

SUSTENTABILIDADE DIGITAL E EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL: NOVOS PARADIGMAS PARA GESTÃO INTELIGENTE DE RECURSOS EM INFRAESTRUTURAS TECNOLÓGICAS

DIGITAL SUSTAINABILITY AND COMPUTATIONAL EFFICIENCY: NEW
PARADIGMS FOR INTELLIGENT RESOURCE MANAGEMENT IN
TECHNOLOGICAL INFRASTRUCTURES

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 14/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/783483609](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/783483609)

Rômulo Ferreira dos Santos¹

RESUMO

A crescente dependência de sistemas computacionais de alta performance, plataformas em nuvem, inteligência artificial, Internet das Coisas, serviços digitais, redes de dados e aplicações intensivas em processamento tem intensificado o debate sobre os impactos ambientais associados à infraestrutura digital contemporânea. Embora a digitalização seja frequentemente apresentada como instrumento de eficiência, inovação e desmaterialização econômica, sua expansão depende de data centers, dispositivos, redes, semicondutores, sistemas de refrigeração, energia elétrica, água, minerais críticos e cadeias globais de hardware, produzindo impactos energéticos e ambientais relevantes. Este estudo analisa estratégias voltadas à construção de modelos computacionais energeticamente eficientes, conciliando desempenho operacional, confiabilidade, escalabilidade e responsabilidade ambiental. A pesquisa adota abordagem qualitativa, exploratória e bibliográfica, articulando fundamentos de computação verde, sustentabilidade digital, engenharia de software sustentável, eficiência energética em data centers, gestão inteligente de recursos, carbon-aware computing, virtualização, edge computing, computação em nuvem, inteligência artificial eficiente e economia circular de equipamentos tecnológicos. Discute-se como políticas adaptativas de gerenciamento de cargas, escalonamento inteligente, consolidação de servidores, otimização algorítmica, observabilidade energética, métricas como PUE, WUE, CUE e Software Carbon Intensity, além da integração com energias renováveis, podem reduzir consumo energético e emissões sem comprometer a qualidade dos serviços. Propõe-se um modelo integrado de gestão sustentável de infraestruturas tecnológicas, orientado por eficiência, suficiência, circularidade, governança de dados e mensuração de carbono. Conclui-se que a sustentabilidade digital exige superar a visão

restrita de eficiência operacional, incorporando decisões arquiteturais, escolhas de software, ciclo de vida de hardware, localização de cargas, matriz elétrica, padrões de uso e responsabilidade socioambiental das organizações.

Palavras-chave: sustentabilidade digital; computação verde; eficiência energética; gestão de recursos; infraestrutura tecnológica; software verde; data centers; carbon-aware computing.

ABSTRACT

The growing dependence on high-performance computing systems, cloud platforms, artificial intelligence, the Internet of Things, digital services, data networks, and processing-intensive applications has intensified the debate on the environmental impacts associated with contemporary digital infrastructure. Although digitalization is often presented as an instrument of efficiency, innovation, and economic dematerialization, its expansion depends on data centers, devices, networks, semiconductors, cooling systems, electricity, water, critical minerals, and global hardware supply chains, producing significant energy and environmental impacts. This study analyzes strategies aimed at building energy-efficient computational models, combining operational performance, reliability, scalability, and environmental responsibility. The research adopts a qualitative, exploratory, and bibliographic approach, articulating the foundations of green computing, digital sustainability, sustainable software engineering, data center energy efficiency, intelligent resource management, carbon-aware computing, virtualization, edge computing, cloud computing, efficient artificial intelligence, and circular economy for technological equipment. It discusses how adaptive workload management policies, intelligent scheduling, server consolidation, algorithmic optimization, energy observability, metrics such as PUE,

WUE, CUE, and Software Carbon Intensity, as well as integration with renewable energy, can reduce energy consumption and emissions without compromising service quality. The article proposes an integrated model for sustainable management of technological infrastructures, oriented by efficiency, sufficiency, circularity, data governance, and carbon measurement. It concludes that digital sustainability requires moving beyond a narrow view of operational efficiency by incorporating architectural decisions, software choices, hardware life cycle, workload location, electricity mix, usage patterns, and organizations' socio-environmental responsibility.

Keywords: digital sustainability; green computing; energy efficiency; resource management; technological infrastructure; green software; data centers; carbon-aware computing.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura digital tornou-se base material indispensável da economia contemporânea. Serviços bancários, plataformas educacionais, sistemas de saúde, comércio eletrônico, inteligência artificial, redes sociais, logística, gestão pública, comunicação, entretenimento, agricultura de precisão, indústria 4.0 e cidades inteligentes dependem de processamento, armazenamento, conectividade e disponibilidade contínua de dados. Essa dependência amplia a centralidade dos data centers, redes de transmissão, dispositivos digitais, sistemas em nuvem e arquiteturas computacionais distribuídas (MURUGESAN, 2008; MASANET et al., 2020; IEA, 2026).

Durante anos, a digitalização foi associada à ideia de desmaterialização. A substituição de documentos físicos por arquivos digitais, reuniões presenciais por videoconferências, lojas

físicas por comércio eletrônico e processos manuais por sistemas automatizados parecia indicar redução direta de impactos ambientais. No entanto, a expansão da infraestrutura computacional demonstrou que o mundo digital não é imaterial. Ele depende de energia elétrica, água, servidores, semicondutores, metais raros, refrigeração, redes, baterias e descarte de equipamentos eletrônicos (HILTY; AEBISCHER, 2015; MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

A sustentabilidade digital surge, nesse contexto, como campo interdisciplinar voltado a reduzir impactos ambientais, sociais e econômicos da tecnologia da informação, sem comprometer inovação, acessibilidade, segurança e qualidade dos serviços. Esse campo envolve tanto a sustentabilidade “da” tecnologia quanto a sustentabilidade “pela” tecnologia. A primeira analisa os impactos diretos da infraestrutura digital; a segunda investiga como soluções digitais podem apoiar sustentabilidade em outros setores, como energia, mobilidade, agricultura e gestão urbana (HILTY; AEBISCHER, 2015; BERKHOUT; HERTIN, 2004).

A eficiência computacional tornou-se elemento central dessa agenda. Sistemas computacionais energeticamente ineficientes ampliam consumo elétrico, emissões de gases de efeito estufa, geração de calor, demanda por refrigeração e custos operacionais. Por outro lado, algoritmos otimizados, arquiteturas adequadas, escalonamento inteligente, virtualização eficiente, uso de energia renovável e gestão adaptativa de cargas podem reduzir impactos ambientais sem degradar a experiência do usuário (MURUGESAN, 2008; BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O crescimento da inteligência artificial intensificou a urgência do tema. Modelos de aprendizado profundo, sistemas generativos, treinamento de grandes modelos, inferência em escala e infraestrutura acelerada por GPUs aumentam a demanda por computação e energia. Patterson et al. (2021) demonstram que decisões sobre arquitetura de modelos, hardware, data center e matriz elétrica influenciam significativamente as emissões associadas ao treinamento de IA. Schwartz et al. (2020) defendem a necessidade de uma “IA verde”, orientada por eficiência, transparência e custo computacional.

Os data centers representam um dos focos principais da sustentabilidade digital. Essas instalações concentram servidores, sistemas de armazenamento, redes, refrigeração, energia de backup, segurança e automação. Métricas como Power Usage Effectiveness (PUE), Water Usage Effectiveness (WUE) e Carbon Usage Effectiveness (CUE) tornaram-se referências para avaliação de eficiência operacional, embora apresentem limites quando analisadas isoladamente (BELADY, 2008; THE GREEN GRID, 2011; UPTIME INSTITUTE, 2024).

A sustentabilidade digital, entretanto, não pode ser limitada à eficiência do data center. Um software mal projetado pode desperdiçar energia mesmo em infraestrutura eficiente. Uma aplicação pode acionar processamento desnecessário, transferir dados excessivos, manter recursos ociosos, gerar consultas ineficientes, armazenar dados sem ciclo de vida definido ou escalar sem necessidade real. Assim, a engenharia de software sustentável tornou-se dimensão indispensável da agenda ambiental da TI (PENZENSTADLER et al., 2014; CALERO; PIATTINI, 2015; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

Diante desse cenário, este artigo parte do seguinte problema de pesquisa: **quais estratégias de sustentabilidade digital e eficiência computacional podem orientar a gestão inteligente de recursos em infraestruturas tecnológicas contemporâneas, conciliando desempenho operacional, redução de consumo energético e responsabilidade ambiental?**

O objetivo geral é analisar novos paradigmas para gestão inteligente de recursos em infraestruturas tecnológicas, com foco em sustentabilidade digital e eficiência computacional. Como objetivos específicos, busca-se: discutir os impactos ambientais da infraestrutura digital; analisar métricas e indicadores de eficiência; examinar estratégias de otimização energética em data centers, nuvem, software e inteligência artificial; propor um modelo integrado de gestão sustentável de recursos computacionais; e refletir sobre governança, circularidade e limites da eficiência (MURUGESAN, 2008; MASANET et al., 2020; FREITAG et al., 2021).

Defende-se como tese central que a sustentabilidade digital não depende apenas de data centers mais eficientes, mas de uma transformação sistêmica que integre software, hardware, energia, arquitetura, governança, ciclo de vida, comportamento de uso e tomada de decisão orientada por carbono. A eficiência computacional deve ser compreendida não apenas como melhoria técnica, mas como princípio estratégico de responsabilidade socioambiental.

2. METODOLOGIA

Este estudo adota abordagem qualitativa, exploratória, bibliográfica e propositiva. A escolha por esse delineamento justifica-se pela

natureza interdisciplinar do tema, que envolve ciência da computação, engenharia de software, engenharia elétrica, gestão de data centers, sustentabilidade corporativa, economia circular, governança de tecnologia e políticas ambientais (CRESWELL, 2014; TORRACO, 2005).

A pesquisa foi estruturada como revisão narrativa integrativa, adequada para temas emergentes e transversais. A revisão narrativa integrativa permite articular contribuições de áreas diferentes, como computação verde, data centers, software sustentável, carbon accounting, inteligência artificial eficiente, gestão de energia e ciclo de vida de equipamentos (WHITTEMORE; KNAFL, 2005; TORRACO, 2005).

A pergunta norteadora foi: **quais dimensões técnicas, gerenciais e ambientais devem compor um modelo de gestão sustentável de recursos em infraestruturas tecnológicas digitais?**

Foram considerados como eixos de análise: sustentabilidade digital; computação verde; eficiência energética; data centers; PUE; WUE; CUE; Software Carbon Intensity; virtualização; consolidação de servidores; escalonamento de cargas; carbon-aware computing; edge computing; computação em nuvem; IA verde; ciclo de vida de hardware; descarte eletrônico; governança ESG; e métricas de desempenho ambiental (MURUGESAN, 2008; BELADY, 2008; ISO/IEC, 2024).

Entre os autores e documentos utilizados, destacam-se Murugesan (2008), Belady (2008), Koomey (2011), Barroso, Hölzle e Ranganathan (2018), Masanet et al. (2020), Shehabi et al. (2016), Beloglazov, Abawajy e Buyya (2012), Buyya et al. (2010), Berl et al. (2010),

Penzenstadler et al. (2014), Calero e Piattini (2015), Hilty e Aebischer (2015), Malmodin e Lundén (2018), Freitag et al. (2021), Schwartz et al. (2020), Patterson et al. (2021), Strubell, Ganesh e McCallum (2019), Henderson et al. (2020), além de documentos da International Energy Agency, Green Software Foundation, ISO/IEC, Uptime Institute, The Green Grid e European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency.

Foram incluídas publicações que abordassem eficiência energética em computação, impactos ambientais de data centers, sustentabilidade de software, métricas de carbono, gestão de recursos computacionais, inteligência artificial eficiente e economia circular de equipamentos. Foram excluídos textos estritamente publicitários, materiais sem autoria identificável, conteúdos sem relação direta com sustentabilidade digital e publicações que abordassem transformação digital sem discutir impactos energéticos ou ambientais.

A análise foi organizada em categorias temáticas: impactos ambientais da infraestrutura digital; métricas de eficiência; gestão energética em data centers; software sustentável; virtualização e cloud computing; IA eficiente; carbon-aware computing; circularidade de hardware; governança; e modelo integrado de gestão.

A partir da análise, propõe-se o **MIGSIT — Modelo Integrado de Gestão Sustentável de Infraestruturas Tecnológicas**, estruturado em sete dimensões: eficiência operacional, eficiência computacional, eficiência de software, gestão energética-carbono, circularidade de hardware, governança e suficiência digital. O modelo tem caráter conceitual e pode orientar organizações públicas, empresas,

instituições de ensino, data centers, equipes de desenvolvimento, gestores de TI e formuladores de políticas.

3. INFRAESTRUTURA DIGITAL E IMPACTOS AMBIENTAIS

A infraestrutura digital contemporânea é composta por data centers, servidores, equipamentos de rede, cabos submarinos, torres de telecomunicação, dispositivos de borda, computadores pessoais, smartphones, sensores IoT, sistemas de armazenamento, plataformas em nuvem e softwares que coordenam operações distribuídas. Cada componente possui impactos ambientais diretos e indiretos, desde a extração de minerais até o consumo de energia em operação e o descarte final (HILTY; AEBISCHER, 2015; MALMODIN; LUNDÉN, 2018).

O consumo de eletricidade é a dimensão mais visível. Data centers demandam energia para alimentar servidores, armazenamento, redes internas, sistemas de refrigeração, iluminação, UPS, transformadores e equipamentos auxiliares. A magnitude das emissões depende não apenas do consumo, mas também da intensidade de carbono da matriz elétrica local e do horário de uso (MASANET et al., 2020; IEA, 2026).

A refrigeração é um dos maiores desafios operacionais. Servidores convertem parte significativa da energia consumida em calor, exigindo sistemas de resfriamento capazes de manter temperatura e umidade adequadas. Estratégias como free cooling, contenção de corredores quentes e frios, refrigeração líquida, otimização por IA e operação em faixas térmicas mais eficientes podem reduzir consumo auxiliar (BELADY, 2008; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

Além da energia, o uso de água tornou-se preocupação crescente. Muitos data centers utilizam sistemas evaporativos de resfriamento, que podem reduzir energia, mas aumentar consumo hídrico. Em regiões sujeitas à escassez de água ou estresse hídrico, a métrica Water Usage Effectiveness torna-se fundamental para avaliar sustentabilidade operacional (THE GREEN GRID, 2011; UPTIME INSTITUTE, 2024).

Outro impacto relevante é o carbono incorporado ao hardware. Servidores, GPUs, baterias, racks, cabos, semicondutores e dispositivos finais possuem emissões associadas à fabricação, transporte e descarte. Em certos contextos, especialmente quando a eletricidade operacional é renovável, o carbono incorporado pode representar parcela significativa da pegada total do sistema (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

O lixo eletrônico também é parte do problema. Ciclos curtos de substituição, obsolescência programada, descarte inadequado, baixa reparabilidade e reciclagem insuficiente ampliam impactos ambientais e sociais. Equipamentos eletrônicos contêm metais valiosos, mas também substâncias perigosas, exigindo logística reversa e economia circular (FORTI et al., 2020; BALDÉ et al., 2017).

Os impactos digitais possuem ainda efeito rebote. Ganhos de eficiência podem reduzir custo por unidade computacional, estimulando maior uso total de processamento, armazenamento e transmissão. Assim, a eficiência técnica pode ser anulada pelo crescimento da demanda se não houver governança, metas absolutas e práticas de suficiência digital (JEVONS, 1865; HILTY; AEBISCHER, 2015).

Portanto, a sustentabilidade digital precisa analisar todo o ciclo de vida da infraestrutura tecnológica: projeto, aquisição, operação, software, energia, uso, manutenção, atualização, descarte e reciclagem. Uma organização não pode declarar sustentabilidade apenas por migrar para nuvem ou adotar energia renovável se ignora ineficiências de software, descarte de equipamentos e crescimento descontrolado da demanda computacional (FREITAG et al., 2021; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

4. COMPUTAÇÃO VERDE E SUSTENTABILIDADE DIGITAL

A computação verde, ou green computing, refere-se ao estudo e à prática de projetar, fabricar, utilizar e descartar computadores, servidores e sistemas associados de forma ambientalmente responsável. Murugesan (2008) organiza esse campo em dimensões como uso verde, descarte verde, design verde e fabricação verde, destacando que a sustentabilidade em TI deve percorrer todo o ciclo de vida dos recursos computacionais.

A sustentabilidade digital amplia essa abordagem ao incluir impactos de software, dados, modelos de negócio, comportamento de usuários, governança de plataformas e efeitos sistêmicos da digitalização. Enquanto a computação verde nasceu fortemente associada a hardware e energia, a sustentabilidade digital incorpora também questões como ética de dados, ciclo de vida de informação, dependência tecnológica, acessibilidade, circularidade e carbono de software (PENZENSTADLER et al., 2014; HILTY; AEBISCHER, 2015).

A engenharia de software sustentável defende que requisitos ambientais devem ser incorporados desde o projeto. Decisões sobre arquitetura, linguagem, banco de dados, protocolos, cache,

compressão, escalabilidade, testes, observabilidade e ciclo de vida de dados influenciam consumo energético e emissões. Portanto, eficiência energética não é apenas problema de infraestrutura, mas também de design de software (CALERO; PIATTINI, 2015; PENZENSTADLER et al., 2014).

A Green Software Foundation consolidou princípios relevantes para software verde, como eficiência de carbono, eficiência energética, consciência de carbono, eficiência de hardware, mensuração e otimização contínua. A especificação Software Carbon Intensity propõe calcular a intensidade de carbono de um sistema de software por unidade funcional, integrando energia consumida, intensidade de carbono da eletricidade e emissões incorporadas do hardware (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; ISO/IEC, 2024).

A sustentabilidade digital também exige distinguir eficiência relativa e redução absoluta. Uma aplicação pode tornar-se mais eficiente por transação, mas aumentar tanto o número de transações que suas emissões totais crescem. Por isso, métricas por unidade funcional devem ser acompanhadas por metas absolutas de consumo, emissões e uso de recursos (HILTY; AEBISCHER, 2015; FREITAG et al., 2021).

Outro princípio fundamental é a suficiência digital. Nem todo processamento é necessário. Nem todo dado precisa ser armazenado indefinidamente. Nem toda aplicação precisa operar em tempo real. Nem todo modelo de IA precisa ser maior. A suficiência propõe perguntar qual nível de serviço é adequado, evitando superdimensionamento, coleta excessiva de dados e computação desnecessária (BORGSMANN, 2017; HILTY; AEBISCHER, 2015).

Assim, computação verde e sustentabilidade digital não representam freio à inovação, mas mudança de paradigma. O objetivo é desenvolver tecnologias que entreguem valor social e econômico com menor intensidade energética, menor emissão, menor desperdício e maior responsabilidade ambiental (MURUGESAN, 2008; CALERO; PIATTINI, 2015).

5. MÉTRICAS DE EFICIÊNCIA: PUE, WUE, CUE E SCI

A gestão sustentável de infraestruturas tecnológicas exige métricas confiáveis. O que não é medido dificilmente é gerenciado de forma consistente. No campo dos data centers, a métrica mais conhecida é o Power Usage Effectiveness, ou PUE, proposta e difundida pela The Green Grid. O PUE é calculado como a razão entre a energia total consumida pelo data center e a energia consumida pelos equipamentos de TI (BELADY, 2008; THE GREEN GRID, 2011).

Um PUE mais próximo de 1 indica que menor parcela da energia é consumida por sistemas auxiliares, como refrigeração, iluminação e distribuição elétrica. Contudo, o PUE não mede a eficiência do software nem a produtividade computacional. Um data center pode ter excelente PUE e, ainda assim, executar aplicações ineficientes ou manter servidores subutilizados (BELADY, 2008; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

O Water Usage Effectiveness, ou WUE, mede o consumo de água associado à operação do data center. Essa métrica tornou-se relevante porque estratégias de resfriamento podem trocar consumo de energia por consumo hídrico. Em regiões tropicais, semiáridas ou com conflito pelo uso da água, o WUE deve ser

considerado junto ao PUE (THE GREEN GRID, 2011; UPTIME INSTITUTE, 2024).

O Carbon Usage Effectiveness, ou CUE, relaciona emissões de carbono ao consumo de energia da infraestrutura. Essa métrica é importante porque dois data centers com consumo semelhante podem ter emissões diferentes conforme a matriz elétrica local. Um sistema alimentado por energia de alta intensidade de carbono tem pegada maior do que outro abastecido por fontes renováveis ou operando em horários de menor carbono (THE GREEN GRID, 2011; IEA, 2026).

No campo do software, a Software Carbon Intensity representa avanço relevante. A SCI propõe medir emissões por unidade funcional do software, considerando energia, intensidade de carbono da eletricidade e emissões incorporadas do hardware. Essa métrica desloca o foco do data center para o serviço digital entregue, permitindo comparar arquiteturas, versões, rotas de implantação e melhorias de código (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; ISO/IEC, 2024).

A fórmula conceitual da SCI pode ser expressa como a relação entre emissões operacionais e incorporadas divididas por uma unidade funcional do sistema. A unidade funcional pode ser uma transação, uma consulta, um usuário ativo, uma chamada de API, uma inferência ou outro indicador de serviço. Essa escolha deve ser transparente, pois influencia a interpretação do resultado (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; ISO/IEC, 2024).

Além dessas métricas, organizações podem utilizar indicadores como utilização média de CPU, memória, armazenamento, taxa de

ociosidade, eficiência de algoritmos, energia por transação, carbono por requisição, taxa de compressão de dados, vida útil de equipamentos, percentual de reuso, percentual de energia renovável e emissões por workload (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; CALERO; PIATTINI, 2015).

A combinação de métricas é indispensável. PUE isolado pode esconder emissões de carbono. CUE isolado pode ignorar consumo de água. SCI isolado pode ocultar crescimento absoluto de uso. Indicadores de eficiência devem ser analisados em conjunto com indicadores absolutos de consumo, emissões e materialidade (FREITAG et al., 2021; HILTY; AEBISCHER, 2015).

Portanto, a mensuração sustentável precisa ser multidimensional. A infraestrutura tecnológica deve ser avaliada por desempenho, disponibilidade, energia, carbono, água, hardware, software e valor entregue ao usuário (THE GREEN GRID, 2011; ISO/IEC, 2024).

6. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM DATA CENTERS

A eficiência energética em data centers depende da integração entre arquitetura física, equipamentos de TI, refrigeração, distribuição elétrica, automação, operação e gestão de cargas. Data centers modernos alcançaram ganhos expressivos nas últimas décadas, mas a crescente demanda por IA e serviços digitais exige novas estratégias de otimização (MASANET et al., 2020; IEA, 2026).

A primeira estratégia é a consolidação de servidores. Servidores subutilizados consomem energia mesmo quando entregam pouca carga computacional. A virtualização permite agrupar cargas em menos máquinas físicas, aumentando utilização média e desligando ou colocando em repouso servidores ociosos. Essa estratégia foi

amplamente estudada em computação em nuvem verde (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; BUYYA et al., 2010).

A segunda estratégia é a gestão dinâmica de energia. Processadores modernos permitem ajustar frequência e tensão conforme demanda, técnica conhecida como Dynamic Voltage and Frequency Scaling. Embora reduza consumo, deve ser aplicada com cuidado para não comprometer desempenho crítico ou aumentar latência em serviços sensíveis (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012).

A terceira estratégia é a otimização da refrigeração. Contenção de corredores, free cooling, refrigeração líquida, uso de ar externo, aumento controlado da temperatura de operação e inteligência artificial aplicada ao controle térmico podem reduzir consumo auxiliar. Em cargas de IA com alta densidade térmica, a refrigeração líquida tende a ganhar relevância (BELADY, 2008; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

A quarta estratégia é a modernização de hardware. Processadores, GPUs, TPUs, memórias, SSDs e fontes de alimentação mais eficientes podem reduzir energia por operação. Contudo, a substituição frequente deve considerar carbono incorporado. Trocar equipamentos antes do fim de sua vida útil pode reduzir energia operacional, mas aumentar emissões de fabricação (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

A quinta estratégia é o planejamento de capacidade. Superdimensionamento é comum em infraestruturas críticas por medo de indisponibilidade. Entretanto, capacidade ociosa amplia consumo e custo. Modelos preditivos de demanda permitem

provisionamento mais preciso, evitando tanto falta quanto excesso de recursos (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012).

A sexta estratégia é a integração com energia renovável e armazenamento. Data centers podem contratar energia renovável, instalar geração local, operar com baterias e ajustar cargas conforme disponibilidade de energia limpa. Entretanto, créditos ou contratos renováveis não eliminam automaticamente emissões operacionais em tempo real, pois a intensidade de carbono da rede varia por região e horário (IEA, 2026; PATTERSON et al., 2021).

A sétima estratégia é a recuperação de calor. Em regiões frias ou em aplicações industriais, o calor residual de data centers pode ser reaproveitado para aquecimento urbano, estufas ou processos. Em regiões tropicais, essa estratégia é mais limitada, mas pode ser estudada em processos específicos (HILTY; AEBISCHER, 2015; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

A eficiência energética em data centers, portanto, depende de decisões integradas. Melhorar apenas a refrigeração é insuficiente se os workloads são ineficientes. Usar energia renovável é insuficiente se há desperdício computacional. A sustentabilidade exige integração entre infraestrutura, software, energia e gestão (MASANET et al., 2020; UPTIME INSTITUTE, 2024).

7. GESTÃO INTELIGENTE DE RECURSOS COMPUTACIONAIS

A gestão inteligente de recursos computacionais busca alocar processamento, memória, armazenamento, rede e energia de forma eficiente, adaptativa e orientada por objetivos de desempenho e sustentabilidade. Em ambientes de nuvem, essa gestão é

particularmente importante porque cargas variam ao longo do tempo, usuários estão distribuídos e aplicações possuem requisitos distintos de latência, disponibilidade e custo (BUY YA et al., 2010; BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUY YA, 2012).

O escalonamento de cargas, ou workload scheduling, é uma das principais estratégias. Cargas flexíveis podem ser deslocadas para horários de menor demanda, regiões com energia menos carbono-intensiva ou servidores mais eficientes. Esse princípio fundamenta a computação consciente de carbono, ou carbon-aware computing (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; PATTERSON et al., 2021).

Cargas não críticas, como treinamento de modelos, processamento em lote, backups, indexações, renderizações e análises de dados, podem ser programadas para horários com maior disponibilidade de energia renovável. Já cargas sensíveis, como transações bancárias, saúde, segurança e sistemas em tempo real, exigem baixa latência e alta disponibilidade, limitando flexibilidade (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUY YA, 2012; IEA, 2026).

A alocação inteligente também envolve autoscaling. Sistemas podem aumentar ou reduzir recursos conforme demanda, evitando provisionamento fixo excessivo. Contudo, autoscaling mal configurado pode gerar instabilidade, custo elevado ou consumo desnecessário. A sustentabilidade exige políticas de escalabilidade que considerem carbono, não apenas desempenho e custo (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

A observabilidade energética é outro elemento fundamental. Equipes de DevOps tradicionalmente monitoram latência,

disponibilidade, erros e custo. A sustentabilidade digital exige acrescentar métricas de energia e carbono aos painéis operacionais. Esse movimento aproxima engenharia de confiabilidade de software e engenharia de sustentabilidade (CALERO; PIATTINI, 2015; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O armazenamento de dados também deve ser gerenciado de forma inteligente. Dados duplicados, logs sem ciclo de vida, backups indefinidos, imagens não comprimidas, retenção excessiva e baixa governança aumentam consumo de armazenamento e energia. Políticas de data lifecycle management podem reduzir impactos sem prejudicar conformidade e segurança (HILTY; AEBISCHER, 2015; FREITAG et al., 2021).

A rede também consome energia. Transferências desnecessárias, APIs verbosas, ausência de cache, replicação excessiva e distribuição ineficiente de conteúdo aumentam tráfego. Estratégias como compressão, caching, edge computing e redução de payload podem melhorar desempenho e reduzir consumo (AL-FUQAHA et al., 2015; SATYANARAYANAN, 2017).

A gestão inteligente de recursos precisa equilibrar quatro objetivos: desempenho, custo, confiabilidade e sustentabilidade. Em muitos casos, há sinergias. Reduzir desperdício diminui custo e emissões. Em outros, há trade-offs. Manter redundância aumenta consumo, mas melhora disponibilidade. A decisão deve ser transparente e orientada por criticidade do serviço (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; AYYUB, 2014).

Portanto, a sustentabilidade digital requer algoritmos de gestão que não otimizem apenas eficiência computacional local, mas também

impactos ambientais sistêmicos. O melhor escalonamento não é necessariamente o mais rápido ou barato; é aquele que entrega valor com menor intensidade de recursos e risco aceitável (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

8. SOFTWARE VERDE E OTIMIZAÇÃO ALGORÍTMICA

O software é frequentemente invisível no debate ambiental, mas suas decisões arquiteturais influenciam diretamente consumo energético. Código ineficiente pode aumentar ciclos de CPU, acesso a memória, leitura em disco, tráfego de rede e tempo de execução. Em escala global, pequenas ineficiências multiplicadas por milhões de usuários tornam-se relevantes (PENZENSTADLER et al., 2014; CALERO; PIATTINI, 2015).

A escolha de algoritmos é uma das dimensões mais importantes. Algoritmos com menor complexidade computacional reduzem tempo de processamento e energia. Em aplicações de larga escala, substituir um procedimento $O(n^2)$ por abordagem $O(n \log n)$, quando possível, pode gerar economia expressiva. A eficiência algorítmica é, portanto, também eficiência ambiental (CORMEN et al., 2009; CALERO; PIATTINI, 2015).

A arquitetura de software também influencia sustentabilidade. Microserviços podem melhorar escalabilidade e manutenção, mas também aumentar overhead de rede, observabilidade, serialização e infraestrutura. Arquiteturas monolíticas podem ser mais simples e eficientes em determinados contextos. A decisão deve considerar requisitos reais, não modismos arquiteturais (NEWMAN, 2021; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

Bancos de dados são outra fonte de consumo. Consultas mal indexadas, modelos de dados inadequados, replicação excessiva, ausência de cache e transações desnecessárias aumentam energia e latência. Otimização de queries, arquivamento, compressão, particionamento e governança de dados podem reduzir impactos (CALERO; PIATTINI, 2015; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

Interfaces digitais também importam. Páginas pesadas, vídeos automáticos, imagens sem compressão, scripts excessivos, rastreadores e bibliotecas desnecessárias aumentam tráfego, consumo de dispositivos e uso de rede. A sustentabilidade digital deve incluir design leve, acessível e eficiente (TOMLINSON et al., 2010; HILTY; AEBISCHER, 2015).

O desenvolvimento orientado por testes também pode contribuir. Testes automatizados evitam retrabalho, falhas e execuções desnecessárias em produção, mas pipelines de integração contínua mal configurados podem consumir energia excessiva. É necessário otimizar frequência, paralelismo, ambientes temporários e retenção de artefatos (PENZENSTADLER et al., 2014; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

A observabilidade de carbono permite que equipes identifiquem rotas de maior impacto. Por exemplo, uma API pode ser responsável por alto consumo por causa de chamadas repetidas; um relatório pode executar consultas pesadas sem necessidade; um modelo de recomendação pode recalcular resultados com frequência excessiva. Sem medição, esses desperdícios permanecem ocultos (ISO/IEC, 2024; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O software verde não significa sacrificar qualidade. Pelo contrário, aplicações eficientes tendem a ser mais rápidas, baratas, escaláveis e robustas. A sustentabilidade reforça boas práticas de engenharia: simplicidade, eficiência, modularidade, observabilidade, ciclo de vida de dados e arquitetura adequada (CALERO; PIATTINI, 2015; PENZENSTADLER et al., 2014).

Assim, a eficiência computacional deve começar no código. Data centers eficientes não compensam software desperdiçador. A sustentabilidade digital exige que desenvolvedores, arquitetos e gestores incorporem carbono como requisito não funcional (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; ISO/IEC, 2024).

9. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EFICIENTE E COMPUTAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO

A inteligência artificial tornou-se um dos maiores vetores de expansão da demanda computacional. Treinamento de grandes modelos, inferência em escala, processamento de linguagem natural, visão computacional, recomendação, simulações científicas e modelos generativos exigem infraestrutura intensiva em GPUs, memória, armazenamento e redes de alta velocidade (STRUBELL; GANESH; MCCALLUM, 2019; PATTERSON et al., 2021).

Strubell, Ganesh e McCallum (2019) chamaram atenção para os custos energéticos e ambientais do treinamento de grandes modelos de processamento de linguagem natural. O artigo teve papel relevante ao popularizar a discussão sobre emissões de IA, embora estimativas variem conforme hardware, data center, energia e metodologia. A contribuição principal foi mostrar que

desempenho algorítmico deve ser analisado junto ao custo computacional.

Schwartz et al. (2020) propuseram a noção de Green AI, defendendo que a pesquisa em inteligência artificial deve reportar não apenas acurácia, mas também eficiência, custo computacional e acessibilidade. Essa perspectiva critica a tendência de buscar ganhos marginais de desempenho por meio de modelos cada vez maiores, sem considerar energia, carbono e concentração de recursos computacionais.

Patterson et al. (2021) demonstraram que escolhas de data center, processadores especializados, eficiência de modelos e energia limpa podem reduzir significativamente emissões associadas ao treinamento de IA. O estudo reforça que o impacto ambiental da IA não é inevitável; depende de decisões técnicas e organizacionais (PATTERSON et al., 2021).

A eficiência em IA pode ser buscada por várias estratégias. A primeira é otimização de arquitetura, com modelos menores e mais eficientes. A segunda é compressão, quantização, pruning e destilação de conhecimento. A terceira é reutilização de modelos pré-treinados, evitando treinamentos redundantes. A quarta é ajuste fino eficiente, como técnicas parameter-efficient fine-tuning. A quinta é otimização de inferência, cache de respostas, batching e uso de hardware apropriado (HAN; MAO; DALLY, 2016; SCHWARTZ et al., 2020).

A inferência em escala pode consumir mais energia cumulativa do que o treinamento, dependendo do volume de uso. Portanto, organizações que implementam IA generativa devem monitorar não

apenas o custo de treinar modelos, mas o custo diário de servir milhões de requisições. A sustentabilidade da IA depende do ciclo completo: treinamento, ajuste, inferência, armazenamento, atualização e descarte de hardware (PATTERSON et al., 2021; IEA, 2026).

A computação de alto desempenho também enfrenta desafios semelhantes. Simulações científicas, modelagem climática, bioinformática, engenharia, mineração de dados e renderização consomem grandes recursos. Escalonamento consciente de energia, paralelismo eficiente, escolha de hardware, redução de comunicação entre nós e otimização de código são estratégias relevantes (DONGARRA et al., 2011; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

A sustentabilidade em IA também possui dimensão social. Se apenas grandes empresas conseguem arcar com custos computacionais, a pesquisa torna-se concentrada. Green AI também é uma agenda de democratização científica, pois modelos eficientes são mais acessíveis a universidades, pequenas empresas, governos locais e organizações sociais (SCHWARTZ et al., 2020; STRUBELL; GANESH; MCCALLUM, 2019).

Portanto, a IA sustentável não significa abandonar inteligência artificial, mas utilizá-la com proporcionalidade, eficiência, transparência e responsabilidade. O melhor modelo não é necessariamente o maior; é aquele que entrega valor adequado com menor custo computacional, energético e social (SCHWARTZ et al., 2020; PATTERSON et al., 2021).

10. CLOUD, EDGE COMPUTING E CARBON-AWARE COMPUTING

A computação em nuvem transformou a forma de provisionar infraestrutura tecnológica. Em vez de adquirir servidores próprios, organizações podem utilizar recursos sob demanda, com elasticidade, automação e escala global. Essa arquitetura pode melhorar eficiência por meio de consolidação, virtualização e uso de data centers altamente otimizados, mas também pode estimular consumo excessivo se não houver governança (BUYAYA et al., 2010; MASANET et al., 2020).

A migração para nuvem não é automaticamente sustentável. O impacto depende da eficiência do provedor, localização dos data centers, matriz elétrica, arquitetura da aplicação, políticas de escalabilidade, uso de serviços gerenciados, retenção de dados e governança de custos. Uma aplicação ineficiente em nuvem pode consumir mais recursos do que em infraestrutura local bem gerenciada (HILTY; AEBISCHER, 2015; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O edge computing desloca parte do processamento para perto do usuário ou da fonte de dados. Isso pode reduzir latência, tráfego de rede e dependência de data centers centrais, sendo útil para IoT, cidades inteligentes, saúde, indústria e veículos conectados. No entanto, dispositivos de borda podem ser menos eficientes individualmente e mais difíceis de gerenciar, exigindo análise de ciclo de vida (SATYANARAYANAN, 2017; SHI et al., 2016).

A decisão entre nuvem centralizada, borda e processamento local deve considerar latência, energia, carbono, privacidade, resiliência e volume de dados. Processar tudo na nuvem pode gerar tráfego desnecessário; processar tudo na borda pode multiplicar hardware

subutilizado. A arquitetura sustentável é contextual (SHI et al., 2016; HILTY; AEBISCHER, 2015).

O carbon-aware computing representa uma das tendências mais promissoras. Seu princípio é deslocar cargas computacionais no tempo ou no espaço conforme a intensidade de carbono da eletricidade. Se uma região ou horário possui maior participação de energia renovável, cargas flexíveis podem ser executadas ali ou naquele momento (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; PATTERSON et al., 2021).

Essa abordagem exige previsões de intensidade de carbono, flexibilidade de cargas, integração com orquestradores, políticas de SLA e transparência. Nem todos os workloads podem ser deslocados, mas muitos podem: processamento em lote, treinamento de IA, backups, relatórios, indexações e análises assíncronas (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O carbon-aware computing também deve considerar riscos de deslocamento de impacto. Migrar cargas para uma região de menor carbono pode aumentar uso de água, gerar latência ou pressionar redes locais. Por isso, decisões devem ser multicritério, combinando carbono, água, disponibilidade, custo e impacto regional (THE GREEN GRID, 2011; IEA, 2026).

Assim, nuvem, borda e consciência de carbono devem ser integradas em uma estratégia arquitetural. A sustentabilidade digital não é escolher uma tecnologia única, mas alocar cada carga no local, horário e infraestrutura mais adequados ao seu perfil

(GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018).

11. ECONOMIA CIRCULAR DE HARDWARE E CICLO DE VIDA

A sustentabilidade digital exige olhar para além da operação energética. A fabricação de equipamentos de TI envolve extração de minerais, uso de água, energia, produtos químicos, transporte internacional e cadeias produtivas complexas. Servidores, notebooks, smartphones, roteadores, baterias e GPUs possuem carbono incorporado que deve ser considerado nas decisões de compra, substituição e descarte (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

A economia circular aplicada à tecnologia busca prolongar vida útil, reparar, recondicionar, reutilizar, remanufaturar e reciclar equipamentos, reduzindo extração de recursos e geração de resíduos. Essa abordagem contrasta com modelos lineares de compra, uso curto e descarte (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

A extensão da vida útil de equipamentos pode reduzir carbono incorporado anualizado. Contudo, há trade-off: equipamentos antigos podem consumir mais energia. A decisão sustentável exige comparar emissões operacionais evitadas por um novo equipamento com emissões incorporadas da fabricação. Nem sempre a substituição mais rápida é ambientalmente melhor (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

Políticas de aquisição sustentável devem considerar eficiência energética, durabilidade, reparabilidade, modularidade, certificações, origem dos materiais, logística reversa, garantias,

disponibilidade de peças e responsabilidade do fornecedor. A compra pública e corporativa pode induzir cadeias mais sustentáveis (BALDÉ et al., 2017; FORTI et al., 2020).

A gestão de ativos de TI deve registrar idade, consumo, desempenho, manutenção, falhas, possibilidade de reuso, destino final e emissões incorporadas. Sem inventário, organizações substituem equipamentos por critérios financeiros ou de conveniência, ignorando impactos ambientais (MURUGESAN, 2008; CALERO; PIATTINI, 2015).

A reciclagem de resíduos eletrônicos é necessária, mas deve ser última etapa. Antes dela, deve-se priorizar redução, reuso e reparo. Reciclar recupera parte dos materiais, mas não elimina integralmente impactos da fabricação e do descarte. A economia circular digital deve começar no design e na aquisição (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

No caso de data centers, estratégias circulares incluem reuso de servidores, revenda de equipamentos, atualização modular, reaproveitamento de componentes, contratos com fornecedores responsáveis, logística reversa e rastreabilidade de descarte. Para dispositivos finais, políticas de manutenção, atualização de software e redução de obsolescência são fundamentais (FREITAG et al., 2021; MURUGESAN, 2008).

Assim, a sustentabilidade digital deve incluir a pergunta: quanto tempo o hardware pode permanecer útil sem comprometer eficiência, segurança e desempenho? A resposta exige análise técnica e ambiental, não apenas financeira (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FORTI et al., 2020).

12. MODELO MIGSIT: GESTÃO SUSTENTÁVEL DE INFRAESTRUTURAS TECNOLÓGICAS

Este artigo propõe o **MIGSIT — Modelo Integrado de Gestão Sustentável de Infraestruturas Tecnológicas**. O modelo busca orientar organizações na construção de uma estratégia de sustentabilidade digital que integre eficiência computacional, gestão energética, software verde, circularidade de hardware, governança e suficiência digital.

O MIGSIT possui sete dimensões.

A primeira dimensão é a **eficiência operacional da infraestrutura**, que inclui PUE, WUE, CUE, refrigeração, distribuição elétrica, automação, manutenção, capacidade instalada, redundância e utilização de equipamentos. Essa dimensão é voltada principalmente a data centers e ambientes físicos de TI (BELADY, 2008; THE GREEN GRID, 2011).

A segunda dimensão é a **eficiência computacional**, que mede utilização de CPU, GPU, memória, armazenamento, rede, taxa de ociosidade, consolidação, virtualização, escalonamento e desempenho por watt. Seu objetivo é maximizar trabalho útil por unidade de energia (BARROSO; HÖLZLE; RANGANATHAN, 2018; BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012).

A terceira dimensão é a **eficiência de software**, que avalia arquitetura, algoritmos, consultas, cache, compressão, ciclos de vida de dados, observabilidade, testes, APIs e Software Carbon Intensity. Essa dimensão reconhece que software determina demanda sobre infraestrutura (CALERO; PIATTINI, 2015; ISO/IEC, 2024).

A quarta dimensão é a **gestão energética e de carbono**, que inclui intensidade de carbono da eletricidade, energia renovável, deslocamento temporal e geográfico de cargas, contratos energéticos, armazenamento, emissões absolutas e metas de redução (IEA, 2026; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

A quinta dimensão é a **circularidade de hardware**, envolvendo aquisição sustentável, reparabilidade, vida útil, reuso, reciclagem, inventário de ativos, logística reversa e carbono incorporado (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

A sexta dimensão é a **governança digital sustentável**, que inclui políticas internas, indicadores, auditoria, responsabilidades, orçamento, capacitação, transparência, relatórios ESG, segurança da informação e gestão de fornecedores (DEEGAN, 2002; GRI, 2021).

A sétima dimensão é a **suficiência digital**, que questiona necessidade de processamento, armazenamento, coleta de dados, frequência de atualização, tamanho de modelos, resolução de mídia e níveis de serviço. Essa dimensão evita que ganhos de eficiência sejam anulados por crescimento desnecessário da demanda (HILTY; AEBISCHER, 2015; FREITAG et al., 2021).

O MIGSIT opera em seis etapas: inventariar, medir, diagnosticar, otimizar, governar e revisar. Inventariar significa mapear ativos, workloads, software, dados, hardware e energia. Medir significa coletar indicadores de energia, carbono, água e utilização. Diagnosticar significa identificar desperdícios e riscos. Otimizar significa implementar melhorias. Governar significa institucionalizar políticas. Revisar significa avaliar continuamente resultados e corrigir efeitos rebote.

O modelo também propõe três níveis de maturidade. No nível básico, a organização mede consumo energético e inventaria equipamentos. No nível intermediário, monitora workloads, calcula emissões, aplica virtualização, otimiza software e cria políticas de descarte. No nível avançado, adota SCl, carbon-aware computing, gêmeos digitais de infraestrutura, automação por IA, metas absolutas de carbono e governança de suficiência.

O MIGSIT não substitui normas técnicas nem relatórios corporativos, mas oferece estrutura gerencial para integrar sustentabilidade ao ciclo de vida da infraestrutura tecnológica. Sua principal contribuição é tratar sustentabilidade digital como responsabilidade transversal, e não como tarefa isolada da equipe de infraestrutura (MURUGESAN, 2008; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

13. RESULTADOS DA ANÁLISE

A análise da literatura permite identificar oito resultados principais.

O primeiro resultado é que a infraestrutura digital possui impacto ambiental material, envolvendo energia, água, carbono incorporado, mineração, resíduos eletrônicos e efeitos indiretos. Portanto, a digitalização não deve ser tratada automaticamente como solução sustentável (HILTY; AEBISCHER, 2015; FREITAG et al., 2021).

O segundo resultado é que data centers continuam sendo foco crítico de eficiência, mas as melhorias tradicionais em PUE não são suficientes para enfrentar a expansão da demanda computacional. O desafio atual exige otimização conjunta de infraestrutura, software, hardware, energia e cargas de trabalho (BELADY, 2008; MASANET et al., 2020).

O terceiro resultado é que métricas multidimensionais são indispensáveis. PUE, WUE, CUE e SCI medem aspectos diferentes e devem ser usados de forma complementar. Nenhuma métrica isolada representa a sustentabilidade total de um sistema digital (THE GREEN GRID, 2011; ISO/IEC, 2024).

O quarto resultado é que software verde é componente estratégico da sustentabilidade digital. Decisões de código, arquitetura, banco de dados, APIs, armazenamento e ciclo de vida de dados podem reduzir ou ampliar consumo energético (PENZENSTADLER et al., 2014; CALERO; PIATTINI, 2015).

O quinto resultado é que a gestão inteligente de recursos, incluindo autoscaling, consolidação, virtualização e escalonamento de workloads, pode reduzir desperdícios sem comprometer qualidade de serviço quando bem implementada (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; BUYYA et al., 2010).

O sexto resultado é que a inteligência artificial exige atenção específica. Modelos maiores nem sempre representam melhor escolha ambiental ou econômica. Green AI defende reportar custo computacional, eficiência e emissões junto ao desempenho técnico (SCHWARTZ et al., 2020; PATTERSON et al., 2021).

O sétimo resultado é que economia circular de hardware deve integrar a estratégia de TI. A substituição de equipamentos precisa considerar energia operacional, carbono incorporado, reparabilidade, vida útil e descarte responsável (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FORTI et al., 2020).

O oitavo resultado é que sustentabilidade digital depende de governança. Sem indicadores, responsabilidades, metas, orçamento,

políticas de aquisição, relatórios e cultura organizacional, iniciativas técnicas tendem a ser pontuais e insuficientes (DEEGAN, 2002; GRI, 2021).

14. DISCUSSÃO

A discussão central deste estudo é que a sustentabilidade digital exige superar a visão limitada de que eficiência energética é apenas problema de data center. Embora a infraestrutura física seja fundamental, o consumo energético e as emissões de sistemas digitais são determinados por uma cadeia de decisões que começa no desenho do produto, passa pelo código, pela arquitetura, pelo hardware, pela nuvem, pela energia, pelo comportamento de uso e termina no descarte dos equipamentos (MURUGESAN, 2008; HILTY; AEBISCHER, 2015).

O primeiro ponto de discussão refere-se à materialidade do digital. A sociedade contemporânea tende a perceber serviços digitais como leves, instantâneos e imateriais. Entretanto, cada busca, vídeo, transação, inferência de IA, backup, mensagem e chamada de API aciona infraestrutura física. A nuvem não elimina materialidade; apenas desloca servidores para instalações especializadas e distribuídas (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; MASANET et al., 2020).

O segundo ponto envolve a tensão entre eficiência e crescimento. A história da computação mostra ganhos extraordinários de eficiência energética por operação, mas a demanda total por computação também cresceu. Esse fenômeno revela o risco de efeito rebote. Se a redução de custo por processamento estimula uso ilimitado, a eficiência relativa pode coexistir com aumento absoluto de consumo (JEVONS, 1865; HILTY; AEBISCHER, 2015).

O terceiro ponto é que sustentabilidade digital deve incluir suficiência. Nem toda coleta de dados é necessária; nem toda imagem precisa de resolução máxima; nem todo relatório precisa ser atualizado em tempo real; nem todo modelo de IA precisa ser gigantesco; nem todo log precisa ser armazenado indefinidamente. A pergunta central deixa de ser apenas “como fazer de forma mais eficiente?” e passa a ser também “isso precisa ser feito nessa escala?” (FREITAG et al., 2021; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

O quarto ponto refere-se à importância do software. Durante muito tempo, a eficiência foi associada a servidores, refrigeração e energia. Porém, software define a demanda imposta à infraestrutura. Aplicações ineficientes, APIs mal desenhadas, bancos de dados sem otimização e arquiteturas superdimensionadas geram desperdício invisível. A sustentabilidade deve tornar-se requisito não funcional ao lado de segurança, desempenho e disponibilidade (PENZENSTADLER et al., 2014; CALERO; PIATTINI, 2015).

O quinto ponto é a necessidade de métricas adequadas. O PUE foi essencial para melhorar eficiência de data centers, mas não mede produtividade computacional, carbono do software ou impacto absoluto. A SCI representa avanço porque desloca a mensuração para o serviço digital entregue. Contudo, deve ser combinada com emissões totais, água, hardware e métricas sociais para evitar interpretações parciais (BELADY, 2008; ISO/IEC, 2024).

O sexto ponto envolve a inteligência artificial. A corrida por modelos maiores pode produzir ganhos de desempenho, mas também concentra poder computacional e aumenta impacto ambiental. Green AI propõe que eficiência, custo e transparência sejam critérios

explícitos de qualidade. Essa mudança é essencial para democratizar a IA e reduzir sua pegada ambiental (SCHWARTZ et al., 2020; STRUBELL; GANESH; MCCALLUM, 2019).

O sétimo ponto é a relação entre energia renovável e eficiência. Contratar energia limpa é importante, mas não autoriza desperdício. Uma infraestrutura alimentada por fontes renováveis ainda utiliza materiais, água, território, redes e equipamentos. Além disso, energia renovável disponível para data centers pode competir com outros usos sociais. Eficiência e suficiência continuam necessárias mesmo em matrizes limpas (IEA, 2026; FREITAG et al., 2021).

O oitavo ponto é a governança. Muitas organizações tratam sustentabilidade digital como responsabilidade exclusiva da área de ESG ou infraestrutura. Esse modelo é insuficiente. Desenvolvedores, arquitetos, compradores, gestores de produto, cientistas de dados, equipes de segurança, finanças e usuários participam das decisões que determinam impacto ambiental. A governança precisa ser transversal (DEEGAN, 2002; GRI, 2021).

O nono ponto é a circularidade. O avanço tecnológico estimula substituição rápida de equipamentos, mas a fabricação de hardware possui impactos significativos. A decisão de trocar servidores, notebooks ou GPUs deve considerar vida útil, reparabilidade, eficiência operacional e carbono incorporado. A economia circular é parte da eficiência computacional ampliada (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

O décimo ponto é que sustentabilidade digital deve ser orientada por valor social. Reduzir emissões é fundamental, mas a tecnologia também deve servir a inclusão, acessibilidade, educação, saúde,

transparência pública e desenvolvimento sustentável. A infraestrutura digital sustentável não é apenas aquela que consome menos energia, mas aquela que entrega valor legítimo com menor impacto e maior responsabilidade (HILTY; AEBISCHER, 2015; FREITAG et al., 2021).

Assim, a sustentabilidade digital exige uma nova racionalidade computacional. O desempenho não pode ser avaliado apenas por velocidade, escala e disponibilidade. Deve incluir energia, carbono, água, materiais, circularidade, necessidade real e benefício social. A eficiência computacional do futuro será técnica, ambiental e ética (MURUGESAN, 2008; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

15. DIRETRIZES PARA INFRAESTRUTURAS TECNOLÓGICAS SUSTENTÁVEIS

A partir da análise realizada, propõem-se diretrizes para organizações que desejam implementar sustentabilidade digital e eficiência computacional.

Primeiro, realizar inventário de infraestrutura tecnológica, incluindo servidores, nuvem, redes, dispositivos, workloads, sistemas críticos, armazenamento, consumo energético e ciclo de vida de equipamentos (MURUGESAN, 2008; FORTI et al., 2020).

Segundo, medir energia, carbono e água com indicadores complementares, como PUE, WUE, CUE, SCI, emissões absolutas, energia por transação e carbono por unidade funcional (THE GREEN GRID, 2011; ISO/IEC, 2024).

Terceiro, incorporar sustentabilidade como requisito não funcional em projetos de software, ao lado de segurança, desempenho,

acessibilidade e confiabilidade (PENZENSTADLER et al., 2014; CALERO; PIATTINI, 2015).

Quarto, otimizar algoritmos, consultas, APIs, cache, compressão, armazenamento e transferência de dados, reduzindo processamento e tráfego desnecessários (CORMEN et al., 2009; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

Quinto, aplicar virtualização, consolidação de servidores, autoscaling e escalonamento inteligente de workloads, evitando recursos ociosos e superdimensionamento (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; BUYYA et al., 2010).

Sexto, adotar carbon-aware computing para cargas flexíveis, deslocando processamento para horários e regiões com menor intensidade de carbono quando tecnicamente possível (GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024; PATTERSON et al., 2021).

Sétimo, avaliar a matriz elétrica e a contratação de energia renovável, mas sem abandonar medidas de eficiência e suficiência (IEA, 2026; FREITAG et al., 2021).

Oitavo, implementar políticas de ciclo de vida de dados, eliminando armazenamento desnecessário, duplicidades, logs sem finalidade e backups indefinidos (HILTY; AEBISCHER, 2015; CALERO; PIATTINI, 2015).

Nono, adotar compras sustentáveis de hardware, considerando eficiência, durabilidade, reparabilidade, modularidade, garantia, logística reversa e carbono incorporado (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

Décimo, prolongar vida útil de equipamentos quando ambientalmente vantajoso, equilibrando consumo operacional e emissões incorporadas (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

Décimo primeiro, aplicar princípios de Green AI, reportando custo computacional, energia, carbono e eficiência junto às métricas de desempenho dos modelos (SCHWARTZ et al., 2020; PATTERSON et al., 2021).

Décimo segundo, capacitar equipes de desenvolvimento, infraestrutura, dados, compras e governança para incorporar sustentabilidade digital nas decisões cotidianas (MURUGESAN, 2008; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

Décimo terceiro, estabelecer metas absolutas de redução de energia, carbono, água e resíduos, evitando depender apenas de indicadores relativos de eficiência (FREITAG et al., 2021; HILTY; AEBISCHER, 2015).

Décimo quarto, integrar sustentabilidade digital aos relatórios corporativos, auditorias, gestão de riscos e indicadores ESG (DEEGAN, 2002; GRI, 2021).

Décimo quinto, adotar princípio de suficiência digital: processar, armazenar, transmitir e treinar apenas o necessário para entregar valor real ao usuário e à sociedade (HILTY; AEBISCHER, 2015; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

16. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sustentabilidade digital e a eficiência computacional constituem agendas estratégicas para organizações, governos e sociedades cada vez mais dependentes de infraestrutura tecnológica. O crescimento da nuvem, da inteligência artificial, dos data centers, dos dispositivos conectados e dos serviços digitais amplia a necessidade de conciliar desempenho operacional, segurança, confiabilidade e responsabilidade ambiental (MASANET et al., 2020; IEA, 2026).

O estudo demonstrou que a infraestrutura digital possui materialidade ambiental relevante. Energia elétrica, água, carbono incorporado, minerais críticos, resíduos eletrônicos e efeitos rebote compõem a pegada real da tecnologia. Portanto, a digitalização não deve ser presumida como ambientalmente neutra ou automaticamente sustentável (MALMODIN; LUNDÉN, 2018; FREITAG et al., 2021).

A eficiência energética em data centers continua indispensável, mas não é suficiente. Métricas como PUE, WUE e CUE devem ser combinadas com indicadores de software, carbono, hardware e valor entregue. A Software Carbon Intensity amplia a capacidade de mensurar emissões por unidade funcional do software, tornando desenvolvedores e arquitetos parte ativa da agenda ambiental (BELADY, 2008; ISO/IEC, 2024).

A gestão inteligente de recursos computacionais pode reduzir desperdícios por meio de virtualização, consolidação, autoscaling, escalonamento de cargas, otimização de dados e carbon-aware computing. Essas estratégias permitem reduzir consumo energético sem comprometer a qualidade dos serviços, desde que sejam planejadas com critérios de desempenho, segurança e criticidade

(BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012; GREEN SOFTWARE FOUNDATION, 2024).

A inteligência artificial representa simultaneamente desafio e oportunidade. Seus custos computacionais podem crescer rapidamente, mas técnicas de Green AI, compressão de modelos, otimização de inferência, escolha eficiente de hardware e uso de energia limpa podem reduzir impactos. O futuro da IA precisa incorporar eficiência como critério de qualidade científica e operacional (SCHWARTZ et al., 2020; PATTERSON et al., 2021).

A economia circular de hardware é outra dimensão indispensável. Equipamentos digitais não devem ser tratados como descartáveis. Prolongar vida útil, reparar, reutilizar, reciclar e adquirir equipamentos com critérios ambientais reduz impactos de fabricação e descarte. A sustentabilidade digital começa antes da operação e continua depois do fim da vida útil do equipamento (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FORTI et al., 2020).

O modelo MIGSIT proposto neste artigo organiza a sustentabilidade digital em sete dimensões: eficiência operacional da infraestrutura, eficiência computacional, eficiência de software, gestão energética e de carbono, circularidade de hardware, governança digital sustentável e suficiência digital. Essa estrutura permite tratar sustentabilidade como processo sistêmico, e não como ação pontual.

Conclui-se que os novos paradigmas de gestão inteligente de recursos em infraestruturas tecnológicas devem superar a lógica de expansão ilimitada da computação. O objetivo não é apenas fazer mais processamento com menos energia, mas fazer o

processamento necessário, no momento adequado, com a arquitetura correta, na infraestrutura menos intensiva em carbono, com hardware durável e software eficiente. A sustentabilidade digital exige eficiência, mas também exige suficiência, governança e responsabilidade socioambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-FUQAHA, Ala; GUIZANI, Mohsen; MOHAMMADI, Mehdi; ALEDHARI, Mohammed; AYYASH, Moussa. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.

AYYUB, Bilal M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. **Risk Analysis**, v. 34, n. 2, p. 340-355, 2014.

BALDÉ, Cornelis P.; FORTI, Vanessa; GRAY, Vanessa; KUEHR, Ruediger; STEGMANN, Paul. **The Global E-waste Monitor 2017**. Bonn/Geneva/Vienna: United Nations University, ITU and ISWA, 2017.

BARROSO, Luiz André; HÖLZLE, Urs; RANGANATHAN, Parthasarathy. **The datacenter as a computer: designing warehouse-scale machines**. 3. ed. Cham: Springer, 2018.

BELADY, Christian L. Green grid data center power efficiency metrics: PUE and DCiE. **The Green Grid**, 2008.

BELADY, Christian L. In the data center, power and cooling costs more than the IT equipment it supports. **Electronics Cooling**, v. 23, n. 1, p. 24-27, 2007.

BELOGLAZOV, Anton; ABAWAJY, Jemal; BUYYA, Rajkumar. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing. **Future Generation Computer Systems**, v. 28, n. 5, p. 755-768, 2012.

BERKHOUT, Frans; HERTIN, Julia. De-materialising and re-materialising: digital technologies and the environment. **Futures**, v. 36, n. 8, p. 903-920, 2004.

BERL, Andreas; GLAUSER, Markus; REICH, Christoph; et al. Energy-efficient cloud computing. **The Computer Journal**, v. 53, n. 7, p. 1045-1051, 2010.

BORGMANN, Albert. **Technology and the character of contemporary life: a philosophical inquiry**. Chicago: University of Chicago Press, 2017.

BUYYA, Rajkumar; BELLOGLAZOV, Anton; ABAWAJY, Jemal. Energy-efficient management of data center resources for cloud computing: a vision, architectural elements, and open challenges. In: **Proceedings of the 2010 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications**. Las Vegas: CSREA Press, 2010.

BUYYA, Rajkumar; YEO, Chee Shin; VENUGOPAL, Srikumar; BROBERG, James; BRANDIC, Ivona. Cloud computing and emerging IT platforms: vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. **Future Generation Computer Systems**, v. 25, n. 6, p. 599-616, 2009.

CALERO, Coral; PIATTINI, Mario. **Green in software engineering**. Cham: Springer, 2015.

CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. **Introduction to algorithms**. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 2009.

CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE, 2014.

DEEGAN, Craig. Introduction: the legitimising effect of social and environmental disclosures. **Accounting, Auditing & Accountability Journal**, v. 15, n. 3, p. 282-311, 2002.

DONGARRA, Jack et al. The international exascale software project roadmap. **International Journal of High Performance Computing Applications**, v. 25, n. 1, p. 3-60, 2011.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis P.; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU, ITU, ISWA, 2020.

FREITAG, Charlotte; BERNERS-LEE, Mike; WIDDICKS, Kelly; KNOWLES, Bran; BLAIR, Gordon S.; FRIDAY, Adrian. The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends, and regulations. **Patterns**, v. 2, n. 9, 100340, 2021.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **GRI Standards**. Amsterdam: GRI, 2021.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

GREEN SOFTWARE FOUNDATION. **Software Carbon Intensity Specification**. San Francisco: Green Software Foundation, 2024.

HAN, Song; MAO, Huizi; DALLY, William J. Deep compression: compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and Huffman coding. **International Conference on Learning Representations**, 2016.

HENDERSON, Peter; HUI, Jie; ROMOFF, Joshua; BRUNSKILL, Emma; JURAFSKY, Dan; PINEAU, Joelle. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. **Journal of Machine Learning Research**, v. 21, n. 248, p. 1-43, 2020.

HILTY, Lorenz M.; AEBISCHER, Bernard. **ICT innovations for sustainability**. Cham: Springer, 2015.

IEA. **Data centres and data transmission networks**. Paris: International Energy Agency, 2023.

IEA. **Energy and AI**. Paris: International Energy Agency, 2026.

ISO/IEC. **ISO/IEC 21031:2024: Information technology — Software Carbon Intensity specification**. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

JEVONS, William Stanley. **The coal question**. London: Macmillan, 1865.

KOOMEY, Jonathan. Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Oakland: Analytics Press, 2011.

MALMODIN, Jens; LUNDÉN, Dag. The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. **Sustainability**, v. 10, n. 9, p. 3027, 2018.

MASANET, Eric; SHEHABI, Arman; LEI, Nuo; SMITH, Sarah; KOOMEY, Jonathan. Recalibrating global data center energy-use estimates. **Science**, v. 367, n. 6481, p. 984-986, 2020.

MURUGESAN, San. Harnessing green IT: principles and practices. **IT Professional**, v. 10, n. 1, p. 24-33, 2008.

NEWMAN, Sam. **Building microservices**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2021.

PATTERSON, David; GONZALEZ, Joseph; LE, Quoc; et al. Carbon emissions and large neural network training. **arXiv preprint arXiv:2104.10350**, 2021.

PENZENSTADLER, Birgit; BAUER, Veronika; CALERO, Coral; FRANCH, Xavier. Sustainability in software engineering: a systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 56, n. 9, p. 1132-1154, 2014.

SATYANARAYANAN, Mahadev. The emergence of edge computing. **Computer**, v. 50, n. 1, p. 30-39, 2017.

SCHWARTZ, Roy; DODGE, Jesse; SMITH, Noah A.; ETZIONI, Oren. Green AI. **Communications of the ACM**, v. 63, n. 12, p. 54-63, 2020.

SHEHABI, Arman; SMITH, Sarah; SARTOR, Dale; et al. **United States Data Center Energy Usage Report**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016.

SHI, Weisong; CAO, Jie; ZHANG, Quan; LI, Youhuizi; XU, Lanyu. Edge computing: vision and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 5, p. 637-646, 2016.

STRUBELL, Emma; GANESH, Ananya; MCCALLUM, Andrew. Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In: **Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics**. Florence: ACL, 2019. p. 3645-3650.

THE GREEN GRID. **Carbon Usage Effectiveness (CUE): a green grid data center sustainability metric**. Beaverton: The Green Grid, 2010.

THE GREEN GRID. **Water Usage Effectiveness (WUE): a green grid data center sustainability metric**. Beaverton: The Green Grid, 2011.

TOMLINSON, Bill; SILBERMAN, M. Six; PATTERSON, Donald; PAN, Yue; BLEVIS, Eli. Collapse informatics: augmenting the sustainability and ICT4D discourse in HCI. In: **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. New York: ACM, 2010. p. 655-664.

TORRACO, Richard J. Writing integrative literature reviews. **Human Resource Development Review**, v. 4, n. 3, p. 356-367, 2005.

UPTIME INSTITUTE. **Global Data Center Survey 2024**. New York: Uptime Institute, 2024.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

¹ Doutor em Gestão de Projetos de Tecnologia da Informação e
Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília
(UnB) E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)