



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

FERNANDO NEVES DO NASCIMENTO NETO

**Contribuição dos Data Centers Sustentáveis para as Cidades Inteligentes: uma
Revisão Sistemática da Literatura**

Recife
2025

FERNANDO NEVES DO NASCIMENTO NETO

**Contribuição dos Data Centers Sustentáveis para as Cidades Inteligentes: uma
Revisão Sistemática da Literatura**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Sistemas de Informação da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Sistemas de Informação.

Orientador(a): Prof. Dra. Suzana de França Dantas Daher

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Nascimento Neto, Fernando Neves do.

Contribuição dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes: uma
revisão sistemática da literatura / Fernando Neves do Nascimento Neto. -
Recife, 2025.

47p. : il., tab.

Orientador(a): Suzana de França Dantas Daher

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Informática, Sistemas de Informação - Bacharelado,
2025.

Inclui referências.

1. data center. 2. sustentabilidade. 3. cidades inteligentes. 4. revisão
sistemática da literatura. I. Daher, Suzana de França Dantas. (Orientação). II.
Título.

000 CDD (22.ed.)

FERNANDO NEVES DO NASCIMENTO NETO

**Contribuição dos Data Centers Sustentáveis para as Cidades Inteligentes: uma
Revisão Sistemática da Literatura**

Trabalho apresentado ao curso de
Sistemas de Informação da Universidade
Federal de Pernambuco, Centro de
Informática, como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Sistemas de Informação.

Aprovado em: 05 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Suzana de França Dantas Daher (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Abel Guilhermino da Silva Filho (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Divanilson Rodrigo Campelo (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta conquista aos meus pais, minha irmã e a todos os meus outros parentes que me apoiaram na minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu saúde e diversas outras bênçãos que me capacitaram a realizar esse trabalho de conclusão de curso. Ele foi o principal contribuinte para essa minha conquista.

Agradeço também à minha irmã, Maria Fernanda, que me apoiou e me incentivou bastante durante o desenvolvimento deste trabalho. Também sou grato aos meus pais, Edivan Neves e Ageneide Soares, que me ajudaram muito.

Sou grato também a meus outros familiares que me apoiaram e torceram por mim ao longo da minha trajetória acadêmica.

E agradeço à professora Suzana Daher, que me orientou durante este trabalho, de modo a investir tempo e conhecimento em mim.

RESUMO

A sustentabilidade é uma das bases do desenvolvimento das chamadas “cidades inteligentes”. Ademais, os avanços tecnológicos que estão sendo previstos para o funcionamento dessas cidades apontam para uma crescente demanda por processamento de dados mais eficientes, o que, por sua vez, tem intensificado a necessidade de desenvolvimento de data centers mais sustentáveis. Desta forma, este estudo conduz uma revisão sistemática da literatura a fim de analisar os avanços da ciência acerca do tema envolvendo data centers sustentáveis e cidades inteligentes, a identificação dos impactos que os data centers sustentáveis geram para as cidades inteligentes, quais as principais tecnologias que estão auxiliando o desenvolvimento/implementação de data centers sustentáveis e quais os principais tipos de métricas utilizadas para avaliar a sustentabilidade do data center foram os alvos deste trabalho. Como resultado, a pouca quantidade de artigos já desenvolvidos sobre este tema indica que ainda há espaço para o desenvolvimento de pesquisas e aplicações. Ao final, 14 artigos foram analisados, sendo que nenhum deles abordou o pilar “social” da sustentabilidade, o que sugere um relevante *gap* a ser abordado pela academia.

Palavras-chave: Data center; sustentabilidade; cidades inteligentes; revisão sistemática da literatura

ABSTRACT

Sustainability is one of the foundations for the development of so-called “smart cities.” Furthermore, the technological advances that are being predicted for the functioning of these cities point to a growing demand for more efficient data processing, which, in turn, has intensified the need to develop more sustainable data centers. Thus, this study conducts a systematic review of the literature to analyze scientific advances on the topic involving sustainable data centers and smart cities. The objectives of this study were to identify the impacts that sustainable data centers have on smart cities, the main technologies that are assisting in the development/implementation of sustainable data centers, and the main types of metrics used to assess data center sustainability. As a result, the small number of articles already written on this topic indicates that there are opportunities for further research and applications. In the end, 14 articles were analyzed, none of which addressed the “social” pillar of sustainability, suggesting a significant gap to be addressed by academia.

Keywords: Data Center; sustainability; smart cities; systematic literature review

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Investimentos em Data Centers nos Estados Unidos entre Janeiro 2014 e Agosto 2024	13
Figura 2. Número de publicações por ano na Web of Science sobre o tema em estudo.....	15
Figura 3. Componentes das cidades inteligentes.....	20
Figura 4. Processo de seleção e exclusão de artigos da RSL.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Perguntas de pesquisa da RSL	26
Tabela 2. Impactos dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes	29
Tabela 3. Tecnologias para implementação de Data Centers Sustentáveis (dados a partir de 2020)	30
Tabela 4. Indicadores utilizados para avaliar sustentabilidade do data center	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa e Relevância	14
1.2	Objetivos geral e específicos	15
1.3	Metodologia de Pesquisa	16
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Cidades Inteligentes.....	17
2.1.1	Importância da sustentabilidade para a construção de cidades inteligentes	20
2.2	Data Centers Tradicionais.....	21
2.3	Data Centers Sustentáveis	22
2.4	Revisão Sistemática da Literatura.....	23
2.5	Resumo do Capítulo	24
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: METODOLOGIA ADOTADA	25
3.1	Resumo do Capítulo	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Pergunta 1. Quais impactos que os data centers sustentáveis geram para as cidades inteligentes?.....	29
4.2	Pergunta 2. Quais tecnologias podem auxiliar o desenvolvimento/ implementação de data centers sustentáveis?	30
4.3	Pergunta 3. Quais os principais indicadores utilizados para avaliar a sustentabilidade do data center?	33
4.4	Contribuições para a Área de Sistemas de Informação	35
4.5	Resumo do capítulo	36
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

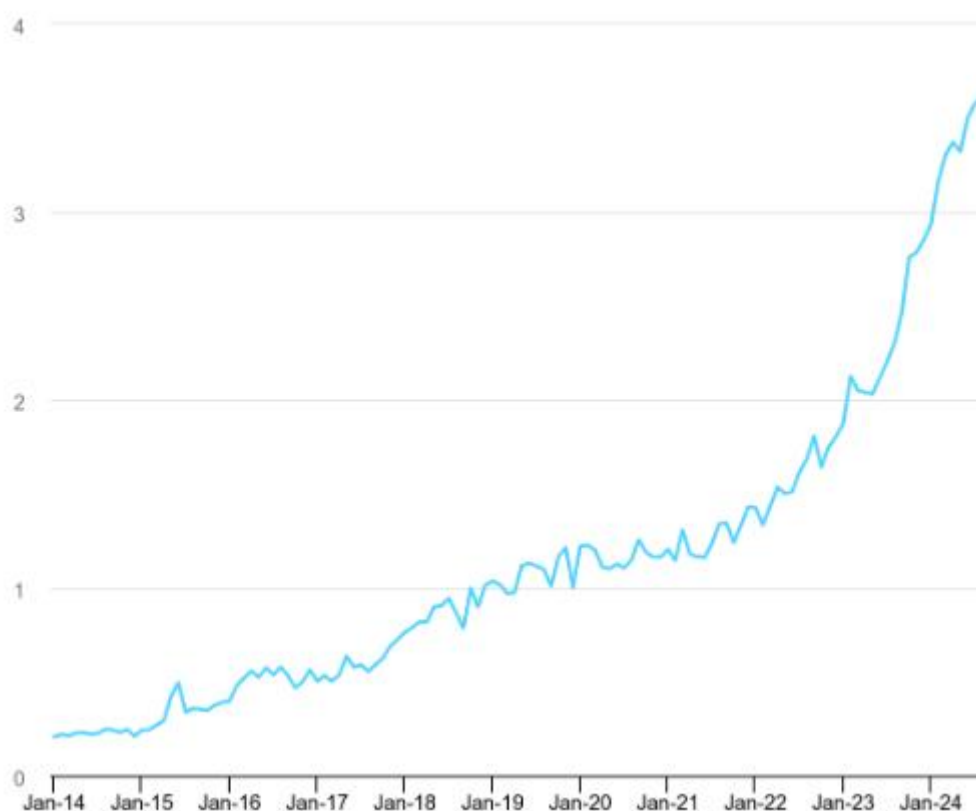
A demanda por serviços digitais tem crescido rapidamente. Segundo relatório da International Telecommunication Union (ITU), agência das Nações Unidas especializada em tecnologias digitais, em 2024 havia 5,5 bilhões de usuários de Internet, contra 2,8 bilhões existentes em 2014 (ITU, 2024). Ou seja, em uma década dobrou a quantidade de pessoas utilizando os mais diversos serviços digitais.

Serviços estes, muitas vezes armazenados em data centers que demandam um maior consumo de energia. Segundo o Fórum Econômico Mundial, é esperado para o ano de 2025, a criação, captura e consumo global de 181×10^{21} bytes de dados ao redor do mundo (Valkhof; Kemene; Stark, 2024).

Avanços no setor em busca de mais centros de dados e melhores desempenhos no consumo de energia desses centros, foram percebidos nos últimos anos. Segundo a International Energy Agency (IEA), avanços significativos no desempenho dos data centers foram realizados, mas esforços adicionais envolvendo governos e indústria ainda se fazem necessários para reduzir as emissões de carbono para a próxima década (Spencer e Singh, 2024). A Figura 1 ilustra os índices de investimentos realizados pelos Estados Unidos em data centers entre os anos de 2014 e 2024, corroborando com a necessidade de observar maior o impacto deste crescimento para o desenvolvimento do planeta e sua sustentabilidade. No gráfico desta figura, o eixo x exibe os meses e anos, já o eixo y, os índices de investimento. Os data centers médios são pequenos em termos de potência, com demanda na ordem de 5 a 10 megawatts (MW), mas os grandes (hiper escaláveis) data centers estão se tornando mais comuns e têm demandas de potência de 100 MW ou mais, com um consumo anual de eletricidade equivalente à demanda de cerca de 350.000 a 400.000 carros elétricos (Spencer e Singh, 2024).

Em 2023, o Banco Mundial em parceria com a ITU já havia sinalizado em um relatório que o desenvolvimento de data centers sustentáveis (ou *greens*) é crucial para a transformação digital sustentável e apoio às ações de mitigação das mudanças climáticas. Isto é, com ações para a redução das pegadas (*footprint*) dos usuários de dados, os países poderiam reduzir as suas emissões e alcançar suas metas de sustentabilidade (ITU; world bank, 2023).

Figura 1. Investimentos em Data Centers nos Estados Unidos entre Janeiro 2014 e Agosto 2024



Fonte: IEA (2024)

O documento “World Urbanization Prospects 2018: Highlights” informa que o mundo está se tornando cada vez mais urbanizado. Segundo esse relatório, desde 2007, mais da metade da população mundial vive em cidades e o número deve aumentar para 60% até 2030 (United Nations, 2019). Nessa direção, o desenvolvimento e consolidação das cidades inteligentes, que também é fundamentada em políticas de sustentabilidade, exigirá investimentos de todos os setores da economia, dentre eles o setor de tecnologia, para encontrar soluções que minimizem o consumo de energia e o impacto no meio ambiente.

O estudo feito por Zhu *et al.* (2023) mostra que os impactos ambientais dos data centers são de nível global. Com isso, pode-se considerar que os centros de dados isolados, longe do cenário urbano, também interferem no funcionamento e bem estar das cidades.

Desta forma, este Trabalho de Conclusão de Curso busca avançar no conhecimento científico acerca deste tema, que envolve data centers sustentáveis e

idades inteligentes.

1.1 Justificativa e Relevância

Biswas *et al.* (2024) afirmam que a implementação de data centers com eficiência energética, refrigeração moderna e alimentação através de fontes de energia limpa são importantes para reduzir a emissão de gás carbônico, e assim, minimizar o impacto ambiental ocasionado pelo funcionamento desses equipamentos. Além disso, Long *et al.* (2022) mencionam a existência de um alto custo financeiro gerado pelo consumo de energia dos data centers tradicionais, sugerindo a substituição por modelos mais sustentáveis.

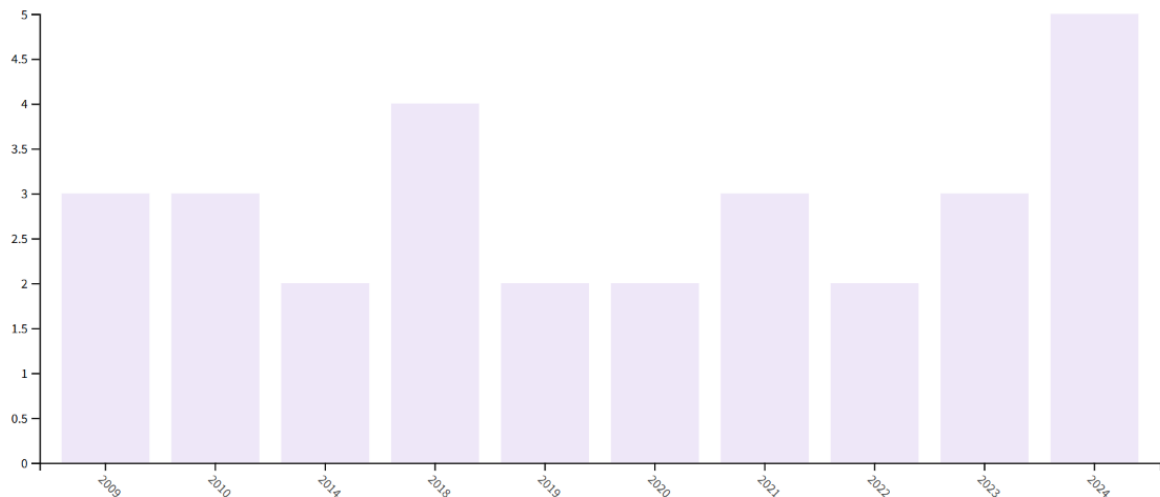
Em 2020, a International Telecommunication Union (ITU) elaborou uma recomendação técnica na qual estabeleceu estratégias para reduzir, gradualmente, as emissões de CO₂ pelo setor da Tecnologia da Informação e Comunicação até 2030, com o objetivo de descarbonizar o setor em 1,5 graus Celsius (ITU, 2020). O documento pede a adoção de um conjunto de ações, dentre elas, a implementação de planos de eficiência energética; a transição para fontes renováveis para geração de eletricidade e a educação sobre a conscientização ambiental sobre as emissões de CO₂ para usuários finais.

O desenvolvimento e consolidação das chamadas cidades inteligentes pressupõe a utilização de data centers capazes de processar grande volume de dados (Zhu et al., 2023). Por consequência, se faz necessário o investimento em sistemas de processamento de dados que tenham melhores eficiências energéticas e operacionais e possam atender aos objetivos apresentados no documento da ITU (2020). Os estudos sobre desenvolvimento de data centers sustentáveis podem contribuir com ações estruturantes para que as cidades inteligentes sejam viáveis.

A comunidade acadêmica tem demonstrado interesse no assunto de data centers sustentáveis e cidades inteligentes; entretanto, o volume de trabalhos publicados sobre esse tema ainda é pequeno. A Figura 2 apresenta o resultado da busca na Web of Science com a seguinte consulta: (“*sustainable data center*” OR “*green data center*”) AND (“*smart city*” OR “*smart cities*”), donde apenas 34 artigos retornaram como resposta numa janela temporal iniciada em 2009. Nota-se que em 2024 houve um aumento na quantidade de publicações, mas observa-se também uma

oportunidade de avançar e contribuir para a ciência envolvendo data centers sustentáveis e cidades inteligentes.

Figura 2. Número de publicações por ano na Web of Science sobre o tema em estudo



Fonte: Web of Science

Desta forma, a relevância deste trabalho de revisão sistemática da literatura (RSL) é justificada por poder posicionar a Academia e a Sociedade quanto às publicações já realizadas sobre o tema objeto deste TCC, apresentando uma síntese das contribuições dos trabalhos já publicados. Para tanto, busca-se organizar o resultado da RSL em termos das principais dificuldades para a implementação de data centers sustentáveis, bem como nos desafios para sua aplicação para o desenvolvimento de cidades inteligentes. A relevância também se justifica pela ausência de trabalhos acadêmicos semelhantes ao deste estudo.

1.2 Objetivos geral e específicos

O objetivo geral deste trabalho é a realização de uma revisão sistemática da literatura sobre a contribuição dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes.

Para alcançá-lo, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1. Realizar estudo para melhor entendimento sobre os conceitos básicos envolvidos neste trabalho;

2. Identificar o gap na literatura e definir as perguntas de pesquisa a serem adotadas, bem como definir a metodologia da revisão sistemática da literatura
3. Conduzir uma análise crítica sobre os achados da pesquisa.

1.3 Metodologia de Pesquisa

Esse trabalho tem um objetivo exploratório. De acordo com Gil (2002), essa finalidade visa proporcionar ao leitor um maior entendimento sobre o problema de pesquisa. O autor também diz que o planejamento desse tipo de objetivo é adaptável, de modo a possibilitar, para análise de um problema, a escolha de um ponto de vista dentre diversas outras considerações.

Essa pesquisa foi produzida através de uma revisão bibliográfica, que para Gil (2002), é uma produção científica fundamentada em outros documentos, sendo os principais, os livros e artigos científicos. Também é mencionado por ele que essa forma de pesquisa é a utilizada pela maioria das produções científicas de objetivo exploratório.

A forma de revisão bibliográfica utilizada para a elaboração desse trabalho foi a Revisão Sistemática de Literatura. Ela é um meio para identificação, avaliação e interpretação de todo material relevante de estudo sobre determinado assunto através de procedimentos estruturados e previamente estabelecidos (Kitchenham e Charters, 2007).

Dentre as diversas formas existentes para fazer uma Revisão Sistemática de Literatura, esse trabalho utilizou a estabelecida por Kitchenham e Charters (2007). Ela possui etapas bem definidas que estão descritas na seção 2.4 deste trabalho, que traz um referencial teórico sobre a Revisão Sistemática de Literatura.

1.4 Estrutura do Trabalho

Neste capítulo fez-se a apresentação da pesquisa, da justificativa e relevância dela, de seus objetivos e da metodologia de pesquisa usada. No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica para esse estudo. Por sua vez, no Capítulo 3 são detalhadas as etapas de metodologia da revisão sistemática da literatura, cujos resultados são apontados no Capítulo 4. Por fim, segue-se o Capítulo 5, de Conclusão, onde também são apresentadas as limitações do estudo e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se conceitos básicos que serão abordados ao longo do trabalho de forma a promover um entendimento inicial sobre o tema tratado.

2.1 Cidades Inteligentes

Washburn e Sindhu (2010) mencionam em seu artigo científico que a empresa norte americana de pesquisa Forrester Research define cidade inteligente como sendo uma cidade que possui seus componentes (serviços de saúde, educação, transporte, segurança pública, entre outros) otimizados através de soluções tecnológicas que fazem processamento do ambiente em tempo real, e fornecem análises de apoio à tomada de decisão de partes interessadas. Essas inovações são adaptáveis ao contexto de cada cidade, de modo a atender seus anseios e particularidades (Weiss, Bernardes e Consoni, 2015).

A Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things* em inglês) possui papel fundamental no conceito de cidades inteligentes, a fim de possibilitar a troca de dados instantânea entre os dispositivos e a nuvem, de modo a tornar viável o uso de sensores de captação de dados do ambiente nas soluções tecnológicas desse modelo de urbanização (Syed *et al.*, 2021). Além disso, a tecnologia 5G tem o potencial de auxiliar essa transferência de dados de modo a permitir com que as diversas soluções de uma cidade inteligente estejam conectadas à internet independentemente de horário e localização (Rao e Prasad, 2018).

Para a formação de uma cidade inteligente, é necessária uma colaboração mútua entre a tecnologia, as pessoas e a gestão pública (Nam *et al.*, 2012). No que diz respeito à cooperação tecnológica, pode-se afirmar que é um meio para proporcionar uma boa qualidade de vida, tanto através da iniciativa pública, quanto da privada, aos cidadãos que usufruem da cidade inteligente. Sobre a colaboração das pessoas, existe a necessidade do aprendizado contínuo e da criatividade, de modo a contribuir para a inclusão digital, para o avanço tecnológico da cidade inteligente e para a qualidade de vida do coletivo. E, sobre a contribuição da gestão pública, é importante o foco num serviço de qualidade tendo o cidadão como beneficiário principal e a participação popular nas decisões do governo. Bem como também é importante que o governo faça a remoção de possíveis impedimentos legais e regulatórios desnecessários para a adoção de soluções tecnológicas.

De acordo com Silva, Khan e Han (2018), as cidades inteligentes são formadas por diversos componentes (Figura 1), a saber:

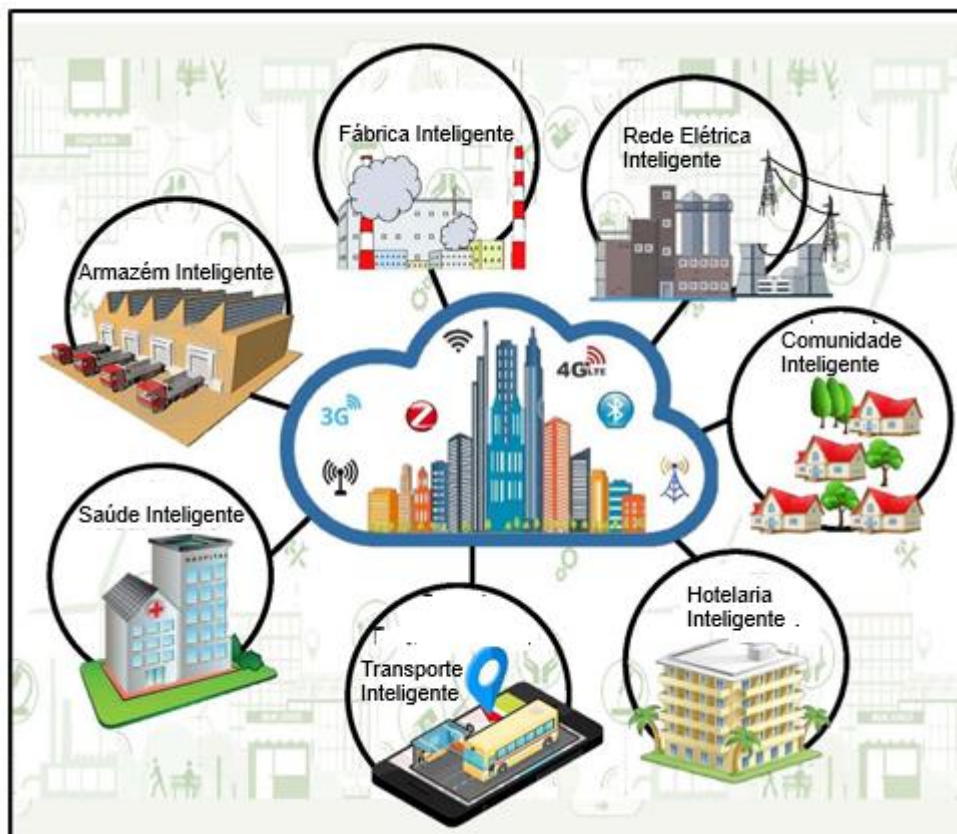
- *Comunidade inteligente*: com o objetivo de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, uma comunidade inteligente possui sistemas de gerenciamento de água, de lixo e construções integradas e com amplo alcance a todos os ativos de uma cidade inteligente (residências, escolas, fábricas, armazéns etc.). As construções inteligentes possuem sensores, hardwares e softwares que coletam dados e alimentam sistemas de informação que auxiliam na tomada de decisão, fornecendo assim, uma melhor eficiência energética.
- *Transporte inteligente*: refere-se aos meios de transporte conectados e interligados ao sistema de controle de tráfego. Desta forma, cria-se um ecossistema apto para melhor comunicação, navegação e gerenciamento de tráfego, por meio de troca e processamento de dados em tempo real, entre dispositivos e/ou banco de dados com alto volume (*big data*). Além disso, a conectividade possibilita a adoção de soluções que melhoram a segurança e o desempenho operacional dos meios de transporte.
- *Saúde inteligente*: esse componente apresenta a possibilidade de uso de sistemas de informação baseados em conhecimento para apoiar profissionais de saúde, bem como suprir a eventual falta de profissionais de saúde perante a demanda por cuidados médicos da população mundial. Desta forma, busca-se a melhoria da qualidade dos serviços prestados. A saúde inteligente auxilia a medicina tradicional com soluções tecnológicas que contém sensores, TICs, IoT, machine learning, big data etc. auxiliando na modernização de dispositivos médicos, sistemas de registros de profissionais e pacientes, sistemas hospitalares de tomada de decisão para o paciente, dentre outros.
- *Rede Elétrica inteligente (smart grid)*: podendo atender tanto às construções inteligentes, quanto às centrais elétricas, ela visa, principalmente, reduzir os danos ambientais provocados pelo consumo de energia vinda a partir de fontes não renováveis, promovendo o uso de energia renovável. Pode conter sistemas de integração com fontes renováveis de energia, mecanismos com algoritmo para aumentar a eficiência energética, sistema de gerenciamento de energia, entre outros.
- *Hospitalidade inteligente*: diz respeito à interoperabilidade entre diversos atores do ramo de turismo (hotéis, agências de viagem, empresas de transporte, entre

outros) para o compartilhamento de dados, de modo a possibilitar que as empresas envolvidas possam usá-los tomada de decisão e no fornecimento de um serviço personalizado ao turista (Buhalis e Leung, 2018).

- *Armazéns inteligente*: também alicerçado nos avanços tecnológicos e sistemas de informação, os armazéns de distribuição poderão melhor apoiar a gestão da cadeia de suprimentos dos seus produtos, com maior previsibilidade da demanda e melhoria na logística nas cidades inteligentes, aproximando suas operações para um fluxo misto (puxado-empurrado), aproximando-se de uma cadeia eficiente quanto aos custos, e uma cadeia de resposta rápida quanto à sua flexibilidade (Corrêa, 2019).
- *Fábricas Inteligentes*: as cidades inteligentes estarão integradas ao setor industrial através de tecnologias como blockchain, IoT, manufatura aditiva, computação nas nuvens etc. Essa integração ao setor industrial que funcionará na Indústria 4.0 (ou na Indústria 5.0), proporcionará assim como nos armazéns inteligentes uma melhor gestão da cadeia de suprimentos, bem como a mudança de paradigma de produção, passando a ser uma indústria orientada a serviços, e menos, à manufatura. Isto é, as indústrias ofertarão soluções de melhoria de produtividade a seus clientes, em vez de simplesmente vender o bem (Corrêa, 2019).

A Figura 3 ilustra alguns dos diversos componentes presentes nas cidades inteligentes.

Figura 3. Componentes das cidades inteligentes



Fonte: Adaptada de Silva, Khan e Han (2018)

2.1.1 Importância da sustentabilidade para a construção de cidades inteligentes

Do ponto de vista ambiental, a sustentabilidade urbana se refere à minimização dos impactos ambientais que as pessoas geram ao meio ambiente, de modo a permitir que as gerações posteriores também usem dos recursos naturais (Correia e Martins, 2022).

Tem ganhado popularidade a ideia de que as cidades inteligentes se centralizam no uso de componentes que sejam inteligentes, verdes e ecológicos (He *et al.*, 2022). De modo a fazer parte desses itens, as soluções de IoT implementadas na infraestrutura das cidades inteligentes têm o potencial de ajudar os sistemas urbanos a diminuir a liberação de gás carbônico e consumirem menos água em seus processos (Yang *et al.*, 2021), de forma a contribuir para que o espaço urbano

satisfaça ao objetivo de desenvolvimento sustentável de número 11, promovido pela ONU (Organização das Nações Unidas, 2025).

Para o sistema elétrico, os avanços no desenvolvimento e impactos - ambientais, econômicos, sociais e de viabilidade de longo prazo - das redes elétricas inteligentes contribuem de forma significativa para a sustentabilidade das cidades inteligentes (Pandiyani *et al.*, 2024). No que tange os aspectos ambientais, as redes elétricas podem reduzir o impacto através do uso de fontes de energia mais limpas, tais como eólica e solar; no que diz respeito ao aspecto econômico, a busca por soluções com maior eficiência energética pode promover ganhos, geração de empregos e melhores prestação de serviços de fornecimento de energia. No âmbito social, destaca-se a possibilidade de haver maior disponibilidade de energia para a sociedade, e em especial um melhor acesso de comunidades carentes, a esse serviço. Por fim, os autores argumentam que a viabilidade a longo prazo de uma rede elétrica sustentável pode oferecer uma maior segurança operacional, melhor resistência aos desastres naturais e menor vulnerabilidade aos ataques virtuais.

2.2 Data Centers Tradicionais

Data centers são estruturas físicas nas quais possui uma infraestrutura de TI que possibilita a existência e funcionamento de aplicações e serviços através do armazenamento e processamento de dados (Susnjara e Smalley, 2024). Ele é formado por uma estrutura complexa resultante da junção de equipamentos vindos de diversos fornecedores e existem modelos que podem chegar a ter milhares de computadores atuando em conjunto para o processamento dos dados (José Carlos, 2022).

Além disso, constituem a estrutura principal das operações digitais dos dias de hoje, garantindo a contínua disponibilidade e segurança dos dados dos dados presentes nas aplicações (ABINEE, 2025). Com isso, os data centers possuem uma importância essencial em diversos setores da sociedade, de modo a estarem presentes nas áreas da saúde, educação, telecomunicações, energia, entre outras (Mondal *et al.*, 2023).

De acordo com a ABINEE (2025), eles podem ser divididos em 5 tipos. Sendo eles: *Enterprise* (que é personalizado para atender a uma única organização); *Colocation* (que permite o compartilhamento de espaço físico entre diversas

empresas, sendo cada uma responsável pelos seus próprios servidores); *Hyperscale*, (que visa o atendimento a grandes volumes de dados); *Edge* (que fica próximo ao usuário final, a fim de reduzir a latência e melhorar o tempo de processamento dos dados), e *Cloud* (que não possui estrutura física própria, tendo os dados armazenados e processados em servidores de terceiros).

O crescente uso de aplicações e serviços online desencadeia a necessidade da construção de novos Data Centers, bem como a expansão dos já existentes. Como consequência disso, é gerado um considerável impacto ambiental devido às suas emissões de Carbono, uma vez que eles têm como principal fonte os combustíveis fósseis (Rostirolla *et al.*, 2021).

2.3 Data Centers Sustentáveis

Os data centers sustentáveis possuem uma implementação e funcionamento que são de acordo com práticas sustentáveis da tecnologia, possuindo as mesmas funcionalidades de um não ecológico (Valmohammadi e Hejr, 2023). Os diversos componentes que os integram são feitos para funcionarem com um consumo energético de forma mais eficiente possível, com seus impactos ambientais minimizados (ITU, 2014).

A grande quantidade de energia consumida pelos data centers tradicionais tem estimulado a produção de pesquisas para desenvolver modelos mais sustentáveis (Mondal *et al.*, 2023). De acordo com Khan e Goodwin (2024), essas estruturas tendem a usar fontes renováveis de energia, bem como fazer o uso de reaproveitamento de equipamentos físicos e da reciclagem de calor produzido pelos sistemas computadorizados. Além disso, os autores mencionam a redução de custos com a operação através do menor consumo energético que os data centers sustentáveis possuem em relação aos tradicionais.

Na literatura existem estudos que tratam desse tema. Ammari *et al.* (2022) o abordam através da implementação de um algoritmo que gera uma otimização operacional através de um gerenciamento de tarefas eficiente e potencializa o uso de fontes renováveis de energia limpa, através do uso e administração de data centers distribuídos. Já Vasconcelos *et al.* (2023), realizaram um estudo que visa a implementação de um modelo de data center híbrido que usa a energia solar e as fontes de energias não renováveis, de modo a considerar os impactos ambientais

provenientes da fabricação de painéis solares e baterias. O estudo dos pesquisadores também visa a análise do local de instalação do data center, levando em conta que diferentes regiões do planeta podem ser mais ou menos eficientes para a instalação de painéis solares. Outro feito inovador é o modelo de datacenter proposto por Lin *et al.* (2024), que faz uma integração entre diversos recursos que capazes de diminuir o impacto ambiental do data center, combinando sistemas de TI, refrigeração, fornecimento de energia, recuperação de calor residual e de iluminação.

2.4 Revisão Sistemática da Literatura

Existem diferentes formas para se fazer uma Revisão Sistemática da Literatura (Galvão e Ricarte, 2020). Grant e Booth (2009) fizeram um estudo no qual encontraram 14 tipos diferentes de Revisão Sistemática de Literatura.

Kitchenham e Charters (2007) explicam que a Revisão Sistemática de Literatura é um meio para identificação, avaliação e interpretação de todo material relevante de estudo sobre determinado assunto. Para esses autores, as principais utilidades da RSL estão na contribuição para sintetizar comprovações de eficácia de algum recurso, seja ele tecnológico ou metodológico; na identificação de áreas da pesquisa que merecem mais atenção e auxiliar na adição de novas atividades à pesquisa.

O modelo de RLS adotado neste trabalho é o ensinado por Kitchenham e Charters (2007), que possui três etapas, sendo elas: Planejamento da revisão, realização da revisão e Relato da revisão. Sobre a etapa de planejamento, esses autores mostram que ela é uma preparação para a revisão da literatura, a fim de ajudar o pesquisador a reconhecer um tema que tenha a necessidade de ser pesquisado; elaborar as questões de pesquisa e a implementação de normas para a etapa de revisão de literatura. A etapa de realização da revisão, para eles, consiste na escolha dos estudos primários, na consideração da qualidade deles e na análise dos dados. E na fase de relato da revisão, Kitchenham e Charters (2007) caracterizam com atividades que vão auxiliar na publicação da pesquisa. Elas são as de decisão da escolha das plataformas de publicação, desenvolvimento de um relatório final, contratação de revisão para a pesquisa, que depende se ela é ou não para fins comerciais e, a depender das decisões de garantia da qualidade, avaliação do protocolo de revisão, bem como o relatório final. O Capítulo 3 apresenta os passos desta metodologia e os critérios adotados.

2.5 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma base conceitual para o desenvolvimento deste trabalho. O próximo capítulo abordará a metodologia adotada na revisão sistemática da literatura, que mostrará as perguntas de pesquisa, bem como critérios adotados para escolha dos documentos usados na revisão sistemática de literatura.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: METODOLOGIA ADOTADA

Para uma análise estruturada sobre a contribuição dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes, esse trabalho fundamenta-se em uma revisão sistemática de literatura, baseado no modelo proposto por Kitchenham e Charters (2007).

O modelo segue então o desenvolvimento de 3 fases: (1) planejamento, (2) condução da revisão e (3) relato da revisão (divulgação).

Planejamento:

Na fase de planejamento, é analisada a necessidade de se fazer uma revisão de literatura sobre o tema escolhido; são estabelecidas as questões de pesquisa, baseadas no objetivo geral e nos objetivos específicos e são definidos os critérios de inclusão e exclusão dos artigos a serem analisados.

Essa fase iniciou com a identificação da necessidade de ser feita uma revisão sistemática de literatura a respeito da contribuição dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes, levando em conta a tendência de uma crescente adesão ao modelo inteligente de desenvolvimento, que tem a sustentabilidade como um de seus principais aspectos. No capítulo 1 é apresentada uma discussão sobre a relevância desse tema.

Em seguida, foram elaboradas as questões de pesquisa desta revisão, que são partes fundamentais da etapa de planejamento e servem como base para o alcance dos objetivos do trabalho. As questões elaboradas para essa pesquisa, bem como suas respectivas justificativas, estão na Tabela 1.

Tabela 1. Perguntas de pesquisa da RSL

Pergunta de pesquisa	Justificativa
Quais impactos que os data centers sustentáveis geram para as cidades inteligentes?	Identificar quais os principais tipos de benefícios que os data centers sustentáveis geram para as cidades inteligentes.
Quais tecnologias podem auxiliar o desenvolvimento/implementação de data centers sustentáveis?	Identificar as principais tecnologias e soluções que tornam um data center sustentável.
Quais os principais tipos de métricas utilizadas para avaliar a sustentabilidade do data center?	Identificar as principais formas de medição do nível de sustentabilidade do data center.

Fonte: Esta pesquisa

Após a elaboração das questões de pesquisa, foram definidas as estratégias de busca dos documentos, bem como os critérios de inclusão deles na pesquisa. Essas ações fazem parte do protocolo de revisão, que definiu as bases de dados usadas e as queries de buscas.

Condução da RSL:

Na fase de condução da revisão, é definida uma estratégia de busca dos artigos através de queries de pesquisa utilizando operadores booleanos e são escolhidas as bases de dados a serem usadas.

As bases de dados escolhidas para a obtenção dos documentos a serem analisados nesta pesquisa foram a Science Direct, a Web of Science e a Scopus. Nelas foram aplicadas as queries de busca, que tiveram como objetivo a obtenção de documentos relacionados aos objetivos de pesquisa dessa revisão de literatura. Levando em conta as particularidades de notação de cada uma das bases de dados, as queries ficaram diferentes umas das outras, porém, com a mesma lógica de busca.

Na base de dados Science Direct, foi usada a query a seguir: ("data center" or "green data center" or "sustainable data center") AND ("smart city" OR "smart cities" OR "smart"). Na base de dados Web of Science, foi usada a query $TI=((("data center" OR "green data center" OR "sustainable data center") AND ("smart city" OR "smart$

cities" OR "smart")), e na base de dados Scopus, foi utilizada a query *TITLE (("data center" OR "sustainable data center" OR "green data center") AND ("smart city" OR "smart cities" OR "smart"))*.

A próxima etapa consistiu em definir os critérios de seleção dos artigos para serem analisados na revisão de literatura. Essa fase contou com os critérios de inclusão listados a seguir:

- Artigos publicados nos últimos 5 anos
- Artigos publicados na língua inglesa
- Publicações feitas em revistas científicas

Os critérios de exclusão foram:

- Artigos de pesquisas não finalizadas
- Artigos repetidos
- Artigos que não satisfazem aos critérios de inclusão
- Artigos cujo conteúdo não contribui com a pesquisa

Fase de relato da RSL:

Na fase de relato da revisão, é feita a apresentação do trabalho, a qual contém os resultados obtidos. Esses resultados serão melhor apresentados no Capítulo 4.

3.1 Resumo do Capítulo

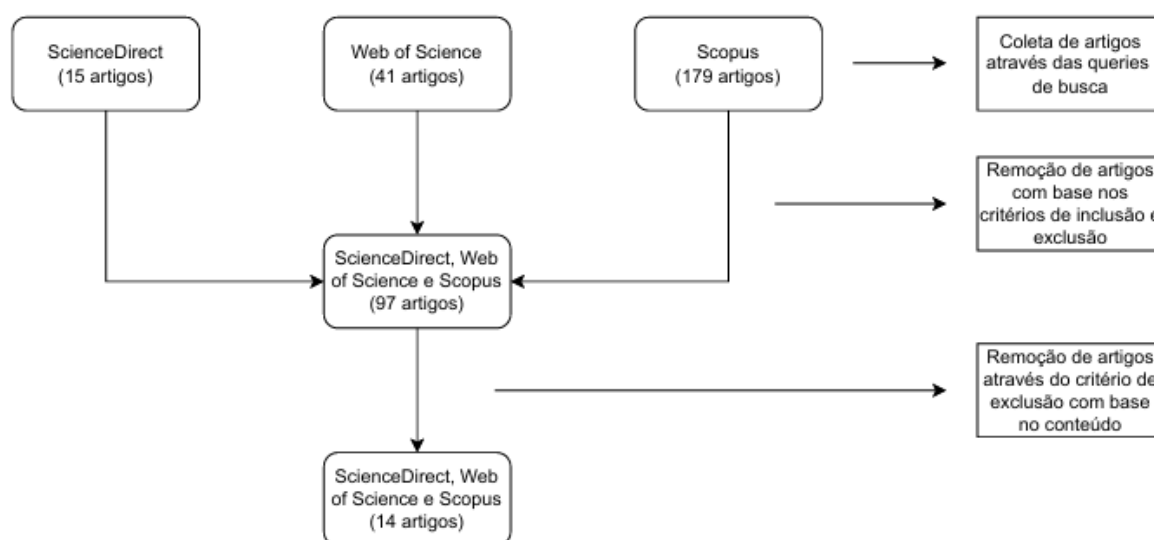
Este capítulo apresentou o planejamento feito para essa revisão sistemática de literatura, no qual foram mostradas as perguntas de pesquisa, os critérios de inclusão e exclusão e as queries de busca, de modo a constituir o protocolo de pesquisa. No próximo capítulo, será mostrada a quantidade de artigos adquiridos em diferentes etapas da coleta, bem como, de acordo com cada pergunta de pesquisa, terá uma sumarização dos documentos selecionados e a discussão deles, de modo a formular respostas que contribuam para a área de Sistemas de Informação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a elaboração do protocolo da revisão, iniciou-se a busca de artigos nas bases de dados escolhidas, aplicando os critérios de inclusão e exclusão mencionados na sessão anterior. A quantidade de artigos encontrados em cada fase da seleção está representada na Figura 4.

Inicialmente, após a coleta de artigos que atenderam aos critérios de inclusão desta RSL, foram obtidos 236 resultados. Deles, 15 foram na base Science Direct, 41 na Web of Science e 179 na Scopus. Após essa etapa, foi colocado o filtro restringindo os resultados aos artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025, restando 11 artigos na Science Direct, 13 na Web of Science e 73 na Scopus, totalizando 97 artigos. A etapa final consistiu, com base na leitura do texto, na remoção de artigos, restando 14 artigos para fundamentar essa pesquisa.

Figura 4. Processo de seleção e exclusão de artigos da RSL.



Fonte: Esta pesquisa

Com o resultado da seleção de artigos, foi possível reunir os dados e informações com o objetivo de responder às seguintes questões de pesquisa.

4.1 Pergunta 1. Quais impactos que os data centers sustentáveis geram para as cidades inteligentes?

Com as produções científicas adquiridas, buscou-se identificar informações acerca dos impactos gerados pelos data centers sustentáveis nas cidades inteligentes. Por causa da predominância de um caráter técnico na maioria dos artigos analisados, a pesquisa qualitativa realizada para responder essa pergunta de pesquisa ficou limitada a quatro produções científicas. Com isso, os efeitos identificados foram divididos em social, econômico e ambiental. A Tabela 2 traz um resumo dos resultados encontrados de forma a trazer os impactos e suas respectivas referências.

Tabela 2. Impactos dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes

Impactos	Referências
Econômico	Zhu <i>et al.</i> (2023), Yu <i>et al.</i> (2025), Zhang <i>et al.</i> (2025), Sermsuk <i>et al.</i> (2025)
Ambiental	Zhu <i>et al.</i> (2023), Zhang <i>et al.</i> (2025), Sermsuk <i>et al.</i> (2025)
Social	Não encontrado

Fonte: Esta pesquisa

Em relação ao impacto ambiental, os resultados quantitativos do estudo feito por Zhu *et al.* (2023) trazem dados sobre a questão do impacto ambiental, informando que o consumo energético dos data centers pode diminuir de 20 a 40 % através do melhoramento dos equipamentos e de 15 a 27% por meio das tecnologias de resfriamento. Já no artigo de Sermsuk *et al.* (2025), apresenta um sistema integrado por um data center, um terminal de recebimento de gás natural liquefeito e uma usina de ciclo combinado. Segundo os autores, esse sistema proporciona uma redução de até 20.304 toneladas de gás carbônico por ano.

Sobre o impacto econômico, Sermsuk *et al.* (2025) explicam que o sistema proposto por eles pode gerar uma economia de até 7,75 milhões de dólares para os proprietários do data center. Já Zhang *et al.* (2025) mostram que através do armazenamento de energia em bateria explicado, pode ser gerada para a operadora do data center uma economia com o custo operacional de até 1,6 milhões de dólares durante o ciclo de vida do data center, e uma vantagem econômica de até 0,35 milhões com o sistema de armazenamento de frio que eles abordam no estudo. Já o artigo de Yu *et al.* (2025), traz como resultado qualitativo os benefícios econômicos como o de

uma receita diária de até 58 centavos de dólar por kVA fornecido, para a operadora do data center.

Visto isso, nota-se que os resultados quantitativos dos estudos se concentram nos impactos ambientais e econômicos, de modo a expor uma falta da análise de possíveis impactos sociais provocados pelos data centers sustentáveis. Percebe-se que por conta da maioria das pesquisas coletadas para realizar essa RSL estarem relacionadas com um aspecto bastante técnico dos data centers, elas tendem a não se aprofundarem no estabelecimento e análise de métricas e indicadores que relativos ao impacto social gerado por essas estruturas nas cidades inteligentes.

Pode-se notar que os artigos trazidos nessa discussão possuem bons resultados que são úteis para a formulação de metas de desempenho a serem conquistadas por diversos data centers sustentáveis, respeitando as particularidades de cada cidade.

4.2 Pergunta 2. Quais tecnologias podem auxiliar o desenvolvimento/ implementação de data centers sustentáveis?

Também foi buscado, na literatura, identificar os principais avanços que podem auxiliar no desenvolvimento ou implementação de data centers sustentáveis. A Tabela 3 sumariza as tecnologias encontradas, bem como as devidas referências.

Tabela 3. Tecnologias para implementação de Data Centers Sustentáveis (dados a partir de 2020)

Tecnologia	Referências
Sistema de gerenciamento de carga de trabalho	Lin <i>et al.</i> (2024), Wang e Liu (2021), Okafor <i>et al.</i> (2025), Sheikholeslami <i>et al.</i> (2022); Zhu <i>et al.</i> (2023), Taghizad-Tavana <i>et al.</i> (2024), Zhang <i>et al.</i> (2025), KUMAR e PRIYA (2025)
Virtualização de recursos	Lin <i>et al.</i> (2024), Jeong e Seungwon (2020), Okafor <i>et al.</i> (2025); Zhu <i>et al.</i> (2023)
Sistema de apoio à decisão	KUMAR e PRIYA (2025)
Sistema de gestão energética sustentável	Lin <i>et al.</i> (2024), He e Shen (2021), Sermsuk <i>et al.</i> (2025), Okafor <i>et al.</i>

	(2025), Sheikholeslami <i>et al.</i> (2022), Zhou <i>et al.</i> (2024), Cen <i>et al.</i> (2024), Yu <i>et al.</i> (2025), Zhang <i>et al.</i> (2025), Taghizad-Tavana <i>et al.</i> (2024), KUMAR e PRIYA (2025)
Machine learning	KUMAR, PRIYA (2025)
Sistema de gerenciamento térmico	Lin <i>et al.</i> (2024), Zhou <i>et al.</i> (2024), Zhu <i>et al.</i> (2023), Zhang <i>et al.</i> (2025)
Sistema de armazenamento de energia	He e Shen (2021), Sheikholeslami <i>et al.</i> (2022), Cen <i>et al.</i> (2024), Yu <i>et al.</i> (2025), Zhang <i>et al.</i> (2025), Taghizad-Tavana <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Esta pesquisa

Através das informações presentes nos artigos, foi feita uma análise qualitativa que constatou que as principais tecnologias que podem auxiliar no desenvolvimento ou implementação de um data center sustentável são os sistemas de gerenciamento inteligente de carga de trabalho, virtualização de recursos, sistemas de apoio à decisão, sistema de gestão energética sustentável, machine learning, Sistema de gerenciamento térmico e armazenamento de energia. Através da Tabela 3, nota-se que as inovações mais relatadas são os sistemas de gerenciamento de carga de trabalho e os sistemas de gestão energética sustentável. Nota-se que as diversas formas de implementar essas duas tecnologias contribuem para que elas tenham esse maior número de resultado.

Sobre o sistema de gerenciamento de carga de trabalho, Wang e Liu (2021) criaram um modelo voltado para data centers que recebem tarefas enviadas por dispositivos IoT, de modo a inovar por levar em conta as particularidades dessas cargas de trabalho. Esse modelo prevê a demanda de chegada de cargas de trabalho vindas de aplicações IoT e faz decisões sobre alocação de máquinas virtuais baseado na chegada delas.

No que tange ao sistema de gestão energética sustentável, He e Shen (2021) desenvolveram um sistema para lidar com a falta de continuidade do fornecimento de energia vindo das fontes renováveis. No modelo, eles propuseram o uso de data centers distribuídos geograficamente com a estocagem externa da energia usada por

eles, tornando a alocação dela mais flexível, podendo vir de diferentes baterias, de acordo com a disponibilidade e critérios de oferta e demanda. O gerenciamento do uso da energia é feito buscando a eficiência do conjunto de data centers distribuídos.

Em relação à virtualização de recursos, o estudo de Jeong e Seungwon (2020) relata uma abordagem de gerenciamento de data center chamada *Software-Defined Data Center* (SDDC), que é capaz de aumentar o poder computacional do data center sem a necessidade de instalar mais componentes de hardware nele, de modo a tornar sustentável o desenvolvimento do centro de dados. Essa tecnologia transfere o poder computacional da infraestrutura para máquinas ou containers virtuais e o gerenciamento dele passa a ser feito através de um software chamado *Software-Defined Computing* (SDC), que é parte integrante do SDDC.

Com base nos resultados encontrados, é possível observar a existência de tecnologias que podem ser implementadas em conjunto, de modo a atuar de forma complementar. Dentre elas, foi observada a possibilidade do uso do sistema de gerenciamento térmico adaptativo, proposto por Zhou *et al.* (2024), aliado ao sistema de previsão de consumo de energia, baseado em machine learning, proposto por Kumar, C e Priya (2025).

O primeiro sistema atua de forma inteligente para decidir se o resfriamento do data center será feito por sistema de ar condicionado ou por ventilador, e faz a troca entre esses dois mecanismos de acordo com a temperatura de dentro do data center e a do lado de fora dele. Já a pesquisa de Kumar, C e Priya (2025), propõe o uso de um modelo capaz de prever variações de demanda de energia pelo data center através da combinação de algoritmos de machine learning e otimizar o consumo energético com base nas previsões feitas. A previsão de temperatura seria capaz de antecipar informações obtidas pelo sistema de gerenciamento térmico adaptativo, de modo a aumentar a eficiência operacional do sistema, a fim de tornar o data center ainda mais sustentável.

4.3 Pergunta 3. Quais os principais indicadores utilizados para avaliar a sustentabilidade do data center?

Para responder essa questão, foram analisados quais indicadores quantitativos são utilizados nos modelos e propostas de data centers sustentáveis relatadas nos artigos. Com isso, nessa etapa, eles foram listados na Tabela 4 e relacionados com os pilares da sustentabilidade ambiental e o econômico. O pilar social não foi abordado por não ter artigos relacionados a ele.

Tabela 4. Indicadores utilizados para avaliar sustentabilidade do data center

Indicador	Pilar da Sustentabilidade	Referências
<i>Power Usage Effectiveness</i> (PUE)	Ambiental	Lin <i>et al.</i> (2024) e Zhu <i>et al.</i> (2023)
Eficiência energética	Ambiental	Zhou <i>et al.</i> (2024), Wang e Liu (2021)
Emissão de gás carbônico em toneladas	Ambiental	Sermasuk <i>et al.</i> (2025), Zhu <i>et al.</i> (2023)
Previsão de consumo de energia	Ambiental	Kumar e Priya (2025)
Confiabilidade operacional	Ambiental	Okafor <i>et al.</i> (2025)
<i>Life-Cycle Cost</i> (LCC)	Econômico	Zhang <i>et al.</i> (2025)
Custo operacional	Econômico	He e Shen (2021)

Fonte: Esta pesquisa

Em relação aos indicadores de tipo ambiental, foram identificados os seguintes: PUE (*Power Usage Effectiveness*), eficiência energética, emissão de gás carbônico em toneladas, previsão de consumo de energia e confiabilidade operacional. Já em relação ao tipo econômico, foram identificados o custo operacional e o *Life-Cycle Cost* (LCC) como indicadores.

Lin *et al.* (2024) e Zhu *et al.* (2023) fazem uso de um mesmo indicador, o PUE (*Power Usage Effectiveness*), para avaliar o nível de sustentabilidade do data center. O PUE corresponde à divisão da energia total consumida pelo data center pela energia total consumida pelos equipamentos de TI relacionados ao processamento dos dados.

Tanto Zhou *et al.* (2024), quanto Wang e Liu (2021) usam indicadores baseados na eficiência energética. No estudo feito por Tanto Zhou *et al.* (2024), ele é formado através da comparação entre a energia consumida de um modelo tradicional que usa ar condicionados com recursos de inteligência artificial e um modelo que utiliza o sistema de gerenciamento térmico adaptativo, proposto no artigo deles. Já Wang e Liu (2021), esse indicador é calculado com base na previsão de solicitações vindas de dispositivos IoT.

Em relação ao indicador de emissão de gás carbônico, levado em conta nos estudos de Sermsuk *et al.* (2025) e Zhu *et al.* (2023), foi observada a quantidade de descarbonização feita pelo data center sustentável. Quanto ao indicador de previsão de consumo de energia, usado por Kumar, C e Priya (2025), esse recurso é obtido com base em técnicas de *machine learning*. Ainda no pilar ambiental da sustentabilidade, o indicador de confiabilidade operacional, usado por Okafor *et al.* (2025), é obtido pela avaliação da consistência da entrega de dados e do desempenho perante diferentes cargas de trabalho.

O *Life-Cycle Cost* (LCC) é um indicador correspondente ao custo de vida útil do data center. Ele inclui gastos de receita e despesa do centro de dados. Por outro lado, He e Shen (2021) fizeram um estudo focado na minimização do custo operacional dos data centers sustentáveis, baseado no algoritmo *Carbon Capped Cost Minimization algorithm* (CCCM), que toma decisões em tempo real sobre gerenciamento de baterias e distribuição de carga entre data centers.

Pode-se observar que embora um dos principais problemas ambientais que os data centers tradicionais causam seja alta quantidade de gás carbônico liberada por eles, os indicadores mais usados na literatura para avaliar a sustentabilidade do centro de dados não fazem uso direto do Indicador de quantidade de emissão de CO², de modo a seu uso ser notado apenas nos artigos de Sermsuk *et al.* (2025) e Zhu *et al.* (2023). É observada também uma lacuna referente ao uso de uma medida padrão e comum à maioria dos data centers sustentáveis propostos, a fim de facilitar a comparação do nível de sustentabilidade entre os modelos presentes na literatura.

4.4 Contribuições para a Área de Sistemas de Informação

Tendo em vista o anseio global pelo uso responsável dos recursos naturais, o uso de sistemas sustentáveis é fundamental para o funcionamento sadio das cidades inteligentes.

Essa RSL trouxe uma perspectiva sobre artigos científicos que abordam o funcionamento de data centers sustentáveis e como eles podem contribuir para as cidades inteligentes, de modo a fazer uma análise crítica sobre os achados. Pode-se notar que os data centers sustentáveis possuem o potencial de contribuição para os compromissos ambientais, econômicos e sociais das cidades inteligentes, de forma a constituir uma parte vital para a infraestrutura delas.

Os resultados mostrados nesta pesquisa contribuem para a análise de quais são as principais contribuições dos data centers sustentáveis para as cidades inteligentes, de modo a poder influenciar o desenvolvimento de novos modelos desses centros de dados, baseados nas tecnologias aqui mencionadas. O trabalho também identifica a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que busquem examinar qualitativamente o impacto social dos data centers sustentáveis nas cidades inteligentes através de estudos empíricos. Também são mostrados resultados concretos de impactos do uso de data centers sustentáveis, de modo a servir para futuras formulações de metas adaptadas a diferentes contextos de cidades inteligentes.

Esse trabalho defende que existe uma vasta possibilidade de combinações de tecnologias já existentes e que ainda não foram colocadas em prática. Ele sugere o uso em conjunto do sistema de gerenciamento térmico adaptativo, proposto por Zhou *et al.* (2024), com o sistema de previsão de consumo de energia, proposto por Kumar, C e Priya (2025). A adoção combinada de inovações é importante tendo em vista a capacidade que ela tem de potencializar ainda mais a sustentabilidade dos data centers verdes, bem como a contribuição deles para as cidades inteligentes.

Além disso, essa RSL identifica que existe uma falta de produções científicas que relacionem diretamente os data centers sustentáveis com as cidades inteligentes. Desse modo, a partir da leitura desse artigo científico, futuras pesquisas podem se inspirar para interpretar a eficiência dos data centers sustentáveis de modo a relacioná-la de uma forma mais explícita com as cidades inteligentes.

4.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo os resultados de cada pergunta de pesquisa foram mostrados de forma sumarizada e discutidos a respeito do conteúdo. Foram discutidos quais são os principais impactos gerados pelos data centers sustentáveis nas cidades inteligentes, bem como as principais tecnologias para a implementação de data centers sustentáveis. Depois foram discutidas as contribuições dessa pesquisa para a área de sistemas de informação.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa buscou fazer um panorama das contribuições de data centers sustentáveis para as cidades inteligentes através de artigos científicos publicados nos últimos 5 anos e presentes nas bases de dados Science Direct, Scopus e Web of Science. Através das queries de buscas, as bases de dados retornaram 236 documentos, dos quais através dos critérios de inclusão e exclusão protocolados nesta pesquisa, 14 foram considerados alinhados com o propósito deste trabalho.

A primeira pergunta de pesquisa desta Revisão Sistemática da Literatura diz a respeito dos impactos que os data centers sustentáveis geram nas cidades inteligentes, onde foi observada, na literatura, uma quantidade maior de relatos em relação aos impactos ambientais e econômicos. Essa realidade reflete a vontade pelo alcance de metas de emissão de gás carbônico estabelecidas mundialmente por organizações internacionais intergovernamentais, bem como a visão do uso da sustentabilidade para obter economia financeira. Dentre os achados, não foram encontrados artigos que abordassem o impacto social de forma empírica, e isso ocorre pelo fato de os data centers sustentáveis fazerem parte de uma infraestrutura técnica que é abstraída na experiência de usuário. Porém, esse tipo de impacto precisa ser mais abordado no meio científico uma vez que os impactos ambientais, econômicos e sociais estão interrelacionados entre si.

Já a segunda questão, teve como objetivo identificar as principais tecnologias usadas no desenvolvimento de data centers sustentáveis. Pôde-se constatar que a maioria delas está relacionada com o consumo energético, de modo a contribuir para a conclusão de que isso é reflexo do fato de que um dos principais problemas que os data centers tradicionais enfrentam é o alto consumo energético proveniente de fontes de energia não renováveis. Também é possível notar que a recente aceleração do poder computacional, introduzida pelo Big Data e pela Inteligência Artificial, tem permitido a inclusão de tecnologias que antes não eram muito utilizadas no desenvolvimento de data centers sustentáveis, como é o caso da machine learning e da virtualização de recursos.

Dentre as tecnologias documentadas, observou-se uma ampla possibilidade de combinações entre elas, de modo a potencializar tanto os impactos que os data

centers sustentáveis causam nas cidades inteligentes, quanto o nível de sustentabilidade do data center.

Também foi observado nos documentos que respondem à segunda pergunta de pesquisa que existe uma falta de estabelecimento de relação mais direta entre os data centers sustentáveis e a sustentabilidade. Com isso, muitos autores falam da tecnologia e de como ela torna o data center mais eficiente energeticamente, porém, sem mencionar que ela contribui para tornar o data center sustentável.

Em relação à terceira pergunta de pesquisa, foi identificada uma falta de uma mensuração padrão que seja comum à maioria dos modelos de data centers apresentados. Isso gera uma dificuldade na comparação do nível de sustentabilidade dos data centers sustentáveis.

Todavia, esse estudo possui limitações quanto ao seu alcance. A primeira foi em relação às condições de inclusão adotadas. Em especial, o fato de que só foram considerados artigos que puderam ser acessados plenamente pelo autor, nos idiomas selecionados. Desta forma, artigos com acesso apenas aos resumos não foram considerados. E, não foram analisados artigos de congressos da área da Tecnologia da Informação que não estão presentes nas bases de dados usadas para essa pesquisa.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a periodicidade da revisão desta pesquisa, a inclusão de novas perguntas de pesquisa, tais como big data sustentáveis e tecnologias construtivas para os servidores de banco de dados; e a abrangência dos critérios de inclusão de produções científicas, de modo a incluir a análise de artigos científicos de congressos da área de TI neste trabalho.

REFERÊNCIAS

_____. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *What the data centre and AI boom could mean for the energy sector*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector>>. Acesso em: 12 ago. 2025.

_____. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Recommendation ITU-T L.1300: Best practices for green data centres*. Geneva: ITU, 2014.

_____. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Global Internet use continues to rise but disparities remain, especially in low-income regions*. Geneva, 27 nov. 2024. Disponível em: <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2024-11-27-facts-and-figures.aspx>. Acesso em: 12 ago. 2025.

_____. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION; WORLD BANK. *Green data centers: towards a sustainable digital transformation – a practitioner’s guide*. Washington, DC: World Bank, 2023.

_____. UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement*. Recomendação ITU-T L.1470, jan. 2020.

_____. UNITED NATIONS. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019.

_____. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Sustainable Development Goal 11: Cidades e comunidades sustentáveis*. Nações Unidas Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>. Acesso em: 23 jul. 2025.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Data centers: perspectivas e desafios para implantação no Brasil. São Paulo, 3 abr. 2025. Disponível em: <https://www.abinee.org.br/wp-content/uploads/2025/04/Datacenter.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, New York, v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015.

AMMARI, A.C.; LABIDI, W.; MNIF, F.; YUAN, H.; ZHOU, M.; SARRAB, M.. Firefly algorithm and learning-based geographical task scheduling for operational cost minimization in distributed green data centers. *Neurocomputing*, [S.l.], v. 490, p. 146–162, jan. 2022. Elsevier.

BISWAS, D.; JAHAN, S.; SAHA, S.; SAMSUDDOHA, M.. A succinct state-of-the-art survey on green cloud computing: challenges, strategies, and future directions. Sustainable Computing: *Informatics and Systems*, [S. l.], v. 44, p. 101036, 2024.

BUHALIS, D.; LEUNG, R.. Smart hospitality—Interconnectivity and interoperability towards an ecosystem. *International Journal of Hospitality Management*, [S.l.], v. 71, p. 41–50, 2018. ISSN 0278-4319.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C.; NIJKAMP, P. Smart cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 65–82, 2009.

CEN, H.; XU, Y.; SUN, K.; TIANB, H.; CHEN, K.; LIN, L.. Markov decision process framework of optimal energy dispatch in a smart data center with uninterruptible power supplies. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 471–486, 2024.

CHEN, T. M. Smart grids, smart cities need better networks. *IEEE Network*, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 2–3, mar./abr. 2010.

CORRÊA, H. *Administração de Cadeias de Suprimentos e Logística - Integração na Era da Indústria 4.0*. São Paulo: Atlas, 2019.

CORREIA, A. F.; MARTINS, R. A cidade inteligente e sustentável: o exemplo da Smart City Laguna. *Revista Brasileira de Direito Urbanístico – RBDU*, Belo Horizonte, ano 8, n. 14, p. 67–82, jan./jul. 2022.

DEPINÉ, Á.; TEIXEIRA, C. S. *Eficiência urbana em cidades inteligentes e sustentáveis: conceitos e fundamentos*. São Paulo: Perse, 2021. 172p.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da Informação*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 57–73, set. 2019/fev. 2020. DOI: 10.21728/logcion.2019v6n1.p57-73.

GIFFINGER, R., FERTNER, C., KRAMAR, H., KALASEK, R., MILANOVIĆ, N. P., MEIJERS, E. Smart cities – Ranking of European medium-sized cities. Final report. Vienna: *Vienna University of Technology Publisher*, 2007.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, [S.l.], v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009. DOI: 10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x.

HE, H.; SHEN, H.. Minimizing the operation cost of distributed green data centers with energy storage under carbon capping. *Journal of Computer and System Sciences*, v. 118, p. 28–52, 2021. ISSN 0022-0000.

HE, P.; ALMASIFAR, N.; MEHBODNIYA, A.; JAVAHERI, D.; WEBBER, J. L. Towards green smart cities using Internet of Things and optimization algorithms: A systematic and bibliometric review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, v. 36, 100822, 2022.

JEONG, S.; SHIN, S. Efficient network administration for smart grid data center. In: *International Conference on Advanced Communications Technology – ICACT 2020*, Daejeon, South Korea, 16–19 fev. 2020. Anais [...]. Daejeon: IEEE, 2020. ISBN 979-11-88428-04-5.

KHAN, T.; GOODWIN, M. O que é um data center verde? [S.l.]: IBM, 2 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/green-data-center>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Keele: Keele University; Durham: University of Durham, 2007. (EBSE Technical Report, EBSE-2007-01). Disponível em: https://legacyfileshare.elsevier.com/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf, Acesso em: 23 jun. 2025.

KUMAR, K. N.; CHETHAN, C.; PRIYA, S. Smart energy forecasting: energy consumption prediction in data centers. In: *International Conference On Visual Analytics And Data Visualization – ICVADV 2025*, [local não informado]. Anais... [S.l.]: IEEE, 2025. p. 586–593. ISBN 979-8-3315-2139-4. DOI: 10.1109/ICVADV63329.2025.10960795.

LIN, W.; LIN, J.; PENG, Z.; HUANG, H.; LIN, W.; LI, K. A systematic review of green-aware management techniques for sustainable data center. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, v. 42, 2024, Art. 100989. ISSN 2210-5379.

LONG, S.; LI, Y.; HUANG, J.; LI, Z.; LI, Y. A review of energy efficiency evaluation technologies in cloud data centers. *Energy and Buildings*, v. 260, p. 111848, 2022.

MONDAL, S.; FARUK, F. B.; RAJBONGSHI, D.; EFAZ, M. M. K.; ISLAM, M.. GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 21, p. 1–28, 2023.

OKAFOR, K. C.; OKAFOR, W. O.; LONGE, O. M.; AYOGU, I. I.; ANOH, K.; ADEBISI, B.. Scalable container-based time synchronization for smart grid data center networks. *Technologies*, Basel, v. 13, n. 3, p. 105, mar. 2025.

PANDIYAN, P.; KIM, K.; SARAVANAN, S.; KANNADASAN, R.; KRISHNAVENI, S.; ALSHARIF, M. H.; MUN, M-K. A comprehensive review of advancements in green IoT for smart grids: paving the path to sustainability. *Energy Reports*, v. 11, p. 5504–5531, 2024.

RAO, S. K.; PRASAD, R. Impact of 5G technologies on smart city implementation. *Wireless Personal Communications*, v. 100, p. 161–176, 2018.

ROSTIROLLA, G.; GRANGE, L.; MINH-THUYEN, T.; STOLF, P.; PIERSON, J.M.; DA COSTA, G.; BAUDIC, G.; HADDAD, M.; KASSAB, A.; NICOD, J.M.; PHILIPPE, L.; REHN-SONIGO, V.; ROCHE, R.; CELIK, B.; CAUX, S.; LECUIVRE, J. A survey of challenges and solutions for the integration of renewable energy in datacenters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 155, p. 111787, nov. 2021.

SERMSUK, M.; SUKJAI, Y.; RAJOO, S.; KIATKITTIPONG, K.; WIBOONRAT, M.; SIRIPONGDEE, S. Feasibility of integrating small-scale liquefied natural gas (LNG) terminal with combined cycle power plant to reduce carbon emissions and costs for data centers. *Results in Engineering*, v. 26, 2025. Art. 105612. ISSN 2590-1230.

SHARMA, A. P.; SINGH, J.; GULZAR, Y.; GUPTA, D.; KUMAR, M.. Sustainable energy efficient workflow classification and scheduling in geo distributed cloud datacenter. *Discover Sustainability*, v. 5, n. 128, 2024.

SHEIKHOLESLAMI, S. M.; RABIEI, A. M.; MOHAMMAD-TAHERI, M.; ABOUEI, J. Cloud data center participation in smart demand response programs for energy cost minimization. *IET Smart Grid*, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 380–394, 2022.

SILVA, B. N.; KHAN, M.; HAN, K. Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 38, p. 697–713, jan. 2018.

SILVA, J. C. Construindo um data center. *Revista USP*, São Paulo, n. 96, p. 114–123, dez. 2012.

SPENCER, T; SINGH, S. *What the data centre and AI boom could mean for the energy sector*. International Energy Agency, 18 out. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector>. Acesso em: 12 ago. 2025.

SUSNJARA, S.; SMALLEY, I. O que é um data center? IBM Think, 4 set. 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/data-centers>. Acesso em: 23 jun. 2025.

SYED, A. S.; SIERRA-SOSA, D.; KUMAR, A.; ELMAGHRABY, A. IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges. *Smart Cities*, Basel, v. 4, n. 2, p. 429–475, 2021.

SYED, Abbas Shah; SIERRA-SOSA, Daniel; KUMAR, Anup; ELMAGHRABY, Adel. IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges. *Smart Cities*, Basel, v. 4, n. 2, p. 429–475, 2021.

TAGHIZAD-TAVANA, K; TARAFDAR-HAGH, M; NOJAVAN, S.; YASINZADEH, M.; GHANBARI-GHALEHJOUGH, M. Operation of smart distribution networks by considering the spatial–temporal flexibility of data centers and battery energy storage systems. *Sustainable Cities and Society*, v. 114, p. 105746, 2024. ISSN 2210-6707.

VALKHOF, B; KEMENE, E; STARK, J. *Data volume is soaring. Here's how the ICT sector can sustainably handle the surge*. World Economic Forum, 22 maio 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2024/05/data-growth-drives-ict-energy-innovation>. Acesso em: 12 ago. 2025.

VALMOHAMMADI, C.; HEJRI, F. M. Designing a conceptual green process model in software development: a mixed method approach. *International Journal of Information Management Data Insights*, [S.I.], v. 3, p. 100204, 2023.

VASCONCELOS, M. F. S.; CORDEIRO, D.; DA COSTA, G.; DUFOSSÉ, F.; NICOD, J-M; REHN-SONIGO, V. Optimal sizing of a globally distributed low carbon cloud federation. In: *IEEE/ACM International Symposium On Cluster, Cloud and Internet Computing*, 23., 2023, Bangalore. Anais... [S.I.]: IEEE, 2023. p. 1–13. DOI: 10.1109/CCGrid57682.2023.00028.

WANG, B.; LIU, F. Task arrival based energy efficient optimization in smart-IoT data center. *Mathematical Biosciences and Engineering*, [S.l.], v. 18, n. 4, p. 3913–3930, 2021.

WASHBURN, D.; SINDHU, U. *Helping CIOs Understand “Smart City” Initiatives*. Cambridge, MA: Forrester Research, Inc., 2010.

WEISS, M. C.; BERNARDES, R. C.; CONSONI, F. L. Cidades inteligentes como nova prática para o gerenciamento dos serviços e infraestruturas urbanos: a experiência da cidade de Porto Alegre. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 310–324, set./dez. 2015.

YANG, Z., JIANJUN, L., FAQIRI, H., SHAFIK, W., TALAL ABDULRAHMAN, A., YUSUF, M., SHARAWY, A.M. Green Internet of Things and Big Data Application in Smart Cities Development. *Complexity*, [S.l.], v. 2021, Article ID 4922697, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/4922697>.

YU, Y.; SHAN, K.; TANG, H.; WANG, S. Reliability and economic impacts of utilizing battery energy storage in data centers for energy flexibility services in smart grids. *Energy Conversion and Management*, [S.l.], v. 339, p. 119951, 2025. ISSN 0196-8904.

ZHANG, Y.; TANG, H.; LI, H.; WANG, S. Unlocking the flexibilities of data centers for smart grid services: Optimal dispatch and design of energy storage systems under progressive loading. *Energy*, v. 316, p. 134511, 2025. ISSN 0360-5442.

ZHOU, W.; MENG, W.; LIU, H.; ZHAO, L. Research on smart energy-saving technology for data center based on adaptive temperature threshold. In: *International Conference On Mobile Internet, Cloud Computing And Information Security – MICCIS, 2., 2024*, Changsha. Anais [...]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2024. p. 130–135.

ZHU, H.; ZHANG, D.; GOH, H. H.; WANG, S.; AHMAD, T.; MAO, D.; LIU, T.; ZHAO, H.; WU, T. Future data center energy-conservation and emission-reduction technologies in the context of smart and low-carbon city construction. *Sustainable Cities and Society*, v. 89, 2023, Art. 104322. ISSN 2210-6707.