

INFRAESTRUTURA DIGITAL SUSTENTÁVEL: INOVAÇÕES EM DATA CENTERS E COMPUTAÇÃO EM NUVEM VERDE

SUSTAINABLE DIGITAL INFRASTRUCTURE: INNOVATIONS IN DATA
CENTERS AND GREEN CLOUD COMPUTING

INFRAESTRUTURA DIGITAL SOSTENIBLE: INNOVACIONES EN CENTROS DE
DATOS Y COMPUTACIÓN EN LA NUBE VERDE

Rômulo Ferreira dos Santos¹, Paulo Cesar Rodrigues Borges²

DOI: 10.54899/dcs.v23i86.4216

Recibido: 08/12/2025 | Aceptado: 05/01/2026 | Publicación en línea: 12/01/2026.

RESUMO

A era digital, marcada por um aumento exponencial na demanda por serviços *online*, levou a uma significativa proliferação de *data centers* e à ampla adoção da computação em nuvem. Essa rápida expansão tecnológica, entretanto, acarreta um considerável ônus ambiental, devido ao alto consumo de eletricidade e às emissões de carbono associadas. Este artigo apresenta uma análise abrangente de conceitos e práticas sustentáveis em *data centers*, ao enfatizar inovações como *data centers* subaquáticos e em ambientes frios, bem como o papel transformador da computação em nuvem verde na minimização do impacto ecológico da infraestrutura digital global. Neste artigo também se examina o atual panorama do consumo de energia, a transição para instalações de hiperescala e infraestruturas compartilhadas de tecnologias (*colocation*), o crescente mercado de *data centers* sustentáveis e o potencial da computação em nuvem para reduzir emissões. Apesar dos avanços promissores e das metas ambiciosas de sustentabilidade estabelecidas pelos principais provedores de nuvem, o contínuo crescimento da demanda por energia reforça a necessidade urgente da adoção acelerada de tecnologias e práticas verdes para garantir um futuro digital verdadeiramente sustentável. Como agenda de trabalhos futuros, é apresentada uma proposta de pesquisa interdisciplinar entre *Data Centers*, Modelo da Tríplice Hélice (MTH) e o enfoque gerencial da *Resource-Based View* (RBV).

Palavras-chave: Computação em Nuvem Verde. *Data Centers* Sustentáveis. Eficiência Energética. Energia Renovável. Impacto Ambiental. Inovação Tecnológica.

ABSTRACT

The digital age, marked by an exponential increase in the demand for online services, has led to a significant proliferation of data centers and the widespread adoption of cloud computing. However, this rapid technological expansion entails a considerable environmental burden due to high electricity consumption and associated carbon emissions. This article provides a

¹ Doutor em Gestão de Projetos de Tecnologia da Informação, Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI), Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: romulo.santos@ieee.org Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-3588-7583>

² Doutor em Ciência da Informação, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: paulo.borges@iesb.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7398-7905>

comprehensive analysis of sustainable concepts and practices in data centers, emphasizing innovations such as underwater and cold-environment data centers, as well as the transformative role of green cloud computing in minimizing the ecological impact of global digital infrastructure. It also examines the current energy consumption landscape, the transition to hyperscale facilities and shared technology infrastructures (colocation), the growing market for sustainable data centers, and the potential of cloud computing to reduce emissions. Despite promising advances and the ambitious sustainability targets set by major cloud providers, the continuous growth in energy demand underscores the urgent need for the accelerated adoption of green technologies and practices to ensure a truly sustainable digital future. As an agenda for future work, an interdisciplinary research proposal is presented between Data Centers, the Triple Helix Model (MTH) and the managerial approach of the Resource-Based View (RBV).

Keywords: Energy Efficiency. Environmental Impact. Green Cloud Computing. Renewable Energy. Sustainable Data Centers. Technological Innovation.

RESUMEN

La era digital, marcada por un aumento exponencial en la demanda de servicios en línea, ha llevado a una proliferación significativa de centros de datos y a la adopción generalizada de la computación en la nube. Sin embargo, esta rápida expansión tecnológica conlleva una considerable carga medioambiental, debido al alto consumo de electricidad y a las emisiones de carbono asociadas. Este artículo presenta un análisis exhaustivo de los conceptos y prácticas sostenibles en los centros de datos, haciendo hincapié en innovaciones como los centros de datos submarinos y en entornos fríos, así como en el papel transformador de la computación en la nube verde para minimizar el impacto ecológico de la infraestructura digital global. En este artículo también se examina el panorama actual del consumo de energía, la transición a instalaciones a hiperescala e infraestructuras tecnológicas compartidas (colocación), el creciente mercado de centros de datos sostenibles y el potencial de la computación en la nube para reducir las emisiones. A pesar de los prometedores avances y los ambiciosos objetivos de sostenibilidad establecidos por los principales proveedores de nube, el continuo crecimiento de la demanda de energía refuerza la urgente necesidad de acelerar la adopción de tecnologías y prácticas ecológicas para garantizar un futuro digital verdaderamente sostenible. Como agenda de trabajo futuro, se presenta una propuesta de investigación interdisciplinaria entre los centros de datos, el modelo de la triple hélice (MTH) y el enfoque gerencial de la visión basada en los recursos (RBV).

Palabras clave: Computación en la Nube Ecológica. Centros de Datos Sostenibles. Eficiencia Energética. Energía Renovable. Impacto Medioambiental. Innovación Tecnológica.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A era digital é caracterizada pela vertiginosa demanda ou procura por serviços *online*, o que influi na proliferação de *data centers* e a massiva adoção da computação em nuvem. No entanto, essa expansão tecnológica acarreta um considerável ônus ambiental, notadamente o elevado consumo de eletricidade e as subseqüentes emissões de carbono. Conciliar a computação de alto desempenho com a responsabilidade ambiental tornou-se um desafio difícil e um imperativo.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise abrangente de conceitos e práticas sustentáveis aplicados a data centers, com ênfase em inovações como data centers subaquáticos e em ambientes frios, além do papel transformador da computação em nuvem verde na minimização do impacto ecológico da infraestrutura digital global.

REFERENCIAL TEÓRICO

Para atingir o objetivo formulado anteriormente, o referencial em pauta fixou-se nos temas mais atuais e de interesse do segmento científico-tecnológico, do industrial e, em última análise, entre a oferta e a procura que presidem as complexas inter-relações entre consumidores e prestadores ou fornecedores destes serviços que, gradativamente, se posicionam como infraestruturas críticas da sociedade e do Estado.

Dessa forma, é fundamental tratar certos conceitos de forma a estabelecer uma terminologia (termos definidos de forma clara e distinta) nesta área interdisciplinar, que já se impõe como promissora no mundo da ciência e da tecnologia, bem como atrativa nas relações de negócios e de mercado.

O mercado avança vertiginosamente nas suas entregas em termos de pesquisas e produções literárias específicas e diversificadas, o que exige mais do pesquisador e do cientista constante interação com esses materiais bibliográficos da área industrial e negocial, caso contrário a comunicação pode vir a se tornar inadequada, isto é, repleta de termos definidos de forma obscura e confusa (RUDIO, 1978).

Os requisitos para esta comunicação adequada pautam-se pela precisão, pela concisão e pela clareza. Tentou-se cingir o propósito desta revisão de literatura com este trinômio, mas sem

aprofundar na teoria. Para o leitor interessado nos aspectos teóricos, as fontes pesquisadas poderão servir de base para um estudo mais minucioso.

Sustentabilidade em *Data Centers*

A crescente demanda por serviços digitais posicionou os *data centers* como infraestrutura crítica, mas seu impacto ambiental é uma preocupação crescente. Atualmente, os *data centers* respondem por aproximadamente 1% do consumo global de eletricidade, com uma taxa de crescimento anual de 9% (CHAUHAN, 2024). Esse dado alarmante reforça a urgência de soluções abrangentes de eficiência energética e práticas sustentáveis de operação.

Uma estratégia central para enfrentar esse desafio é a integração de fontes renováveis de energia nas operações de *data centers*. O aproveitamento de energia solar, eólica e hidrelétrica pode reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e mitigar emissões de carbono (LI *et al.*, 2023; VIRMANI, 2025). Essa mudança não apenas se alinha aos esforços globais de descarbonização, mas também aumenta a resiliência operacional e a previsibilidade de custos no longo prazo.

Além da origem da energia, técnicas inovadoras de resfriamento são cruciais para propiciar maior eficiência energética. Soluções como *data centers* subaquáticos ou instalados em ambientes frios utilizam temperaturas naturais para o resfriamento, o que reduz drasticamente o consumo de energia tradicionalmente empregado no controle térmico (ALKRUSH *et al.*, 2024).

Proporcionar sustentabilidade em *data centers* não se trata apenas de colocar atenção no quesito de baixar o consumo energético, mas tambémem conhecer todo o conjunto de impactos ambientais que as infraestruturas de tecnologias da informação (TI) causam ou podem causar ao longo do seu ciclo de vida. Desse modo, os aspectos a seguir orientam a compreensão do problema:

- Seleção de materiais ecologicamente adequados;
- Reaproveitamento do calor gerado pelos equipamentos; e
- Integração de energias renováveis (CHIDOLUE *et al.*, 2024).

Além dos aspectos enumerados anteriormente, vale ressaltar que a utilização de recursos de Inteligência Artificial (IA), implantados nos sistemas distribuídos que dão suporte a esses *data centers*, constituem fator importante para otimizar o seu desempenho e ampliar a sua eficiência operacional, ao mesmo tempo que reforçam o cumprimento de metas ambientais (VIRMANI, 2025).

Computação em Nuvem

A computação em nuvem representa um paradigma transformador no fornecimento de recursos de TI, o que permite aos usuários ter acesso aos servidores, armazenamento e aplicações sob demanda e de forma remota pela Internet. Seus principais atributos são os seguintes:

- Elasticidade: possibilita o ajuste dinâmico de recursos conforme a demanda (PATEL, 2023; LAI, *et al.*, 2023);
- Autosserviço: usuários podem provisionar e gerenciar recursos sem intervenção direta do provedor (HARSHA *et al.*, 2019; QADI; HARBI, 2024);
- Ampla acessibilidade: serviços disponíveis de qualquer local com conexão à Internet, o que facilita o trabalho remoto e a colaboração global (QADI; HARBI, 2024; SIDHAARTH VISHNU, 2023);
- Modelo de pagamento conforme o uso: reduz custos fixos, já que se paga apenas pelos recursos efetivamente consumidos (HARSHA *et al.*, 2019; QADI; HARBI, 2024).

Essas características tornam a computação em nuvem indispensável na economia digital, o que permite escalabilidade, otimização de custos e vantagem competitiva, ao mesmo tempo em que elimina a necessidade de grandes investimentos iniciais em *hardware* e *software*.

Entretanto, existem desafios. Questões de segurança e privacidade são críticas, visto que dados processados e armazenados remotamente estão sujeitos a acessos não autorizados (HARSHA *et al.*, 2019). Além disso, a dependência da conectividade pode afetar a disponibilidade do serviço, especialmente em regiões com infraestrutura de rede instável.

Apesar disso, os benefícios da nuvem, escalabilidade, eficiência de recursos e disseminação do acesso a soluções de nível empresarial, continuam a impulsionar sua ampla adoção em diversos setores.

Data Centers Verdes

Os *data centers* verdes, também chamados de sustentáveis, podem ser definidos como instalações de tecnologia da informação e comunicação (TIC), concebidas e projetadas para empregar eficientemente tecnologias voltadas à redução do consumo de energia e à mitigação ou, até mesmo, à eliminação de impactos que afetem negativamente o meio ambiente (PITCHAI *et al.*, 2024).

Os desafios que vêm à tona com essas novas infraestruturas tecnológicas e suas interações complexas com o dia a dia das pessoas, já não são tão desconhecidos dos profissionais, pesquisadores e cientistas das áreas de tecnologia. Há décadas, estes são confrontados com situações difíceis de contornar, por exemplo, a de equilibrar rapidez com segurança na produção de bens ou no desenvolvimento de soluções para usuários cada vez mais exigentes. No entanto, no final, acabaram sempre por balancear razoavelmente bem a equação custo-benefício.

Para o caso em tela (*data centers* verdes), o desafio é o de atingir a meta de máxima eficiência energética a um mínimo de impacto ambiental. O balanço razoável entre esses requisitos à primeira vista incoadunáveis precisa atender a algumas premissas, quais sejam:

- Energia renovável: priorização de fontes como solar e eólica, o que reduz a dependência de combustíveis fósseis (REDDY, 2024; ALIJOYO *et al.*, 2024);
- Materiais sustentáveis: escolha de insumos de baixo impacto ambiental ao longo do ciclo de vida;
- Sistemas avançados de resfriamento: tecnologias de alta eficiência, que muitas vezes se utilizam de métodos naturais ou indiretos;
- Práticas de reciclagem: descarte responsável e reaproveitamento de equipamentos e materiais.

Com o apoio de redes inteligentes (*smart grids*) e da Internet das Coisas (IoT), os *data centers* verdes conseguem monitorar e otimizar instantaneamente ou em tempo real o seu consumo de energia, o que os torna exemplos viáveis de infraestruturas tecnológicas alinhadas aos objetivos globais de sustentabilidade (ALIJOYO *et al.*, 2024).

Inovações em *Data Centers* Sustentáveis

A gênese da inovação para *data centers* sustentáveis vem dos desafios mencionados anteriormente. Estes desafios criam oportunidades para surgir pessoas criativas. As soluções inovadoras vêm das empresas que atraem capital humano criativo.

Em termos de *data centers* verdes ou sustentáveis, a disrupção em inovação ocorre a partir do momento em que as soluções tradicionais de baixa eficiência são substituídas por essas infraestruturas que privilegiam o baixo impacto ambiental, menor consumo de energia e maior eficiência de processamento de dados e serviços de comunicação, tudo isso em larga escala, quer

dizer, *data centers* sustentáveis são inovações disruptivas, quando alcançam uma gama ampla e diversificada de usuários/consumidores a custos toleráveis.

Como conclusão parcial neste tópico da revisão de literatura, pode-se dizer que a busca por soluções disruptivas impulsionou o surgimento de novos cenários de inovação tecnológica, tais como:

- *Data centers* subaquáticos: utilizam a baixa temperatura da água para resfriamento natural, que prescindem de sistemas tradicionais de ar-condicionado, o que reduz os custos energéticos. Além disso, sua instalação próxima a grandes centros populacionais costeiros diminui a latência (neste contexto, o período entre o início do projeto e a sua conclusão) e melhora a distribuição de dados (USPTO, 2018);
- *Data centers* em regiões frias (*ice data centers*): localizados em ambientes de baixa temperatura, aproveitam o clima natural para resfriamento, o que aumenta a eficiência energética. Frequentemente, também utilizam energia limpa, como a hidrelétrica, o que reforça o requisito de sustentabilidade (GE *et al.*, 2024).

Roteiro para Computação em Nuvem Verde

O *Green loud Computing Roadmap* estabelece diretrizes para tornar os serviços de nuvem mais sustentáveis (RAO, 2023). As principais práticas incluem:

- Virtualização eficiente: maximizar o uso de recursos físicos por meio de tecnologias avançadas de virtualização, o que reduz a necessidade de infraestrutura adicional (CLAUDE *et al.*, 2024);
- Redução do lixo eletrônico: políticas de ciclo de vida que prolonguem a durabilidade de equipamentos, priorizem o reparo e garantam a reciclagem adequada (SWATHI *et al.*, 2024);
- Migração para energias renováveis: priorização de energia solar, eólica e hidrelétrica para alimentar a infraestrutura da nuvem (SINGLA, 2023);
- Infraestrutura otimizada: projetos arquitetônicos que minimizem a demanda física e energética, por intermédio de soluções de resfriamento inovadoras e sistemas de distribuição de energia mais eficientes (ALKRUSH *et al.*, 2024).

Esse roteiro traça um caminho claro para que a computação em nuvem contribua com a preservação ecológica, sem sacrificar o desempenho.

MÉTODO DA PESQUISA

Para se alinhar ao objetivo desta pesquisa, que é o de analisar de forma abrangente conceitos e práticas sustentáveis aplicadas às infraestruturas de *data centers*, optou-se por uma pesquisa documental, descritiva e exploratória, por meio de um enfoque misto, parte quantitativo, parte qualitativo (SEKARAN, 2000).

Foi empregada uma revisão bibliográfica que abrangeu, em sua maior parte, literatura muito atual, tanto de origem nacional como internacional, não só para compor a revisão de literatura usual, como também para coligir dados históricos de fontes secundárias e recentes, que receberam tratamento estatístico descritivo simples, pela estimativa de parâmetros de tendência central, de dispersão e de correlação.

Em paralelo à revisão mencionada, desenvolveu-se uma pesquisa documental, que envolveu a busca, seleção e organização de atos normativos, relatórios organizacionais, patentes, manuais técnicos e notas informativas elaboradas por organizações de natureza pública, privada ou combinação desses tipos (VIRMANI, 2025).

Dessas estatísticas foi possível extrair informações relevantes sobre as alternativas que se apresentam no bojo do paradigma de *data centers* sustentáveis, que operem com máxima eficiência e mínimo consumo de energia, e que sejam aplicadas em modelagens matemáticas simples e expeditas pela técnica das Cadeias de Markov, com o intuito de gerar cenários prospectivos sobre a utilização desses tipos de *data centers* (BRÉMAUD, 2020; DALKANI; MOJARAD; ARFAEINIA, 2021). O componente do enfoque quantitativo da pesquisa ficou assim caracterizado.

Já o componente qualitativo do enfoque misto da pesquisa concentrou-se não só na descrição e ilustração das distribuições temporais e espaciais dos dados secundários coligidos e mencionados anteriormente, como também na interpretação dos cenários prospectivos, com a atenção dirigida para as influências na sustentabilidade dos *data centers*.

Em suma, o método explanado foi subdividido em duas etapas, em que cada uma delas emprega a abordagem mista que norteou esta pesquisa:

- 1ª Etapa (análise dos dados históricos): foram coletados valores anuais de consumo de energia de *data centers*, ao longo de aproximadamente dez anos, para se deduzir estatísticas descritivas simples e de caracterização geral da série temporal. Essa análise permitiu reconhecer padrões de estabilidade, de tendência, periodicidade, dentre outros aspectos;

- 2ª Etapa (projeções por intermédio das Cadeias de Markov): com base nas estatísticas produzidas, utilizou-se um modelo estocástico de Cadeia de Markov para estimar e gerar os estados futuros de consumo energético (BRÉMAUD, 2020; DALKANI; MOJARAD; ARFAEINIA, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

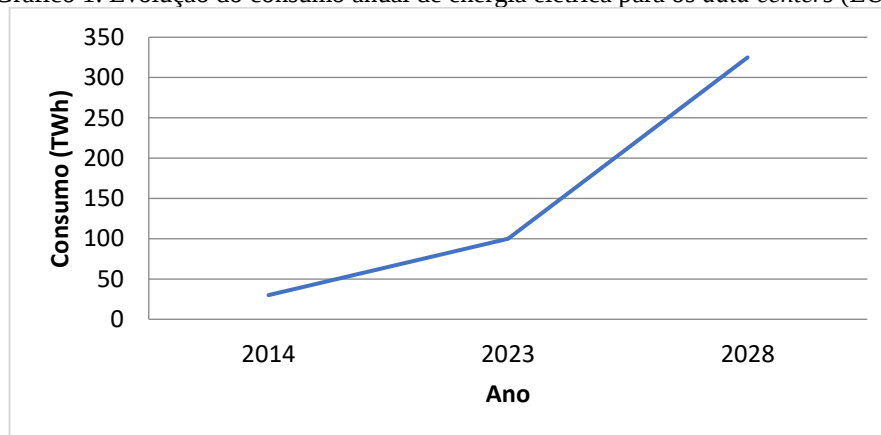
O crescimento da infraestrutura digital apresenta um cenário desafiador em termos de consumo energético e impactos ambientais, mas também abre oportunidades claras para a sustentabilidade, quais sejam:

Crescimento do Consumo Energético em *Data Centers*

O consumo anual de eletricidade por servidores nos EUA aumentou de aproximadamente 30 TWh em 2014 para quase 100 TWh em 2023. Ao se considerar todos os componentes, o uso total de eletricidade por *data centers* no país alcançou 176 TWh em 2023 (4,4% do consumo total de energia) e projeta-se que chegue entre 325 TWh e 580 TWh em 2028 — de 6,7% a 12% do consumo nacional (KANDEMIR; GÖK; GÖKSEN, 2023). O Gráfico 1 ilustra este cenário.

Cabe registrar que os valores expressos no Gráfico 1 refletem a crescente demanda por serviços em nuvem, armazenamento massivo de dados e processamento em larga escala, o que traz implicações diretas para a sustentabilidade energética e para a necessidade de adoção de soluções mais eficientes e verdes no setor (KANDEMIR; GÖK; GÖKSEN, 2023).

Gráfico 1. Evolução do consumo anual de energia elétrica para os *data centers* (EUA)

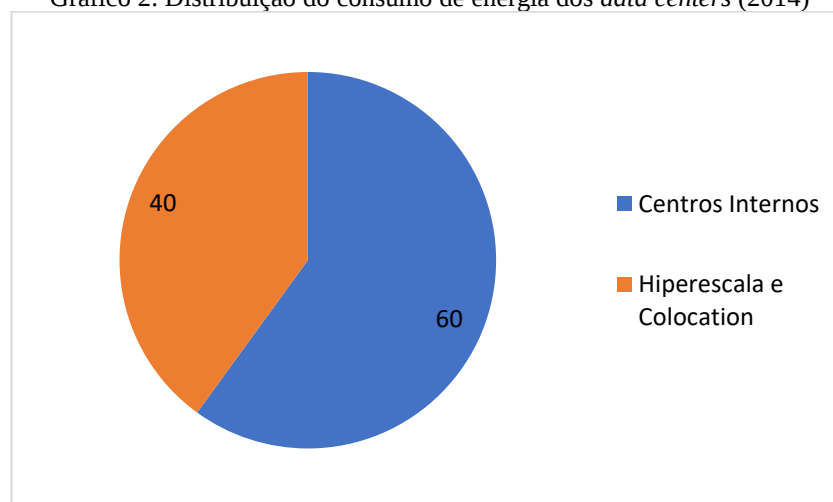


Fonte: Elaborado pelos autores.

Migração para *Data Centers* de Hiperescala e *Colocation*

A estrutura do consumo de energia mudou substancialmente. Em 2014, os centros internos respondiam por mais de 60% do consumo de servidores (Gráfico 2).

Gráfico 2. Distribuição do consumo de energia dos *data centers* (2014)

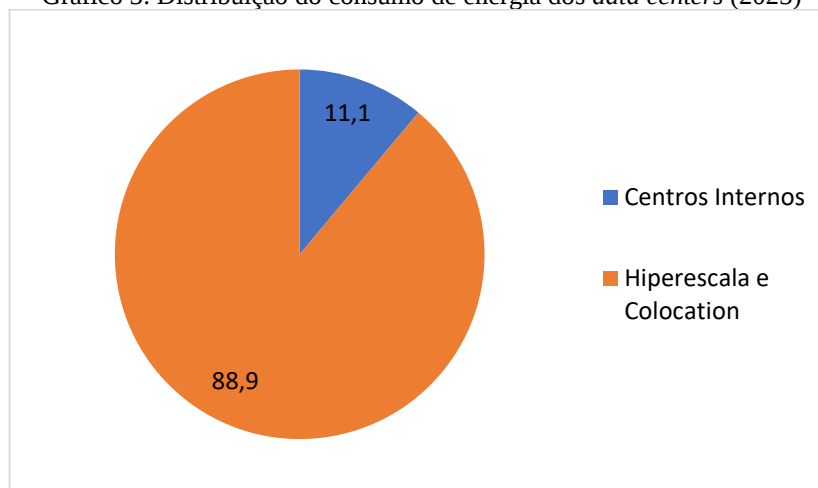


Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 2 ilustra para aquela época que 60% do consumo estava concentrado em centros internos, enquanto 40% correspondiam às estruturas de hiperescalas e *colocation*. Esse recorte do tempo revela um cenário de predominância de infraestruturas próprias das organizações, embora já fosse notável o crescimento dos modelos de hospedagem compartilhada e em larga escala, que posteriormente se tornariam predominantes no mercado (NAGARATHINAM *et al.*, 2024).

Em 2023, essa participação caiu para cerca de 11,1%, enquanto as estruturas de hiperescala e *colocation* já representavam, aproximadamente, 80%. Nessa tendência, é possível projetar um cenário em que essa cifra supere o patamar de 90% até 2028. Isso demonstra uma consolidação e otimização de recursos em larga escala (Gráficos 3 e 4).

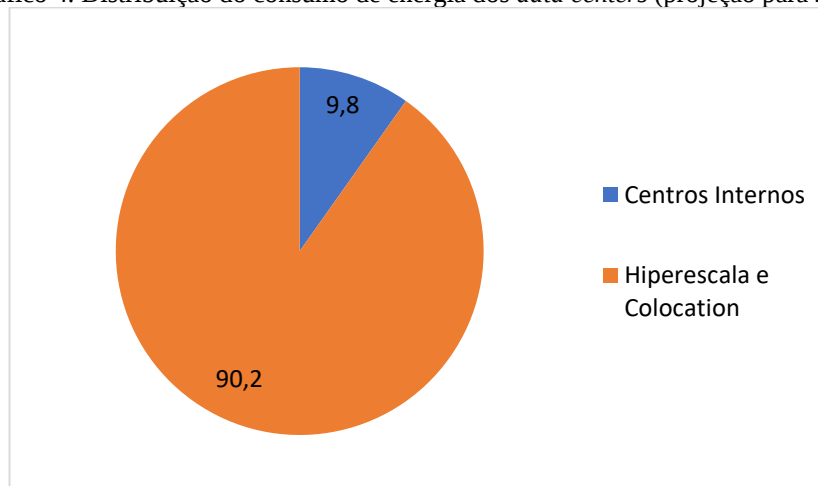
Gráfico 3. Distribuição do consumo de energia dos *data centers* (2023)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação a 2014, período em que predominavam os centros internos, o Gráfico 3 permite verificar que em 2023 apenas 11,1% do consumo está associado a essas estruturas, contra 88,9% concentrado em *data centers* de hiperescalas e *colocation*. Essa transformação reflete a migração das organizações para provedores especializados, que oferecem maior escalabilidade, eficiência energética e otimização de custos operacionais (MONDAL *et al.*, 2023).

Gráfico 4. Distribuição do consumo de energia dos *data centers* (projeção para 2028)



Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 4 apresenta a projeção para 2028. Esse cenário indica que apenas 9,8% do consumo energético permanecerão em centros internos, enquanto 90,2% serão dominados por *data centers* de hiperescalas e *colocation* (MONDAL *et al.*, 2023). Essa tendência confirma a consolidação do modelo centralizado em provedores globais, impulsionado pela demanda

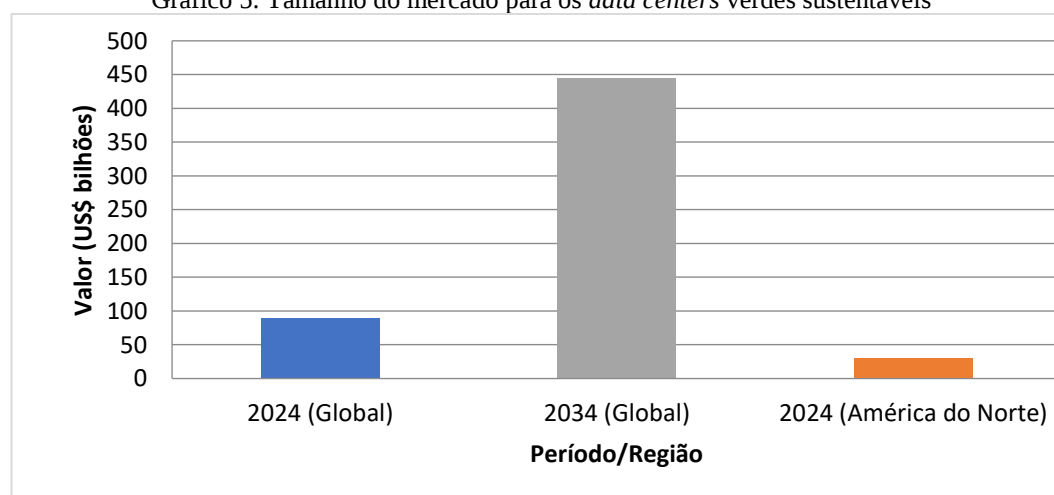
crescente por serviços em nuvem, inteligência artificial e *big data*. Ao mesmo tempo, reforça o fato de ser necessário enfrentar o desafio de garantir eficiência energética e sustentabilidade diante do avanço contínuo dessas infraestruturas de grande porte (BRÉMAUD, 2020; DALKANI; MOJARAD; ARFAEINIA, 2021).

Mercado Global de *Data Centers* Sustentáveis

O mercado global de *data centers* sustentáveis foi avaliado de US\$ 84 a 85 bilhões em 2024, com projeção de atingir entre US\$ 441 a 442 bilhões até 2034, o que representa uma Taxa de Crescimento Anual Composta (*Compound Annual Growth Rate* — CAGR) de aproximadamente 18% no período. Especificamente, os *data centers* verdes passaram de um valor global de US\$ 71 a 85 bilhões (2024 e 2025) para uma estimativa de US\$ 392 bilhões em 2034 (CAGR, cerca de 18,5%). A América do Norte lidera o mercado, com cerca de US\$ 27 a 30 bilhões em 2024 (de 36% a 39% do total global — Gráfico 5).

O Gráfico 5 evidencia o crescimento projetado do mercado de *data centers* verdes sustentáveis. Em 2024, o mercado global atingiu cerca de US\$ 90 bilhões, enquanto a América do Norte representa aproximadamente US\$ 30 bilhões desse montante. Para 2034, a estimativa global alcança cerca de US\$ 450 bilhões, o que demonstra a rápida expansão do setor impulsionada pela demanda por eficiência energética, redução de emissões de carbono e conformidade regulatória (BRÉMAUD, 2020; DALKANI; MOJARAD; ARFAEINIA, 2021).

Gráfico 5. Tamanho do mercado para os *data centers* verdes sustentáveis



Fonte: Elaborado pelos autores.

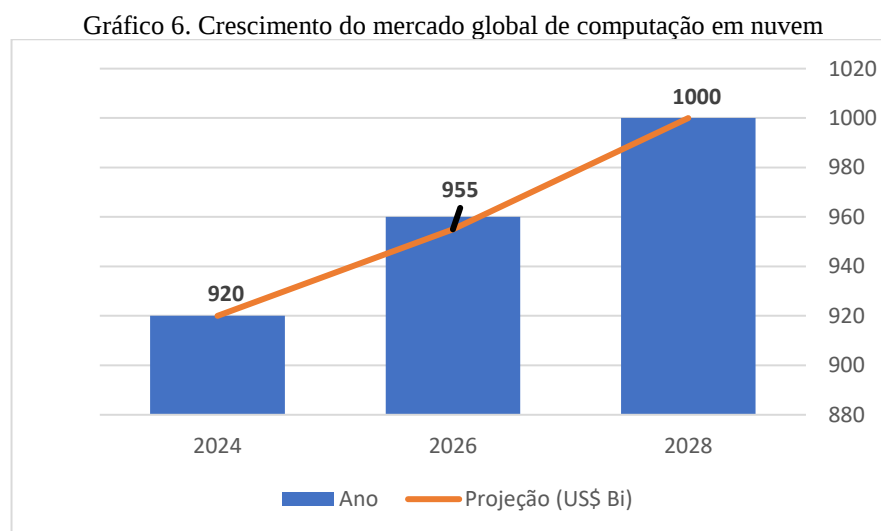
Mercado de Computação em Nuvem

Em 2024, o mercado global de nuvem alcançou aproximadamente US\$ 912,8 bilhões e deve ultrapassar US\$ 1 trilhão até 2028 (CAGR, cerca de 16% a 17%). Mais de 90% das empresas já utilizam algum serviço de nuvem e cerca de 94% das grandes organizações adotaram a nuvem, sendo que 48% planejam migrar metade de suas aplicações dentro de um ano (Gráfico 6).

O Gráfico 6 mostra o crescimento projetado do mercado global de computação em nuvem, que deve evoluir de US\$ 920 bilhões em 2024 para cerca de US\$ 955 bilhões em 2026, e a marca de US\$ 1 trilhão em 2028 (BRÉMAUD, 2020; DALKANI; MOJARAD; ARFAEINIA, 2021).

Sustentabilidade na Nuvem

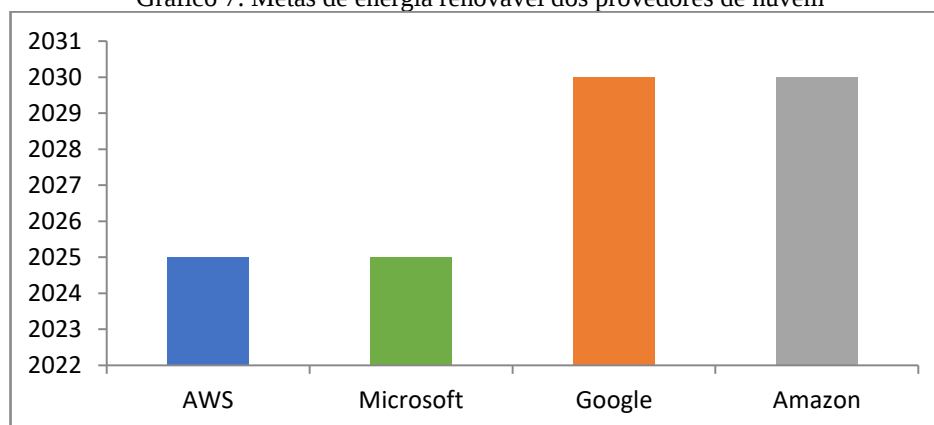
Os principais provedores estabeleceram metas ambiciosas. A *Amazon Web Services* (AWS) e a Microsoft têm por meta alcançar 100% de energia renovável até 2025 e neutralidade hídrica até 2030. A Microsoft também projetou ser classificada como “carbono negativo” até 2030 e remover todas as suas emissões históricas até 2050 (MICROSOFT, 2020a; MICROSOFT, 2020b; MICROSOFT, 2025; AMAZON, 2024; AMAZON, [s.d.]; AWS, [s.d.]).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Google e a Amazon têm metas de neutralidade entre 2030 e 2040. Migrar para a nuvem pode reduzir emissões em até 84% (ACCENTURE, 2020; GOOGLE, 2020a; GOOGLE, 2020b). O Gráfico 7 ilustra este cenário.

Gráfico 7. Metas de energia renovável dos provedores de nuvem

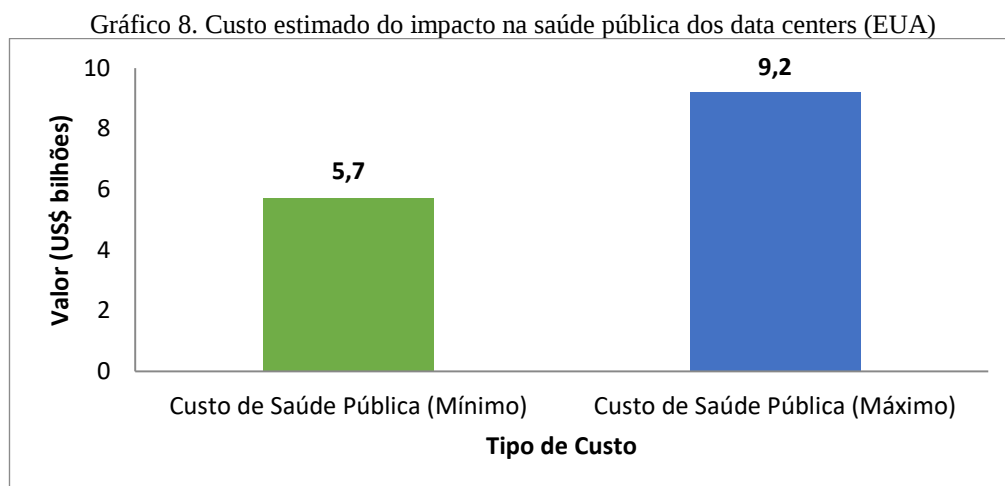


Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 7 ainda ressalta as metas de adoção de energia renovável definidas pelos principais provedores globais de computação em nuvem. A AWS e a Microsoft estabeleceram como horizonte o ano de 2025 para alcançar 100% de uso de fontes renováveis, enquanto a Google e a Amazon projetaram atingir essa meta em 2030 (AMAZON WEB SERVICES, [s.d.]; MICROSOFT, [s.d.]). Esses compromissos refletem a pressão crescente por sustentabilidade no setor, diante do elevado consumo energético dos *data centers*, e posicionam tais empresas como protagonistas na transição para infraestruturas digitais mais verdes.

Consequências Ambientais Adversas

Apesar dos avanços, o crescimento da infraestrutura digital gera impactos negativos. Em 2024, mais de 1.240 novos *data centers* foram solicitados apenas nos EUA, com demanda projetada de 239,3 TWh — equivalente ao consumo de todo o estado da Flórida. Isso resulta em impactos à saúde pública devido ao uso de energia fóssil, com custos estimados entre US\$ 5,7 e 9,2 bilhões por ano (CHANNI; KUMAR, 2024; AGRAWAL *et al.*, 2024). O Gráfico 8 ilustra este cenário.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O Gráfico 8 também apresenta a estimativa do impacto econômico dos *data centers* sobre a saúde pública nos Estados Unidos. Os custos variam entre um mínimo de US\$ 5,7 bilhões e um máximo de US\$ 9,2 bilhões, o que reflete despesas associadas a doenças respiratórias, cardiovasculares e outros agravos decorrentes da poluição atmosférica e das emissões indiretas ligadas ao consumo energético dessas infraestruturas. Esses valores evidenciam que, além dos desafios tecnológicos e ambientais, a expansão dos *data centers* também traz implicações sociais e de saúde que precisam ser consideradas em políticas públicas e em estratégias de sustentabilidade (CHANNI; KUMAR, 2024; AGRAWAL *et al.*, 2024).

Data Centers Sustentáveis (Verdes), Modelo da Tríplice Hélice e Resource-Based View

O escopo inicialmente delineado como objetivo para este trabalho tem o potencial de deixar abertas outras portas para analisar, discutir e prolongar algumas conclusões parciais em trabalhos futuros de pesquisa, sobretudo no que toca a integrar o tema ora desenvolvido com dois outros: o Modelo da Tríplice Hélice – MTH (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 1995; ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 2000) e o Modelo da Visão Baseada em Recursos - VBR ou RBV - *Resource-Based View* (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 2000; BORGES *et al.*, 2020; BORGES, 2022; BARNEY *et al.*, 2011; BARNEY; HESTERLY, 2015).

O MTH, originalmente idealizado por Henry Etzkowitz & Loet Leydesdorff, em meados da década de 1990 e no início dos anos 2000 (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 1995; ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 2000), até os dias de hoje, continua bastante estudado e utilizado. Em poucas palavras e genericamente, os autores o descreveram como uma estrutura de

interações entre o segmento acadêmico (universidades, centros universitários e faculdades), o industrial (indústrias) e o setor governamental (governo em seus vários níveis). Tal estrutura deve ser capaz de estimular o desenvolvimento social e econômico por intermédio de organizações, tais como: parques científico-tecnológicos e centros de transferência de tecnologia.

É fácil verificar na Teoria da Administração que áreas como Cibernética, Sistemas, Pesquisa Operacional, Teoria da Decisão e a Teoria Contingencial foram muito beneficiadas pelo avanço de tecnologias disruptivas (a exemplo da IA), e estes benefícios multiplicam-se ao se juntar a este concerto multidisciplinar o MTH, quando entram em cena parcerias entre governo, academia e indústria (BORGES, 2022).

O desenvolvimento de sistemas dotados de interfaces cada vez mais fáceis de usar (*user friendly*), no domínio das tecnologias da informação (TI), é um fator que muito influencia a interação de diversos campos do conhecimento e que atrai usuários sem muito conhecimento na área tecnológica. Essa perspectiva contribui bastante para disseminar a oferta e a procura por soluções resultantes desses esforços colaborativos, que se traduzem em benefícios para diversos setores da economia (BORGES, 2022). E é neste recorte de trabalhos interdisciplinares que se faz esta argumentação

Enquanto isso, proliferam os esforços de pesquisa interdisciplinar entre áreas das ciências sociais aplicadas e exatas na esteira desses avanços tecnológicos, reforçados pelos resultados práticos que são entregues todo o dia à sociedade e ao mundo científico. Como exemplo dessas entregas cita-se um protótipo de sistema especialista que estima a competitividade de empresas por meio da IA (BORGES *et al.*, 2020). Este caso combinou métodos e técnicas de IA, da área de gestão estratégica empresarial, em sentido amplo, e da RBV, em sentido estrito, que é um corpo coerente de conceitos, métodos e técnicas capazes de caracterizar a competitividade de uma empresa, com fundamento nos seus recursos e diferenciais competitivos (BARNEY *et al.*, 2011, BARNEY; HESTERLY, 2015; BORGES *et al.*, 2020).

Pesquisas e resultados práticos como o mencionado servem de referência para concitar interessados em trabalhos futuros que explorem relações de interdisciplinaridade nessas três áreas de estudo: *Data Centers*, MTH e RBV. Nos próximos itens são apresentados apontamentos sugestivos para esta agenda.

Pesquisas que Interligam *Data Centers*, Modelo da Tríplice Hélice (MTH) e *Resource-Based View* (RBV)

Para a agenda proposta é elucidativo expor os aspectos gerais que podem ser explorados nesse escopo de interdisciplinaridade. É possível definir uma conexão bem objetiva entre os três assuntos em apreço para, a seguir, delinear-se uma sugestão de pesquisa bibliográfica preliminar.

Enfoque da *Resource-Based View* (RBV)

A premissa central do método assinala que a vantagem competitiva de longo prazo de uma empresa depende dos recursos internos da organização (tangíveis e intangíveis), desde que sejam: Valiosos, Raros, Inimitáveis e Organizados — variáveis VRIO. Os autores asseveram que uma empresa só se sustenta (é competitiva), se mobilizar esses recursos de forma alinhada ao seu processo estratégico de negócio (BARNEY *et al.*, 2011, BARNEY; HESTERLY, 2015).

Relação de *Resource-Based View* (RBV) com *Data Centers* Sustentáveis

Enumeram-se a seguir os aspectos de conexão entre as duas áreas:

- 1) Recursos valiosos (V): eficiência energética, *design* inovador (submersos em ambientes frios);
- 2) Recursos raros (R): *know-how* em gestão de infraestrutura verde, parcerias com governos e universidades para tecnologias de resfriamento;
- 3) Recursos inimitáveis (I): rotinas operacionais próprias, algoritmos de otimização energética e localização estratégica próxima a fontes renováveis;
- 4) Organização (O): capacidade de estruturar a governança ambiental e o capital humano para operar *data centers* “eco-friendly”.

Ou seja, a sustentabilidade pode ser tratada como recurso estratégico, capaz de diferenciar empresas na competição global (redução de custo energético, reputação verde e atração de clientes conscientes).

Relação com o Modelo da Tríplice Hélice (MTH)

Os autores do MTH sustentam a cooperação Universidade-Indústria-Governo para gerar inovação (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 1995; ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 2000). Ao se combinar o MTH e a RBV, ressaltam-se os seguintes temas para pesquisa:

- 1) Universidade: gera conhecimento (pesquisa e desenvolvimento em técnicas de resfriamento e em inteligência artificial para otimizar energia);
- 2) Indústria: transforma esse conhecimento em recursos estratégicos VRIO, aplicáveis aos *data centers*;
- 3) Governo: cria marcos regulatórios e incentivos fiscais, que estimulam a adoção desses recursos.

A Tríplice Hélice fornece o arcabouço teórico-prático para que novos recursos sustentáveis identificados sejam apropriados pelas empresas como diferenciais competitivos, com base na RBV.

Agenda de Pesquisa Interdisciplinar entre as Áreas de *Data Centers*, Modelo da Tríplice Hélice (MTH) e *Resource-Based View* (RBV) - Síntese Sugestiva

Como pressuposto de pesquisa, a RBV pode explicar por que se adotar práticas sustentáveis em *data centers*, com a perspectiva de poder gerar vantagem competitiva duradoura. Os *data centers* sustentáveis, por sua vez, podem ser objeto de aplicação, em que essas práticas se materializam em recursos VRIO. Finalmente, a área ligada ao MTH pode fornecer o mecanismo de coordenação para desenvolver e difundir esses recursos no contexto dinâmico e sinérgico de inovação (“ecossistema de inovação”).

Como possibilidades hipotéticas para esses estudos combinados, que contribuiriam bastante para implementar aplicações interdisciplinares, citam-se:

- 1) Parcerias ou consórcios entre empresas como a Google, o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e um governo de país que se localize em regiões do Ártico, como a Finlândia, Islândia, Suécia ou Noruega, para instalar *data centers* submersos ou em regiões frias;
- 2) O conhecimento universitário de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) categorizado como tecnologia rara e/ou inimitável, nesse estudo;

- 3) Uma aplicação empresarial que criasse vantagem competitiva em termos de custo, incrementado pela “reputação verde”;
- 4) O apoio estatal para propiciar viabilidade regulatória e incentivos fiscais. Isso ilustra perfeitamente a RBV aplicada em combinação com o MTH ao problema dos impactos ecológicos dos *data centers*.

Para encerrar e ilustrar sinopticamente esta agenda de pesquisa futura, o Quadro 1 mostra arranjos e linhas possíveis de pesquisa, além de sugerir perguntas para cada linha, que trazem em si hipotéticos desafios.

O Quadro 1 coloca em evidência diferentes perspectivas de análise, desde a avaliação de práticas estratégicas de sustentabilidade até métricas de alcance ou de impacto social, político e ambiental. Nele são levantadas linhas de investigação que conectam economia, governança, inovação tecnológica e indicadores de desempenho. Por intermédio desse enfoque interdisciplinar é possível compreender não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também os desafios sociais e políticos envolvidos na expansão sustentável das infraestruturas de TI.

Quadro 1. Proposta de agenda de pesquisas futuras interdisciplinares em *Data Centers*, Modelo da Trílice Hélice (MTH) e *Resource-Based View* (RBV)

Perspectivas	Possível Linha de Pesquisa	Perguntas e Desafios
RBV (<i>Resource-Based View</i>)	Investigar se práticas de sustentabilidade em <i>data centers</i> atendem aos critérios VRIO.	Quais práticas são de fato raras e inimitáveis? Como mensurar valor estratégico da redução de carbono?
<i>Data Centers</i> Sustentáveis	Analisar a viabilidade econômica e ecológica de inovações (submersos, em regiões frias, resfriamento por imersão líquida).	Como balancear custo de instalação vs. economia energética? Qual é o ciclo de vida ecológico total?
Tríplice Hélice	Avaliar como a cooperação universidade-indústria-governo pode acelerar tecnologias verdes para <i>data centers</i> .	Que modelos de governança colaborativa funcionam melhor? Como distribuir ganhos entre os atores?
Integração RBV + Tríplice Hélice	Explorar como a criação conjunta de recursos sustentáveis transforma-se em vantagem competitiva duradoura.	Como avaliar se um recurso verde criado em ambiente colaborativo gera diferencial competitivo real?
Impacto Social e Político	Estudar os efeitos sobre políticas públicas, emprego e economia regional da instalação de <i>data centers</i> sustentáveis.	Os governos podem/devem subsidiar? Como mitigar possíveis desigualdades no acesso às novas infraestruturas?
Métricas de Sustentabilidade Estratégica	Desenvolver indicadores que combinem desempenho financeiro, ecológico e de inovação colaborativa.	Quais são os indicadores-chave de desempenho (KPIs) que mostram vantagem competitiva e impacto ambiental ao mesmo tempo?

Fonte: Elaboração própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo vertiginoso e crescente de desenvolvimento tecnológico da sociedade apresenta uma situação dicotômica crítica, expressa por esta pergunta: como expandir a capacidade computacional sem comprometer a sustentabilidade ambiental?

A rápida evolução dos *data centers* e da computação em nuvem é indispensável ao avanço tecnológico, mas exige uma abordagem inovadora e proativa para mitigar impactos no meio-ambiente.

A análise de inovações sustentáveis, como *data centers* subaquáticos e em regiões frias, aliada ao **roteiro da Computação em Nuvem Verde**, demonstra caminhos viáveis para conciliar desempenho e responsabilidade ambiental. O crescimento projetado do mercado de *data centers* sustentáveis (de cerca de US\$ 441 a 442 bilhões em 2034) e as metas de energias renováveis de grandes provedores (Amazon, Microsoft e Google) sinalizam uma transformação positiva em direção a um futuro mais verde.

No entanto, o aumento acelerado do consumo energético — que pode chegar a 580 TWh nos EUA até 2028, o que representa até 12% do consumo nacional — e os impactos associados, como os custos na área saúde, decorrentes do uso de energia fóssil, recomendam atenção e urgência para a matéria.

Assim, alcançar uma infraestrutura digital realmente sustentável e resiliente depende da aceleração na adoção de:

- Tecnologias inovadoras;
- Energias renováveis;
- Virtualização eficiente;
- Redução do lixo eletrônico; e
- Projetos físicos otimizados.

O imperativo é claro: o progresso tecnológico deve estar inextricavelmente ligado à preservação ecológica, para garantir um futuro digital viável e sustentável perante a realidade que se impõe para os *data centers*, e as possibilidades de explorar as inter-relações entre essa temática com MTH e RBV em estudos futuros são muito auspiciosas.

REFERÊNCIAS

- ACCENTURE. **Cloud migrations can reduce CO2 emissions by nearly 60 million tons a year, according to new research from Accenture**. [S.l.]: Accenture, 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/4wd9b5aw> Acesso em: 07/10/2025.
- AGRAWAL, A., *et al.* “An in-depth Examination of Green Energy Options to Improve Power Consumption Efficiency and Reduce Carbon Emissions in Contemporary Data Centre Infrastructures”. **In: International Conference on Trends in Quantum Computing and Emerging Business Technologies**. Pune (India): IEEE, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10545213> Acesso em: 22/09/2025.
- ALIJOYO, F. A. *et al.* “Cloud-based IoT solutions for smart grids: advancing smart technologies in energy management”. **Anais do 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)**. Bhopal (India): Maulana Azad National Institute of Technology (MANIT), 2024.
- ALKRUSH, A. A.; SALEM, M. S.; ABDELREHIM, O.; HEGAZI, A. “Data centers cooling: a critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions”. **International Journal of Refrigeration**, vol. 160, 2024.
- AMAZON WEB SERVICES. **Sustainable Cloud Computing**. [S.l.]: AWS, [s.d.]. Disponível em: <https://aws.amazon.com/sustainability/> Acesso em: 07/10/2025.
- AMAZON. **Amazon becomes the world’s largest corporate purchaser of renewable energy / Amazon meets 100% renewable energy goal**. [S.l.]: About Amazon, 2024. Disponível em: <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-renewable-energy-goal> Acesso em: 07/10/2025.
- AMAZON. **Carbon-free energy / AWS Cloud**. [S.l.]: About Amazon Sustainability, [s.d.]. Disponível em: <https://sustainability.aboutamazon.com/climate-solutions/carbon-free-energy> Acesso em: 07/10/2025.
- AWS. **Data Centers – Becoming water positive at AWS**. [S.l.]: AWS, [s.d.]. Disponível em: <https://aws.amazon.com/sustainability/data-centers/> Acesso em: 07/10/2025.
- BARNEY, J. B.; KETCHEN, D. J.; WRIGHT, M. “The future of Resource-Based Theory”. **Journal of Management**, vol. 37, n. 5, 2011.
- BORGES, P. C. R. “A Inteligência Artificial aplicada na tomada de decisão das organizações”. **Centro Universitário IESB (LinkedIn)** [27/06/2022]. Disponível em: <https://tinyurl.com/yeyrh36y>. Acesso em: 21/08/2025.
- BORGES, P. C. R. *et al.* “Protótipo de um sistema especialista para classificar o nível de competitividade de uma microempresa de serviços”. **Journal of Sustainable Competitive Intelligence**, vol. 10, n. 1, 2020.
- BRÉMAUD, Pierre. **Markov Chains: Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation and Queues**. Switzerland: Springer, 2020.
- CHANNI, H. K.; KUMAR, P. “Green Data Centers and Renewable Energy”. **In: AI Applications for Clean Energy and Sustainability**. Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6567-0.ch009> Acesso em: 22/09/2025.
- CHAUHAN, S. “The growing energy demand of data centers: Impacts of AI and cloud computing”. **International Journal for Multidisciplinary Research**, vol. 6, n. 4, 2024.

CHIDOLUE, N. O. *et al.* “Green data centers: sustainable practices for energy-efficient IT infrastructure”. **Engineering Science & Technology Journal**, vol. 5, n. 1, 2024.

CLAUDE, J.; BUGINGO, E.; KAMANGA, C. T. “Extend the ant colony optimization algorithm for virtualization technologies to improve the resources utilization in on-premises Datacenters”. **Journal of Information and Technology**, 2024.

DALKANI, H.; MOJARAD. M.; ARFAEINIA, H. “Modelling Electricity Consumption Forecasting Using the Markov Process and Hybrid Features Selection”. **International Journal of Intelligent Systems and Applications**, vol. 13, oct. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2021.05.02> Acesso em: 22/09/2025.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. “The dynamics of innovation: from National Systems and Mode 2 to a Triple Helix of university–industry–government relations”. **Research Policy**, vol. 29, n. 2, 2000.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. “The triple helix – university-industry-government relations: a laboratory for knowledge-based economic development”. **EASST Review**, vol. 14, n. 1, 1995.

GE, L. *et al.* “Feasibility investigation on a novel data center cooling system based on cross-seasonal soil cool storage in severe cold area”. **Journal of Energy Storage**, vol. 98, 2024.

GOOGLE. **24/7 by 2030: Realizing a carbon-free future**. [S.l.]: Sustainability Google, 2020a. Disponível em: <https://sustainability.google/reports/247-carbon-free-energy/> Acesso em: 07/10/2025.

GOOGLE. **Our third decade of climate action: Realizing a carbon-free future**. [S.l.]: Google Blog, 2020b. Disponível em: <https://tinyurl.com/mvjf7ehf> Acesso em: 07/10/2025.

HARSHA, S.; REDDY, B. R.; BATHINI, N. “An insight of cloud computing”. **JETIR – International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research**, vol. 6, 2019.

Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8140-0.ch006> Acesso em: 22/09/2025.

KANDEMIR, A. B. GÖK, B.; GÖKSEN, H. "Data Centers in Sustainability and Green Computing". In: **Achieving Economic Growth and Welfare Through Green Consumerism**.

LAI, D.; LUO, W.; YUAN, X. “Research on cloud computing elastic resource allocation method based on real time operation and maintenance”. **Anais 11th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City (ITIoTSC)**. Xangai (China): IEEE, 2023.

LI, Z. *et al.* “A comprehensive review of data center integrated with renewable energy”. **Anais da 12th IET Conference Proceedings**, vol. 2022, n. 27. Hong Kong (China): IET, 2023.

Microsoft, 2020b. Disponível em: <https://tinyurl.com/mpyhmd5k> Acesso em: 07/10/2025.

MICROSOFT. **2025 Environmental Sustainability Report**. [S.l.]: CDN Dynmedia, 2025. Disponível em: <https://tinyurl.com/mvvdesyd> Acesso em: 07/10/2025.

MICROSOFT. **Microsoft announces it will be carbon negative by 2030**. Redmond: Microsoft Newsroom, 2020a. Disponível em: <https://tinyurl.com/4dzzh95f> Acesso em: 07/10/2025.

MICROSOFT. **Microsoft will replenish more water than it consumes by 2030**. [S.l.]: Blogs

- MICROSOFT. **Sustainability at Microsoft**. [S.l.]: Microsoft, [s.d.]. Disponível em: <https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability> Acesso em: 07/10/2025.
- MONDAL, Sudipto *et al.*, “GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction”. **Sustainability Journal**, v. 15, n. 21, oct. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su152115249> Acesso em: 22/09/2025.
- NAGARATHINAM, A. *et al.* “Green Data Centers: A Review of Current Trends and Practices”. **In book: Technology-Driven Business Innovation, vol 223**. Byblos (Lebanon): Springer, Cham, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-51997-0_21 Acesso em: 22/09/2025.
- PATEL, H. R.; PATALIA, T. P. “A review on cloud computing elasticity”. **Journal of Propulsion Technology**, vol. 44, n. 2, 2023.
- PITCHAI, R. *et al.* “Green Technologies, Reducing Carbon Footprints, and Maximizing Energy Efficiency with Emerging Innovations: Green Computing”. **In book: Convergence Strategies for Green Computing and Sustainable Development**. Hershey, PA: Vishal Jain, IGI Global Scientific Publishing, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0338-2.ch005> Acesso em: 22/09/2025.
- QADI, M. J.; HARBI, I. M. “An overview of cloud computing systems”. **International Journal for Multidisciplinary Research**, vol. 6, n. 4, 2024.
- RAGHAV, Y. Y.; PANDEY, P. “Adoption of Green Cloud Computing for Environmental Sustainability: An Analysis”. **In book: Convergence Strategies for Green Computing and Sustainable Development**. Hershey, PA: Vishal Jain, IGI Global Scientific Publishing, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0338-2.ch008> Acesso em: 22/09/2025.
- RAO, P. A. S. “Green Cloud Computing: A framework for sustainable and efficient cloud infrastructure”. **International Journal of Scientific Research and Engineering Trends**, vol. 9, n. 6, 2023.
- REDDY, V. J. *et al.* “Pathway to sustainability: an overview of renewable energy integration in building systems”. **Sustainability**, vol. 16, n. 2, 2024.
- RUDIO, Franz Victor. **Introdução ao projeto de pesquisa científica**. Petrópolis : Editora Vozes. 1978.
- SEKARAN, Uma. **Research methods for business: a skill-building approach**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- SIDHAARTH, V. K. R. S. “A world with cloud computing”. **International Scientific Journal of Engineering and Management**, vol. 2, n. 4, 2023.
- SINGLA, N. “Green Cloud Infrastructure: Mitigating the environmental impact of cloud computing”. **Anais d 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE)**. Ghaziabad (India): IEEE, 2023.
- SWATHI, B. *et al.* **Sustainable e-waste reduction methods and models**. In: KUMAR, R. K. V.; KANNAN, H.; KHAN, P. A.; PRADHAN, B. K.; SPODARETS, D. (org.) **Sustainable Solutions for E-Waste and Development**. Hershey, PA (USA): IGI Global Scientific Publishing, 2024.

USPTO - U.S. Patent and Trademark Office. **Patent number: EUA-10136562-B2.**
Washington: USPTO, 2018. Disponível em:
<https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html> Acesso em 19/09/2025.

VIRMANI, Sarina. “Investigating the Environmental Sustainability of Data Centers”.
American journal of student research, vol. 3, n. 1, jan. 2025. Disponível em:
<https://www.doi.org/10.70251/HYJR2348.311018> Acesso em: 22/09/2025.