

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DATACENTERS

GERAÇÃO DE CARBONO EM DATACENTERS NOS ESCOPOS 1, 2 E 3:

COMPARAÇÃO BRASIL a ESTADOS UNIDOS EM BASE DE 1 MW DE TI

LUIS TOSSI/ ABDC

São Paulo

2026

GERAÇÃO DE CARBONO EM DATACENTERS NOS ESCOPOS 1, 2 E 3:

COMPARAÇÃO BRASIL a ESTADOS UNIDOS EM BASE DE 1 MW DE TI

Artigo executivo, com revisão bibliográfica e síntese quantitativa sobre a geração de carbono em datacenters, estruturada nos escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol, com comparação entre Brasil e Estados Unidos em base normalizada de 1 MW de TI, com ênfase em dados oficiais do BEN/EPE e ONS para o Brasil e da IEA para os Estados Unidos.

São Paulo

2026

RESUMO

Este estudo aprofunda a comparação da geração de carbono de datacenters no Brasil e nos Estados Unidos nos escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol, normalizando os resultados por 1 MW de carga de TI e por ano de operação. A metodologia parte de uma instalação de referência com PUE 1,4, equivalente a 12.264 MWh/ano de eletricidade total por MW de TI, e aplica fatores de emissão location-based derivados da matriz elétrica: para o Brasil, a análise utiliza a leitura combinada de dados oficiais do Sistema de Informações Energéticas/Balanco Energético Nacional, da EPE, e da operação do Sistema Interligado Nacional pelo ONS; para os Estados Unidos, utiliza a intensidade de carbono do setor elétrico reportada pela International Energy Agency. Em cenário central, o escopo 2 brasileiro é estimado em cerca de 0,638 ktCO_{2e}/MW TI.ano, contra aproximadamente 4,55 ktCO_{2e}/MW TI.ano nos Estados Unidos. O escopo 1 é menor, mas não desprezível: testes e emergências com geradores diesel podem variar de cerca de 11 a 94 tCO₂/MW TI.ano para 12 a 100 horas anuais de operação, antes de refrigerantes. O escopo 3 é tratado por critérios de ciclo de vida, incluindo obras civis, infraestrutura eletromecânica, servidores, baterias, logística, reposição e fim de vida, com faixa anualizada de 0,8 a 3,0 ktCO_{2e}/MW TI.ano. Conclui-se que o Brasil possui vantagem estrutural robusta em carbono operacional location-based, mas a comparação completa exige transparência sobre PUE, fator de emissão temporal, operação real de geradores e fronteiras do escopo 3.

Palavras-chave: datacenters; carbono; escopo 1; escopo 2; escopo 3; Brasil; Estados Unidos; PUE; CUE; diesel; supply chain.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de datacenters tornou-se uma das infraestruturas críticas da economia digital. O avanço de computação em nuvem, inteligência artificial, redes de entrega de conteúdo, pagamentos digitais e armazenamento corporativo ampliou a demanda por energia elétrica firme, refrigeração e equipamentos de alta densidade. Como consequência, a avaliação ambiental do setor deixou de ser restrita à eficiência energética e passou a exigir inventários completos de gases de efeito estufa nos escopos 1, 2 e 3.

Este artigo adota como objeto a geração de carbono associada a um datacenter hipotético, porém tecnicamente representativo, com 1 MW de carga de TI. A escolha de 1 MW de TI como unidade funcional permite comparar países e projetos sem confundir capacidade computacional útil com área construída, potência contratada, nível de redundância ou porte absoluto do campus. Essa base também permite converter diretamente PUE, fator de emissão da rede, horas de geradores diesel e emissões incorporadas em tCO_{2e} por MW de TI ao ano.

A pergunta central é: quanto carbono é gerado por 1 MW de TI em datacenters no Brasil e nos Estados Unidos quando se consideram, simultaneamente, as emissões diretas, a eletricidade adquirida e a cadeia de suprimentos? A hipótese é que o Brasil apresenta vantagem estrutural no escopo 2 location-based por causa da baixa intensidade carbônica média de sua matriz elétrica, enquanto o escopo 3 reduz a distância relativa entre os países por depender de cadeias globais de hardware, construção civil, baterias, metais e equipamentos eletromecânicos.

2. METODOLOGIA E FRONTEIRAS DO ESTUDO

A unidade funcional é 1 MW de TI operando continuamente por 8.760 horas por ano. A energia total da instalação é calculada por Energia anual = 1 MW × 8.760 h × PUE. Para o cenário de referência, adota-se PUE 1,4, valor compatível com datacenters eficientes e inferior à média histórica de muitos parques legados. O resultado é 12.264 MWh/ano por MW de TI.

O escopo 2 é calculado por $E_2 = \text{Energia anual} \times \text{EF}$, em que EF é o fator de emissão da eletricidade em tCO_{2e}/MWh. A análise principal usa abordagem location-based, pois o objetivo é comparar a intensidade física média do sistema elétrico no local de operação. A abordagem market-based é discutida separadamente porque certificados, PPAs e contratos renováveis podem reduzir

emissões reportadas sem alterar necessariamente a intensidade média física da rede em todas as horas.

O escopo 1 inclui combustão estacionária de diesel em geradores de emergência, eventuais combustíveis em caldeiras ou veículos próprios e emissões fugitivas de refrigerantes. O escopo 3 inclui bens de capital, equipamentos de TI, infraestrutura elétrica e mecânica, construção civil, transporte upstream, resíduos, combustível e energia não incluídos nos escopos 1 e 2, substituição de hardware e fim de vida. Para o escopo 3, os valores são anualizados pela vida útil técnica de cada classe de ativo.

3. BASE CONCEITUAL: ESCOPOS 1, 2 E 3

O GHG Protocol define escopo 1 como emissões diretas de fontes pertencentes ou controladas pela organização; escopo 2 como emissões indiretas da geração da eletricidade, vapor, calor ou resfriamento comprados; e escopo 3 como demais emissões indiretas na cadeia de valor. Em datacenters, essa estrutura é especialmente útil porque separa três realidades físicas diferentes: operação local, matriz elétrica e cadeia global de ativos.

No escopo 1, a principal fonte é a combustão de diesel em grupos geradores, utilizada em testes periódicos, manutenções, comissionamento e contingências de rede. Outra fonte relevante são vazamentos de refrigerantes, cujo impacto climático depende do GWP do fluido, da carga do sistema e da taxa anual de vazamento. Em sites com refrigeração por chillers, CRAC/CRAH e sistemas de expansão direta, pequenas perdas de gases de alto GWP podem representar dezenas de toneladas de CO₂e por ano.

No escopo 2, o fator crítico é o carbono da eletricidade. Datacenters têm perfil de carga contínuo, elevado fator de utilização e baixa elasticidade de demanda. Assim, diferenças entre matrizes elétricas nacionais impactam diretamente o inventário operacional. No escopo 3, destacam-se aço, concreto, cobre, alumínio, transformadores, UPS, baterias, chillers, servidores, switches, storage, placas eletrônicas, semicondutores e logística internacional.

4. DADOS DE MATRIZ ELÉTRICA E FATORES DE EMISSÃO

Para o Brasil, o estudo recomenda a combinação de duas bases: SIE/BEN/EPE para balanço energético nacional e composição anual da oferta elétrica, e ONS para geração elétrica do Sistema

Interligado Nacional por fonte e por período. A matriz brasileira apresenta elevada participação renovável, especialmente hidráulica, eólica, solar e biomassa, o que sustenta fatores médios de emissão substancialmente menores que os observados em sistemas com maior participação de gás natural e carvão.

Para os Estados Unidos, o estudo utiliza a referência da International Energy Agency para intensidade de emissões do setor elétrico e de calor. A matriz norte-americana possui maior participação de gás natural e carvão que a brasileira, embora varie fortemente por região. Por isso, o valor médio nacional é útil para comparação macro, mas decisões locais deveriam usar fatores regionais e horários quando disponíveis.

Como cenário quantitativo central, adota-se EF Brasil = 0,052 tCO₂e/MWh, com faixa de sensibilidade de 0,040 a 0,080 tCO₂e/MWh; e EF Estados Unidos = 0,371 tCO₂e/MWh, com faixa de 0,350 a 0,390 tCO₂e/MWh. Essas faixas são coerentes com a diferença estrutural entre a eletricidade brasileira, fortemente renovável, e a norte-americana, ainda dependente de combustíveis fósseis em parcela relevante.

5. RESULTADOS QUANTITATIVOS POR 1 MW DE TI

Tabela 1 — Energia anual por 1 MW de TI segundo PUE

PUE — Energia Total Anual do Datacenter (1 MW TI)		
<i>Power Usage Effectiveness — base 1 MW TI × 8.760 h/ano</i>		
PUE	Energia anual total (MWh/ano)	Cálculo
1,3	11.388	$1 \text{ MW} \times 8.760 \text{ h} \times 1,3$
1,4	12.264	$1 \text{ MW} \times 8.760 \text{ h} \times 1,4$
1,5	13.140	$1 \text{ MW} \times 8.760 \text{ h} \times 1,5$
1,6	14.016	$1 \text{ MW} \times 8.760 \text{ h} \times 1,6$
Referência de mercado	$PUE \leq 1,4 \rightarrow$ eficiência aceitável $PUE \leq 1,2 \rightarrow$ classe mundial (Tier IV / hiperescala)	

Fonte: elaboração própria a partir da definição de PUE do The Green Grid e da unidade funcional adotada.

A Tabela 1 mostra a sensibilidade energética do PUE. A variação de 0,1 ponto no PUE altera o consumo anual em 876 MWh por MW de TI. Essa diferença é suficiente para deslocar significativamente as emissões de escopo 2 em redes de alta intensidade carbônica, como ocorre em parte do sistema elétrico norte-americano.

Tabela 2 — Escopo 2 location-based por 1 MW de TI, PUE 1,4

Escopo 2 Location-Based — Fator de Emissão da Matriz Elétrica			
<i>Base: 1 MW TI × PUE 1,3 × 8.760 h/ano = 11.388 MWh/ano consumidos</i>			
País	Fator de emissão adotado (tCO₂e/MWh)	Escopo 2: faixa (tCO₂e/ano)	Cenário central (tCO₂e/ano)
Brasil	0,040 a 0,080	491 a 981	638
Estados Unidos	0,350 a 0,390	4.292 a 4.783	4.550
Diferencial	~8,7× menor no Brasil	~8,7× menor no Brasil	7,1×

Fonte: elaboração própria com dados oficiais de matriz elétrica do SIE/BEN/EPE e ONS para Brasil e intensidade elétrica da IEA para Estados Unidos.

A Tabela 2 evidencia a diferença central do estudo. Em cenário médio, o datacenter de 1 MW de TI emite cerca de 638 tCO₂e/ano no Brasil e cerca de 4.550 tCO₂e/ano nos Estados Unidos no escopo 2 location-based. A razão entre os cenários centrais é aproximadamente 7,1 vezes. Mesmo usando o limite superior brasileiro e o limite inferior norte-americano, os Estados Unidos permanecem acima em cerca de 4,4 vezes.

6. ESCOPO 1: GERADORES DIESEL E REFRIGERANTES

Para geradores diesel, considera-se que a instalação de referência deve sustentar a carga total da instalação, não apenas os servidores. Com PUE 1,4, 1 MW de TI implica 1,4 MW elétrico total. Adota-se consumo específico operacional de 0,25 L/kWh em carga relevante, fator de emissão de 2,68 kgCO₂/L de diesel e quatro cenários de horas anuais: 12 h, 24 h, 50 h e 100 h. As 12 a 24 h representam testes e manutenção; 50 a 100 h representam cenários mais conservadores,

incluindo eventos de rede, comissionamento e limites típicos observados em permissões ambientais.

Tabela 3 — Emissões de CO₂ de geradores diesel por 1 MW de TI

Escopo 1 — Emissões de Diesel (Gerador de Emergência)			
<i>Somente CO₂ da combustão — fator 2,68 kgCO₂/L diesel (IPCC/GHG Protocol)</i>			
Horas/ano	Diesel consumido (L/ano)	Emissões (tCO ₂ /ano)	Observação
12	4.200	11,3	<i>Somente CO₂ da combustão; não inclui CH₄/N₂O nem refrigerantes</i>
24	8.400	22,5	<i>Somente CO₂ da combustão; não inclui CH₄/N₂O nem refrigerantes</i>
50	17.500	46,9	<i>Somente CO₂ da combustão; não inclui CH₄/N₂O nem refrigerantes</i>
100	35.000	93,8	<i>Somente CO₂ da combustão; não inclui CH₄/N₂O nem refrigerantes</i>
Faixa operacional 12 a 100 h/ano	4.200 a 35.000 L/ano	11,3 a 93,8 tCO₂/ano	<i>Faixas não incluem CH₄/N₂O; inventário completo requer fatores GHG Protocol Scope 1</i>

Fonte: elaboração própria com fator de emissão de diesel baseado em IPCC/GHG Protocol e consumo específico técnico de geradores.

O escopo 1 de diesel é menor que o escopo 2, mas não é irrelevante. Em 100 horas anuais, a emissão de combustão aproxima-se de 94 tCO₂ por MW de TI, valor comparável à diferença anual gerada por melhorias moderadas de PUE em redes de baixa emissão. As emissões fugitivas podem acrescentar de 5 a mais de 80 tCO₂e/MW TI.ano, dependendo do refrigerante, do GWP, da carga instalada e da taxa de vazamento. Por isso, a substituição por fluidos de baixo GWP e a gestão rigorosa de estanqueidade são medidas relevantes.

7. ESCOPO 3: CADEIA DE SUPRIMENTOS E CRITÉRIOS DE CONTABILIZAÇÃO

O escopo 3 deve ser estruturado por categorias do GHG Protocol. Em datacenters, a categoria 2, bens de capital, concentra grande parte do carbono incorporado: edifício, fundações, estrutura metálica, concreto, salas elétricas, UPS, baterias, chillers, torres de resfriamento, transformadores, geradores, barramentos, cabos e quadros. Equipamentos de TI também entram como bens de capital quando adquiridos pelo operador: servidores, GPUs, CPUs, memória, storage, switches e racks. A categoria 3, combustível e energia não incluídos nos escopos 1 e 2, deve considerar emissões upstream de extração, processamento e transporte de diesel e energia elétrica.

A categoria 4 inclui transporte e distribuição upstream de equipamentos; a categoria 5 inclui resíduos de obra e operação; e as categorias 6 e 7 incluem viagens e deslocamento de empregados quando relevantes.

O critério adotado para anualização é a vida útil técnica: obra civil e envelope entre 30 e 50 anos; infraestrutura eletromecânica entre 15 e 25 anos; UPS e baterias entre 5 e 10 anos; servidores e storage entre 3 e 5 anos; rede entre 5 e 7 anos; e GPUs de alta densidade entre 3 e 4 anos. Essa abordagem evita superestimar o primeiro ano de operação e permite comparar o carbono incorporado com emissões anuais operacionais.

Tabela 4 — Estrutura do escopo 3 em datacenters por 1 MW de TI

Escopo 3 — Emissões Incorporadas da Cadeia de Valor (tCO₂e/MW TI·ano)			
<i>Emissões upstream e incorporadas — anualizadas pela vida útil de cada bloco da infraestrutura</i>			
Bloco da cadeia	Exemplos	Vida útil usada	Faixa anualizada (tCO₂e/MW TI·ano)
Construção civil	<i>Concreto, aço, fundações, salas técnicas, envelope</i>	30 a 50 anos	100 a 400
Infraestrutura eletromecânica	<i>UPS, chillers, transformadores, geradores, cabos, painéis</i>	15 a 25 anos	150 a 700
Baterias e armazenamento	<i>VRLA, Ion-lítio, racks de baterias, reposição</i>	5 a 10 anos	50 a 250
Hardware de TI	<i>Servidores, GPUs, CPUs, memória, storage, switches</i>	3 a 5 anos	400 a 1.500
Logística, resíduos e upstream energy	<i>Frete internacional, embalagens, resíduos, WTT de combustíveis</i>	1 a 10 anos	50 a 150
Total anualizado	<i>Soma dos blocos relevantes ao projeto</i>	Ponderado	800 a 3.000

Metodologia: GHG Protocol Scope 3, categorias 1 (bens adquiridos), 2 (bens de capital) e 4 (transporte upstream). Valores anualizados pelo critério de amortização linear por vida útil. Faixas não substituem ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) primária do projeto.

Fonte: elaboração própria com base em GHG Protocol, estudos de carbono incorporado em computação e literatura de eficiência de datacenters.

A principal incerteza do escopo 3 está no hardware. Servidores de uso geral têm perfis de ciclo de vida diferentes de clusters de IA com GPUs, interconexões de alta velocidade e ciclos de substituição acelerados. A fabricação de semicondutores é intensiva em energia, água ultrapura, gases especiais e salas limpas, e grande parte dessa emissão ocorre fora do país onde o datacenter opera. Portanto, Brasil e Estados Unidos podem ter escopo 3 semelhante por MW de TI quando compram equipamentos globais equivalentes, mesmo que tenham escopos 2 muito diferentes.

8. COMPARAÇÃO CONSOLIDADA BRASIL × ESTADOS UNIDOS

Tabela 5 — Comparação consolidada por 1 MW de TI, PUE 1,4

Inventário de Emissões GEE — Comparativo Brasil × Estados Unidos			
<i>Faixas indicativas por componente de escopo — valores em tCO₂e/ano</i>			
Componente	Brasil	Estados Unidos	Comentário
Escopo 1: diesel 12 a 100 h/ano	11 a 94 tCO ₂ e/ano	11 a 94 tCO ₂ e/ano	<i>Diferença depende mais de confiabilidade da rede e testes do que do país</i>
Escopo 1: refrigerantes	5 a 80+ tCO ₂ e/ano	5 a 80+ tCO ₂ e/ano	<i>Depende de GWP, carga e taxa de vazamento</i>
Escopo 2 location-based	491 a 981 tCO ₂ e/ano	4.292 a 4.783 tCO ₂ e/ano	<i>Principal diferencial Brasil × EUA</i>
Escopo 3 anualizado	800 a 3.000 tCO ₂ e/ano	800 a 3.000 tCO ₂ e/ano	<i>Depende de cadeia global e densidade de hardware</i>
Total indicativo (sem refrigerantes extremos)	1,3 a 4,1 ktCO₂e/ano	5,1 a 7,9 ktCO₂e/ano	<i>Faixas não substituem inventário primário do projeto</i>

Fonte: elaboração própria com dados oficiais e literatura setorial/acadêmica.

A comparação consolidada mostra que o Brasil é estruturalmente mais competitivo no escopo 2 location-based. A diferença é tão expressiva que, mesmo adicionando escopo 3 anualizado equivalente, o total brasileiro permanece inferior ao norte-americano na maior parte dos cenários. Entretanto, quando o datacenter é extremamente intensivo em hardware, com renovação rápida de servidores e GPUs, o escopo 3 pode tornar-se o principal componente no Brasil, enquanto nos Estados Unidos tende a dividir protagonismo com o escopo 2.

Em abordagem market-based, grandes operadores nos Estados Unidos podem reportar escopo 2 líquido menor por meio de PPAs renováveis, RECs e contratos de energia limpa. Essa informação é relevante para inventários corporativos, mas não elimina a necessidade de avaliar emissões horárias e location-based, sobretudo quando a carga opera 24 horas por dia e depende da rede em períodos sem geração renovável local.

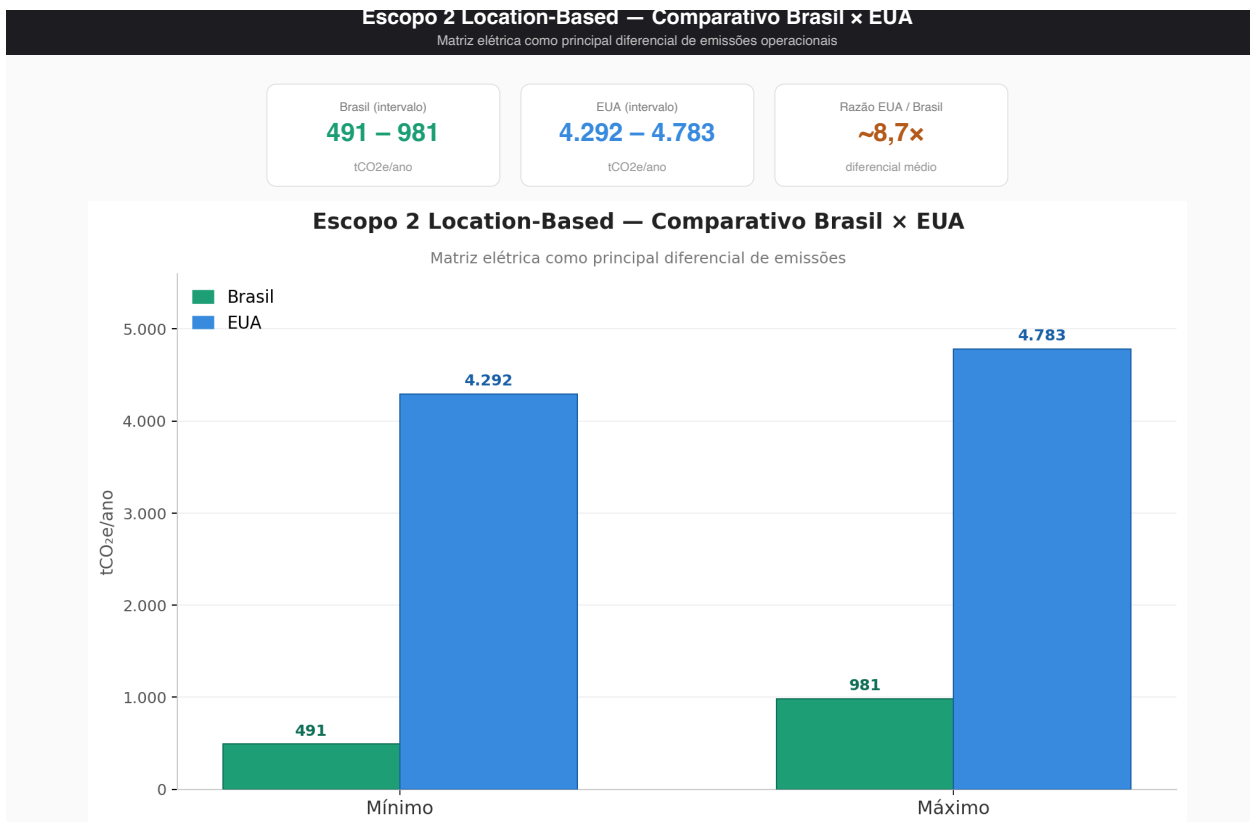


Figura 1 — Escopo 2 location-based por 1 MW de TI. Fonte: elaboração própria com SIE/BEN/EPE, ONS e IEA.

9. DISCUSSÃO

Os resultados confirmam que a variável decisiva na comparação Brasil a Estados Unidos é o fator de emissão da eletricidade. O Brasil possui vantagem location-based porque seu sistema elétrico tem alta participação renovável. Essa vantagem é relevante para atração de cargas digitais, especialmente workloads que buscam reduzir emissões operacionais sem depender exclusivamente de instrumentos contratuais.

A análise também mostra que a agenda de descarbonização não pode parar no PUE. Reduzir PUE continua essencial, mas a métrica CUE torna-se mais adequada para comparar carbono, pois multiplica eficiência energética por intensidade de carbono da energia. Um PUE baixo em uma rede de alto carbono pode emitir mais que um PUE moderado em uma rede de baixo carbono. Além disso, WUE e uso de água devem ser avaliados separadamente, pois estratégias de economia de carbono podem aumentar consumo hídrico, dependendo do sistema de refrigeração.

Do ponto de vista regulatório e de disclosure, recomenda-se que operadores reportem: carga média de TI, PUE anual, energia total, fator de emissão utilizado, método location-based e market-based, horas anuais de geradores, litros de diesel consumidos, tipo e vazamento de refrigerantes, emissões incorporadas por classe de ativo e vida útil usada para anualização. Sem essas informações, comparações entre países e projetos podem misturar dados físicos, dados contratuais e estimativas de ciclo de vida sem consistência.

10. CONCLUSÃO

Em base de 1 MW de TI e PUE 1,4, o datacenter de referência consome 12.264 MWh/ano. Aplicando fatores médios location-based, o escopo 2 é estimado em aproximadamente 638 tCO₂e/ano no Brasil e 4.550 tCO₂e/ano nos Estados Unidos. A diferença decorre da matriz elétrica: o Brasil possui maior participação renovável e menor intensidade média de carbono, enquanto os Estados Unidos ainda apresentam participação relevante de combustíveis fósseis.

O escopo 1 é menor, mas operacionalmente importante. Geradores diesel podem adicionar cerca de 11 a 94 tCO₂/ano por MW de TI para 12 a 100 horas anuais de operação, antes de CH₄, N₂O e refrigerantes. Refrigerantes de alto GWP podem acrescentar emissões relevantes caso não haja controle rigoroso de vazamentos. O escopo 3, por sua vez, é decisivo para uma comparação honesta, pois construção, eletromecânica, baterias e hardware podem somar 0,8 a 3,0 ktCO₂e/MW TI.ano em base anualizada.

A conclusão prática é que o Brasil possui vantagem estrutural clara para datacenters quando a métrica é carbono operacional location-based. No entanto, a decisão locacional e o inventário corporativo devem incorporar escopo 3, horas reais de geradores, refrigerantes e distinção explícita entre location-based e market-based. Essa abordagem permite comparar Brasil e Estados Unidos com maior rigor técnico e reduz o risco de conclusões baseadas apenas em consumo de energia ou em contratos de energia renovável.

REFERÊNCIAS

AMAZON WEB SERVICES. The cloud and sustainability. Seattle: AWS, 2024. Disponível em: <https://sustainability.aboutamazon.com/environment/the-cloud>.

CHEN, L.; WEMHOFF, A. P. Predicting embodied carbon emissions from purchased electricity for United States counties. *Applied Energy*, v. 292, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116898.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional: ano-base 2023/2024. Rio de Janeiro: EPE, 2024/2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.

GHG PROTOCOL. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Washington, DC: WRI/WBCSD, 2011. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>.

GHG PROTOCOL. Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition. Washington, DC: WRI/WBCSD, 2004. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.

GOOGLE. Environmental Report. Mountain View: Google, 2024. Disponível em: <https://www.google.com/environment/report/>.

GUPTA, U. et al. Chasing carbon: the elusive environmental footprint of computing. arXiv, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2011.02839>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data centres and data transmission networks. Paris: IEA, 2024/2025. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Emissions Factors and electricity generation data. Paris: IEA, 2024/2025. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>.

LANNELONGUE, L.; GREALEY, J.; INOUYE, M. Green algorithms: quantifying the carbon footprint of computation. *Advanced Science*, v. 8, n. 12, 2021. DOI: 10.1002/advs.202100707.

MASANET, E. et al. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, v. 367, n. 6481, p. 984 a 986, 2020. DOI: 10.1126/science.aba3758.

MCKINSEY & COMPANY. Investing in the rising data center economy. New York: McKinsey, 2023/2024. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/>.

MICROSOFT. Environmental Sustainability Report. Redmond: Microsoft, 2024. Disponível em: <https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/report>.

MYTTON, D. Data centre water consumption. *npj Clean Water*, v. 4, 2021. DOI: 10.1038/s41545-021-00101-w.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Histórico da operação: geração de energia por fonte no SIN. Rio de Janeiro: ONS, 2024/2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>.

PWC. Data centres and energy: sustainability, infrastructure and supply chain considerations. London: PwC, 2024. Disponível em: <https://www.pwc.com/>.

ERNST & YOUNG. Data centers, energy demand and decarbonization: infrastructure and supply chain perspectives. London: EY, 2024. Disponível em: <https://www.ey.com/>.

SHEHABI, A. et al. United States Data Center Energy Usage Report. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016. Disponível em: https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1005775_v2.pdf.

STRUBELL, E.; GANESH, A.; MCCALLUM, A. Energy and policy considerations for deep learning in NLP. *Proceedings of ACL*, 2019. DOI: 10.18653/v1/P19-1355.

THE GREEN GRID. Carbon Usage Effectiveness (CUE): a green grid data center sustainability metric. Beaverton: The Green Grid, 2010. Disponível em: <https://www.thegreengrid.org/>.

UPTIME INSTITUTE. Global Data Center Survey. New York: Uptime Institute, 2023/2024. Disponível em: <https://uptimeinstitute.com/research-and-reports>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. eGRID: Emissions & Generation Resource Integrated Database. Washington, DC: EPA, 2024/2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/egrid>.

APÊNDICE A — FÓRMULAS UTILIZADAS

Energia anual total (MWh) = carga de TI (MW) × 8.760 h/ano × PUE.

Escopo 2 location-based (tCO₂e/ano) = energia anual total (MWh) × fator de emissão da eletricidade (tCO₂e/MWh).

Diesel anual (L/ano) = potência total suportada pelo gerador (kW) × horas anuais × consumo específico (L/kWh).

CO₂ do diesel (tCO₂/ano) = litros de diesel × 2,68 kgCO₂/L ÷ 1.000.

Escopo 3 anualizado (tCO₂e/ano) = soma das emissões incorporadas de cada classe de ativo dividida por sua vida útil técnica, adicionando reposição, logística, resíduos e upstream energy.