

Deteção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC e sua relação com o desempenho energético de edificações: uma análise bibliométrica

Fault Detection and Diagnosis in HVAC Systems and their relation on Building Energy Performance: A Bibliometric Analysis

Bruno de Oliveira Schneider¹

Guilherme Agues Emerick²

Matheus Alves Lima³

Rodrigo de Souza⁴

Thales Rodrigues Barboza⁵

Resumo

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) desempenham papel relevante no desempenho energético das edificações e falhas em seus componentes podem comprometer a eficiência operacional, elevando o consumo de energia. Esta pesquisa analisou a produção científica sobre detecção e diagnóstico de falhas (*Fault Detection and Diagnosis – FDD*) em sistemas HVAC e sua relação com o desempenho energético de edificações, buscando compreender a evolução do tema e as principais tendências da área. Para isso, foi realizada uma

¹ Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória – Espírito Santo – Brasil. ORCID:

<https://orcid.org/0009-0005-2273-2266>

² Profissional independente – Mantena – Minas Gerais – Brasil. ORCID:

<https://orcid.org/0009-0005-1234-9327>

³ Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – São Mateus – Espírito Santo – Brasil. ORCID:

<https://orcid.org/0009-0000-3119-5910>

⁴ Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória – Espírito Santo – Brasil. ORCID:

<https://orcid.org/0009-0006-7031-5894>

⁵ Instituto Federal Fluminense – Cordeiro – Rio de Janeiro – Brasil. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-4783-1106>

análise bibliométrica da produção indexada na base *Web of Science*, considerando o período de 2016 a 2026. Observou-se crescimento da produção científica ao longo do período, com destaque para periódicos voltados à energia e às edificações. Entre os termos mais frequentes, destacaram-se: *fault detection*, *diagnosis*, *energy efficiency*, *HVAC system*, *model* e *strategy*. Nos anos mais recentes, observou-se a maior presença de abordagens relacionadas a *machine learning*, *prediction*, *prognostics*, *optimization* e *predictive control*. Os resultados indicam que a pesquisa vem ampliando seu foco, passando da identificação e do diagnóstico de falhas para estudos que também envolvem previsão, prognóstico, otimização e controle, com maior aproximação entre FDD e desempenho energético.

Palavras-chave: HVAC; Detecção; Diagnóstico; Eficiência; Engenharias.

Abstract

Heating, ventilation, and air conditioning systems (HVAC) play an important role in the energy performance of buildings and faults in their components can compromise operational efficiency, increasing energy consumption. This study analyzed the scientific literature on fault detection and diagnosis (FDD) in HVAC systems and its relationship with building energy performance, seeking to understand the evolution of the topic and its main trends. A bibliometric analysis was conducted using publications indexed in the Web of Science database, covering the period from 2016 to 2026. Scientific production increased throughout the period, with a concentration of publications in journals focused on energy and buildings. Among the most frequent terms were *fault detection*, *diagnosis*, *energy efficiency*, *HVAC system*, *model*, and *strategy*. In recent years, approaches related to *machine learning*, *prediction*, *prognostics*, *optimization*, and *predictive control* have become more prominent. The results indicate that research has broadened its focus from fault identification and diagnosis to studies that also address prediction, prognostics, optimization, and control, strengthening the connection between FDD and building energy performance.

Keywords: HVAC; Detection; Diagnosis; Efficiency; Engineering.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (*Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC*) estão diretamente relacionados à operação e ao desempenho energético das edificações. Além de proporcionarem condições adequadas de conforto térmico e ambiente interno, esses sistemas representam parcela importante do consumo de energia dos edifícios. Por essa razão, seu monitoramento e sua operação eficiente têm recebido atenção em estudos voltados ao desempenho de sistemas prediais.

Problemas em equipamentos e componentes podem alterar as condições de funcionamento dos sistemas HVAC. Falhas em sensores, atuadores, equipamentos de climatização e sistemas de controle, por exemplo, podem modificar o comportamento esperado do sistema e aumentar o consumo de energia. Para identificar essas condições, diferentes abordagens vêm sendo empregadas, desde modelos baseados no comportamento físico dos equipamentos até métodos estatísticos e técnicas orientadas por dados (LI et al., 2016; ZHANG et al., 2017; KIM et al., 2018).

As técnicas de detecção e diagnóstico de falhas, conhecidas pela sigla FDD (*Fault Detection and Diagnosis*), são utilizadas para reconhecer comportamentos anormais e investigar suas possíveis causas. Esses métodos têm sido aplicados a diferentes componentes de sistemas HVAC, incluindo *chillers*, unidades de tratamento de ar e sistemas de volume de refrigerante variável. Entre as abordagens encontradas na literatura estão métodos baseados em modelos, técnicas estatísticas e métodos de aprendizado de máquina (LI et al., 2016; WANG et al., 2017; LEE et al., 2019).

Com o aumento da disponibilidade de dados provenientes dos sistemas de automação e monitoramento das edificações, métodos de aprendizado de máquina passaram a ocupar espaço cada vez maior nas pesquisas sobre FDD. Redes neurais, modelos como *XGBoost* e técnicas de aprendizado profundo vêm sendo utilizadas para reconhecer padrões de funcionamento e classificar diferentes condições de falha em sistemas HVAC (CHAKRABORTY et al., 2019; ZHANG; SAEED; SADEGHIAN, 2023).

A discussão sobre FDD também passou a envolver questões relacionadas ao desempenho energético e à manutenção dos sistemas. Uma falha pode afetar não apenas o funcionamento de

determinado componente, mas também o consumo de energia necessário para manter as condições de operação desejadas. Por esse motivo, estudos recentes têm aproximado o diagnóstico de falhas de estratégias de manutenção preditiva, *digital twins*, prognóstico, otimização e controle preditivo (HOSAMO et al., 2022; HOSAMO et al., 2023).

Embora a produção científica sobre o tema tenha aumentado, os estudos estão distribuídos entre diferentes áreas, como engenharia de energia, engenharia de edificações, refrigeração e ar-condicionado, automação, controle, ciência de dados e inteligência artificial. Essa diversidade dificulta uma visão conjunta de como o campo vem se desenvolvendo e de quais temas passaram a ganhar maior espaço ao longo dos anos.

A análise bibliométrica permite examinar essa produção de maneira sistemática, considerando aspectos como evolução temporal, fontes de publicação, autores, distribuição geográfica, citações e relações entre palavras-chave. A análise desses elementos também pode ajudar a identificar mudanças na agenda de pesquisa e temas que ainda apresentam oportunidades de desenvolvimento.

Diante disso, este estudo analisou a produção científica sobre detecção e o diagnóstico de falhas em sistemas HVAC e sua relação com o desempenho energético de edificações, considerando a evolução da produção entre 2016 e 2026, os principais periódicos e contribuintes, a estrutura conceitual da literatura, as tendências temáticas e as lacunas de pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sistemas HVAC e desempenho energético

O desempenho energético das edificações resulta da interação entre características construtivas, condições ambientais, ocupação, equipamentos e estratégias de operação. Nesse conjunto, os sistemas HVAC têm papel importante, pois seu funcionamento está diretamente relacionado às condições de temperatura, ventilação e conforto dos ambientes.

A modelagem e a avaliação desses sistemas têm incorporado diferentes técnicas computacionais. Ahmad et al. (2016) analisaram técnicas de inteligência computacional aplicadas a sistemas HVAC, enquanto Okochi e Yao (2016) discutiram avanços tecnológicos relacionados aos sistemas de volume de ar variável.

A avaliação do desempenho energético também considera variáveis operacionais e ambientais. Modelos do comportamento energético das edificações podem estabelecer condições de referência para identificar desvios no funcionamento dos sistemas. Zhang et al. (2017), por exemplo, investigaram a representação de falhas operacionais de sistemas HVAC em simulações de desempenho de edificações.

A identificação desses desvios pode complementar a avaliação convencional do desempenho energético, principalmente quando as alterações observadas podem ser associadas a condições específicas de operação dos equipamentos.

2.2 Detecção e diagnóstico de falhas

Detecção e o diagnóstico de falhas são etapas relacionadas, mas possuem finalidades distintas. A detecção está associada à identificação de um comportamento anormal, enquanto o diagnóstico busca determinar a natureza ou a provável origem da condição identificada.

Diversos métodos têm sido empregados para essas finalidades em sistemas HVAC. Li et al. (2016) utilizaram uma estratégia orientada por dados para detectar e diagnosticar falhas em *chillers* por meio de análise discriminante linear. Wang et al. (2017) empregaram redes Bayesianas no diagnóstico de falhas em *chillers*.

A literatura também apresenta métodos baseados em modelos físicos e simulação. Zhang et al. (2017) investigaram a modelagem de falhas operacionais em sistemas HVAC dentro de simulações de desempenho de edificações, relacionando as condições anormais aos efeitos observados no sistema.

Uma revisão sobre métodos de detecção e diagnóstico de falhas em sistemas prediais mostrou a diversidade de abordagens utilizadas na área e o aumento da participação de métodos baseados em dados operacionais (KIM et al., 2018).

2.3 Métodos orientados por dados e aprendizado de máquina

A maior disponibilidade de dados provenientes de sistemas de automação predial tem favorecido o uso de métodos orientados por dados. A partir de registros históricos de operação,

esses métodos podem reconhecer padrões associados tanto ao funcionamento normal quanto a condições de falha.

Chakraborty et al. (2019) utilizaram um modelo *XGBoost* com limiar dinâmico para a detecção antecipada de falhas em sistemas HVAC. Lee et al. (2019) investigaram métodos baseados em *deep learning* para detecção e diagnóstico de falhas em unidades de tratamento de ar.

O aprendizado de máquina também passou a ser aplicado em situações nas quais os dados disponíveis são incompletos ou não possuem classificação prévia. Li et al. (2021), por exemplo, desenvolveram uma abordagem semi supervisionada para o diagnóstico de falhas em *chillers* utilizando dados não rotulados.

Revisões mais recentes mostram a consolidação do aprendizado de máquina e do aprendizado profundo entre as abordagens utilizadas em FDD para sistemas HVAC (CHEN et al., 2023; ZHANG; SAEED; SADEGHIAN, 2023).

2.4 Diagnóstico, prognóstico e manutenção preditiva

O FDD tem sido aplicado não apenas à identificação de falhas já existentes, mas também a estratégias voltadas à previsão de seu comportamento e ao planejamento de intervenções. A incorporação de técnicas de previsão e prognóstico permite considerar a evolução das condições operacionais ao longo do tempo.

Essa aproximação entre diagnóstico e manutenção pode ser observada em estudos voltados à manutenção preditiva. Hosamo et al. (2022) propuseram uma estrutura para manutenção preditiva de unidades de tratamento de ar baseada na detecção e no diagnóstico automático de falhas.

Outra linha de desenvolvimento envolve o uso de *digital twins*. Hosamo et al. (2023) investigaram sua aplicação na detecção e previsão de fontes de falhas e avaliação do conforto em edifícios não residenciais.

Essas abordagens ampliam a função dos sistemas de monitoramento. Em vez de apenas identificar comportamentos anormais, os dados obtidos durante a operação podem ser utilizados para estimar a evolução da condição do sistema e subsidiar a definição de intervenções de manutenção.

2.5 Relação entre falhas e desempenho energético

As falhas em sistemas HVAC podem afetar tanto o funcionamento dos equipamentos quanto seu desempenho energético. Dependendo da natureza da falha, o sistema pode necessitar de maior consumo de energia para atender às condições de operação estabelecidas.

A relação entre esses dois aspectos também aparece na literatura por meio da presença conjunta de termos como *fault detection*, *energy efficiency*, *energy consumption* e *energy performance*. Apesar dessa proximidade temática, a presença conjunta desses conceitos não significa que os estudos estabeleçam, necessariamente, uma relação quantitativa entre uma falha específica e o aumento do consumo energético. A identificação e o diagnóstico de uma falha não permitem, por si só, determinar sua consequência energética.

Essa questão representa uma das lacunas observadas na literatura analisada e reforça a importância de pesquisas que relacionem as condições de falha às alterações efetivamente observadas no desempenho energético dos sistemas HVAC e das edificações.

3 METODOLOGIA

3.1 Coleta e tratamento dos dados

Realizou-se uma análise bibliométrica de caráter quantitativo e descritivo, com base em registros bibliográficos indexados na *Web of Science* (WoS). A pesquisa concentrou-se na produção científica relacionada à detecção e ao diagnóstico de falhas em sistemas HVAC e à sua relação com eficiência, consumo e desempenho energético de edificações.

Realizou-se a busca em 15 de agosto de 2026, utilizando o campo de tópicos da *Web of Science* (TS). Construiu-se a estratégia de modo a combinar quatro dimensões conceituais: sistemas HVAC, detecção/diagnóstico de falhas, desempenho energético e edificações, conforme apresentado na Equação 1.

$$TS=($$

$$(HVAC \text{ OR } "air \ conditioning" \text{ OR } chiller*)$$

$$AND$$

$$("fault \ detection" \text{ OR } "fault \ diagnosis" \text{ OR } FDD)$$

$$AND$$

$$("energy \ efficiency" \text{ OR } "energy \ consumption" \text{ OR } "energy \ performance")$$

$$AND$$

$$(building* \text{ OR } "commercial \ building*" \text{ OR } "office \ building*" \text{ OR } "building$$

$$energy")$$

$$)$$
(1)

Refinaram-se os resultados da busca considerando o período de publicação de 2016 a 2026, o idioma inglês e os tipos documentais *Article* e *Review*. Após a aplicação desses critérios, obtiveram-se 262 documentos para a análise. Como a coleta foi realizada em 15 de agosto de 2026, os registros referentes a esse ano correspondem à produção indexada até a data da busca e não representam um período anual completo.

Inicialmente, verificaram-se possíveis duplicidades nos registros. Na verificação dos identificadores DOI, a única ocorrência identificada estava associada a registros sem DOI informado, e não se considerou essa ocorrência como evidência de duplicação de documentos.

Submeteram-se as palavras-chave a um processo de normalização, com o objetivo de agrupar diferentes grafias ou formas equivalentes de um mesmo termo. Para isso, utilizou-se um vocabulário de equivalência (*thesaurus*), permitindo consolidar termos como *fault detection*, *fault diagnosis*, *neural network*, *energy consumption*, *air conditioning system* e *model predictive control*.

Esse procedimento buscou reduzir a fragmentação decorrente de diferenças de grafia, hifenização e formas de apresentação dos termos e proporcionar maior consistência às análises de frequência e coocorrência.

3.2 Análises bibliométricas

Realizou-se a análise dos registros no ambiente R, utilizando o pacote *Bibliometrix*. Consideraram-se indicadores relacionados à evolução anual da produção científica, fontes de publicação, produtividade dos autores, distribuição geográfica, colaboração científica, citações e palavras-chave.

Também se realizaram análises da estrutura conceitual da literatura por meio da coocorrência de palavras-chave, permitindo identificar relações entre os principais termos empregados nos documentos.

Examinou-se a estrutura temática por meio de mapas baseados em centralidade e densidade, utilizados para posicionar e interpretar os agrupamentos temáticos. Classificaram-se esses agrupamentos em temas motores, temas básicos, temas de nicho e temas emergentes ou em declínio.

Por fim, analisou-se a evolução temática, considerando diferentes períodos da série temporal, permitindo observar mudanças na presença e na relação entre os principais temas ao longo do período estudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos documentos analisados

A análise resultou em 262 documentos, publicados em 60 fontes, com participação de 936 autores e 959 palavras-chave dos autores. O conjunto de documentos analisados reuniu 11.699 referências, apresentou idade média de 4,14 anos e média de 36,77 citações por documento.

Identificou-se uma colaboração internacional de 29,01%, indicando a participação de pesquisadores de diferentes países na produção científica analisada. Quanto aos tipos documentais, observou-se predominância de artigos científicos, seguidos por documentos classificados como revisões, conforme os critérios estabelecidos para a seleção das publicações.

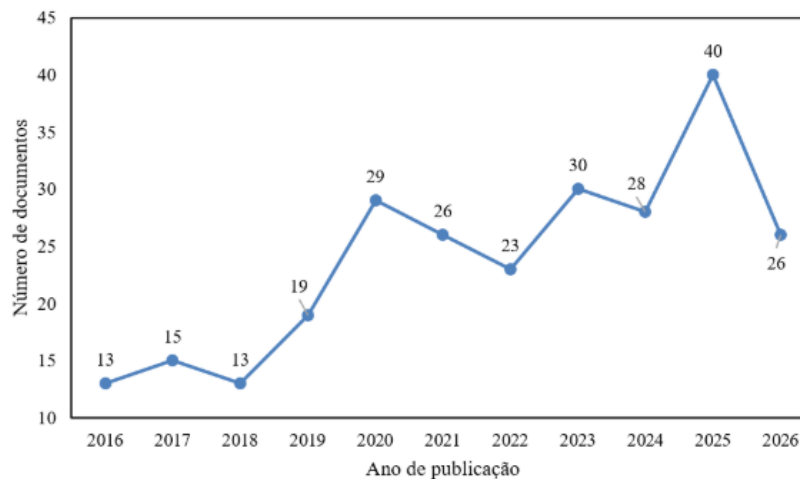
4.2 Evolução temporal da produção científica

A Figura 1 apresenta a evolução da produção científica sobre detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC no período analisado. Observou-se crescimento da produção ao longo da série, passando de 13 documentos em 2016 para 40 em 2025, maior número anual registrado no período. A partir de 2020, a produção permaneceu em patamar superior ao observado nos primeiros anos, apesar das oscilações registradas entre 2021 e 2024. Em 2026, foram

identificados 26 documentos até 15 de agosto, portanto, esse número não representa a produção correspondente a um ano completo.

O crescimento observado ao longo da série indica aumento do interesse científico pela relação entre sistemas HVAC, detecção e diagnóstico de falhas e desempenho energético das edificações.

Figura 1 – Evolução da produção científica no período de 2016 a 2026.



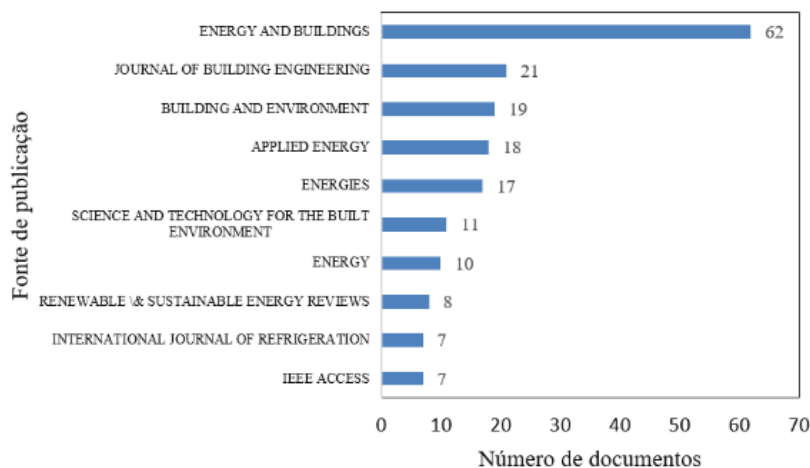
Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

4.3 Principais fontes de publicação

As principais fontes de publicação são apresentadas na Figura 2. Observou-se forte concentração da produção científica em *Energy and Buildings*, que apresentou 62 documentos, número aproximadamente três vezes superior ao registrado por *Journal of Building Engineering*, segunda fonte mais produtiva. Também se destacaram *Building and Environment*, *Applied Energy* e *Energies*, com 19, 18 e 17 documentos, respectivamente. A predominância de periódicos relacionados à energia e ao desempenho de edificações reforça a proximidade entre os estudos de detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC e as questões relacionadas ao desempenho energético das edificações.

Apesar dessa concentração, a produção encontra-se distribuída entre periódicos de diferentes áreas, incluindo energia, desempenho de edificações, refrigeração, simulação e automação. Essa distribuição evidencia o caráter interdisciplinar do tema, que envolve tanto aspectos relacionados ao funcionamento dos sistemas HVAC quanto métodos de modelagem, diagnóstico, controle e análise de dados.

Figura 2 – Principais fontes de publicação da produção científica analisada.



Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

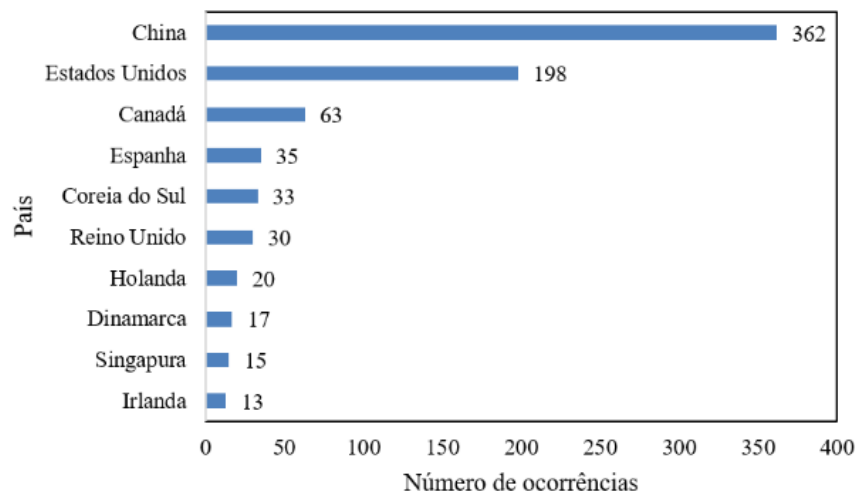
4.4 Distribuição geográfica

A distribuição das publicações por país (Figura 3) mostrou forte concentração da produção científica na China e nos Estados Unidos. Juntos, os dois países registraram 560 ocorrências, enquanto outros países da Europa, Ásia e América do Norte também apresentaram participação na produção analisada.

Na análise por país do autor correspondente, identificou-se apenas um documento com autor correspondente no Brasil: Borgstein, Lamberts e Hensen (2018), publicado em *Energy and Buildings*, com o título *Mapping failures in energy and environmental performance of buildings*. A participação brasileira mostrou-se, portanto, reduzida em relação aos países com maior

produção. Esse resultado indica que o tema ainda apresenta espaço para maior desenvolvimento da produção científica nacional.

Figura 3 – Principais países quanto à produção científica analisada.



Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

4.5 Autores e colaboração científica

A produção científica analisada envolveu 936 autores distribuídos em 262 documentos, resultando em uma média de 3,57 autores por documento. Entre os autores com maior número de documentos, destacaram-se Chen, Y., com 12 publicações; Li, G., com 11; e Wang, Z. e Chen, H., com 10 documentos cada. Granderson, J., Zhang, X. e Chen, Z. apresentaram nove documentos, enquanto O'Neill, Z., Lin, G. e Wang, S. registraram oito publicações cada (Tabela 1).

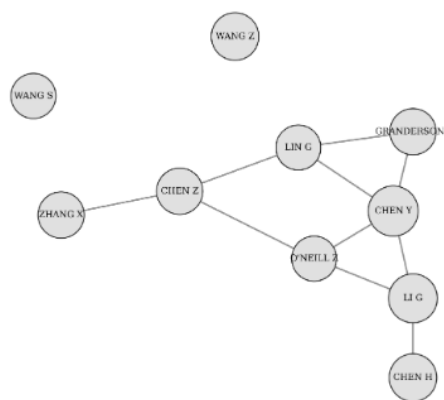
Tabela 1 – Principais autores da produção científica analisada.

Autor	Documentos	Citações
Chen, Y.	12	482
Li, G.	11	409
Wang, Z.	10	641
Chen, H.	10	185
Granderson, J.	9	608
Zhang, X.	9	369
Chen, Z.	9	354
O'Neill, Z.	8	747
Lin, G.	8	402
Wang, S.	8	156

Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

A rede de colaboração apresentada na Figura 4 mostrou as relações de coautoria entre os dez autores com maior produção. Observou-se a formação de um núcleo principal de colaboração envolvendo Chen, Y., Lin, G., Granderson, J., O'Neill, Z. e Li, G., com conexões adicionais de Chen, Z. e Zhang, X. Chen, H. apresentou conexão com Li, G., enquanto Wang, Z. e Wang, S. não apresentaram conexões com os demais autores selecionados na rede.

Figura 4 – Rede de colaboração entre os principais autores da produção científica analisada.



Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

A ausência de conexões de Wang, Z. e Wang, S. na Figura 4 deve ser interpretada dentro do recorte adotado para a análise. O fato de esses autores aparecerem isolados não significa ausência de colaboração científica, mas indica que não foram identificadas relações de coautoria com os demais nove autores incluídos na rede.

A presença de diferentes autores e grupos de colaboração na produção analisada reforça a diversidade de abordagens empregadas no estudo de detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC. O tema envolve aspectos relacionados a sistemas de climatização, desempenho energético, modelagem, automação, controle e métodos computacionais, o que favorece a participação de pesquisadores de diferentes áreas.

Esse resultado demonstra a existência de cooperação científica entre grupos de diferentes contextos, embora a produção permaneça geograficamente concentrada, principalmente na China e nos Estados Unidos, conforme observado na análise apresentada no item 4.4.

4.6 Impacto científico

A análise das citações permitiu identificar os documentos que receberam maior número de citações dentro da produção científica selecionada (Tabela 2). A distribuição das citações entre os documentos mais citados evidencia a existência de um núcleo de trabalhos com maior repercussão em diferentes dimensões da pesquisa em sistemas HVAC e edificações. Entre os dez documentos com maior número de citações, identificaram-se trabalhos relacionados à detecção e diagnóstico de falhas, eficiência energética, aprendizado de máquina, automação predial, monitoramento e manutenção preditiva.

Tabela 2 – Documentos mais citados na produção científica analisada

Posição	Autores	Ano	Título	Citações
1	Touzani et al.	2018	<i>Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings</i>	383
2	Lu et al.	2020	<i>Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance</i>	360
3	Kim e Katipamula	2018	<i>A review of fault detection and diagnostics methods for building systems</i>	287
4	Himeur et al.	2023	<i>AI-big data analytics for building automation and management systems: A survey, actual challenges and future perspectives</i>	273
5	Dong et al.	2019	<i>A review of smart building sensing system for better indoor environment control</i>	265
6	Hong et al.	2020	<i>State-of-the-art on research and applications of machine learning in the building life cycle</i>	255
7	Chen et al.	2023	<i>A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems</i>	246
8	Hosamo et al.	2022	<i>A digital twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics</i>	245
9	Tien et al.	2022	<i>Machine learning and deep learning methods for enhancing building energy efficiency and indoor environmental quality – A review</i>	202
10	Ahmad et al.	2016	<i>Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review</i>	193

Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

A presença desses diferentes enfoques entre os trabalhos mais citados evidencia a aproximação entre monitoramento, diagnóstico, análise energética e métodos computacionais na produção científica da área. Não se trata, portanto, de linhas de pesquisa isoladas, mas de temas que se complementam à medida que os sistemas prediais passam a ser monitorados de forma mais detalhada e os dados de operação são incorporados aos processos de diagnóstico e tomada de decisão.

Observou-se também a presença de trabalhos de revisão entre os documentos mais citados, especialmente aqueles dedicados a FDD, inteligência artificial e eficiência energética. Esses estudos contribuem para a consolidação do conhecimento da área ao sistematizarem métodos e aplicações desenvolvidos em diferentes linhas de pesquisa. A concentração dos documentos mais citados entre 2016 e 2023 deve, contudo, ser interpretada considerando o maior tempo disponível para acúmulo de citações dos trabalhos publicados nos primeiros anos do período analisado.

4.7 Estrutura conceitual

A análise das palavras-chave permitiu identificar os principais conceitos associados à produção científica sobre detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC (Tabela 3). Entre os termos mais frequentes, destacaram-se *fault detection*, *diagnosis*, *energy efficiency*, *HVAC system*, *model*, *strategy* e *performance*. A frequência desses termos evidencia a presença simultânea de três dimensões principais na literatura analisada: identificação de falhas, sistemas HVAC e desempenho energético.

Tabela 3 – Principais palavras-chave da produção científica analisada

Palavra-chave normalizada	Frequência
<i>Fault detection</i>	101
<i>Diagnosis</i>	53
<i>Energy efficiency</i>	45
<i>HVAC system</i>	45
<i>Model</i>	45
<i>Strategy</i>	43
<i>Systems</i>	42
<i>Performance</i>	39
<i>Fault diagnosis</i>	36
<i>Buildings</i>	33
<i>Energy consumption</i>	33
<i>HVAC</i>	32
<i>Machine learning</i>	29
<i>Optimization</i>	29
<i>Prognostics</i>	28

Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science.

Os termos *fault detection*, *diagnosis* e *fault diagnosis* ocupam posição central nessa estrutura, representando o núcleo conceitual relacionado à identificação de condições anormais e à determinação de suas possíveis causas. A associação de *model* e *strategy* a esses termos indica a utilização de diferentes modelos e estratégias para o desenvolvimento das técnicas de FDD.

Outra dimensão está relacionada ao desempenho energético das edificações. Termos como *energy efficiency*, *energy consumption*, *energy performance* e *performance* aparecem associados à produção analisada, indicando que a investigação das falhas não se restringe ao funcionamento

dos equipamentos, mas também envolve suas possíveis implicações sobre o desempenho dos sistemas e das edificações.

Também se observa a presença de termos relacionados às abordagens computacionais. *Machine learning, optimization, prognostics, data-driven, neural network, deep learning* e *artificial intelligence* aparecem na estrutura conceitual, indicando a incorporação de métodos orientados por dados e técnicas de inteligência artificial às pesquisas sobre FDD.

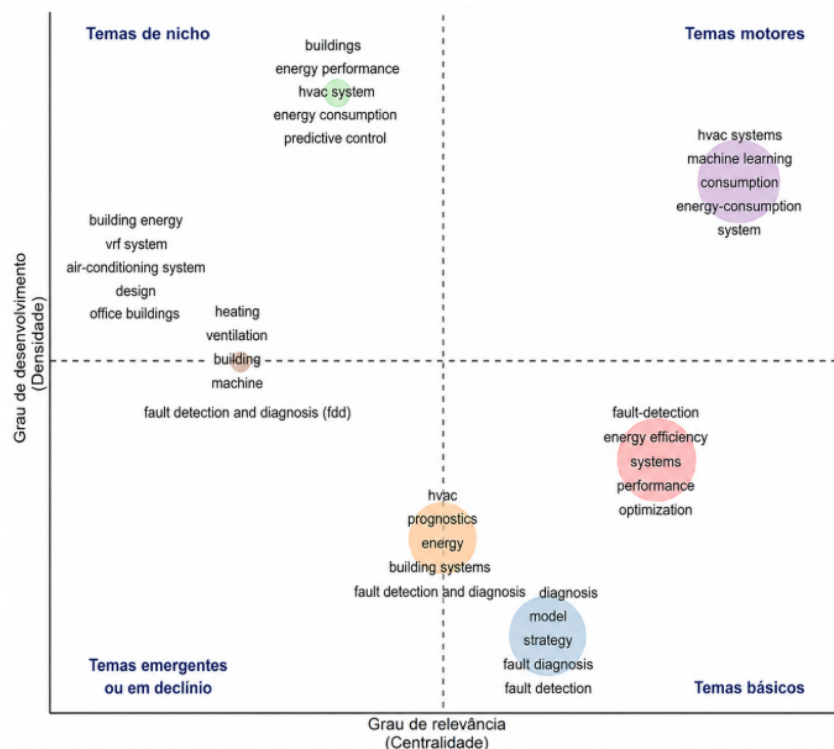
A relação entre esses grupos de termos sugere uma estrutura conceitual na qual detecção e diagnóstico de falhas constituem o núcleo do campo, enquanto modelagem, eficiência energética e métodos computacionais estabelecem conexões com diferentes aplicações e estratégias de análise. A presença de *prognostics* e *optimization* também indica a ampliação das aplicações para além da identificação de falhas, aproximando o diagnóstico de abordagens voltadas à previsão e à tomada de decisão.

4.8 Análise temática

A análise temática permitiu classificar os principais agrupamentos de palavras-chave segundo seu grau de centralidade e densidade, resultando na identificação de temas motores, temas básicos, temas de nicho e temas emergentes ou em declínio (Figura 5). Essa classificação permite observar não apenas a frequência dos termos, mas também a importância dos diferentes temas para a estrutura e o desenvolvimento do campo.

Os temas motores estão relacionados principalmente aos sistemas HVAC, ao aprendizado de máquina e ao consumo energético. A elevada centralidade e densidade desses temas indicam que essas abordagens apresentam forte integração com a produção científica analisada e constituem áreas com maior desenvolvimento. A presença simultânea de aspectos computacionais e energéticos evidencia a aproximação entre métodos de análise de dados e avaliação do funcionamento dos sistemas HVAC.

Figura 5 – Mapa temático da produção científica analisada



Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science, processados no Biblioshiny.

Os temas básicos concentram-se principalmente em detecção e diagnóstico de falhas, associados a modelos e estratégias de diagnóstico. A elevada centralidade desses temas indica que eles possuem relação com diferentes linhas de pesquisa do campo, embora apresentem menor densidade. Esse posicionamento reforça o papel da detecção e do diagnóstico como elementos estruturantes da produção científica analisada.

Os temas de nicho estão associados principalmente a edificações, desempenho energético, consumo de energia, sistemas de climatização e controle preditivo. Apesar de apresentarem menor centralidade, esses assuntos possuem maior desenvolvimento interno, caracterizando linhas de investigação mais específicas. Sua posição evidencia a existência de estudos direcionados a aspectos particulares do desempenho e da operação de sistemas HVAC em edificações.

No quadrante de temas emergentes ou em declínio, encontram-se agrupamentos com menor centralidade e densidade. A posição nesse quadrante, entretanto, não permite determinar isoladamente se os temas estão em processo de emergência ou de declínio, uma vez que ambas as

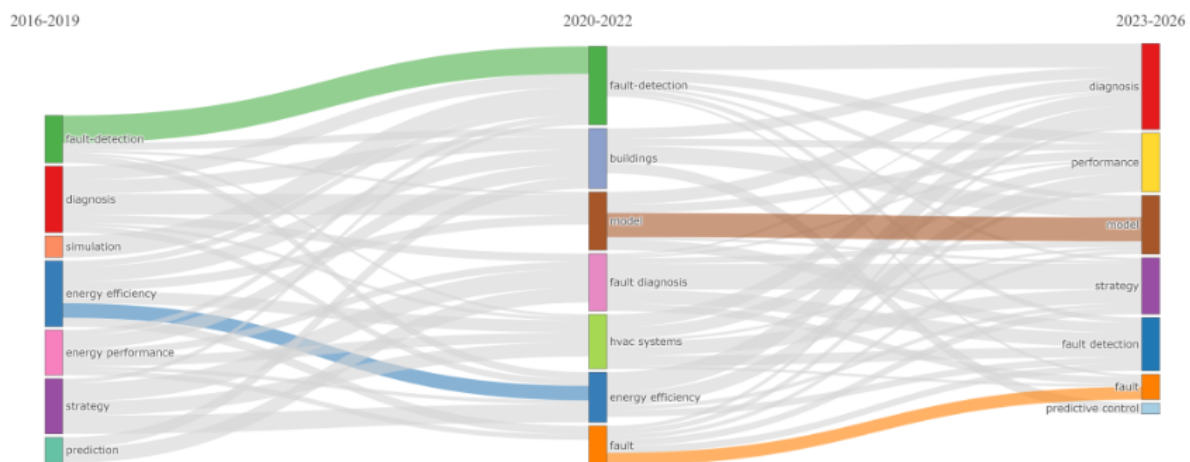
situações podem apresentar características semelhantes no mapa temático. Essa distinção depende da análise da evolução dos temas ao longo do período estudado.

De modo geral, o mapa temático evidencia uma estrutura na qual a detecção e o diagnóstico de falhas permanecem associados ao núcleo da área, enquanto eficiência energética, métodos computacionais, desempenho de edificações e estratégias de controle compõem diferentes frentes de investigação.

4.9 Evolução temática

A análise da evolução temática permitiu observar como os principais assuntos da produção científica se modificaram ao longo do período analisado (Figura 6). Entre 2016 e 2019, destacaram-se temas relacionados à detecção de falhas, diagnóstico, simulação, eficiência energética, desempenho energético, estratégia e previsão. Nesse período, a produção apresentou maior concentração em questões relacionadas à identificação de falhas e à avaliação do desempenho dos sistemas.

Figura 6 – Evolução temática da produção científica entre 2016 e 2026.



Fonte: elaboração própria com base nos dados da Web of Science, processados no Biblioshiny.

No período de 2020 a 2022, observou-se a permanência de *fault detection*, acompanhada pelo surgimento ou fortalecimento de temas como *buildings*, *model*, *fault diagnosis*, *HVAC systems*, *energy efficiency* e *fault*. Essa configuração indica uma ampliação dos enfoques da pesquisa, com maior associação entre a identificação de falhas, a modelagem dos sistemas, as edificações e a eficiência energética.

Entre 2023 e 2026, verificou-se a continuidade de alguns desses temas e a incorporação de novos enfoques. *Diagnosis* e *model* permaneceram presentes, enquanto apareceram com maior destaque *performance*, *strategy*, *fault detection*, *fault* e *predictive control*. A evolução indicou uma aproximação entre a identificação e o diagnóstico de falhas e questões relacionadas ao desempenho e ao controle dos sistemas.

As conexões entre os períodos também mostram que os temas não permanecem necessariamente com a mesma denominação ou posição ao longo do tempo. Alguns assuntos apresentam continuidade, enquanto outros são substituídos ou desdobrados em abordagens mais específicas. A trajetória de *fault detection*, por exemplo, manteve-se presente nos diferentes períodos, enquanto temas associados a *diagnosis*, *model*, *performance* e *predictive control* ganharam espaço nas etapas mais recentes.

De modo geral, a evolução temática indica a permanência da detecção e do diagnóstico de falhas como eixo central da produção científica, acompanhada pela ampliação das relações com modelagem, desempenho e controle. O período mais recente apresentou, portanto, uma estrutura temática mais diversificada, na qual a identificação de falhas passou a se relacionar também com aspectos de desempenho e estratégias de controle dos sistemas HVAC.

4.10 Discussão integrada e lacunas de pesquisa

Os resultados obtidos nas diferentes análises bibliométricas mostraram que a produção científica sobre detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC apresentou crescimento e diversificação ao longo do período analisado. Os estudos abrangeram temas relacionados à eficiência energética, modelagem, diagnóstico, aprendizado de máquina, otimização, prognóstico e controle, indicando aproximação entre diferentes áreas de conhecimento.

A análise dos autores e do impacto científico mostrou a participação de diferentes grupos de pesquisa e a existência de trabalhos com elevada repercussão na área. A análise das palavras-chave, por sua vez, evidenciou a permanência de *fault detection* e *diagnosis* entre os principais conceitos, juntamente com termos relacionados à eficiência energética, desempenho, sistemas HVAC e modelagem. A evolução temática mostrou que esses temas permaneceram presentes ao longo do período, enquanto abordagens relacionadas a *performance*, *prognostics* e *predictive control* ganharam espaço nos períodos mais recentes.

Apesar dessa expansão, os resultados também indicam algumas lacunas. Uma delas refere-se à integração entre a detecção e o diagnóstico de falhas e a avaliação quantitativa do desempenho energético. Embora *energy efficiency*, *energy consumption* e *energy performance* apresentem presença relevante na produção analisada, a ocorrência conjunta desses termos não significa, necessariamente, que os estudos estabeleçam uma relação quantitativa entre tipos específicos de falhas e seus impactos sobre o consumo de energia. A avaliação dessa relação constitui, portanto, uma possibilidade de aprofundamento.

Outra lacuna refere-se à integração entre FDD, prognóstico, otimização e controle. A evolução temática indica maior presença desses assuntos nos períodos mais recentes, mas sua incorporação ao campo de FDD ainda aparece distribuída entre diferentes linhas de pesquisa. Estudos que integrem a identificação da falha, a previsão de sua evolução, a avaliação do impacto energético e a definição de estratégias de controle podem contribuir para aproximar os resultados do diagnóstico das decisões de operação e manutenção.

Identificou-se também a necessidade de ampliar a aplicação das técnicas em condições reais de operação. A utilização de modelos, métodos orientados por dados e técnicas de aprendizado de máquina depende da disponibilidade e da qualidade dos dados obtidos dos sistemas prediais. Nesse contexto, questões relacionadas à qualidade dos dados, à generalização dos modelos para diferentes edificações e equipamentos e à validação em condições reais constituem aspectos relevantes para o avanço das aplicações.

Por fim, a concentração da produção científica em determinados países e grupos de pesquisa indica a necessidade de ampliar os estudos em diferentes contextos climáticos, construtivos e operacionais. A comparação entre edificações e sistemas HVAC submetidos a diferentes condições de operação pode contribuir para avaliar a capacidade de generalização dos métodos desenvolvidos.

5 Considerações Finais

A análise bibliométrica permitiu caracterizar a produção científica sobre detecção e diagnóstico de falhas em sistemas HVAC e sua relação com o desempenho energético de edificações no período de 2016 a 2026. Os resultados evidenciaram crescimento da produção

científica e participação de diferentes autores, países e fontes de publicação, com destaque para periódicos relacionados à energia e às edificações.

A análise dos documentos, autores, palavras-chave e temas mostrou que a detecção e o diagnóstico de falhas constituem o núcleo da produção científica analisada, enquanto eficiência energética, modelagem e métodos computacionais apresentam forte presença no campo. Nos períodos mais recentes, observaram-se também abordagens relacionadas ao aprendizado de máquina, ao prognóstico, à otimização e ao controle preditivo, indicando ampliação dos enfoques aplicados aos sistemas HVAC.

Verificou-se que a produção científica apresenta trajetória de expansão e diversificação, com aproximação progressiva entre FDD, desempenho energético e métodos computacionais. As lacunas identificadas concentram-se principalmente na quantificação dos impactos das falhas sobre o desempenho energético, na validação das técnicas em condições reais de operação e na integração entre diagnóstico, prognóstico, controle e manutenção.

A utilização da *Web of Science* como única fonte de dados e a delimitação da análise a documentos em inglês classificados como *Article* e *Review* constituem limitações do estudo. Além disso, o ano de 2026 corresponde a um período parcial, considerando que a busca foi realizada em 15 de agosto de 2026.

Os resultados mostram que o campo de pesquisa em FDD aplicado a sistemas HVAC vem se ampliando para além da identificação de falhas, incorporando métodos e aplicações relacionados ao desempenho energético e à gestão dos sistemas. Esse panorama contribui para compreender o desenvolvimento da área e pode orientar novas pesquisas voltadas à integração entre diagnóstico de falhas, eficiência energética e operação dos sistemas HVAC.

Referências

AHMAD, M. W. et al. Computational intelligence techniques for HVAC systems: a review. *Building Simulation*, v. 9, n. 4, p. 359-398, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0285-4>.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Mapping failures in energy and environmental performance of buildings. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 476-485, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.038>.

CHAKRABORTY, D.; ELZARKA, H. Early detection of faults in HVAC systems using an XGBoost model with a dynamic threshold. *Energy and Buildings*, v. 185, p. 326-344, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.032>.

CHEN, Z. et al. A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. *Applied Energy*, v. 339, 121030, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121030>.

DONG, B. et al. A review of smart building sensing system for better indoor environment control. *Energy and Buildings*, v. 199, p. 29-46, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.025>.

HIMEUR, Y. et al. AI-big data analytics for building automation and management systems: a survey, actual challenges and future perspectives. *Artificial Intelligence Review*, v. 56, n. 6, p. 4929-5021, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10286-2>.

HONG, T. et al. State-of-the-art on research and applications of machine learning in the building life cycle. *Energy and Buildings*, v. 212, 109831, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109831>.

HOSAMO, H. H. et al. A Digital Twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics. *Energy and Buildings*, v. 261, 111988, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111988>.

HOSAMO, H. H. et al. Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings. *Energy and Buildings*, v. 281, 112732, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112732>.

KIM, W.; KATIPAMULA, S. A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, v. 24, n. 1, p. 3-21, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1318008>.

LEE, K. P.; WU, B. H.; PENG, S. L. Deep-learning-based fault detection and diagnosis of air-handling units. *Building and Environment*, v. 157, p. 24-33, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.029>.

LI, B. et al. A novel semi-supervised data-driven method for chiller fault diagnosis with unlabeled data. *Applied Energy*, v. 285, 116459, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116459>.

LI, D.; HU, G.; SPANOS, C. J. A data-driven strategy for detection and diagnosis of building chiller faults using linear discriminant analysis. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 519-529, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.014>.

LU, Q. et al. Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*, v. 118, 103277, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103277>.

OKOCHI, G. S.; YAO, Y. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 784-817, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.328>.

TIEN, P. W. et al. Machine learning and deep learning methods for enhancing building energy efficiency and indoor environmental quality: a review. *Energy and AI*, v. 10, 100198, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100198>.

TOUZANI, S.; GRANDERSON, J.; FERNANDES, S. Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings. *Energy and Buildings*, v. 158, p. 1533-1543, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.039>.

WANG, Z. et al. Fault detection and diagnosis of chillers using Bayesian network merged distance rejection and multi-source non-sensor information. *Applied Energy*, v. 188, p. 200-214, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.130>.

ZHANG, F.; SAEED, N.; SADEGHIAN, P. Deep learning in fault detection and diagnosis of building HVAC systems: a systematic review with meta analysis. *Energy and AI*, v. 12, 100235, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100235>.

ZHANG, R.; HONG, T. Modeling of HVAC operational faults in building performance simulation. *Applied Energy*, v. 202, p. 178-188, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.153>.