



Análise das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas aos sites institucionais da Universidade de Brasília

Analysis of Carbon Dioxide (CO₂) Emissions Associated with the Institutional Websites of the University of Brasília

Amanda Gonçalves Rodrigues¹⁵

Bruno Xavier Moraes¹⁵

Tennyson Santos Silva Soares¹⁵

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi
da Conceição¹⁵

Prof. Dr. Uidemar Moraes
Barral¹⁵

O avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) impulsiona um consumo crescente de energia e emissões de dióxido de carbono (CO₂), ainda subquantificados em instituições de ensino e pesquisa. Este estudo estimou o consumo energético e as emissões de CO₂ do tráfego de dados dos websites da Universidade de Brasília (UnB), utilizando o modelo Sustainable Web Design (SWD) adaptado com dados nacionais. O consumo médio foi de $2,38 \times 10^{-4}$ quilowatt-hora (kWh) por acesso, resultando em uma emissão média de $6,45 \times 10^{-3}$ gramas de dióxido de carbono (gCO₂). A análise identificou que 11,0% das páginas avaliadas excederam o consumo médio, principalmente devido ao uso intensivo de imagens em alta resolução (.jpg, .png, .jpeg), que representaram 82,7% dos dados transferidos. Para 2022, a emissão total estimada foi de 118.563,4 gCO₂, valor comparado ao estoque acumulado de carbono de um peixeiro ao longo de sua vida. Apesar da infraestrutura digital da UnB ser relativamente eficiente, impulsionada pela otimização do tráfego e pela matriz elétrica renovável brasileira, as TICs globalmente representam um desafio ambiental crescente. A contínua digitalização e o aumento do tráfego de dados projetam um consumo energético que pode anular ganhos de eficiência e dificultar a mensuração de emissões dispersas. Conclui-se que o crescimento da comunidade universitária e a expansão da digitalização exigem monitoramento constante e estudos periódicos para fundamentar decisões sustentáveis e promover a gestão ambiental responsável da infraestrutura digital.

Palavras-chave: tecnologias da informação e comunicação; emissões de CO₂; websites institucionais; eficiência energética; consumo energético.

The advancement of Information and Communication Technologies (ICTs) drives increasing energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions, which are still poorly quantified in educational and research institutions. This study estimated the energy consumption and CO₂ emissions from data traffic on the University of Brasília's (UnB) websites, using the Sustainable Web Design (SWD) model adapted with national data. The average consumption was estimated at 2.38×10^{-4} kilowatt-hours (kWh) per access, resulting in an average emission of 6.45×10^{-3} grams of carbon dioxide (gCO₂).

¹⁵ Curso de Graduação de Ciências Ambientais, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF. Email: amanda.rodriguesciamb@gmail.com; bragamoraes28@gmail.com; tennyson.ciamb@gmail.com; pedrozuchi@unb.br e uidemar.barral@unb.br.



The analysis identified that 11.0% of the evaluated pages exceeded the average consumption, mainly due to the intensive use of high-resolution images (.jpg, .png, and .jpeg), which represented 82.7% of the transferred data. For 2022, the total estimated emission was 118,563.4 gCO₂, a value compared with the lifetime accumulated carbon stock of a single pequi tree. Despite UnB's digital infrastructure being relatively efficient, driven by traffic optimization and Brazil's renewable electricity matrix, ICTs globally represent a growing environmental challenge. Continuous digitalization and increasing data traffic project an increase in energy consumption that may offset efficiency gains and hinder the quantification of dispersed emissions. It is concluded that the growth of the university community and the expansion of digitalization require constant monitoring and periodic studies to support sustainable decision-making and promote the environmentally responsible management of digital infrastructure.

Keywords: information and communication technologies; CO₂ emissions; university websites; energy efficiency; energy consumption.

JEL Classification: Q53; Q56; Q40

1 Introdução

As Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) englobam dispositivos digitais usados para coletar, processar, armazenar e transmitir informações. A Internet, baseada em protocolos padronizados, permite a transferência de dados entre computadores globalmente conectados. Websites, identificados por URLs e hospedados em data centers, são a principal interface entre usuários e sistemas, organizando conteúdos digitais e viabilizando seu acesso via redes de comunicação.

O avanço das TICs transformou práticas sociais, educacionais e produtivas, impulsionando crescimento econômico e produtividade, e, em alguns casos, reduzindo a intensidade energética (Shahiduzzaman; Layton; Alam, 2015). Porém, a infraestrutura necessária, data centers, redes e dispositivos, demanda consumo contínuo e crescente de energia. O funcionamento da infraestrutura digital implica um elevado consumo energético em escala global. Estima-se que esse consumo alcance cerca de 416,2 terawatt-horas por ano (TWh/ano), o equivalente a aproximadamente 0,23% do consumo mundial de eletricidade (Al-Mhdawi; Al-Raweshidy, 2018). Além disso, as TICs são responsáveis por cerca de 2% das emissões globais de CO₂ (Belkhir; Elmeligi, 2018). Esses valores variam conforme a eficiência dos equipamentos e o design dos serviços. Apesar da importância, os impactos ambientais dos serviços digitais são pouco mensurados, especialmente em países em desenvolvimento e no meio acadêmico (Salvia et al., 2018). A digitalização acelerada, impulsionada pela Internet das Coisas (IoT), que poderá conectar até 50 bilhões de dispositivos (Ai; Peng; Zhang, 2018; Evans, 2011), tem ampliado o tráfego global de dados, que aumentou oito vezes desde 2010 (Giambene, 2021).

Estudos recentes têm demonstrado que websites universitários contribuem para emissões de carbono associadas às TICs, evidenciando que parâmetros como o tamanho das páginas, o volume de dados transferidos e o design influenciam a pegada de carbono desses serviços digitais (Sánchez-Cuadrado; Morato, 2024).

Em instituições como a Universidade de Brasília (UnB), a digitalização acadêmica e administrativa depende de uma infraestrutura robusta de websites institucionais. O uso intenso por milhares de usuários aumenta o tráfego de dados e as emissões de CO₂ associadas ao consumo energético. Em 2022, a Universidade de Brasília possuía 50.361 alunos regulares de graduação e pós-graduação *stricto sensu*, evidenciando a magnitude de sua comunidade acadêmica e o potencial volume de utilização de seus websites institucionais (Universidade de Brasília, 2023).

O tráfego de dados em websites demanda energia tanto da infraestrutura física, como servidores e data centers, quanto das características técnicas das próprias páginas. Elementos visuais complexos, como imagens em alta resolução, scripts pesados e animações, exigem maior capacidade de processamento dos servidores e dispositivos de acesso, resultando em um consumo energético significativamente mais elevado (Jagroep et al., 2015). Websites mal otimizados podem consumir várias vezes mais energia do que páginas simples e bem estruturadas.

Os data centers são ambientes críticos, responsáveis por manter os serviços digitais operando de forma contínua, e por isso concentram grande parte do consumo energético do sistema digital (Pinto; De Campos; De Azevedo, 2021; EPE, 2024). As redes de comunicação

também demandam energia elétrica para transmitir dados, o que contribui para o consumo total.

A infraestrutura web da Universidade de Brasília é regulamentada pela Instrução STI nº 0004/2023, que estabelece diretrizes para padronização, segurança e conformidade das páginas institucionais, que devem operar sob o domínio “unb.br”. A Superintendência de Tecnologia da Informação (STI) é responsável pelo serviço de hospedagem e pela segurança da informação, enquanto as unidades acadêmicas e administrativas são responsáveis pela atualização dos conteúdos em alinhamento com os objetivos institucionais e requisitos legais. O Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação (PDTIC 2023–2028) orienta os investimentos em TIC na Universidade de Brasília, com foco em gestão eficiente e alinhamento com a missão institucional.

A mensuração das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao consumo de energia elétrica decorrente do tráfego de dados em websites apresenta desafios metodológicos, em razão da diversidade de variáveis envolvidas. As estimativas podem se restringir à transmissão de dados em âmbito nacional, ou adotar uma abordagem mais abrangente, que inclui data centers, infraestrutura internacional, equipamentos locais, dispositivos dos usuários e até a energia incorporada à fabricação desses dispositivos.

As emissões de CO₂ associadas à operação de websites não decorrem apenas da atividade digital em si, mas da energia consumida por servidores, redes de dados e dispositivos dos usuários. Mesmo acessos simples mobilizam data centers e infraestrutura de telecomunicação, cujas emissões de CO₂ dependem da origem da eletricidade. Segundo Freitag et al. (2021), o setor de TIC pode responder por até 3,9% das emissões globais, com tendência de alta diante da crescente digitalização. A natureza distribuída da infraestrutura digital dificulta a medição precisa das emissões, que se espalham entre servidores, redes, armazenamento e dispositivos. Como destaca Gupta et al. (2021), os inventários tradicionais de carbono não capturam adequadamente esses impactos indiretos.

O impacto também varia conforme a localização do acesso. Países com matrizes limpas, como o Brasil, apresentam emissões por acesso bem menores do que regiões dependentes de combustíveis fósseis, como a Polônia (Istrate et al., 2024). Outro fator relevante é a complexidade dos sites: páginas mais pesadas e dinâmicas exigem mais processamento e, portanto, mais energia (Kennedy, 2023). Compreender as emissões digitais requer uma abordagem multidimensional, considerando infraestrutura, design, matriz energética e localização. A sustentabilidade digital passa pela eficiência técnica e pela conscientização sobre os impactos do uso online.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo estimar a emissão média de CO₂ associada ao consumo de energia elétrica proveniente do tráfego de dados nos websites vinculados ao domínio da UnB, com o intuito de fomentar discussões sobre os impactos digitais sob a perspectiva das emissões decorrentes da transferência de dados na Internet. Os objetivos específicos incluíram: calcular o consumo médio de energia elétrica associado ao tráfego de dados dos websites da UnB; analisar a variabilidade desse consumo por data e faixa horária; projetar um cenário anual de emissões de CO₂ associadas ao tráfego; e identificar padrões de consumo que se desviem significativamente da média.

Adotou-se como referência a metodologia proposta pelo modelo *Sustainable Web Design* (SWD), utilizada pela ferramenta *Website Carbon Calculator*, que estima o consumo

de eletricidade com base no volume de dados transferidos e nos valores de intensidade energética dos setores de data centers, redes e dispositivos dos usuários. A metodologia também considera a intensidade de emissão de CO₂ da matriz energética local para calcular as emissões associadas ao consumo de energia elétrica decorrente do tráfego de dados (Aslan et al., 2018).

A pesquisa justifica-se pela ausência de dados consolidados sobre o consumo energético da infraestrutura digital da universidade, o que limita o planejamento de ações voltadas à sustentabilidade e à eficiência energética. A otimização de páginas, a racionalização da infraestrutura e a revisão de padrões de design e hospedagem são passos iniciais em um processo mais amplo de aprimoramento institucional. Em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), é fundamental ampliar a visibilidade de fontes de impacto ambiental ainda negligenciadas, como o uso cotidiano de plataformas digitais em ambientes acadêmicos (Bieser; Hilty, 2018). Mesmo ações corriqueiras, como o carregamento de uma página web, podem gerar emissões significativas quando consideradas em larga escala (Coroama et al., 2015). Espera-se que os resultados deste estudo possam servir de referência para outras instituições que busquem compreender e monitorar seus impactos digitais.

2 Materiais e métodos

A estimativa do consumo energético e das emissões de CO₂ associadas ao tráfego de dados dos websites da Universidade de Brasília (UnB) baseou-se em uma adaptação do modelo *Sustainable Web Design* (SWD), adequado ao contexto brasileiro. A abordagem *bottom-up* adotada, alinhada aos avanços na eficiência energética da infraestrutura digital (Schien et al., 2015; Hinton et al., 2015), priorizou emissões operacionais de CO₂, considerando os segmentos de data centers, redes de telecomunicações e dispositivos dos usuários.

As intensidades energéticas (kWh/GB) de cada segmento foram calculadas a partir de dados nacionais, substituindo médias globais por informações da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE). O consumo de data centers foi estimado com base na CNAE de hospedagem de dados; o das redes, a partir da CNAE de telecomunicações; e o dos dispositivos finais foi inferido proporcionalmente ao modelo original do SWD. O volume de dados trafegados no Brasil foi obtido pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), somando os acessos de banda larga fixa e móvel.

Com a intensidade energética nacional consolidada, estimou-se o consumo médio por visualização de página (*page view*), correspondente à soma das intensidades dos três segmentos. As emissões incorporadas não foram consideradas devido à ausência de dados específicos para o setor digital brasileiro.

Para a definição da amostra, desenvolveu-se um processo automatizado que percorre os links do rodapé do site principal da UnB (<https://www.unb.br>), acessando recursivamente páginas internas sob o domínio unb.br. As URLs extraídas foram armazenadas em banco de dados e estratificadas por unidade organizacional com base em sua identificação textual. A amostra foi então composta por seleção aleatória estratificada, garantindo representatividade institucional.

O volume de dados transferidos por página foi medido por um script em Node.js com a biblioteca *Puppeteer*, que simula o carregamento dos sites e intercepta as requisições de rede. Os acessos foram realizados com intervalo de 5 segundos e até 3 tentativas por URL, extraindo os campos *Content-Length* e *Content-Type* dos cabeçalhos HTTP. Os recursos foram categorizados por tipo (imagem, vídeo, texto, script e CSS), e os dados foram organizados por tipo e extensão predominantes.

A execução foi automatizada para ocorrer em cinco horários distintos por dia (09h00, 11h30, 15h00, 17h30 e 21h00) durante cinco dias úteis consecutivos (4 a 10 de junho de 2025), abrangendo diferentes padrões de uso. A janela temporal foi adotada como recorte operacional da utilização dos websites institucionais durante dias úteis. Os horários foram definidos para representar diferentes períodos de utilização dos serviços digitais ao longo do expediente.

Cada URL foi acessada 25 vezes, e os dados de transferência foram convertidos de bytes para gigabytes (GB). O consumo energético (kWh) foi calculado multiplicando-se o volume transferido pelas intensidades energéticas segmentadas. A primeira etapa analítica organizou os dados por data e faixa horária, permitindo identificar padrões temporais. Foram calculados dois CVs adicionais: (i) entre dias, para cada faixa horária, e (ii) entre faixas horárias, para cada dia.

Na segunda análise, aplicou-se o Intervalo Interquartil (IQR) para detectar valores atípicos entre as médias de consumo das URLs, identificando websites com comportamento significativamente divergente. Para esses valores atípicos, foi realizada uma análise detalhada da distribuição de bytes transferidos por tipo e extensão. O objetivo foi identificar os fatores que contribuem para esses desvios.

A emissão média de CO₂ por visualização de página foi calculada a partir do consumo energético médio (kWh), multiplicado pelo fator de emissão da matriz elétrica brasileira para o ano de 2022, obtido do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE/MCTI, 2024).

A emissão total foi estimada considerando o número de acessos por usuário da comunidade acadêmica em 2022. Por fim, o valor foi comparado ao estoque acumulado de carbono de um pequizeiro, árvore da espécie *Caryocar brasiliense*, nativa do Cerrado, que pode estocar em média 8.710.000 gCO₂ ao longo de sua vida, o que equivale a 8,71 Mg de CO₂ (Teixeira et al., 2022).

3 Resultados e discussões

Em 2022, a intensidade energética da internet no país foi estimada em 0,1091 kWh/GB, calculada com base no consumo total de 9.101.140.000 kWh e no volume de 83,40 Exabytes de dados trafegados no mesmo ano. Esses dados estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa de consumo energético para os segmentos de data centers, redes e dispositivos para o Brasil

Segmento	Consumo --GWh--	Consumo --kWh--	Intensidade --kWh/GB--
Data centers	1.421,87	1.421.870.000	0,0170
Redes	3.928,16	3.928.160.000	0,0471
Dispositivos	3.751,79	3.751.790.000	0,0450
Total	9.101,14	9.101.140.000	0,1091

Fonte: Elaboração própria, com base em EPE (2024), Anatel e adaptação do modelo Sustainable Web Design.

Com a aplicação da metodologia, foram mapeadas 1.015 URLs de sites vinculados à Universidade de Brasília. A estratificação por setor, com seleção aleatória, reduziu a amostra para 327 URLs, distribuídas em 11 categorias institucionais: Biblioteca Central, Centros, Decanatos, Educação a Distância, Faculdades, Fazenda Água Limpa, Hospital Veterinário, Institutos, Restaurante Universitário, Secretarias e UnBTV. Para cada URL, o tráfego de dados foi medido conforme as datas e faixas horárias definidas.

Os valores médios de consumo energético (em kWh) por acesso, por data e por horário, bem como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação (CV) indicaram uma baixa dispersão dos dados, com coeficiente de variação médio de 3,87% entre os dias analisados e 3,53% entre os horários ao longo do dia. Esses resultados sugerem que o consumo energético associado ao uso dos websites institucionais da Universidade de Brasília é relativamente constante, sem picos ou oscilações significativas, reforçando a confiabilidade dos dados coletados e a representatividade da amostra analisada.

Tabela 2 - Indicadores estatísticos do consumo energético estimado de sites da Universidade de Brasília

Categoria	Média --kWh--	Mediana --kWh--	Desvio Padrão --kWh--	Coef. de Variação --%--
Por data	-	-	-	3,87
Por hora	-	-	-	3,53
Estimativa Geral	0,000238	0,0000970	0,000413	174

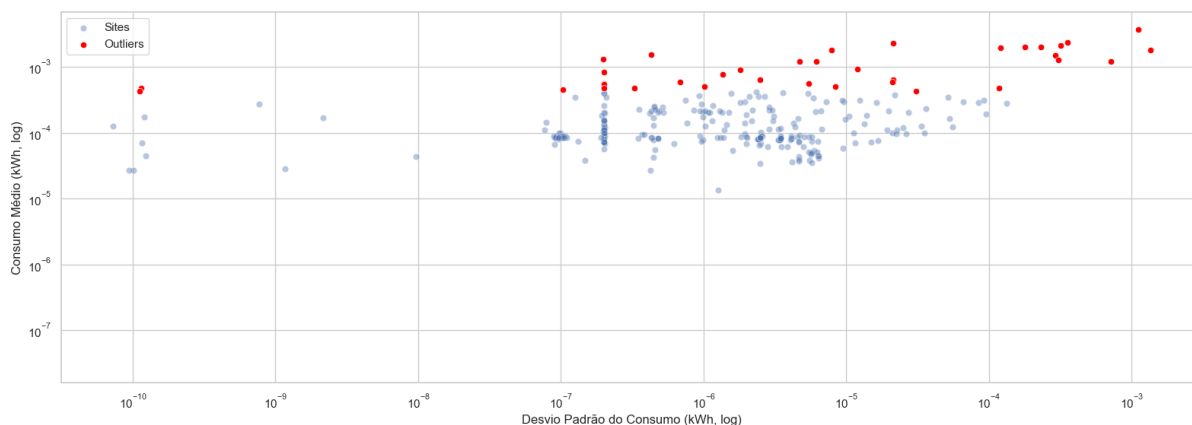
Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados coletados nos websites institucionais da UnB.

O consumo médio de energia elétrica foi de $2,38 \times 10^{-4}$ kWh por visualização de página, valor superior à mediana de $9,70 \times 10^{-5}$ kWh, o que indica uma distribuição assimétrica influenciada por páginas com alto consumo. O desvio padrão de $4,13 \times 10^{-4}$ kWh revela uma variabilidade significativa entre os sites, atribuída à complexidade visual, ao uso de imagens em alta resolução, scripts pesados e à ausência de otimização em determinadas

páginas. Essa heterogeneidade reflete a autonomia das unidades acadêmicas e administrativas na gestão de seus conteúdos digitais, ainda que sob as diretrizes da STI. O coeficiente de variação elevado ($>100\%$) evidencia uma disparidade expressiva entre os consumos médios das páginas, sinalizando que alguns sites da universidade apresentam ineficiência energética acentuada.

Com a aplicação do IQR, foi possível avaliar a variabilidade das médias de consumo energético individual por URL em relação à média global dos sites da UnB, com o objetivo de identificar observações que justificassem o elevado coeficiente de variação, superior a 100%. O resultado é apresentado na Figura 1, que ilustra a dispersão dos outliers, ou seja, as URLs cujas médias de consumo energético se desviam significativamente da média geral. Dentre as 327 páginas analisadas, 36 (11,0%) apresentaram consumo acima da média, sendo identificadas como outliers superiores segundo o critério de Tukey (consumo médio de energia acima de $Q3 + 1,5 \times IQR$) não simplesmente por apresentarem consumo acima da média aritmética.

Figura 1 - Dispersão de outliers no consumo médio de energia por site



Fonte: Elaboração própria, a partir da análise IQR das URLs avaliadas.

O gráfico da Figura 1 demonstra que, entre os 36 sites classificados como outliers, as imagens respondem por 82,7% do tráfego de dados (323.274.490 bytes), predominantemente nos formatos .jpg (50,8%), .png (46,9%) e .jpeg. Os conteúdos em texto representam 15,8% do tráfego, enquanto os scripts correspondem a apenas 1,4%. Não foi possível determinar a antiguidade das imagens a partir dos dados coletados. Essa distribuição evidencia que as imagens em alta resolução constituem o principal fator responsável pelo elevado consumo de dados e, consequentemente, pelo aumento do impacto energético e das emissões de CO₂ nesse grupo específico. A otimização dessas imagens, portanto, configura-se como uma medida eficaz para reduzir a pegada de carbono.

Considerando a população universitária da UnB em 50.361 pessoas e assumindo ao menos um acesso diário por indivíduo a websites institucionais ao longo de 2022, o total projetado de acessos foi de aproximadamente 18,38 milhões. Com base na emissão média de $6,45 \times 10^{-3}$ gCO₂ por acesso, estimou-se uma emissão total anual de 118.563,4 gCO₂. Esse valor foi comparado ao estoque acumulado de carbono da espécie arbórea Caryocar

brasiliense, nativa do Cerrado, ao longo de sua vida. Essa comparação foi utilizada apenas como referência interpretativa para dimensionar as emissões digitais anuais estimadas nesse cenário.

Projetando esse consumo para um período de 10 anos, mantendo as mesmas condições de acesso e número de usuários, a emissão acumulada seria de aproximadamente 1.185.634 gCO₂, o que equivale a 1,19 toneladas de CO₂ equivalente. Embora esse valor possa parecer relativamente baixo se comparado a outras fontes de emissão, ele evidencia a crescente relevância ambiental das atividades digitais, especialmente quando associado a uma única instituição pública.

4 Conclusão

Neste estudo, analisou-se a emissão média de dióxido de carbono (CO₂) associada ao consumo energético do tráfego de dados dos websites sob o domínio da Universidade de Brasília (UnB), utilizando uma amostra de mais de 300 URLs medidas ao longo de cinco dias úteis e em diferentes horários. Estimou-se uma intensidade energética da internet no Brasil de 0,1091 kWh/GB e uma emissão média de $6,45 \times 10^{-3}$ gCO₂ por visualização de página. Os resultados indicaram um padrão estável de consumo ao longo dos dias e horários analisados, e identificaram que 36 das 327 páginas (11,0%) concentram consumo acima da média, devido à alta proporção de imagens em alta resolução.

Com base no total projetado de acessos em 2022, a emissão anual estimada foi de 118.563,4 gCO₂, quantidade comparada ao estoque acumulado de carbono de uma árvore da espécie Caryocar brasiliense ao longo de sua vida. Esses resultados sugerem um uso relativamente eficiente da infraestrutura web institucional, em parte favorecido pelo fato de a matriz elétrica brasileira ser majoritariamente renovável. Ainda assim, é crucial reconhecer que, em um contexto mais amplo, as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) representam um desafio ambiental relevante.

Globalmente, o uso das TICs pode corresponder a até 2% das emissões mundiais de carbono, e em 2020, o setor foi responsável por cerca de 4% da eletricidade consumida e aproximadamente 1,4% das emissões de gases de efeito estufa globalmente. A crescente digitalização e o aumento do tráfego de dados projetam um aumento contínuo no consumo de energia, o que tende a neutralizar os ganhos de eficiência. A dispersão e a invisibilidade dessas emissões, fragmentadas entre servidores, redes e dispositivos, tornam o problema mais complexo de mensurar e gerenciar.

O crescimento da comunidade acadêmica e o avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação reforçam a necessidade de ações permanentes de monitoramento. Essas ações são essenciais não apenas para reduzir o impacto ambiental digital, mas também para enfrentar limitações como a ausência de dados nacionais consolidados sobre redes, dispositivos e centros de dados, e a falta de métricas precisas de acesso aos websites. O aprimoramento contínuo dessas estimativas é indispensável para subsidiar decisões sustentáveis na gestão da infraestrutura digital das instituições públicas.

Referências



AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Dados de acessos e tráfego de banda larga fixa e móvel no Brasil. Brasília: Anatel, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

AI, Yuan; PENG, Mugen; ZHANG, Kecheng. Edge computing technologies for Internet of Things: a primer. *Digital Communications and Networks*, v. 4, n. 2, p. 77-86, 2018.

AL MHDRAWI, Ammar K.; AL-RAWESHIDY, Hamed S. iPRDR: Intelligent power reduction decision routing protocol for big traffic flood in hybrid-SDN architecture. *IEEE Access*, v. 6, p. 10944-10955, 2018.

ASLAN, Joshua et al. Electricity intensity of internet data transmission: Untangling the estimates. *Journal of industrial ecology*, v. 22, n. 4, p. 785-798, 2018.

BELKHIR, Lotfi; ELMELIGI, Ahmed. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of cleaner production*, v. 177, p. 448-463, 2018.

BIESER, Jan; HILTY, Lorenz. Indirect effects of the digital transformation on environmental sustainability: methodological challenges in assessing the greenhouse gas abatement potential of ICT. *EPiC Series in Computing*, n. 52, p. 68-81, 2018.

COROAMA, Vlad C. et al. The energy intensity of the Internet: home and access networks. In: *ICT innovations for sustainability*. Springer International Publishing, 2015. p. 137-155.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica – 20 anos. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 4 jul. 2025.

EVANS, Dave et al. *The internet of things. How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything*. Whitepaper, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), v. 1, p. 1-12, 2011.

FREITAG, Charlotte et al. The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations. arXiv preprint arXiv:2102.02622, 2021.

GIAMBENE, Giovanni. IP-Based Networks and Future Trends. In: *Queueing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 65-182.

GUPTA, Udit et al. Chasing carbon: The elusive environmental footprint of computing. In: 2021 IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA). IEEE, 2021. p. 854-867.

HINTON, Kerry; JALALI, Fatemeh; MATIN, Ashrar. Energy consumption modelling of optical networks. *Photonic Network Communications*, v. 30, n. 1, p. 4-16, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Classificação Nacional de Atividades Econômicas - CNAE. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

ISTRATE, Robert et al. The environmental sustainability of digital content consumption. *Nature Communications*, v. 15, n. 1, p. 3724, 2024.



JAGROEP, Erik A. et al. An Energy Consumption Perspective on Software Architecture: A Case Study on Architectural Change. In: *European Conference on Software Architecture*. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 239-247.

KENNES, Tom. Measuring IT carbon footprint: What is the current status actually?. arXiv preprint arXiv:2306.10049, 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil – Ano Base 2024. Brasília: MCTI, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 4 jul. 2025.

PINTO, Marcos M. F.; DE CAMPOS, Patrícia Klinkerfus; DE AZEVEDO, Viviane Ramalho. Sustentabilidade de data centers com o uso da TI-Verde. *Revista Científica e-Locução*, v. 1, n. 20, p. 18, 2021.

SALVIA, Amanda L. et al. Analysis of energy consumption and efficiency at University of Passo Fundo—Brazil. In: *Towards Green Campus Operations: Energy, Climate and Sustainable Development Initiatives at Universities*. Springer, 2018. p. 519-533.

SCHIEN, Daniel et al. The energy intensity of the Internet: edge and core networks. In: *ICT Innovations for Sustainability*. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 157-170.

SÁNCHEZ-CUADRADO, Sonia; MORATO, Jorge. The Carbon Footprint of Spanish University Websites. *Sustainability*, v. 16, n. 13, p. 5670, jul. 2024.

SHAHIDUZZAMAN, Md; LAYTON, Allan; ALAM, Khorshed. On the contribution of information and communication technology to productivity growth in Australia. *Economic Change and Restructuring*, v. 48, n. 3, p. 281-304, 2015.

SUSTAINABLE WEB DESIGN. Sustainable Web Design. Disponível em: <https://sustainablewebdesign.org/>. Acesso em: 18 maio 2025.

TEIXEIRA, Bruno Emanuel et al. The potential of natural shade provided by Brazilian savanna trees for thermal comfort and carbon sink. *Science of the Total Environment*, v. 845, p. 157324, jul. 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157324.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Anuário Estatístico 2023: ano-base 2022. Brasília: UnB, 2023. Disponível em: <https://repositoriodpo.unb.br/anuarios/anuario-estatistico-2023/>. Acesso em: 31 ago. 2026.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação - PDTIC 2023-2028. Brasília: UnB, 2023.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Secretaria de Tecnologia da Informação. Instrução STI nº 0004/2023: Dispõe acerca da difusão de sites web da Universidade de Brasília (UnB) para a Intranet, Internet. Brasília: UnB, 2023. Disponível em: https://etir.unb.br/wp-content/uploads/2024/01/Dispoe_acerca_da_difusao_de_sites_web_da_Universidade_de_Brasilia_UnB_para_Intranet_internet.pdf. Acesso em: 18 maio 2025.