

Análise de diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos e baterias na redução de CO₂ na operação de data centers

Yannis Bianchini Pontuschka, Daniel Cordeiro¹

¹Escola de Artes, Ciências e Humanidades — Universidade de São Paulo — São Paulo, SP — Brasil

Abstract. *The exponential increase in the use of online services in the last decades has triggered greater concern for sustainability, thus forming the Sustainable Computing area, focused on addressing environmental concerns in computing systems. In this context, this study analyzes different technologies for photovoltaic panels and batteries in a system consisting of globally distributed data centers, using a simulator based on linear programming. We demonstrate that the selection of these technologies directly impacts carbon emissions, highlighting the need to consider aspects of sustainability and durability when choosing technologies to mitigate environmental impact.*

Resumo. *O aumento exponencial da utilização de serviços online nas últimas décadas desencadeou uma maior preocupação à sustentabilidade, formando-se, então, a área Computação Sustentável, focada em abordar preocupações ambientais em sistemas computacionais. Neste contexto, este estudo analisa diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos e baterias em um sistema composto de data centers distribuídos globalmente, por meio de um simulador baseado em programação linear. Demonstramos que a seleção dessas tecnologias impacta diretamente nas emissões de carbono, evidenciando a necessidade de considerar aspectos de sustentabilidade e durabilidade na escolha de tecnologias para mitigar o impacto ambiental.*

1. Introdução

Na era da computação em nuvem, testemunhamos uma demanda crescente por serviços digitais, impulsionando um aumento exponencial no tráfego global da Internet desde 2010, conforme relatado pelo International Energy Agency (IEA)¹. Este crescimento vertiginoso ultrapassou vinte vezes o volume anterior, impulsionando proporcionalmente o custo energético da infraestrutura de hardware que sustenta essa expansão global. Tal infraestrutura está relacionada aos data centers (DCs), centros de processamento e armazenamento de dados em larga escala, os quais consomem entre 1% e 1,5% de toda a energia disponível no mundo¹. Essa expansão tecnológica e seu consequente aumento na demanda energética levantam sérias preocupações sobre as emissões de poluentes associados à produção dessa energia. Pesquisadores têm se dedicado intensamente à busca por estratégias e soluções capazes de mitigar o impacto ambiental decorrente das atividades da Tecnologia da Informação (TI).

A área de Computação Sustentável se concentra em abordar as preocupações ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas computacionais. Especificamente,

¹IEA, *Data Centres and Data Transmission Networks*. Disponível em <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>.

este trabalho encaixa-se na área de Computação Sustentável em Nuvem, ou *Green Cloud Computing*, cujo foco está em desenvolver DCs mais sustentáveis, i.e., DCs projetados de forma a minimizar seu impacto ambiental e maximizar sua eficiência energética. Para isso, fontes limpas de energia e armazenamento energético local são amplamente utilizadas.

Diante desse contexto, esse estudo analisa a utilização de diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos (PVs) e de baterias em um sistema composto por múltiplos DCs, distribuídos geograficamente pelo globo. A análise está relacionada à emissão de gás carbônico desse sistema, em um intervalo de um ano de carga de trabalho. No sistema analisado, cada DC possui acesso à rede elétrica local, baterias que possibilitam o armazenamento de energia, e fonte renovável por meio de PVs. Nosso objetivo é estender o trabalho de [Silva Vasconcelos et al. 2023], considerando diferentes tipos de tecnologias de painéis solares e baterias, questão discutida nas próximas seções.

2. Simulador

Como base para esse estudo, utilizamos o simulador ² de [Silva Vasconcelos et al. 2023]. O objetivo do simulador é reduzir a pegada de carbono de uma plataforma em nuvem por meio do dimensionamento de PVs e de baterias, e do agendamento estratégico da carga de trabalho entre os DCs, os quais são geograficamente distribuídos. O simulador utiliza uma técnica de otimização combinatória denominada programação linear, que tem como objetivo encontrar os valores ótimos para um conjunto de variáveis de decisão, sujeitas a um conjunto de restrições lineares. Dentre os parâmetros de entrada do simulador, tem-se:

- pegada de carbono das PVs, para cada data center ($\text{g CO}_2\text{eq} / \text{m}^2$);
- pegada de carbono na produção da bateria ($\text{g CO}_2\text{eq} / \text{kWh}$);
- eficiência de carga e de descarga da bateria (%);
- vida útil da PV (anos);
- eficiência de conversão da PV (%);
- irradiação solar para a localização de cada DC (kWh / m^2).

Como saída, o simulador computa métricas relacionadas à sustentabilidade, como o *Green Energy Coefficient* (GEC), o total de emissão de carbono após o fim da execução de toda carga de trabalho e o dimensionamento das PVs e baterias, para cada DC. A localização dos DCs configurada para nossa simulação é idêntica a de [Silva Vasconcelos et al. 2023], a qual é composta de nove DCs geograficamente distribuídos por todos os continentes.

3. Tecnologias analisadas

As três tecnologias de PV para o teste foram: silício amorfo (a-si), silício monocristalino (mono-si) e telureto de cádmio (CdTe) (Tabela 1)³. Para tecnologias de baterias, consideramos as de chumbo-ácido e íons de lítio (íon-lítio). Sua pegada de carbono está relacionada à emissão de CO₂ em sua fase de produção. A coluna

²O repositório do simulador está publicamente disponível em: <https://gitlab.com/migvasc/lowcarboncloud>.

³Os dados dos PVs são baseados no *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) — Disponível em <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

eficiência na Tabela 2 refere-se tanto à eficiência de carga quanto de descarga das respectivas tecnologias. Os dados para as baterias são baseados em [Jiao and Månsson 2023, Akbari et al. 2019, da Silva Lima et al. 2021]. Ressaltamos que mudamos apenas os parâmetros relacionados às tecnologias nas simulações; dados como a irradiação solar e número de núcleos de processamento por DC ficaram inalterados. Para cada teste, considera-se uma tecnologia de PV e uma de bateria, as quais simulamos sua utilização pelos DCs do nosso sistema. Para três tecnologias de PV e duas de bateria, todas as seis combinações diferentes foram simuladas. Para validação dos dados, pode-se baixar o repositório², configurar o arquivo `2021.js` da pasta `input` conforme a combinação escolhida, e executar.

Tabela 1. Dados para as tecnologias de PV testadas

Tecnologia	Eficiência (%)	Ciclo de vida (anos)	Pegada de carbono (kgCO₂eq/m²)
mono-si	26,7	25	403,0
CdTe	22,3	25	61,7
a-si	14,0	28	82,2

Tabela 2. Dados para as tecnologias de bateria testadas

Tecnologia	Eficiência (%)	Ciclo de vida (anos)	Pegada de carbono (gCO₂eq/kWh)
Chumbo-ácido	75,0	8,5	85.530
Íon-lítio	92,5	11,5	136.760

4. Resultados

Após analisar os dados apresentados (Figura 1) é evidente que a seleção das tecnologias a serem implementadas teve um impacto significativo nas emissões de CO₂. Notavelmente, o uso de tecnologias CdTe e íon-lítio resultou em emissões que foram mais de 50% menores em comparação com a combinação de mono-si e chumbo-ácido. Isso indica a importância crítica das escolhas tecnológicas nos resultados finais. Além disso, constatou-se que a escolha da tecnologia fotovoltaica teve um impacto mais substancial nas emissões do que a escolha da tecnologia da bateria. Os cenários que adotaram a tecnologia mono-si registraram as maiores emissões de CO₂, enquanto aqueles que optaram pelo uso de CdTe resultaram em emissões menores. Os cenários com tecnologia a-si situaram-se em uma posição intermediária entre esses extremos.

A disparidade entre as tecnologias mono-si e CdTe surge devido a fatores cruciais como o ciclo de vida da bateria e a pegada de carbono na fase de produção. A tecnologia CdTe possui uma vida útil mais longa e uma pegada de carbono menor em comparação com a tecnologia mono-si. No que diz respeito às baterias, os cenários que empregam íon-lítio revelam emissões inferiores, embora tenham uma pegada de carbono maior do que a chumbo-ácido, devido à sua maior durabilidade e eficiência.

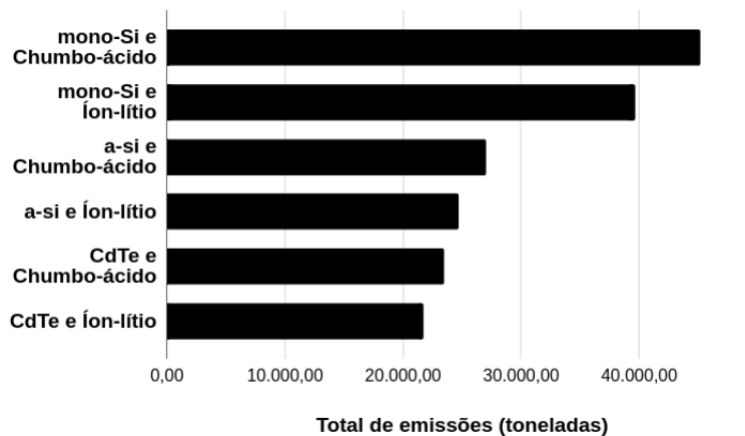


Figura 1. Total de emissões de CO₂ para combinações entre tecnologias de PV e de bateria

5. Conclusão

A análise anterior exemplifica a abordagem da Computação Sustentável, enfatizando a importância de considerar aspectos relacionados à durabilidade e sustentabilidade, além da eficiência, dos dispositivos eletrônicos. Os resultados demonstram que avaliar fatores isoladamente pode induzir a previsões incorretas sobre emissão de CO₂. Por exemplo, é possível constatar que a pegada de carbono da tecnologia chumbo-ácido é inferior à de íon-lítio e erroneamente prever que combinações com a primeira tecnologia tenham emissões menores. Todavia, como já pontuado, o oposto ocorre na prática. Portanto, uma análise abrangente de todas as variáveis é crucial para os administradores de DCs entenderem o impacto ambiental de suas estruturas e selecionarem as tecnologias com cuidado.

Este trabalho é parte do projeto “Tendências em Computação de Alto Desempenho, do Gerenciamento de Recursos a Novas Arquiteturas de Computadores”, processo nº 2019/26702-8, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- Akbari, H., Browne, M. C., Ortega, A., Huang, M. J., Hewitt, N. J., Norton, B., and McCormack, S. J. (2019). Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 192:144–168. Thermal Energy Storage for Solar Applications.
- da Silva Lima, L., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmás, D., Laget, H., Corbisier, D., Mertens, J., and Dewulf, J. (2021). Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46:101286.
- Jiao, Y. and Månsson, D. (2023). Greenhouse gas emissions from hybrid energy storage systems in future 100 *Journal of Energy Storage*, 57:106167.
- Silva Vasconcelos, M. F., Cordeiro, D., da Costa, G., Dufossé, F., Nicod, J.-M., and Rehn-Sonigo, V. (2023). Optimal sizing of a globally distributed low carbon cloud federation. In *CCGrid 2023 - IEEE/ACM 23rd International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing*, pages 1–13, Bangalore, India. 13 p.