

Entender e avaliar o papel da computação na crise climática

Danilo Carastan-Santos¹

¹Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, Inria, LIG, France
email:{danilo.carastan-dos-santos}@univ-grenoble-alpes.fr

29 de maio de 2025

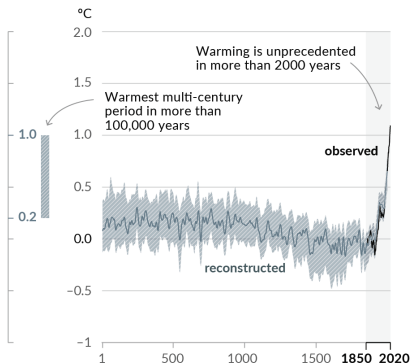
Crise climática

Fonte: Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC

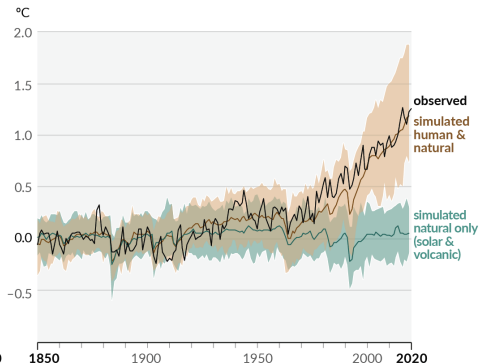
Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years

Changes in global surface temperature relative to 1850–1900

(a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1–2000) and **observed** (1850–2020)



(b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850–2020)



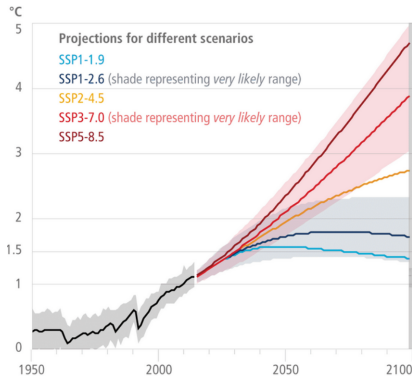
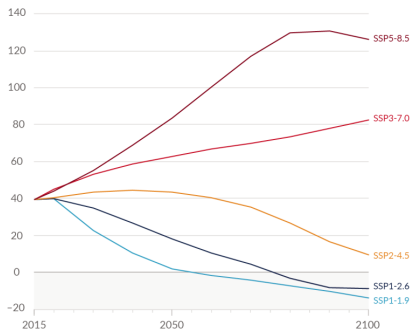
Trajetórias

Fonte: Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC

Notação: Referência SSPx-y

- x = Categoria de *Shared Socio-economic Pathways*
- y = Forçamento radiativo no final do século (em W/m²)
 - Forçamento radiativo $\approx$ energia que entra na atmosfera – energia que sai
 - y = razão do forçamento radiativo em 2100 versus 1750

Carbon dioxide (GtCO₂/yr)



Crise climática e computação

Dois pontos de vista (1 de 2)

① Computação como solução

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

Crise climática e computação

Dois pontos de vista (2 de 2)

① Computação como problema

- Ilusão do “desmaterializado”, algo não físico, virtual, sem custo
 - Tecnologias de computação, no entanto, são muito físicas e consumidoras de recursos
- Aceleradora de novos modos de consumo e uso
 - Exemplo: *streaming*¹ e publicidade direcionada por sistemas de recomendação

Os dois pontos de vista se entrelaçam

¹<https://youtu.be/whML39I7Q7Y?t=1593>

https://edge-intelligence.imag.fr/trajectory_app.html

Como avaliar os impactos ambientais de uma solução de computação?

Foco no impacto ambiental

- Textos de referência :
 - ① ITU-T L.1410, L.1450 e L.1480 (*International Telecommunication Union*)
 - ② *Net Carbon Impact Assessment Methodology for ICT Solutions*²
- Síntese abordada aqui :
 - ① **Indicadores de impacto**
 - ② **Perímetro: Escopo, Ordem, Fases do ciclo de vida**

²<https://www.greendigitalcoalition.eu/net-carbon-impact-assessment-methodology-for-ict-solutions/>

Indicadores de impacto

Alguns exemplos

- Mais usados
 - 1 Consumo de energia primária (eletricidade, combustíveis)
 - 2 Aquecimento global (emissões de gases de efeito estufa)
- Menos usados, mas importantes
 - 1 Uso de água
 - 2 Esgotamento de recursos abióticos (minerais não fósseis)
 - 3 Radiações ionizantes (danos humanos e ecossistemas por radionuclídeos)
 - 4 Artificialização do solo (instalações de data centers)

Indicadores de impacto³

Aquecimento Global

- Medido em kg de CO₂ equivalente emitido
- Equivalente CO₂:
 - Vários GEE com potencial de aquecimento global (GWP)
 - CO₂ é a referência (GWP = 1)
 - **Pergunta:** O que significa um GWP = 10?

³Fonte da tabela: Jones, S. W. (2023, December). Modeling 300mm wafer fab carbon emissions. In 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM) (pp. 1-4). IEEE.

Indicadores de impacto³

Aquecimento Global

- Medido em kg de CO₂ equivalente emitido
- Equivalente CO₂:
 - Vários GEE com potencial de aquecimento global (GWP)
 - CO₂ é a referência (GWP = 1)
 - **Pergunta:** O que significa um GWP = 10?
 - **Resposta:** Um gás com GWP = 10 tem dez vezes mais potencial de aquecimento que CO₂

³Fonte da tabela: Jones, S. W. (2023, December). Modeling 300mm wafer fab carbon emissions. In 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM) (pp. 1-4). IEEE.

Indicadores de impacto³

Aquecimento Global

- Medido em kg de CO₂ equivalente emitido
- Equivalente CO₂:
 - Vários GEE com potencial de aquecimento global (GWP)
 - CO₂ é a referência (GWP = 1)
 - **Pergunta:** O que significa um GWP = 10?
 - **Resposta:** Um gás com GWP = 10 tem dez vezes mais potencial de aquecimento que CO₂

Formula	GWP – 100 year
C2F6	11,100
C3F8	8,900
C4F6	
c-C4F8	9,540
c-C5F8	2
CF4	6,630
CH2F2	677
CH3F	116
CHF3	12,400
N2O	264
NF3	16,100
SF6	23,500

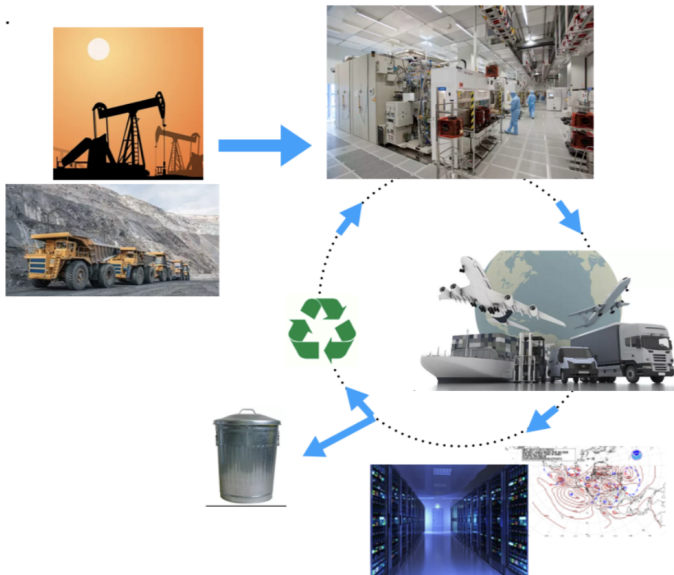
³Fonte da tabela: Jones, S. W. (2023, December). Modeling 300mm wafer fab carbon emissions. In 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM) (pp. 1-4). IEEE.

Emissões relacionadas à eletricidade

Mix energético

- ① <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- ② <https://app.electricitymaps.com/map/24h>
- ③ Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)
 - <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>

Fases do ciclo de vida de um equipamento (ex: servidor)



Fases do ciclo de vida de um equipamento (ex: servidor)

Extração de matéria prima



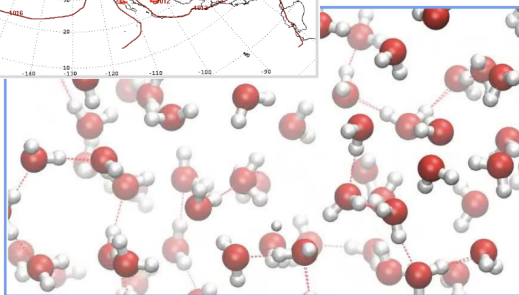
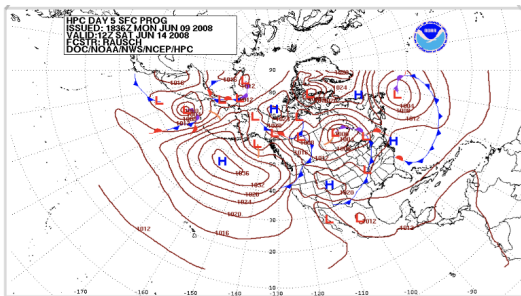
Fases do ciclo de vida de um equipamento (ex: servidor)

Fabricação



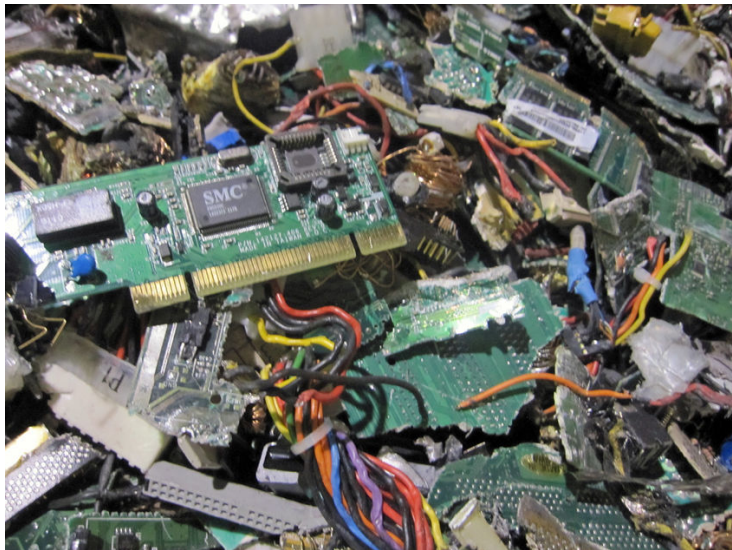
Fases do ciclo de vida de um equipamento (ex: servidor)

Utilização



Fases do ciclo de vida de um equipamento (ex: servidor)

Fim de vida



Dois conceitos diferentes, mas frequentemente mencionados :

① Escopo⁴

- Escopo 1 : Emissões diretas de fontes possuídas ou controladas
- Escopo 2 : Emissões relacionadas ao consumo de energia
- Escopo 3 : Emissões relacionadas à cadeia de valor (transporte de equipamentos, fabricação, fim de vida)

② Ordem⁵

- Primeira ordem : Impactos relacionados ao ciclo de vida da solução
- Segunda ordem : Consequências diretas após a implementação da solução
- Efeitos de ordem superior : Consequências de impactos de segunda ordem, frequentemente devido a mudanças nos padrões de consumo, comportamento, estilo de vida, etc. Efeitos rebote (*rebound effect*).

⁴<https://ghgprotocol.org/>

⁵<https://www.greendigitalcoalition.eu/assets/uploads/2024/04/EGDC-Net-Carbon-Impact-Assessment-Methodology-for-ICT-Solutions.pdf>

Situação prática

Desenvolvimento de uma plataforma de *streaming* (1 de 3)

- Indicador : emissões de CO₂
- Fases do ciclo de vida
 - **Matérias-primas** : extração de metais para fabricar a infraestrutura de TI (servidores, rede, etc.)
 - **Fabricação** : manufatura do hardware (CPU, memória, armazenamento, GPU, roteadores de rede, fibra óptica, torres de rede móvel)
 - **Distribuição** : entrega do hardware
 - **Uso** : eletricidade consumida pela plataforma (desenvolvimento + uso pelos clientes + infraestrutura de rede) multiplicada pelo mix energético da eletricidade
 - **Fim de vida** : descarte ou reciclagem do hardware

Situação prática

Desenvolvimento de uma plataforma de *streaming* (2 de 3)

- Escopo

- **Escopo 1** : Sem emissões
- **Escopo 2** ⁶ : Emissões relacionadas ao consumo de eletricidade do desenvolvimento + possível hospedagem do serviço no local (fase de uso)
- **Escopo 3** : Emissões relacionadas à eletricidade consumida pelos clientes, infraestrutura de rede e hospedagem externa (fase de uso). Emissões relacionadas às fases de matérias-primas, fabricação e fim de vida

⁶Escopo 2 é o componente mais considerado atualmente

Situação prática

Desenvolvimento de uma plataforma de *streaming* (3 de 3)

- Ordem

- **Primeira ordem** : Emissões relacionadas a todos os componentes mencionados acima
- **Segunda ordem** : Emissões relacionadas ao consumo de mídia física (DVD) (redução de emissões). Emissões relacionadas à demanda dos clientes (aumento de emissões)
- **Efeitos de ordem superior** : Emissões relacionadas às mudanças de comportamento induzidas pelo serviço :
 - Streaming em celular + rede móvel
 - Vício em vídeos curtos
 - Consumo induzido por publicidade direcionada, via anúncios integrados no serviço ou influenciadores
 - Mudança de infraestrutura para atender à demanda (4G → 5G → 6G → ...)

O efeito rebote

- Conceito da economia : Paradoxo de Jevons⁷
- À medida que os avanços tecnológicos aumentam a eficiência com que um recurso é utilizado, o consumo total desse recurso pode aumentar em vez de diminuir
- **Pensamento geral:**
 - Rebote direto:** um serviço se torna mais eficiente → ele se torna mais barato/mais prático/mais atraente → ele é mais utilizado → o consumo de recursos aumenta.
 - Rebote indireto:** reduzir o consumo de recursos em um setor pode gerar consumo em outro setor, pois os recursos são reinvestidos (em dinheiro ou em tempo).

⁷https://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxo_de_Jevons

Ferramentas existentes (1 de 2)

- Fase de uso (consumo elétrico na infraestrutura de TI local)
 - Wattímetros físicos e de software
 - Tecnologias RAPL (CPU) e NVML (GPU Nvidia)
 - Ferramentas: Perf⁸, CodeCarbon⁹, Alument¹⁰
- Outras fases
 - Base IMPACTS digital da ADEME¹¹
 - Datavizta¹²
 - Ecoinvent¹³ (base paga)
 - Algumas fases, como fim de vida e distribuição (transporte), às vezes não são consideradas

⁸<https://www.man7.org/linux/man-pages/man1/perf.1.html>

⁹<https://codecarbon.io/>

¹⁰<https://alument.dev/>

¹¹<https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-impact?idDocument=167>

¹²<https://dataviz.boavizta.org/>

¹³<https://ecoinvent.org/>

Ferramentas existentes (2 de 2)

- Efeitos de ordem superior e efeitos rebote
 - Análises qualitativas *ad-hoc* (avaliação caso a caso)
 - Área de pesquisa recente

O que podemos fazer?

Algumas sugestões

- Usar computação com intenção cuidadosa em direção à sustentabilidade (GreenICT e ICT4Green)
 - GreenICT e ICT4Green são desejáveis, mas certamente não está à altura da crise climática
- Medir e estimar os impactos em todo o ciclo de vida com o escopo mais amplo possível
 - Não olhar unicamente para o consumo elétrico
- Informar os usuários/clientes dessas medições e estimativas
- Questionar a relevância das soluções
 - Impossível normalizar a “necessidade”.
Muito útil? Muito supérfluo? Conforto ou necessidade?
 - Risco de superconsumo/super-atratividade/vício?

Para saber mais

- International Telecommunication Union (ITU). L.1480 : Enabling the Net Zero transition: Assessing how the use of information and communication technology solutions impact greenhouse gas emissions of other sectors (2022)¹⁴
- European Green Digital Coalition (EGDC). Net-Carbon Impact Assessment Methodology (2024)¹⁵
- Luccioni, A. S., Strubell, E., & Crawford, K. (2025). From Efficiency Gains to Rebound Effects: The Problem of Jevons' Paradox in AI's Polarized Environmental Debate. arXiv preprint arXiv:2501.16548.

Obrigado!

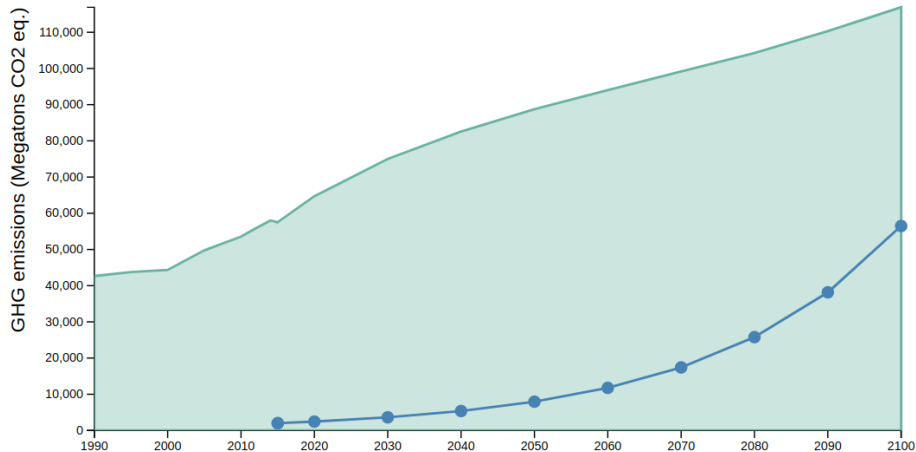
contato: `danilo.carastan-dos-santos@univ-grenoble-alpes.fr`
`https://danilo-carastan-santos.github.io/`

¹⁴<https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1480-202212-I>

¹⁵<https://www.greendigitalcoalition.eu/net-carbon-impact-assessment-methodology-for-ict-solutions/>

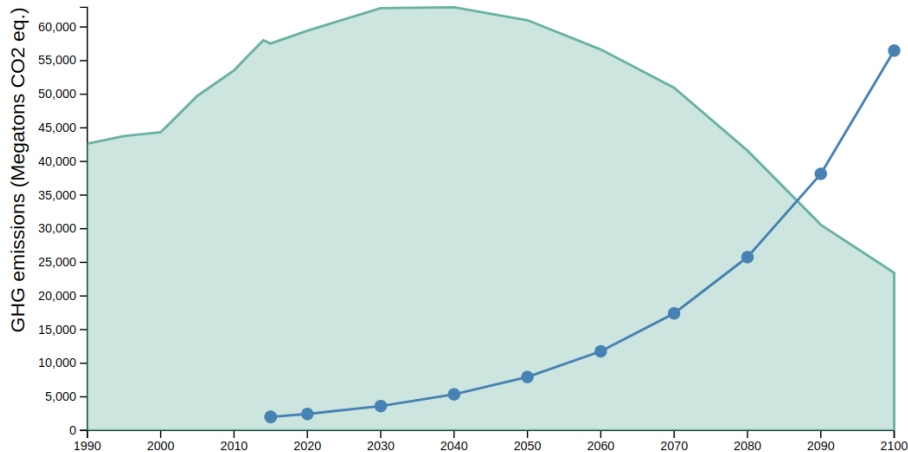
Backup Slide

SSP3-7.0, Crescimento anual: 4%, Parte das emissões globais em 2015: 3,5%



Backup Slide

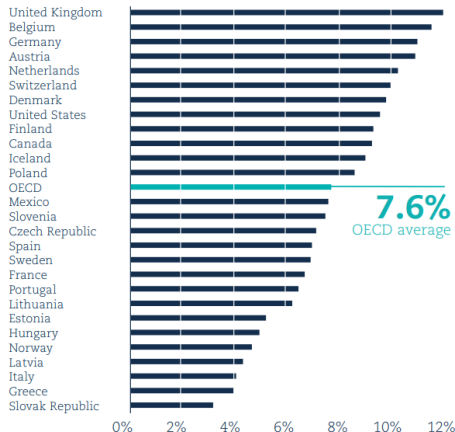
SSP2-4.5, Crescimento anual: 4%, Parte das emissões globais em 2015: 3,5%



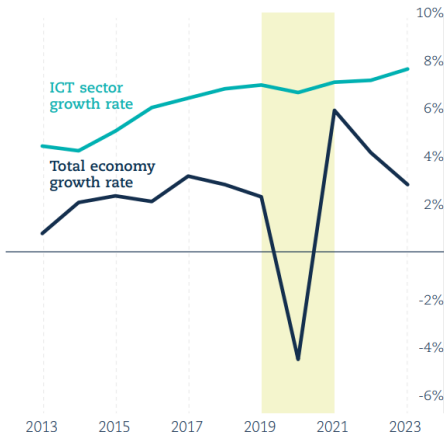
Backup Slide¹⁶

Estimates show strong growth of the ICT sector in 2023.

Predicted ICT sector growth rate, 2023



The ICT sector shrugged off the COVID-19 pandemic, in contrast to the broader economy.



¹⁶Fonte:

https://www.oecd.org/en/publications/2024/05/oecd-digital-economy-outlook-2024-volume-1_d30a04c9.html

Shared Socio-economic Pathways

5 categories

