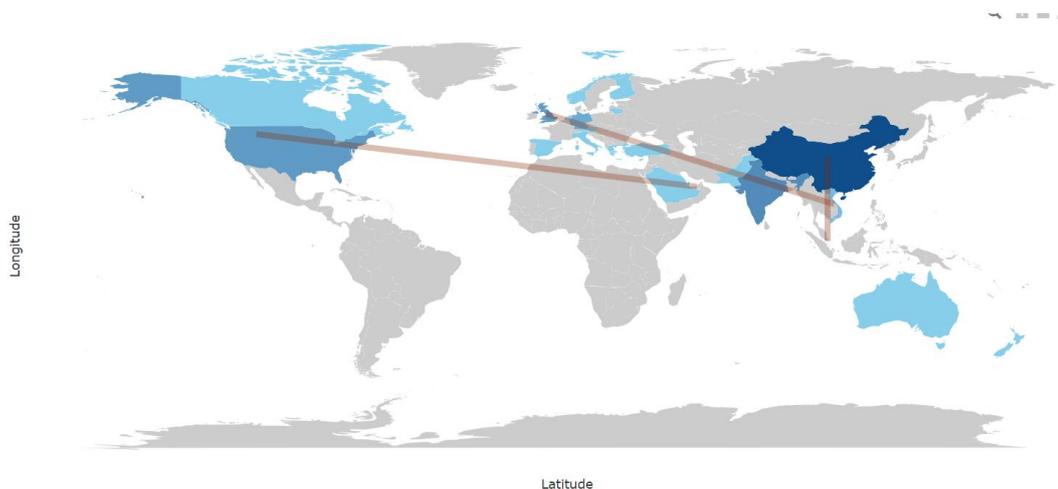
Rehman, MH (Muhammad Habib ur Rehman) é professor assistente na *National University of Computer and Emerging Sciences*, no Paquistão. Trabalha com mineração de dados em tempo real para a IoT. Alguns de seus temas de pesquisa são cidades inteligentes, redes móveis, *blockchain* e Indústria 4.0. Possui 2243 citações, 122 publicações e seu h-index é de 26.

Salah, K (Khaled H. Salah) é professor no departamento de engenharia elétrica e de computação, na *Khalifa University*. Os interesses de pesquisa incluem computação em nuvem e em névoa, IoT, *blockchain* e cibersegurança. Seu PhD em ciência da computação foi obtido no *Illinois Institute of Technology*, em 2000. Possui 10443 citações, 290 publicações e h-index de 49.

Zangoti, HM (Hussein Mohammed Zangoti) obteve seu título de mestre em *Monmouth University*. Atualmente trabalha em seu PhD em Ciência da Computação na *Florida International University*. Seus interesses de pesquisa estão relacionados a IoT, redes, segurança e redes sociais. Possui 323 citações, 9 documentos e h-index de 3.

A Figura 9 apresenta os países e seus volumes de pesquisa em comparação aos demais. Os traços vermelhos apresentam as redes de colaboração. Ao analisar o mapa, foram encontradas três principais colaborações. A primeira é a China, que possui o maior número de pesquisas e interage primariamente com Singapura. A segunda rede de colaboração existe entre Inglaterra e Vietnã. A terceira rede compreende Estados Unidos e Emirados Árabes Unidos.

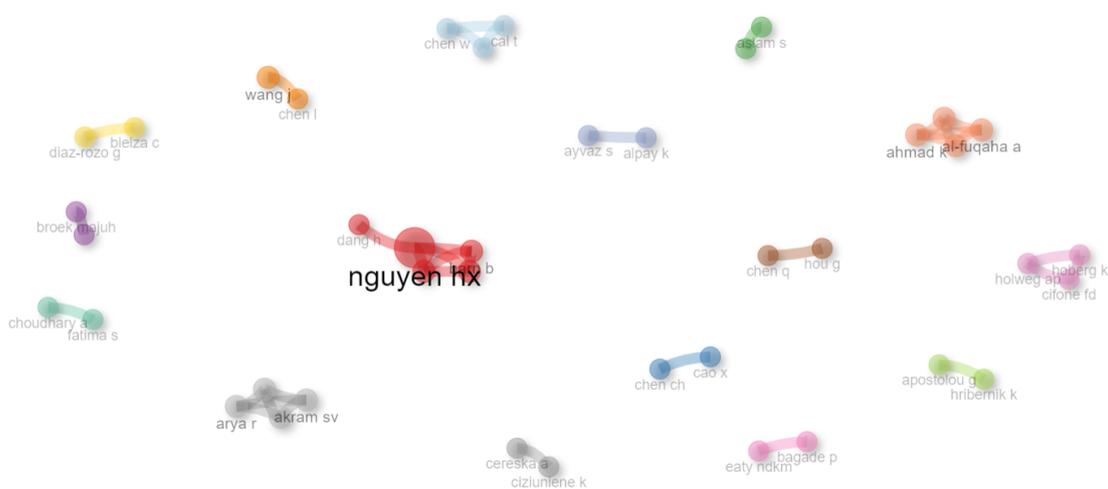
Figura 9 – Redes globais de pesquisa



Fonte: autores (2023)

Foi executada uma análise gráfica da colaboração entre os autores. Verifica-se que existem diversos grupos de pesquisa; porém, estes não interagem entre si e são de pequena dimensão. A maior e mais influente rede é liderada pelo autor Nguyen, HX., com cinco autores que colaboram entre si. Os outros *clusters* são, em sua maioria, compostos por dois autores. Estes resultados estão representados pela Figura 10.

Figura 10 – Redes de colaboração entre autores



Fonte: autores (2023)

A fim de responder a segunda questão de pesquisa, foi feita uma análise de conteúdo e codificação após a leitura dos artigos. A Tabela 4 apresenta a sumarização dos resultados, que serão discutidos na próxima seção. As referências foram separadas em três grupos: Tecnologias, Indústrias e Contribuições da IoT para a manutenção.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da codificação

Tecnologias	Código	Descrição	Quantidade de artigos	Porcentagem
	T1	<i>IoT</i>		26
T2	<i>Machine learning</i>		18	60%
T3	<i>Big data/analytics</i>		17	57%
T4	<i>Cloud</i>		10	33%
T5	<i>Artificial intelligence</i>		9	30%
T6	<i>Edge</i>		7	23%
T7	<i>Digital Twins</i>		6	20%
T8	<i>Wireless sensors and networks</i>		6	20%
T9	<i>Sensors</i>		6	20%
T10	<i>Augmented reality</i>		5	17%
T11	<i>Blockchain</i>		5	17%
T12	<i>Cyber-physical systems</i>		4	13%
T13	<i>Virtual reality</i>		4	13%
T14	<i>Robotics</i>		3	10%
T15	<i>Additive manufacturing</i>		3	10%
T16	<i>Building Information Modeling</i>		2	7%
T17	<i>Software-defined networks</i>		1	3%
T18	<i>Quantum computing</i>		1	3%
T19	<i>Geographic Information Systems</i>		1	3%
T20	<i>5G</i>		1	3%
T21	<i>6G</i>		1	3%
T22	<i>Drones</i>		1	3%
	Total		30	
Indústrias	Código	Descrição	Quantidade de artigos	Porcentagem
	I1	<i>Manufacturing</i>	13	43%
I2	<i>Building</i>	11	37%	
I3	<i>Other</i>	11	37%	
I4	<i>Energy</i>	10	33%	
I5	<i>Logistics and transport</i>	9	30%	
I6	<i>Auto industry</i>	6	20%	
I7	<i>Health</i>	6	20%	
I8	<i>Aeronautical</i>	5	17%	
I9	<i>Agricultural</i>	4	13%	
I10	<i>Natural resources</i>	3	10%	
I11	<i>Industry 4.0</i>	2	7%	
I12	<i>Food</i>	2	7%	
I13	<i>Chemical</i>	2	7%	
I14	<i>Electronics</i>	2	7%	
I15	<i>Navigation</i>	1	3%	
I16	<i>Retail</i>	1	3%	
I17	<i>Mining</i>	1	3%	
	Total		30	

Contribuições	Código Descrição		Quantidade	Porcentagem
			de artigos	
	C1	<i>Real-time monitoring</i>	30	100%
	C2	<i>Prediction of potential failures</i>	24	80%
	C3	<i>Performance monitoring</i>	20	67%
	C4	<i>Optimization of resource use / cost reduction</i>	20	67%
	C5	<i>Detect anomalies</i>	19	63%
	C6	<i>Data analysis</i>	18	60%
	C7	<i>Connection</i>	7	23%
	C8	<i>Data to digital twin</i>	3	10%
	C9	<i>Task automation</i>	3	10%
	C10	<i>Control capabilities</i>	1	3%
	C11	<i>Customized solutions</i>	1	3%
	C12	<i>Safety</i>	1	3%
		Total	30	

Fonte: autores (2023)

Conclui-se que, para o código “Tecnologias”, além da própriaIoT, o aprendizado de máquina liderou a tabela com 18 artigos. Referente ao código “Indústrias”, em primeiro lugar ficou a manufatura, com 13 artigos, seguida por construção, com 11 artigos. Na classificação das contribuições daIoT para a manutenção, todos os artigos referem-se a monitoramento em tempo real e a predição de potenciais falhas está representada por 24 artigos.

3 DISCUSSÕES

A discussão dos resultados segue o método de análise de conteúdo, através da qual a organização das discussões segue as categorias identificadas. Os resultados estão organizados e analisados por tais categorias. Tabelas são apresentadas a fim de ilustrar a distribuição das referências pelos tópicos.

3.1 Tecnologias

Os artigos foram analisados a fim de identificar a frequência de artigos em que cada item figurou. Além da própriaIoT, a categoria com maior representatividade é *machine learning*, com 18 artigos ou 60%. A seguir figura a categoria *big data/analytics*, representada em 17 artigos ou 57%. Além destas, encontraram-se mais 19 categorias, dentre infraestrutura, equipamentos e técnicas. Os cinco artigos mais citados foram (Love & Matthews, 2019) (dez menções); (Aheleroff et al., 2021) (nove menções); (Mihai et al., 2022) (oito menções) e, com sete menções cada, (Khajavi et al., 2019) e (Khan et al., 2020). Tais resultados são detalhados na Tabela 5.

Tabela 5 – Artigos sobre tecnologias

Descrição	N	Artigos
<i>IoT</i>	26	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz & Alpay, 2021), (uit het Broek et al., 2021), (L. Chen et al., 2022), (Dang et al., 2022), (Eaty & Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Jia et al., 2023), (Khajavi et al., 2019), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (Wang et al., 2020), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (Love & Matthews, 2019), (W. Chen et al., 2021; Mihai et al., 2022)
<i>Machine learning</i>	18	(Aheleroff et al., 2021), (Ayvaz & Alpay, 2021), (uit het Broek et al., 2021), (L. Chen et al., 2022), (Dang et al., 2022), (Eaty & Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Khajavi et al., 2019), (Khan et al., 2020), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (Wu et al., 2021), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021)
<i>Big data/analytatics</i>	17	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz & Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Cifone et al., 2021), (Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Khajavi et al., 2019), (Khan et al., 2020), (Love & Matthews, 2019), (Schöggl et al., 2023), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Cloud</i>	10	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz & Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Dang et al., 2022), (Eaty & Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Khan et al., 2020), (von Stietencron et al., 2022), (Mihai et al., 2022)
<i>Artificial intelligence</i>	9	(Aheleroff et al., 2021), (Ayvaz & Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Love & Matthews, 2019), (Mian et al., 2023), (Schöggl et al., 2023), (Xie et al., 2023), (Mihai et al., 2022)
<i>Edge</i>	7	(Ayvaz & Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Khan et al., 2020), (Mian et al., 2023), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (Xie et al., 2023)
<i>Digital twins</i>	6	(Aheleroff et al., 2021), (Cifone et al., 2021), (Dang et al., 2022), (Eaty & Bagade, 2023), (Jia et al., 2023), (Khajavi et al., 2019)
<i>Wireless sensors and networks</i>	6	(Dang et al., 2022), (Khajavi et al., 2019), (Love & Matthews, 2019), (Mian et al., 2023), (Singh et al., 2021), (G. Zhang et al., 2022)
<i>Sensors</i>	6	(Singh et al., 2021), (von Stietencron et al., 2022), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022)
<i>Augmented reality</i>	5	(Aheleroff et al., 2021), (Dang et al., 2022), (Khajavi et al., 2019), (Love & Matthews, 2019), (Mihai et al., 2022)
<i>Blockchain</i>	5	(Cifone et al., 2021), (Khan et al., 2020), (Schöggl et al., 2023), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)

<i>Cyber-physical systems</i>	4	(Aheleroff et al., 2021), (Jia et al., 2023), (Teoh et al., 2023), (W. Chen et al., 2021)
<i>Virtual reality</i>	4	(Aheleroff et al., 2021), (Khajavi et al., 2019), (Love & Matthews, 2019), (Mihai et al., 2022)
<i>Robotics</i>	3	(Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Love & Matthews, 2019)
<i>Additivem manufacturing</i>	3	(Jagatheesaperumal et al., 2022), (Love & Matthews, 2019), (Mihai et al., 2022)
<i>Building Information Modeling</i>	2	(Hou et al., 2022), (Love & Matthews, 2019)
<i>Software-defined networks</i>	1	(Aslam et al., 2020)
<i>Quantum computing</i>	1	(Cifone et al., 2021)
<i>Geographic Information Systems</i>	1	(Hou et al., 2022)
<i>5G</i>	1	(Khan et al., 2020)
<i>6G</i>	1	(Khan et al., 2020)
<i>Drones</i>	1	(Love & Matthews, 2019)

Fonte: autores (2023)

3.2 Indústrias

Além das tecnologias, os artigos foram analisados a fim de identificar as indústrias mais relevantes. A classificação dos artigos segue o mesmo método que no item anterior; ou seja, a quantidade de artigos que menciona cada item. A indústria mais citada é a manufatura (13 artigos ou 43%). A segunda é a construção, com 11 artigos ou 37%. Além destas principais, foram identificadas outras 15 classificações. Os cinco artigos mais citados na categoria são (Mihai et al., 2022), com 9 citações; (Singh et al., 2021), (Aheleroff et al., 2021) e (Schöggl et al., 2023), com 7 citações cada um e (W. Chen et al., 2021), com 6 citações. O estudo é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Artigos sobre indústrias

Descrição	N	Artigos
<i>Manufacturing</i>	13	(Aheleroff et al., 2021), (Ayvaz&Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Cifone et al., 2021), (Eaty&Bagade, 2023), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Khan et al., 2020), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022)

<i>Building</i>	11	(Eaty& Bagade, 2023), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Khan et al., 2020), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Other</i>	11	(uit het Broek et al., 2021), (Cifone et al., 2021), (Jia et al., 2023), (Mian et al., 2023), (Schöggl et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (Wu et al., 2021), (G. Zhang et al., 2022), (S. Zhang et al., 2021)
<i>Energy</i>	9	(Aheleroff et al., 2021), (Khan et al., 2020), (Puerto-Santana et al., 2022), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Wang et al., 2020), (L. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Logisticsand transport</i>	9	(Jarašūnienė et al., 2023), (Khan et al., 2020), (Mihai et al., 2022), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (von Stietencron et al., 2022), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021)
<i>Automotive</i>	6	(Aheleroff et al., 2021), (Eaty& Bagade, 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Singh et al., 2021), (Wang et al., 2020), (Mihai et al., 2022)
<i>Health</i>	6	(Aheleroff et al., 2021), (Khan et al., 2020), (von Stietencron et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Aeronautical</i>	5	(Aheleroff et al., 2021), (Puerto-Santana et al., 2022), (Wang et al., 2020), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Agricultural</i>	4	(Aheleroff et al., 2021), (Khan et al., 2020), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Natural resources</i>	3	(Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021)
<i>Industry 4.0</i>	2	(Jarašūnienė et al., 2023), (W. Chen et al., 2021)
<i>Electronics</i>	2	(Schöggl et al., 2023), (Singh et al., 2021)
<i>Food</i>	1	(Schöggl et al., 2023)
<i>Chemical</i>	1	(Schöggl et al., 2023)
<i>Navigation</i>	1	(Aslam et al., 2020)
<i>Retail</i>	1	(Jarašūnienė et al., 2023)
<i>Mining</i>	1	(Mihai et al., 2022)

Fonte: autores (2023)

3.3 Contribuições

Os artigos foram também analisados sob a ótica das contribuições feitas pela IoT aos processos de manutenção. O sistema de classificação mantém-se o mesmo. A contribuição mais citada é o monitoramento em tempo real, em todos os artigos. A predição de potenciais falhas vem em segundo lugar, com 24 artigos. Foram classificados dez itens adicionais. Os cinco artigos mais citados são (Aheleroff et al., 2021), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jia et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022) e (Singh et al., 2021), com seis citações cada um. Este processo é descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Artigos sobre contribuições

Descrição	N	Artigos
<i>Real-time monitoring</i>	30	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz&Alpay, 2021), (uithetBroek et al., 2021), (L. Chen et al., 2022), (Cifone et al., 2021), (Dang et al., 2022), (Eaty&Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Jia et al., 2023), (Khajavi et al., 2019), (Khan et al., 2020), (Love & Matthews, 2019), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Prediction of potential failures</i>	24	(Aheleroff et al., 2021), (uithetBroek et al., 2021), (L. Chen et al., 2022), (Cifone et al., 2021), (Dang et al., 2022), (Eaty&Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jia et al., 2023), (Khajavi et al., 2019), (Khan et al., 2020), (Love & Matthews, 2019), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (von Stietencron et al., 2022), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Performance monitoring</i>	20	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz&Alpay, 2021), (uithetBroek et al., 2021), (Cifone et al., 2021), (Eaty&Bagade, 2023), (Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jia et al., 2023), (Khan et al., 2020), (Love & Matthews, 2019), (Puerto-Santana et al., 2022), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022), (Mihai et al., 2022)
<i>Optimization and cost reduction</i>	20	(Hou et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Khajavi et al., 2019), (Khan et al., 2020), (Love & Matthews, 2019), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2022)

		et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022)
<i>Detectanomalies</i>	19	(Aheleroff et al., 2021), (Aslam et al., 2020), (Ayvaz&Alpay, 2021), (uithetBroek et al., 2021), (L. Chen et al., 2022), (Dang et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Jarašūnienė et al., 2023), (Jia et al., 2023), (Mian et al., 2023), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Shubita et al., 2023), (Teoh et al., 2023), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021), (Xie et al., 2023), (S. Zhang et al., 2021), (W. Chen et al., 2021)
<i>Data analysis</i>	18	(L. Chen et al., 2022), (Cifone et al., 2021), (Dang et al., 2022), (Eaty&Bagade, 2023), (Jia et al., 2023), (Khan et al., 2020), (Puerto-Santana et al., 2022), (Schöggl et al., 2023), (Singh et al., 2021), (Teoh et al., 2023), (von Stietencron et al., 2022), (Wu et al., 2021), (Xie et al., 2023), (G. Zhang et al., 2022), (L. Zhang et al., 2021), (S. Zhang et al., 2021), (Mihai et al., 2022), (W. Chen et al., 2021)
<i>Connection</i>	7	(Ayvaz&Alpay, 2021), (L. Chen et al., 2022), (Jagatheesaperumal et al., 2022), (Khajavi et al., 2019), (Shubita et al., 2023), (Wang et al., 2020), (Wu et al., 2021)
<i>Task automation</i>	4	(Khajavi et al., 2019), (Wang et al., 2020), (Xie et al., 2023)
<i>Data to digital twin</i>	3	(Aheleroff et al., 2021), (Eaty& Bagade, 2023), (Jia et al., 2023)
<i>Controlcapabilities</i>	1	(Aheleroff et al., 2021)
<i>Customizedsolutions</i>	1	(Ayvaz&Alpay, 2021)
<i>Safety</i>	1	(Singh et al., 2021)

Fonte: autores (2023)

Em suma, conclui-se que as questões de pesquisa são respondidas através deste trabalho, o que pode ser consolidado da seguinte maneira:

QP1: qual é o estado da arte da pesquisa referente à utilização da IoT e *data streaming* em aplicações de manutenção?

Após a aplicação dos diversos critérios de seleção, verifica-se que os estudos ocorreram entre 2019 e 2023. Assim, conclui-se que é um tema recente e que recebe maior atenção das pesquisas a cada ano. Os países com o maior número de pesquisas são China, Inglaterra e Estados Unidos. O *journal* que mais publicou artigos é o *IEEE Internet of Things Journal*, com 5 artigos. O escopo de tal *journal* são os últimos avanços referentes à IoT, além de impactos sociais, gestão de dados e projetos. Os autores com maior influência são Afzal, N., Khan, WZ., Rehman MH., Salah K., e Zangotti, HM. Cada um recebeu 206 citações. Ao analisar a rede de colaboração entre autores, é possível concluir que existem diversas redes de pequena extensão; ou seja, há a oportunidade de tais grupos de pesquisa interagirem entre si para ampliar as conexões.

QP2: quais são as tecnologias, indústrias e contribuições da IoT relacionadas à Manutenção 4.0?

Esta revisão comprovou que as tecnologias mais representativas são, além da própria IoT, por ordem de quantidade de artigos citados, *machine learning*, *big data & analytics* e *cloud computing*. A relação completa de itens apresentados como tecnologia pode ser resumida em técnicas, ferramentas e infraestrutura. As indústrias em que mais são aplicados aIoT com o apoio de dados em tempo real são manufatura e construção. A contribuição daIoT com processos de manutenção são o fornecimento de dados em tempo real, predição de falhas futuras e monitoramento de desempenho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo é analisar o estado da arte referente à utilização daIoT dados em tempo real nos processos de manutenção, além de identificar as tecnologias, indústrias e contribuições. Foram utilizados métodos de revisão da literatura (bibliometria e análise de conteúdo) para atingimento deste objetivo e fornecer respostas às questões de pesquisa propostas. Os resultados obtidos através da análise bibliométrica mostram que existe campo para estender as pesquisas. A primeira menção do tema, dentro da amostra selecionada, foi feita em 2019. Existem trabalhos ainda em andamento em 2023 e, conforme o comportamento crescente da produção de artigos, pode-se concluir que é uma área de interesse da comunidade acadêmica, além do mundo organizacional. Os termos “*internet of things*”, “*framework*”, “*system*”, “*design*”, “*information modeling BIM*”, “*industry*”, “*integration*”, “*performance*” e “*product life-cycle*” são temas motores, enquanto “*fault diagnosis*” pode ser definido como um tema emergente.

Quanto à primeira questão de pesquisa pode ser concluído, em resumo, que é um tema em voga na sociedade e que há pesquisadores influentes atuando sobre eles. Existem *journals* de quadrantes e percentis elevados que publicam artigos e o tema é estudado em diversas partes do mundo. Referente à segunda questão de pesquisa, os maiores representantes das tecnologias são o aprendizado de máquina, análise de dados e computação em nuvem. As principais indústrias apontadas pelo estudo são a manufatura e a construção. As maiores contribuições daIoT à manutenção são a geração de dados em tempo real, análises preditivas e monitoramento de desempenho. Quanto a temas futuros, sugere-se que sejam propostos estudos de caso a fim de verificar a forma em que o conhecimento teórico pode ser gerado e aplicado em situações reais.

REFERÊNCIAS

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101225. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2023, December 5). *Biblioshiny Tutorial*. <https://Bibliometrix.Org/Biblioshiny/Biblioshiny2.Html>.
<https://bibliometrix.org/biblioshiny/biblioshiny2.html>
- Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2020). Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 9714–9727. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2993411>

- Ayvaz, S., & Alpay, K. (2021). Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time. *Expert Systems with Applications*, 173, 114598. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114598>
- Bruegge, F. (2021). *Predictive Maintenance Market: The Evolution from Niche Topic to High ROI Application*. <https://iot-analytics.com/predictive-maintenance-market-evolution-from-niche-topic-to-high-roi-application/>
- Chen, L., Wei, L., Wang, Y., Wang, J., & Li, W. (2022). Monitoring and Predictive Maintenance of Centrifugal Pumps Based on Smart Sensors. *Sensors*, 22(6), 2106. <https://doi.org/10.3390/s22062106>
- Chen, W., Qiu, X., Cai, T., Dai, H. N., Zheng, Z., & Zhang, Y. (2021). Deep Reinforcement Learning for Internet of Things: A Comprehensive Survey. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 23, Issue 3, pp. 1659–1692). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3073036>
- Cifone, F. D., Hoberg, K., Holweg, M., & Staudacher, A. P. (2021). ‘Lean 4.0’: How can digital technologies support lean practices? *International Journal of Production Economics*, 241, 108258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108258>
- Dang, H., Tatipamula, M., & Nguyen, H. X. (2022). Cloud-Based Digital Twinning for Structural Health Monitoring Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(6), 3820–3830. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3115119>
- Eaty, N. D. K. M., & Bagade, P. (2023). Digital twin for electric vehicle battery management with incremental learning. *Expert Systems with Applications*, 229, 120444. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120444>
- Hou, G., Li, L., Xu, Z., Chen, Q., Liu, Y., & Mu, X. (2022). A Visual Management System for Structural Health Monitoring Based on Web-BIM and Dynamic Multi-source Monitoring Data-driven. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 4731–4748. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06268-1>
- Jagatheesaperumal, S. K., Rahouti, M., Ahmad, K., Al-Fuqaha, A., & Guizani, M. (2022). The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Applications, Techniques, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(15), 12861–12885. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3139827>
- Jarašūnienė, A., Čižiūnienė, K., & Čereška, A. (2023). Research on Impact of IoT on Warehouse Management. *Sensors*, 23(4), 2213. <https://doi.org/10.3390/s23042213>
- Jia, P., Wang, X., & Shen, X. (2023). Accurate and Efficient Digital Twin Construction Using Concurrent End-to-End Synchronization and Multi-Attribute Data Resampling. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(6), 4857–4870. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3221012>

- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmstrom, J. (2019). Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, 7, 147406–147419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106522. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>
- Love, P. E. D., & Matthews, J. (2019). The ‘how’ of benefits management for digital technology: From engineering to asset management. *Automation in Construction*, 107, 102930. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102930>
- Lueth, K. L. (2020). *Top 10 IoT applications in 2020*. <https://iot-analytics.com/top-10-iot-applications-in-2020/>
- Mian, T., Choudhary, A., Fatima, S., & Panigrahi, B. K. (2023). Artificial intelligence of things based approach for anomaly detection in rotating machines. *Computers and Electrical Engineering*, 109, 108760. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108760>
- Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D. V., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., Karamanoglu, M., Barn, B., Shetve, D., Prasad, R. V., Venkataraman, H., Trestian, R., & Nguyen, H. X. (2022). Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 24(4), 2255–2291. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>
- Nepomuceno, L. X. (2014). *Técnicas de Manutenção Preditiva - Volume 1* (8a ed.). Blucher.
- Predictive Maintenance: Niche Topic to Killer Application in 10 Years*. (2021). IoT Analytics. <https://iot-analytics.com/wp/wp-content/uploads/2021/05/Predictive-maintenance-market-niche-topic-to-killer-application-in-10-years-min.png>
- Puerto-Santana, C., Bielza, C., Diaz-Rozo, J., Ramirez-Gargallo, G., Mantovani, F., Virumbrales, G., Labarta, J., & Larranaga, P. (2022). Asymmetric HMMs for Online Ball-Bearing Health Assessments. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(20), 20160–20177. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3173064>
- Schöggel, J.-P., Rusch, M., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2023). Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 401–420. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.012>
- Shubita, R. R., Alsadeh, A. S., & Khater, I. M. (2023). Fault Detection in Rotating Machinery Based on Sound Signal Using Edge Machine Learning. *IEEE Access*, 11, 6665–6672. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237074>

- Singh, R., Sharma, R., Vaseem Akram, S., Gehlot, A., Buddhi, D., Malik, P. K., & Arya, R. (2021). Highway 4.0: Digitalization of highways for vulnerable road safety development with intelligent IoT sensors and machine learning. *Safety Science*, *143*, 105407. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105407>
- Sinha, S. (2021). *State of IoT 2021: Number of connected IoT devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular IoT now surpassing 2 billion*. IoT Analytics. [https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/#:~:text=Reports %26 Databases-,State of IoT 2021%3A Number of connected IoT devices growing,IoT now surpassing 2 billion](https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/#:~:text=Reports%26Databases-,State%20of%20IoT%2021%3A%20Number%20of%20connected%20IoT%20devices%20growing,IoT%20now%20surpassing%202%20billion)
- Stevan Jr, S. L., Leme, M. O., & Dias, M. M. (2018). *Indústria 4.0: Fundamentos, Perspectivas e Aplicações* (1st ed.). Érica.
- Teoh, Y. K., Gill, S. S., & Parlikad, A. K. (2023). IoT and Fog-Computing-Based Predictive Maintenance Model for Effective Asset Management in Industry 4.0 Using Machine Learning. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(3), 2087–2094. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3050441>
- uit het Broek, M. A. J., Teunter, R. H., de Jonge, B., & Veldman, J. (2021). Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, *214*, 107743. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107743>
- von Stietencron, M., Hribernik, K., Lepenioti, K., Bousdekis, A., Lewandowski, M., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2022). Towards logistics 4.0: an edge-cloud software framework for big data analytics in logistics processes. *International Journal of Production Research*, *60*(19), 5994–6012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1977408>
- Wang, H., Ni, G., Chen, J., & Qu, J. (2020). Research on rolling bearing state health monitoring and life prediction based on PCA and Internet of things with multi-sensor. *Measurement*, *157*, 107657. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107657>
- Wu, J.-Y., Wu, M., Chen, Z., Li, X.-L., & Yan, R. (2021). Degradation-Aware Remaining Useful Life Prediction With LSTM Autoencoder. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *70*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3055788>
- Xie, Q., Hu, X., Ren, L., Qi, L., & Sun, Z. (2023). A Binocular Vision Application in IoT: Realtime Trustworthy Road Condition Detection System in Passable Area. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *19*(1), 973–983. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3145858>
- Zhang, G., Chen, C.-H., Cao, X., Zhong, R. Y., Duan, X., & Li, P. (2022). Industrial Internet of Things-enabled monitoring and maintenance mechanism for fully

mechanized mining equipment. *Advanced Engineering Informatics*, 54, 101782.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101782>

Zhang, L., Qiao, F., Wang, J., & Zhai, X. (2021). Equipment Health Assessment Based on Improved Incremental Support Vector Data Description. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(5), 3205–3216.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2919468>

Zhang, S., Ye, F., Wang, B., & Habetler, T. G. (2021). Semi-Supervised Bearing Fault Diagnosis and Classification Using Variational Autoencoder-Based Deep Generative Models. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6476–6486.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3040696>

Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472.
<https://doi.org/10.1177/1094428114562629>