



EACH

Escola de Artes, Ciências e Humanidades
Universidade de São Paulo

A Computação e seu papel na crise climática

Daniel Cordeiro

Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH)
Universidade de São Paulo

Secretaria Executiva de Mudanças Climáticas — 25 de fevereiro de 2026

- Professor da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) da USP
- Doutor em Ciência da Computação pela *Université de Grenoble*
- Bacharel e Mestre em Ciência da Computação pela Universidade de São Paulo
- Pesquisador do CCD “Cidades Carbono Neutro” (FAPESP), IRP “Sustainable Megalopolises for Humans” (CNRS) e “EcoSustain: ciência de dados e computação para o meio ambiente” (FAPESP)
- Eu tenho investigado problemas em Computação de Alto Desempenho + Teoria do Escalonamento + Ciência Social Computacional ⇒ **Computação Sustentável e Cidades Inteligentes**



Aquecimento global

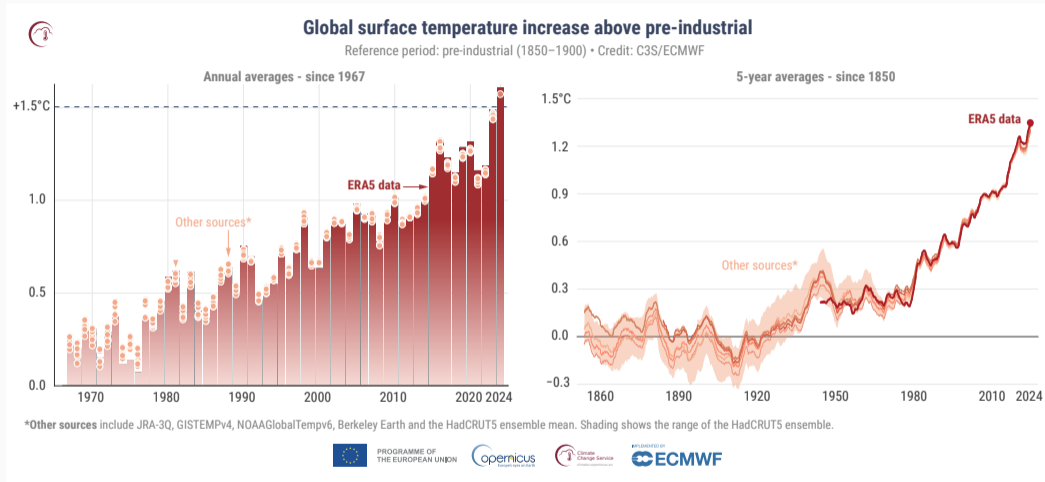


Figura 1: Fonte: EU Copernicus Climate Change Service (C3S) (jan/2025).

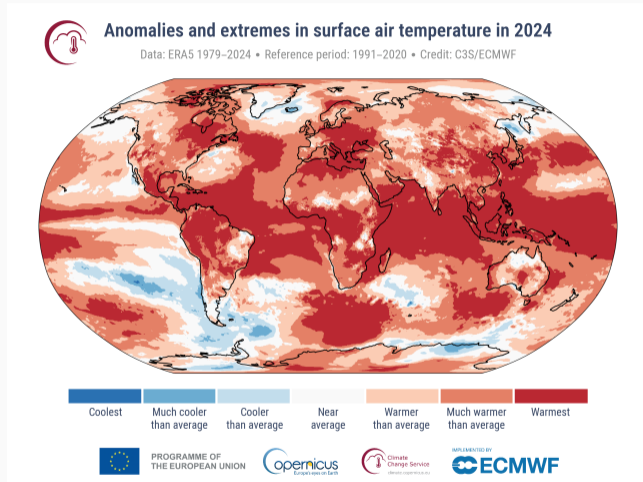


Figura 1: Fonte: EU Copernicus Climate Change Service (C3S) (jan/2025).

Acordo de Paris: metas e trajetórias

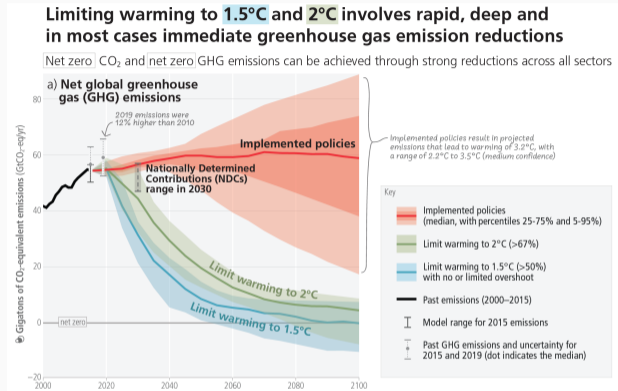


Figura 2: Emissões de CO₂ vs. metas de aquecimento global¹

¹IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 19 de mai. de 2023. 184 pp. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

- ICT4Green** Transição ecológica por meio da transição digital (*digital transition*): computação para otimizar o uso de recursos nas atividades humanas
- Exemplo: usar tecnologias de reunião por videoconferência em vez de presencial (para evitar emissões ligadas ao transporte)
- GreenICT** Computação com o menor uso de recursos possível
- Exemplo: otimização do consumo energético de algoritmos

Crise climática e computação

Computação como Solução (2 de 2)

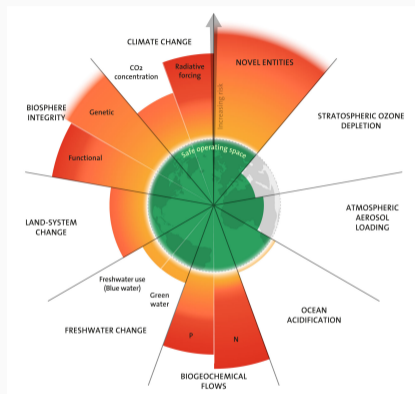


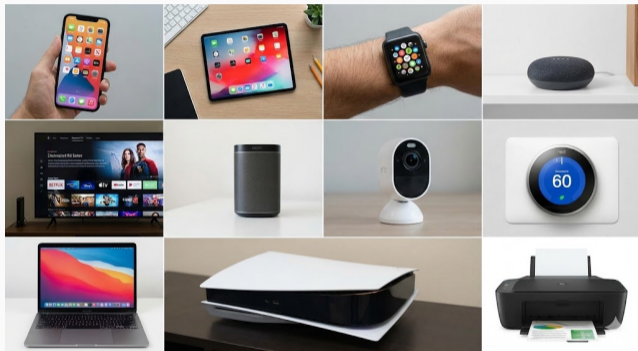
Figura 3: Limites planetários: limites seguros para processos de mudanças globais em que as atividades humanas afetam o funcionamento do planeta. Nós excedemos 7 dos 9 limites.³

² Boris Sakschewski et al. *Planetary Health Check 2025*. Rel. técn. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), 2025. DOI:

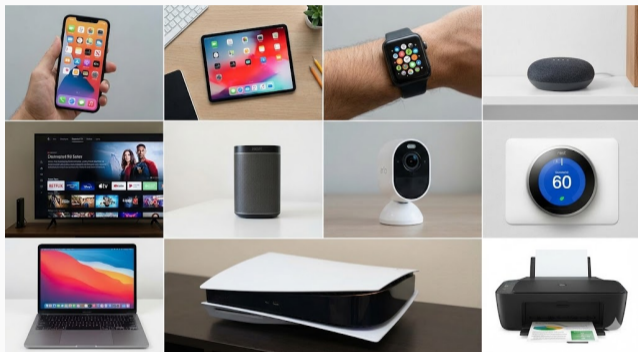
- Aceleradora de novos modos de consumo e uso
 - Exemplo: *streaming* e publicidade direcionada por sistemas de recomendação
- Ilusão do “desmaterializado”, algo não físico, sem custo

Os dois pontos de vista se entrelaçam!

O que há em comum entre esses dispositivos?



O que há em comum entre esses dispositivos?



TODOS dependem de outros programas de computador que estão rodando em outros computadores (servidores) hospedados em data centers!

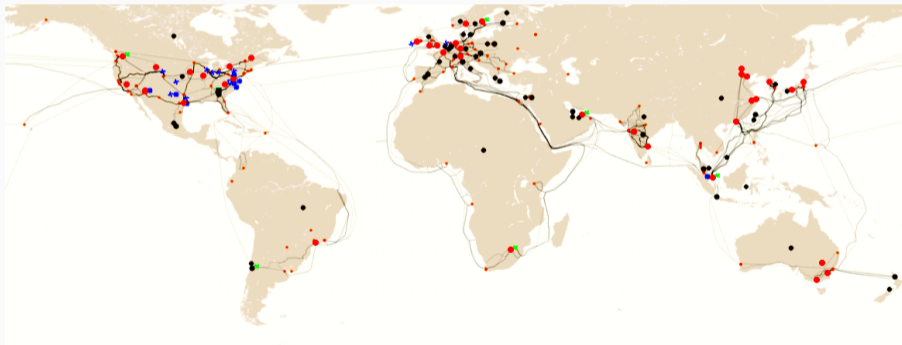
A Computação está em todo lugar

- Computação (em Nuvem) é parte essencial da infraestrutura da nossa sociedade



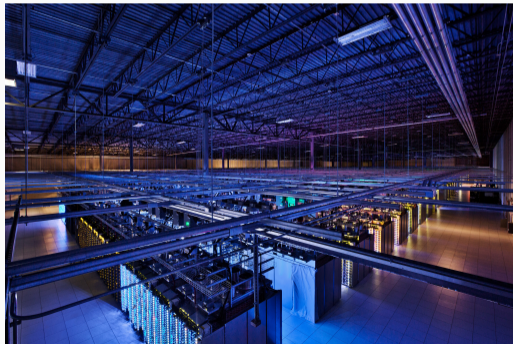
A Computação está em todo lugar

- Computação (em Nuvem) é parte essencial da infraestrutura da nossa sociedade
- Geralmente escondida (à vista de todos)



A Computação está em todo lugar

- Computação (em Nuvem) é parte essencial da infraestrutura da nossa sociedade
- Geralmente escondida (à vista de todos)
- Estamos acostumados a ter recursos “*quasi-infinitos*” sob demanda



A energia necessária para os nossos data centers

Global electricity demand from data centres, AI, and cryptocurrencies, 2019-2026

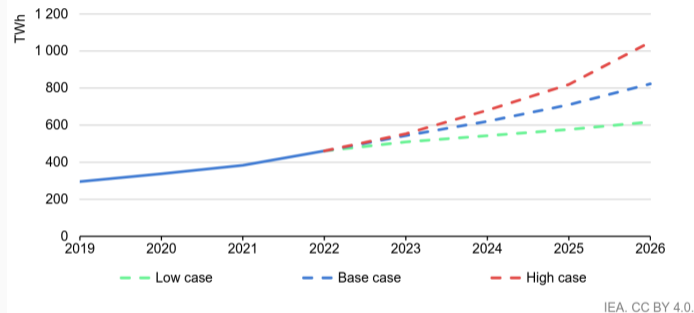


Figura 4: Relatório da IEA, jan/2024^a

^aIEA. *Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026*. International Energy Agency, jan. de 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.

- A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que DCs usaram 460 TWh de eletricidade no mundo todo em 2022, **quase 2% de toda demanda global por eletricidade**
- **Inteligência artificial e** cripto-moedas podem fazer **a demanda de energia dobrar até 2026**
- Um aumento equivalente a adicionar ao menos uma Suécia e no máximo uma Alemanha

A Computação pode ajudar a mitigar os efeitos do aquecimento global ... mas hoje é também parte do problema!

- Estima-se que o setor de TIC (tecnologias de informação e comunicação) use entre 5–6% de toda energia do mundo
 - ⇒ algo entre 1,7% e 4% das emissões globais de gases de efeito estufa⁴
- Um aumento de 8,2% entre 2020 e 2022
- Para comparação, a aviação contribuiu com 2% das emissões de CO₂ em 2022

⁴World Bank e International Telecommunication Union. *Measuring the Emissions and Energy Footprint of the ICT Sector: Implications for Climate Action*. 2024.

Treinamento de LLMs

GPT-3 1,3 GWh

GPT-4 50–60 GWh ($\approx 1/9$ do
recorde de produção da
usina nuclear de Angra 1)

GPT-5 100s GWh

Grok4 310 GWh

outros há uma enorme corrida
por novos LLMs
especialistas

Treinamento de LLMs

- GPT-3** 1,3 GWh
- GPT-4** 50–60 GWh ($\approx 1/9$ do recorde de produção da usina nuclear de Angra 1)
- GPT-5** 100s GWh
- Grok4** 310 GWh
- outros** há uma enorme corrida por novos LLMs especialistas

Inferência

- GPT-3: 564 MWh por dia
- Google: 60% do consumo de energia relativo a IA foi inferência (entre 2019 e 2021)
- Unesco/UCL: 1 bilhão de consultas ao ChatGPT por 0,34 Wh / consulta = 310 GWh por ano = consumo de 3 mi de pessoas na Etiópia

... e a Computação como parte do problema aumenta

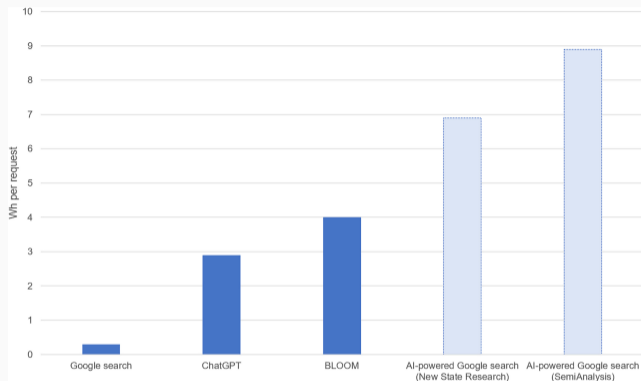


Figura 5: Consumo de energia estimado para buscas com IA vs. busca tradicional no Google⁵

Em 2024, o Google respondeu a **5 trilhões de buscas!**

⁵ Alex de Vries. "The growing energy footprint of artificial intelligence". Em: *Joule* 7.10 (2023), pp. 2191–2194.

Tendência de aumento no consumo de energia...

- Fórum Econômico Mundial: consumo de energia por IA dobrando a cada 100 dias (crescimento anual de 26–36%)
- Grandes provedores de nuvem revendo metas de neutralidade de carbono⁶
- LLMs viraram os novos buscadores

... criou tendência de aumento no consumo de água

- 5 gotas d'água por consulta ao Gemini
- DCs médios (até 100 MW) podem usar entre 2 milhões de litros por dia em resfriamento evaporativo (6500 residências)
- DCs maiores (*hyperscale*) podem chegar a 11–20 milhões de litros diários
- ⇔ podem causar **estresse hídrico local**

⁶<https://www.technologyreview.com/2024/07/17/1095019/google-amazon-and-the-problem-with-big-techs-climate-claims/>

Impactos ambientais de DCs

- Greenhouse Gas (GHG) Protocol:
 1. *Emissões diretas de GEE*
 2. *Emissões indiretas de GEE de eletricidade*
 3. *Outras emissões indiretas de GEE: 74% da pegada de carbono dos DCs do Google*
- Uso de energia renovável em DCs de nuvem
 - Google: média 64%, máx: 97%^a
- Melhoras na eficiência:
 - 6 × workload vs 6% energia (2010–2018)^b

^aGoogle. *Environmental Report 2023*. Google, 2023. URL: <https://sustainability.google/reports/google-2023-environmental-report/>.

^bEric Masanet et al. "Recalibrating global data center energy-use estimates".

Em: *Science* 367.6481 (2020), pp. 984–986.

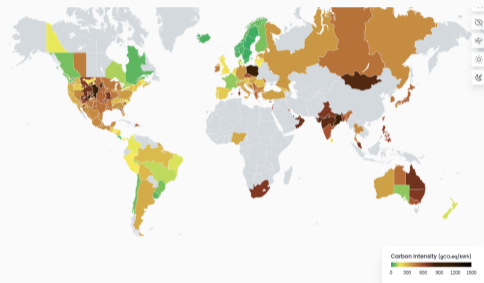


Figura 6: ElectricityMap.

Tabela 1: Emissões (em g CO₂-eq/kWh) do uso da energia da rede elétrica. Fonte: electricityMap, climate-transparency.org

Localização	Emissões
Joanesburgo	900,6
Pune	702,8
Camberra	667,0
Dubai	530,0
Singapura	495,0
Seul	415,6
Virgínia	342,8
São Paulo	61,7
Paris	52,6

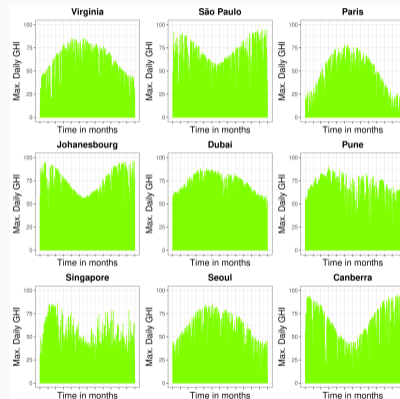


Figura 7: Irradiação solar por localidade. Dados de MERRA-2

DCs se tornaram um problema para cidadãos

- **Custos e infraestrutura de energia:** Aumento nas contas de luz e estresse na rede elétrica local.
 - Data centers na Irlanda causam sobrecarga na rede elétrica, consumindo até 22% da eletricidade nacional em 2024-2025, o que levou a pausas em novas conexões em Dublin até 2028 e riscos de alertas de demanda em cidades como Dublin e Cork
- **Recursos hídricos:** Esgotamento do abastecimento de água da comunidade
 - Rodízio de água para moradores de Vinhedo/SP enquanto DCs operam sem restrições; DC em Caucaia/CE recebeu outorgas para 144 mil L/dia (2025), baseadas em autodeclaração de suficiência hídrica
- **Uso do solo:** Ocupação de terras que seriam melhor aproveitadas para conservação ambiental ou agricultura
- **Poluição física:** Poluição e trânsito gerados pelas obras de construção, além da poluição do ar causada pela operação de geradores a diesel

- Transformação de “Lixo Térmico” em aquecimento para a população
- Melhorias na Infraestrutura Local (Água, Energia e Internet)
- Geração de empregos e capacitação de pessoas (poucos empregos, mas 5 empregos indiretos por cada direto); investimento de DCs em capacitação e na economia local ⁷
- A construção de DC é investimento em infraestrutura para a indústria brasileira de Computação

⁷https://datacenters.google/intl/pt-BR_ALL/accelerating-economies/

Mensagem final: as dificuldades

- Digital está em todos os lugares
- Estamos sendo invadidos por objetos conectados, em quantidades que crescem rapidamente
- O custo, em emissões de carbono, da tecnologia digital não é evidente, muitas vezes escondido em outros setores
- Efeito rebote (paradoxo de Jevons): a introdução de tecnologias mais eficientes do ponto de vista energético pode, no conjunto, aumentar o consumo total de energia
- Digital não é virtual!

Mensagem final: o lado bom

O paradoxo de IA e Sustentabilidade

IA para a Sustentabilidade

Aplicada de forma segura, IA pode (**e deve!**) acelerar todos os **ODSs da ONU**, melhorando os processos de tomada de decisões e liderando a inovação⁸:

- otimizando o uso de energia;
- melhorando diagnósticos médicos;
- monitorando a biodiversidade;
- expandindo oportunidades de educação;
- etc.

A IA deve oferecer:

- Equidade
- Acessibilidade
- Ética e transparência
- **Governança efetiva: com um senso de responsabilidade compartilhada!**

⁸Harnessing Artificial Intelligence for Sustainable Development Goals (SDGs) :
<https://unsdg.un.org/latest/announcements/harnessing-artificial-intelligence-sustainable-development-goals-sdgs>

Estamos avançando (aka: agradecimentos aos financiadores 😊)

Projetos de pesquisa em ICT4Green e GreenICT em andamento:

- Centro de Ciência para o Desenvolvimento “**Cidades Carbono Neutro**” (FAPESP #24/01115-0)
- “**EcoSustain**: ciência de dados e computação para o meio ambiente” (FAPESP #21/06867-2)
- *International Research Project “**Sustainable Megalopolises for Humans**”, Centre national de la recherche scientifique (CNRS)*
- Projeto **SOCLOUD: Sustainable and Open Cloud**, *Agence Nationale de la Recherche (ANR)*

A Computação e seu papel na crise climática

Contato: Daniel.Cordeiro@usp.br
<https://each.usp.br/dc/>

Referências

-  Google. *Environmental Report 2023*. Google, 2023. URL: <https://sustainability.google/reports/google-2023-environmental-report/>.
-  IEA. *Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026*. International Energy Agency, jan. de 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.
-  IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 19 de mai. de 2023. 184 pp. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
-  Masanet, Eric et al. “Recalibrating global data center energy-use estimates”. Em: *Science* 367.6481 (2020), pp. 984–986.
-  Sakschewski, Boris et al. *Planetary Health Check 2025*. Rel. técn. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), 2025. DOI: 10.48485/PIK.2025.017.

-  Vries, Alex de. “The growing energy footprint of artificial intelligence”. Em: *Joule* 7.10 (2023), pp. 2191–2194.
-  World Bank e International Telecommunication Union. *Measuring the Emissions and Energy Footprint of the ICT Sector: Implications for Climate Action*. 2024.