



## Estratégia de eficiência energética em data centers: revisão sistemática *Energy efficiency strategy in data centers: a systematic review*

Rodrigo Santiago do Nascimento Lima<sup>1,\*</sup>, Andréa Teresa Riccio Barbosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Eficiência e Sustentabilidade, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS, campus Campo Grande, MS, Brasil

<sup>2</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Eficiência e Sustentabilidade, Universidade Federal Mato Grosso do Sul – UFMS, campus Campo Grande, MS, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: rodrigoss4ntiago@gmail.com

Received: 15 November 2025 | Accepted: 20 December 2025 | Published online: 24 December 2025

**Resumo:** Uma quantidade massiva de dados é processada diariamente em um *Data Center* (DC), e essa carga de trabalho tem se ampliado a cada ano devido à expansão dos serviços baseados em computação em nuvem e aplicações em larga escala. Nesse contexto, foi realizada uma revisão sistemática com foco em uma análise quantitativa e qualitativa de artigos publicados em diferentes partes do mundo, com o objetivo de apresentar ações e estratégias desenvolvidas em diversos contextos frente ao crescente consumo de energia nesses ambientes. Além disso, destacam-se os desafios relacionados à qualidade e à continuidade do fornecimento de energia elétrica, que impactam direta e indiretamente o funcionamento dos *Data Centers*. A cada expansão tecnológica, surge a necessidade de novos investimentos em equipamentos e, consequentemente, de maior demanda energética. Por fim, o trabalho apresenta o levantamento dos artigos selecionados de acordo com os critérios estabelecidos e suas respectivas contribuições para a adoção de boas práticas que promovam o funcionamento eficiente e sustentável dos DC.

Palavras-chave: *data center*; eficiência energética; sistema de refrigeração; revisão sistemática; contenção de ar.

**Abstract:** A massive amount of data is processed daily in a *Data Center* (DC), and this workload has been increasing every year due to the expansion of cloud-based services and large-scale applications. In this context, a systematic review was conducted focusing on a quantitative and qualitative analysis of articles published in different parts of the world, with the objective of presenting actions and strategies developed in various contexts to address the growing energy consumption in these environments. Furthermore, challenges related to the quality and continuity of power supply are highlighted, as they directly and indirectly affect the operation of *Data Centers*. With each technological expansion, new investments in equipment are required, which consequently lead to higher energy demand. Finally, this study presents the selection of articles based on established criteria and their respective contributions to the adoption of best practices that promote the efficient and sustainable operation of DC.

Keywords: *data center*; energy efficiency; cooling system; systematic review; air containment.

## 1 Introdução

Os sistemas de Tecnologia da Informação (TI) e DC vêm assumindo, portanto, um papel cada vez mais importante nos negócios das empresas. Desta forma, os serviços de TI continuarão em um crescimento sem precedentes e estarão cada vez mais alinhados à evolução empresarial (Pinto et al., 2021).

A crescente quantidade de dados processados diariamente pela necessidade da indústria de Tecnologia da Informação (TI), faz-se necessário a construção de DC adequados para atender essa demanda e para se obter um ambiente eficiente energeticamente. No caso de falha do DC, ocorre uma inviabilidade no fornecimento do serviço de TI estável e contínuo para atender diversos setores que dependem deste ambiente, tais como o sistema de comunicação do banco, as telecomunicações, as transmissões de dados, entre outros (Cho et al., 2019).

Segundo Pinto et al. (2021) os DCs precisam manter sua infraestrutura ativa para a operacionalização adequada dos seus componentes tecnológicos, que por sua vez geram calor e consequentemente necessitam de refrigeração, ocasionando a elevação de consumo de energia.

Tal estudo torna-se significativo e justifica-se porque busca mostrar que o consumo de energia com refrigeração se mostrou uma preocupação constante no DC, pois o equipamento de TI deve ser mantido dentro de uma faixa de temperatura adequada 24 horas por dia. Além disso, esse estudo ressalta a importância de melhorar a eficiência energética no ambiente DC e possibilitar que os serviços ali processados pelos servidores continuem atendendo a demanda.

Para execução deste trabalho utilizou-se de uma análise sistemática de artigos que abordam a eficiência energética em ambientes de DC, destacando a importância dos sistemas de climatização e o desempenho térmico das instalações. Além disso, são discutidas boas práticas de infraestrutura que promovem o funcionamento eficiente e sustentável dos DCs.

Nesse processo de análise de publicações foi utilizada a plataforma Parsifal, que é uma ferramenta online que dá suporte aos pesquisadores na revisão sistemática de literaturas. Na construção da pesquisa com o auxílio dessa ferramenta foram realizadas várias etapas, tais como, definição das perguntas que os trabalhos poderiam elucidar sobre a pesquisa, as palavras chaves e sinônimos, e os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos.

Sendo assim, essas referências servirão como base para avaliar soluções e práticas recomendadas, visando a otimização do consumo energético e o aprimoramento das condições térmicas no local de estudo. Os autores citados nas referências bibliográficas e suas teorias contribuíram para compreensão do estudo.

## 2 Fundamentação teórica

Segundo Parsifal (2025), destaca-se como uma eficiente ferramenta para gerenciamento de muitos artigos, garantindo um processo sistemático e bem documentado. Durante esse processo é realizada uma lista com avaliação quantitativa e qualitativa, possibilitando obter um *ranking* das literaturas analisadas.

De acordo com Kitchenham (2004), durante a construção de uma revisão sistemática da literatura exige-se a consulta a uma quantidade significativa de trabalhos de pesquisa, que necessitam de ajustes de sequências de busca, filtragem de resultados para que se possa selecionar artigos que atendam aos critérios de inclusão ou a retirada dos que atendem ao critério de exclusão, após isso o pesquisador pode dar início a análise de cada um dos resultados.

De acordo com Li et al. (2024), realizou um estudo sobre a Tecnologia de Resfriamento Evaporativo Direto (CDEC) no resfriamento do DC, realizado em locais de climas de alta temperatura e umidade. A pesquisa concentrou-se na Nova Área de Gui'an, na província de Guizhou, China, onde as temperaturas excedem 32°C. No estudo os principais objetivos incluíram avaliação da eficácia do CDEC, análise das condições climáticas e da otimização de parâmetros e, propôs soluções práticas para implementação do CDEC em projetos de DC.

Segundo Hwang e Lee (2021), o aumento da demanda por energia nos DCs deve-se ao rápido avanço da TI, o que ressalta a urgência de medidas para otimizar o consumo energético. Nesse contexto, o estudo investigou como a implementação de sistemas de resfriamento com ar externo pode contribuir para a redução do consumo de energia elétrica nos DCs. Para isso, foram desenvolvidos modelos de simulação com o objetivo de maximizar a eficiência energética, determinando o volume de ar necessário para o resfriamento dos equipamentos e estabelecendo diretrizes para reduzir o consumo de energia e melhorar a sustentabilidade do ambiente.

Os resultados do estudo indicam que a aplicação de um volume de ar adequado pode gerar uma economia anual superior a 56% nos custos com energia. Além disso, foi constatado que, ao longo do ano, a utilização do sistema de resfriamento com ar externo por mais de 8 horas diárias resulta em uma economia adicional: para cada aumento de 1°C na temperatura interna configurada, trouxe uma redução de 441 kWh no consumo anual de energia (Hwang e Lee, 2021).

No estudo conduzido por Chang et al. (2024) trouxeram estratégias com abrangência na importância dos sistemas de resfriamento com foco na eficiência energética e sustentabilidade no ambiente dos DCs. Nesse estudo abordaram como objetivo a identificação e análise dos diversos tipos de sistemas de resfriamento utilizados em DCs, investigando as estratégias de controle de otimização que contribuem na eficiência dos equipamentos de climatização. Isto foi possível através de métricas de avaliação de eficiência energética e maneiras de melhoria do consumo e alinhamento com as metas de sustentabilidade.

O estudo de Sun et al. (2020) propõe um sistema de climatização baseado na demanda, integrando um ciclo de resfriamento por tubo de calor e compressão de vapor. Nas simulações realizadas foi adotado um

modelo matemático, cujos resultados indicaram que o Coeficiente de Desempenho (COP) aumentou à medida que a temperatura de entrada subiu, variando de 29°C a 41°C sob condições nominais. Esses resultados demonstram a eficiência crescente do sistema em resposta ao aumento da temperatura de entrada, evidenciando o impacto positivo de ambos os modos de operação.

Singh et al. (2024) realizou um estudo no DC situado no edifício acadêmico da National Chin-Yi University of Technology, em Taichung, Taiwan. A pesquisa teve como objetivo melhorar a eficiência energética e o desempenho do sistema de resfriamento, que enfrentam problemas de alta demanda de energia e resfriamento inadequado. O estudo focou no *retrofit* do sistema HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) do DC local, para isso utilizou as medições de campo e as simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).

O estudo iniciou com avaliação das condições térmicas antes da modernização, para tal, foram realizadas medições de temperatura, umidade, velocidade do ar e consumo de energia, posteriormente as simulações CFD foram implementadas, com base nos dados colhidos e realizadas suas análises. Como resultados dessa modernização dos sistemas HVAC se obteve redução do PUE e melhoria próxima de 50%, com diminuição da temperatura média dentro do DC, redução significativa do consumo de energia elétrica, melhoria na distribuição do fluxo de ar e, também trouxe benefícios ambientais e econômicos para a universidade (Singh et al., 2024).

Conforme Eicker et al. (2023), o estudo de caso foi realizado em um DC de um banco em Kocaeli, na Turquia, tendo seu consumo de energia monitorado de forma contínua por dez meses. Nesse estudo, investigaram a viabilidade de chegar a um modelo de DC de Energia Zero (NZEDC) através da integração de sistemas de resfriamento natural, da reutilização de calor residual e do uso de um sistema de energia renovável para melhoria da eficiência em DCs.

O estudo conduzido por Wang et al. (2023), foi realizado em regiões com distintas características climáticas, focando nas cidades de Harbin e Pequim, na China. Na pesquisa, investigaram os fatores que contribuem para o consumo de energia em sistemas de resfriamento centralizados, e analisaram como as condições ambientais e a dissipação de calor dos equipamentos no DC afetam o desempenho térmico e o consumo de energia dos sistemas de climatização em DC.

Segundo Kim e Cho (2021), foi analisado um total de 2.592 possíveis arranjos de layout e foi desenvolvido um sistema de Contenção de Ar Modular (MAC) com foco na otimização do desempenho térmico em DC de alta densidade. O estudo concentrou-se na análise e otimização das configurações de resfriamento, utilizando simulações de CFD, e buscou soluções para manter as temperaturas dentro das faixas recomendadas pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

O sistema MAC empregou configurações de contenção de corredor frio e corredor quente (CAC e HAC), separando os fluxos de ar frio e quente. Isso permitiu que o ar resfriado percorresse caminhos mais curtos até os servidores, reduzindo a dissipação de calor e aumentando a eficácia da distribuição de ar nos equipamentos (Kim e Cho, 2021).

Zhou et al. (2024) apresentou diversas abordagens, incluindo um controle adaptativo, robusto e baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs), que auxiliam no ajuste e na otimização de parâmetros críticos como temperatura e umidade. Além disso, o uso de técnicas de mineração de dados e aprendizado de máquina contribui para a prevenção de condições térmicas adversas no DC, permitindo a detecção precoce de pontos quentes no ambiente.

### 3 Metodologia

Na busca por melhor entendimento na construção da eficiência energética do DC foi realizada uma revisão sistemática da literatura e uma consulta quantitativa e qualitativa de trabalhos de pesquisa, e assim filtrou resultados de artigos que atendessem critérios bem estabelecidos.

Esta pesquisa foi desenvolvida na área de engenharia, utilizando a linha de pesquisa em eficiência energética e sustentabilidade. Possui uma abordagem multidisciplinar e com métodos quantitativos em que será realizado uma análise de artigos conforme condições estabelecidas nos critérios definidos.

Para o desenvolvimento das atividades apresentadas nessa análise de revisão sistemática foi consultada a literatura nos portais Google Scholar, ACM Digital Library, IEEE Digital Library, MDPI, Scopus e ScienceDirect, com período correspondente aos anos de 2020 - 2024. Para guiar a condução da revisão sistemática, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão para seleção dos artigos, conforme sumarizados no Quadro 1.

Quadro 1. Seleção de Critério dos artigos analisados durante a revisão sistemática do reservatório.

Critérios	Descrição
Inclusão	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estratégias de gerenciamento térmico em DCs;</li> <li>2. Estudo com uso de algoritmos e ferramentas para otimização da eficiência em DC;</li> <li>3. Estudo de energias alternativas para demandas em DCs;</li> <li>4. Estudo de caso - Avaliação de refrigeração de um DC;</li> <li>5. Estudo de modelos de resfriamento de DCs com ênfase na eficiência;</li> <li>6. Estudo de métricas de avaliação da eficiência energética do DC;</li> <li>7. Estudo de revisão da eficiência energética em DC;</li> <li>8. Estudos comparativos que analisam o impacto de diferentes métodos de resfriamento;</li> <li>9. Estudos que analisam DC ideal energeticamente;</li> <li>10. Estudos que envolvam eficiência energética de climatização em DCs;</li> <li>11. Estudos que exploram o impacto de novas tecnologias de climatização;</li> <li>12. Estudos que investigam estratégias ou tecnologias de climatização voltadas para melhorar a eficiência energética em DCs;</li> <li>13. Estudos sobre contenção de ar em DC.</li> </ol>
Exclusão	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Artigos que abordam somente tecnologias de climatização antigas ou obsoletas;</li> <li>2. Estudos anteriores à 2020;</li> <li>3. Estudos duplicados;</li> <li>4. Estudos que não envolvam climatização de DC;</li> <li>5. Estudos que não incluem análise quantitativa ou qualitativa de eficiência energética;</li> <li>6. Estudos que não tenham aplicação direta em DCs;</li> <li>7. Estudos sobre climatização que não estão diretamente relacionados a DC.</li> </ol>

Em seguida foram criadas *strings* de pesquisa utilizada nas plataformas de base de dados acadêmicas multidisciplinares, sendo essas: ((“Data Center cooling” AND “energy efficiency”) OR “HVAC systems”) AND ((“air conditioning” AND “Data Center energy savings”) OR (“cooling systems” AND (“power usage effectiveness” OR “green Data Centers”))).

Inicialmente os arquivos são designados com o *status* de *Unclassified*. Depois foi iniciada a avaliação de cada um deles, na qual foi preciso ler o título e o resumo, e conforme os critérios de inclusão e exclusão, o status dos trabalhos foram modificados para *accepted*, *rejected* ou *duplicated*.

Esse estudo resultou numa pré-seleção de 156 trabalhos e foram aplicados critérios de inclusão e exclusão, 99 foram descartados, e 29 identificados como duplicados. Dessa forma, restaram 28 trabalhos que apresentaram informações relevantes para extração de dados. A Tabela 1 apresenta os resultados da pesquisa, com detalhes de cada base de dados e o total de artigos em cada status de análise.

Tabela 1. Distribuição de artigos analisados por base de dados.

Base de dados	Artigos analisados	Artigos duplicados	Artigos recusados	Artigos aceitos
ACM Digital Library	10	-	9	1
Google Scholar	16	7	7	2
IEEE Digital Library	12	1	7	4
MDPI	15	5	7	3
SciELO	0	-	-	-
Science@Direct	83	5	65	13
Scopus	15	8	4	3
Web of Science	5	3	-	2
<b>Total</b>	<b>156</b>	<b>29</b>	<b>99</b>	<b>28</b>

Nota: (-): Artigos não disponíveis.

Dessa forma, as metodologias e abordagens dos trabalhos estudados trouxeram elementos essenciais que contribuíram significativamente para o entendimento de melhores práticas para eficiência energética no DC. Seus estudos trouxeram estratégias utilizadas que são adotadas em diferentes contextos ao redor do mundo para atendimento a demanda energética desses ambientes.

Com base nas informações da Figura 1, observa-se um aumento no número de estudos sobre climatização em DCs a partir de 2021, e entre 2022-2023 um aumento significativo, e com tendência de manter o crescimento também em 2024. Assim, indicando que essa metodologia tem sido cada vez mais explorada e aprimorada ao longo dos anos, visando à melhoria da eficiência energética desse ambiente.

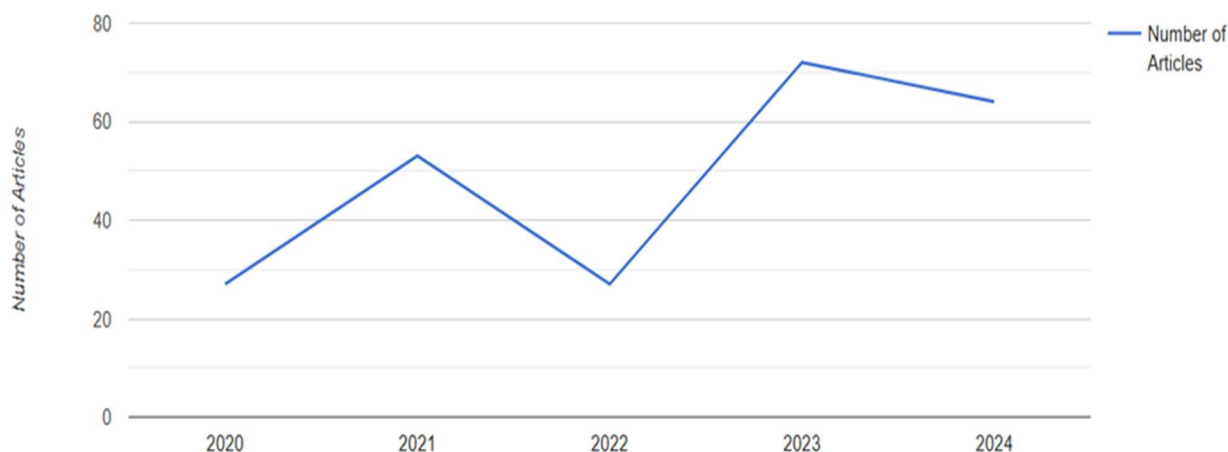


Figura 1. Quantitativo de artigos após seleção, estudos sobre climatização de *Data Centers* nos últimos cinco anos. esquemática do reservatório 3D. Fonte: Com base em *Parsifal* (2025), adaptado pelo autor (2025).

A Figura 2 apresenta um gráfico com os dados referentes aos artigos aceitos neste estudo. É interessante destacar que o número de artigos aceitos na sua maioria passou de 40% das bases de dados acadêmicas selecionadas, e tendo uma grande expressão de artigos aceitos quando utilizada uma das maiores e populares base de dados *ScienceDirect*, mantida pela editora *Elsevier*, chegando aos 75% de trabalhos aceitos.

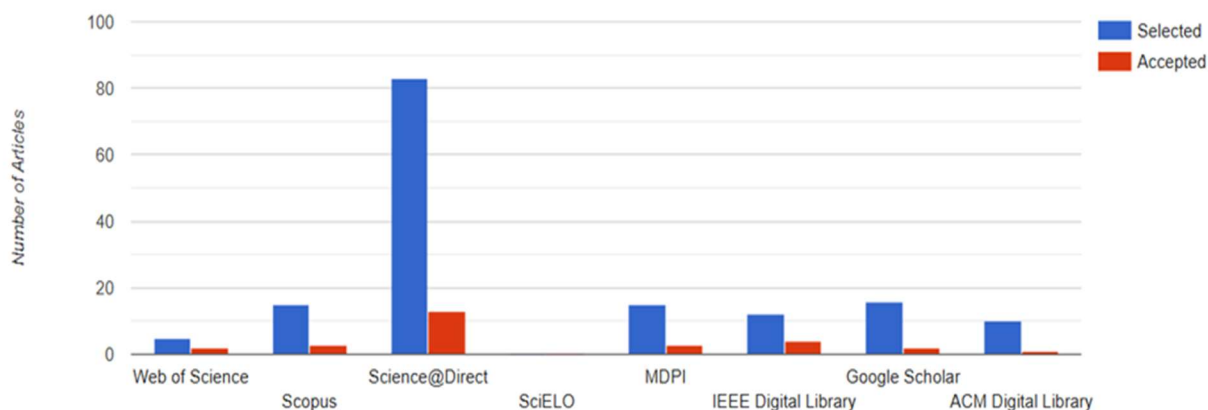


Figura 2. Artigos sobre eficiência energética na climatização de *Data Centers* produzidos nos últimos cinco anos. Fonte: Com base em *Parsifal* (2025), adaptado pelo autor (2025).

A Figura 3 mostra uma visão detalhada da utilização de diferentes bases de dados, evidenciando quais são as mais frequentes em termos de consulta e acesso por pesquisadores. O *Science@Direct* é a base mais utilizada, representando mais de 50% do total, indicando assim que mais da metade dos estudos analisados foram obtidos a partir desta plataforma. Esta predominância pode ser atribuída à sua vasta coleção de periódicos científicos, abrangendo diversas áreas do conhecimento.

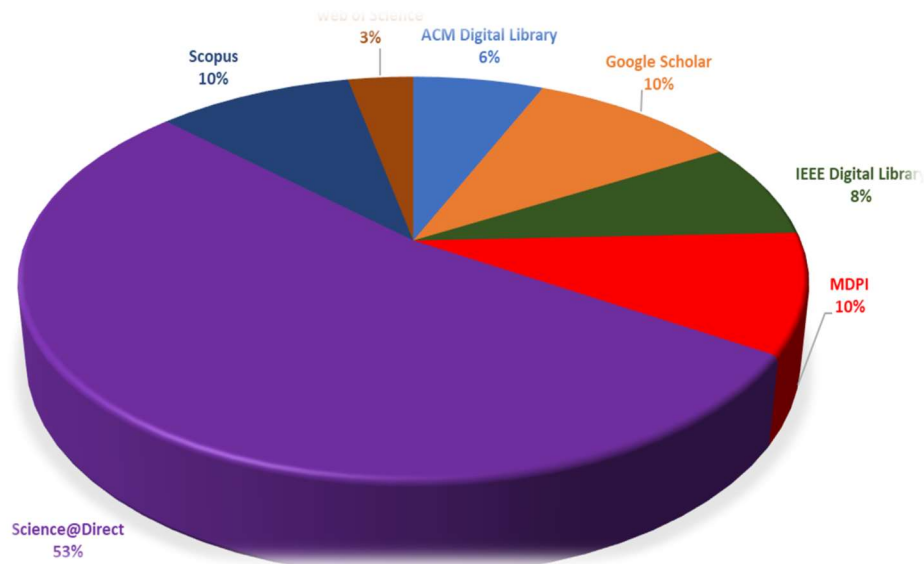


Figura 3. Quantitativo de distribuição percentual das bases de dados utilizadas para pesquisa sobre eficiência energética na climatização de *Data Centers*.

4 Resultados

Nos levantamentos realizados foi elaborado um resumo dos artigos e suas contribuições, com foco no estudo da eficiência energética do DC. Esse levantamento permitiu evidenciar algumas ações estratégicas adotadas em diferentes contextos ao redor do mundo para atender à crescente demanda energética desses ambientes.

Na Tabela 2, foi apresentado um estudo realizado na China, em 2024, no qual foram utilizados recursos locais da temperatura ambiente para o resfriamento do DC analisado, resultando em uma significativa redução no consumo de energia destinado à climatização.

Tabela 2. Síntese das informações e contribuições do estudo realizado na China utilizando a tecnologia CDEC (resfriamento evaporativo direto por névoa fria).

Título do Artigo: Experimental study on direct evaporative cooling for free cooling of data centers.	
Autores(as)	Chao Li; Ruiyong Mao; Yong Wang; Jun Zhang; Jiang Lan; Zujing Zhang
País/local de estudo	Provincia de Guizhou, China.
Ano da publicação	2024
Contribuição	O artigo demonstra que a tecnologia CDEC (resfriamento evaporativo direto por névoa fria) possibilita ao DC utilizar fontes naturais de resfriamento, resultando em uma redução significativa no consumo de energia destinado à climatização.

Os resultados do estudo apresentado na Tabela 3, realizado em Seul, investigou a recirculação do ar no interior do DC como estratégia para reduzir o consumo de energia. Essa técnica de contenção também se mostrou eficaz para evitar que o ar quente se misture ao corredor de ar frio, contribuindo para maior eficiência do sistema de resfriamento.

Tabela 3. Síntese das informações e contribuições do estudo feito na Coreia do Sul com estratégias no sistema modular de contenção de ar (MAC).

Título do Artigo: Development of modular air containment system: thermal performance optimization of row-based cooling for high-density data centers.	
Autores(as)	Jinkyun Cho e Youngmo Kim
País/local de estudo	Na região da Coreia do Sul, em Seul.
Ano da publicação	2021

Contribuição	O estudo propõe um sistema modular de contenção de ar (MAC) para otimizar o resfriamento em data centers. A principal contribuição está na implementação de estratégias que reduzem o recirculamento e o desvio (by-pass) do ar frio, garantindo uma distribuição mais eficiente entre os racks.
<p>Na Tabela 4, o estudo contribuiu com a aplicação de estratégias inteligentes para o gerenciamento em tempo real da temperatura e da umidade no DC, permitiu detectar possíveis problemas de aquecimento e propor melhorias na eficiência operacional do ambiente.</p> <p>Tabela 4. Síntese das informações e contribuições do estudo realizado na China com estratégias no gerenciamento inteligente da temperatura e umidade dentro do ambiente de DC.</p> <p>Título do Artigo: Advancements in data denter cooling systems: from refrigeration to high performance cooling.</p>	
Autores(as)	Feng Zhou, Wenlong Gu e Guoyuan Ma
País/local de estudo	Universidade de Tecnologia de Beijing, na China.
Ano da publicação	2024
Contribuição	O estudo destacou estratégias de gerenciamento inteligente voltadas à otimização de parâmetros como temperatura e umidade, possibilitando o monitoramento em tempo real para rápida detecção e solução de problemas.

O estudo realizado na Turquia, apresentado na Tabela 5, introduziu o conceito de DC verde, destacando que a construção e a infraestrutura do data center influenciam diretamente a demanda de resfriamento. Além disso, propôs o uso de energia fotovoltaica como alternativa para suprir parte da demanda energética do ambiente.

<p>Tabela 5. Síntese das informações e contribuições do estudo realizado na Turquia com estratégias no destaque de melhorias da infraestrutura e aproveitamento do ar externo para redução do custo.</p> <p>Título do Artigo: Sustainability analysis of zero energy consumption DC with free cooling, waste heat reuse and renewable energy systems: a feasibility study.</p>	
Autores(as)	Gül Nihal Güğül, Furkan Gökçül e Ursula Eicker
País/local de estudo	Kocaelli, Turquia.
Ano da publicação	2022
Contribuição	O estudo destacou estratégias rápidas e de baixo custo para transformar um DC de alto consumo em um DC verde. Entre elas, propôs um modelo de refrigeração inteligente que utiliza ar externo frio para resfriar o data center e ressaltou que a construção e a infraestrutura do edifício influenciam a demanda de resfriamento.

No estudo realizado em Taiwan, conforme Tabela 6, enfatizou estratégias na edificação e infraestrutura do DC para melhoria de sua eficiência. Dentre estas ações na infraestrutura, também tratou do aprimoramento na contenção de ar frio e quente, além de simulações com CFD.

<p>Tabela 6. Síntese das informações e contribuições do estudo realizado em Taiwan com estratégias na modernização do DC, contenção de ar e simulação com CFD.</p> <p>Título do Artigo: Retrofitting HVAC systems for enhanced energy performance and resilience in the university data center room.</p>	
Autores(as)	Nitesh Singh; Indra Permana; Alya Penta Agharid e Fu-Jen Wang
País/local de estudo	Taichung, Taiwan.
Ano da publicação	2024

Contribuição	O estudo enfatizou estratégias de modernização ( <i>retrofitting</i> ) voltadas à transformação de um data center pequeno e ineficiente em uma instalação com maior eficiência energética. Entre as ações propostas, destacou-se a reforma física para aprimorar a contenção de ar, bem como o uso de simulações com CFD para diagnosticar falhas e sugerir melhorias.
<p>Na Tabela 7 o estudo focou na análise de revisões dos últimos 20 anos como orientação na melhoria da eficiência do DC, e discutiu sobre a importância de ampliar padrões para atendimento à métrica de eficiência da indústria, PUE (Power Usage Effectiveness).</p>	
<p>Tabela 7. Síntese das informações e contribuições de estudos realizados na China entre 2004 e 2024, voltados ao aprimoramento da eficiência energética em data centers.</p>	
<p>Título do Artigo: Optimization control strategies and evaluation metrics of cooling systems in data centers: a review.</p>	
Autores(as)	Qiankun Chang; Yuanfeng Huang; Kaiyan Liu; Xin Xu; Yaohua Zhao e Song Pan
País/local de estudo	China.
Ano da publicação	2024
Contribuição	O estudo apresentou orientações para aumentar a eficiência dos data centers, com ênfase na refrigeração a ar e na análise do uso de piso elevado ( <i>underfloor</i> ), que pode favorecer a formação de pontos quentes. Também examinou a principal métrica de eficiência energética utilizada na indústria, o PUE, padronização global das métricas e implementação de técnicas de inteligência artificial.
<p>O estudo realizado na Coreia do Sul, apresentado na Tabela 8, evidenciou que a alteração da temperatura interna do ambiente pode ser uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de energia em <i>data centers</i>.</p>	
<p>Tabela 8. Síntese das informações e contribuições de estudos realizados na Coreia do Sul com influência da temperatura operacional na eficiência energética do DC.</p>	
<p>Título do Artigo: Study on the design and operation of an outdoor air-cooling system for a computer room.</p>	
Autores(as)	JiHyun Hwang e Taewon Lee
País/local de estudo	Coreia do Sul.
Ano da publicação	2021
Contribuição	O estudo apresenta diretrizes para projetar e operar sistemas de resfriamento de forma mais eficiente, destacando que cada aumento de 1 °C na temperatura interna configurada pode gerar uma economia anual de aproximadamente 0,4% no consumo de energia. Assim, operar o DC em temperaturas mais elevadas, mas ainda dentro das faixas recomendadas pela ASHRAE, configura-se como uma estratégia simples e eficaz de otimização. Isso ocorre porque, em períodos de verão, manter a sala a 24 °C exige maior gasto energético do que operá-la a 26 °C.

Finalmente, no estudo apresentado na Tabela 9, realizado na China, destacou a importância de estratégias de contenção de ar e suas problemáticas na eficiência do ambiente do DC quando não tratadas.



Tabela 9. Síntese do estudo sobre contenção de ar e carga de resfriamento em DCs: avaliação de falhas de isolamento e proposta de modelo matemático integrando calor dos equipamentos e ambiente externo.

Título do Artigo: Thermal performance analyses and optimization of data center centralized-cooling system.	
Autores(as)	Siqi Wang; Rang Tu; Xianzhong Chen; Xu Yang e Kun Jia
País/local de estudo	China.
Ano da publicação	2022
Contribuição	O estudo destaca a relevância da adoção de estratégias de contenção de ar e evidencia os impactos negativos decorrentes de falhas no isolamento entre os corredores quente e frio. Além disso, propõe um modelo matemático para estimar a carga de resfriamento de um data center, considerando tanto a dissipação de calor dos equipamentos instalados nos <i>racks</i> quanto às trocas térmicas com o ambiente externo.

Diante disso, a revisão sistemática dos trabalhos relacionados à eficiência energética em DC de diferentes países permitiu compreender as diversas estratégias apresentadas nos artigos analisados, selecionados e melhor avaliados conforme os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

5 Conclusões

O estudo desenvolvido por meio da análise sistemática dos artigos pesquisados revelou contribuições significativas acerca das estratégias adotadas em cada país onde os estudos foram conduzidos. Esses levantamentos permitiram compreender os diferentes contextos e soluções empregadas para atender às demandas energéticas dos *Data Centers* (DC).

- a) Em regiões de clima frio, como na China, há a adoção de estratégias baseadas no uso de fontes naturais de resfriamento, aproveitando as condições ambientais externas para climatizar o ambiente interno do DC. Em outros contextos, verificou-se a implementação de sistemas inteligentes de gerenciamento em tempo real da temperatura e da umidade, bem como modelos de construção e infraestrutura que influenciam diretamente na redução do consumo de energia.
- b) Destacam-se também ações voltadas à modernização de instalações antigas e de pequeno porte, à integração de sistemas fotovoltaicos para suprimento parcial da demanda elétrica e ao uso de simulações por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para otimizar o desempenho térmico.
- c) Adoção de estratégias de contenção de ar para aprimorar a eficiência energética, permitindo a manutenção de uma temperatura uniforme de entrada do ar nos equipamentos de TI, e evitando a formação de pontos quentes que são problemas comuns em ambientes de *Data Center*. Essa prática melhora o aproveitamento do ar circulado e contribui para a eficiência do sistema de climatização, de acordo com as normas técnicas vigentes.
- d) Por fim, o conjunto de estudos analisados apresentou revisões quantitativas e qualitativas realizadas nos últimos 20 anos, que serviram como orientação para a melhoria da eficiência dos DCs e para a padronização de métricas globais, com destaque para o PUE (Power Usage Effectiveness). Além propor um modelo matemático para estimar a carga de resfriamento, aliado à automação da coleta de dados e à aplicação de técnicas de Inteligência Artificial voltadas à otimização energética.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) pelo suporte e apoio institucional.

Referências bibliográficas

ASHRAE TC 9.9 (2015) Data Center storage equipment – thermal guidelines, issues, and best practices. ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9, Disponível em: [https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/ashrae\\_storage\\_white\\_paper\\_2015.pdf](https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/ashrae_storage_white_paper_2015.pdf). (accessed 12 Oct. 2024).

- ASHRAE TECHNICAL COMMITTEE (2021) Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance. 5. ed. Atlanta. Disponível em: <https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/supplemental%20files/therm-gdlns-5th-r-e-refcard.pdf>. (accessed 2 Oct. 2024).
- Chang, Q, Huang, Y, Liu, K, Xu, X, Zhao, X and Pan, S (2024) ‘Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers: A Review’, *Sustainability*, v. 16, p. 1-41. <https://doi.org/10.3390/su16167222>.
- Cho, J, Park, B and Jeong, Y (2019) ‘Thermal Performance Evaluation of a Data Center Cooling System under Fault Conditions’, *Energies*, v. 12, 2996. <https://doi.org/10.3390/en12152996>.
- Eicker, U, Gügöl, GN and Gökçül, F (2023) ‘Sustainability analysis of zero energy consumption Data Centers with free cooling, waste heat reuse and renewable energy systems: A feasibility study’, *Energy*, v. 262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125495>.
- Hwang, J and Lee, T (2021) ‘Study on the Design and Operation of an Outdoor Air-Cooling System for a Computer Room’, *Energies*, v. 14, n. 6, p. 1-17. <https://doi.org/10.3390/en14061670>.
- Kim, Y and Cho, J (2021) ‘Development of modular air containment system: Thermal performance optimization of row-based cooling for high-density Data Centers’, *Energy*, v. 231, p. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120838>.
- Kitchenham, B (2004) ‘Procedures for performing systematic reviews’, Keele, UK: Keele University.
- Li, C, Mao, R, Wang, Y, Zhang, J, Lan, J and Zhang, Z (2024) ‘Experimental study on direct evaporative cooling for free cooling of Data Centers’, *Energy*, v. 288, p. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129889>.
- Parsifal. Parsifal v.2.1.1: Perform Systematic literature reviews. Disponível em: <https://parsif.al/>.
- Pinto, MMF, Campos, PK and Azevedo, VR. (2021) ‘Sustentabilidade de data centers com uso da ti-verde’, *Revista Científica E-Locução*, 1(20), 18.
- Singh, N, Permana, I, Agharid, AP and Wang, FJ (2024) ‘Retrofitting HVAC systems for enhanced energy performance and resilience in university Data Center room’, *Journal of Building Engineering*, v. 95, p. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110162>.
- Sun, X, Han, Z, Wei, H, Bai, C, Xue, D and Li, X (2020) ‘Study on influence of operating parameters of Data Center air conditioning system based on the concept of on-demand cooling’, *Renewable Energy*, v. 160, p. 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.100>.
- Wang, S, Tu, R, Chen, X, Yang, X and Jia, K (2023) ‘Thermal performance analyses and optimization of Data Center centralized-cooling system’, *Applied Thermal Engineering*, v. 222, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119817>.
- Zhou, F, Gu, W and Ma, G (2024) ‘Advancements in Data Center cooling systems: From refrigeration to high performance cooling’, *Energy and Buildings*, v. 320, p. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114634>.