

Computação Sustentável e Energeticamente Eficiente

Daniel Cordeiro¹, Emilio Francesquini², Alessandro Santiago dos Santos³,
Alvaro Luiz Fazenda⁴, Silvana Rossetto⁵ *

¹Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil

²Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, Brasil

³Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, Brasil

⁴Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), São José dos Campos, Brasil

⁵Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil

daniel.cordeiro@usp.br, e.francesquini@ufabc.edu.br, alesan@ipt.br
alvaro.fazenda@unifesp.br, silvana@ic.ufrj.br

Resumo. Apresentamos refinamentos sobre os desafios sugeridos nas temáticas relacionadas com Computação Sustentável e os impactos sociais e econômicos da computação. Discutimos as demandas relacionadas com problemas computacionalmente complexos que requerem infraestruturas de processamento de alto desempenho e, conseqüentemente, geram demandas por soluções de hardware e software energeticamente eficientes. Destacamos a necessidade de incorporar essas questões na formação dos profissionais da área, incentivando e dando condições para se adotar abordagens de desenvolvimento de soluções computacionais cientes do consumo energético e ambientalmente sustentáveis. Por fim, propomos potenciais métricas para avaliação do progresso das soluções propostas.

Abstract. We present refinements on the challenges suggested in the themes related to sustainable computing and the social and economic impacts of computing. We discuss the demands related to complex computational problems that require high-performance processing infrastructures and, consequently, generate demands for energy-efficient hardware and software solutions. We highlight the need to incorporate these issues into the training of professionals in the field, encouraging and enabling them to adopt energy-conscious and environmentally sustainable approaches to developing computing solutions. Finally, we propose potential metrics for evaluating the progress of the proposed solutions.

1. Contexto atual

Os desafios ambientais contemporâneos são de escala global e exigem uma abordagem interdisciplinar. Entre eles, destacam-se a drástica redução da biodiversidade em diversos biomas, a poluição atmosférica, o aquecimento global, a alta pegada energética e os danos causados por desastres naturais. Os avanços significativos em tecnologias de informação

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos #2023/00811-0 (“EcoSustain-Ciência de Dados e Computação para o Meio Ambiente”) e #2024/01115-0 (“CCD-Cidades Carbono Neutro”).

e comunicação (TIC), ciência de dados e inteligência artificial nas últimas décadas oferecem oportunidades promissoras para aplicar essas inovações em prol do meio ambiente. No entanto, o progresso da computação e a crescente complexidade dos problemas abordados têm gerado uma demanda substancial por energia. Um estudo de [Jones et al. 2018] aponta que atualmente cerca de 12% da energia global é consumida por *data centers*, computadores pessoais, celulares e TVs, com previsão de aumento para 20,9% até 2030. Para conter ou reduzir o consumo de energia, é necessário um esforço em várias frentes.

Um primeiro aspecto envolve o desenvolvimento de soluções computacionais — tanto de hardware quanto de software — que sejam energeticamente eficientes e de alto desempenho. Outra, de caráter mais humano, refere-se à revisão dos currículos de formação dos profissionais da área, permitindo que cultivem uma abordagem de desenvolvimento consciente em relação ao consumo energético, e que seja possível lhes dar um suporte adequado para atender às demandas sem sobrecarga excessiva de trabalho. O trabalho de Carro e Nazar [Carro and Nazar 2023] oferece uma visão abrangente sobre os desafios da computação energeticamente eficiente no contexto de aplicações com uso intensivo de dados. Os autores destacam que, para garantir a continuidade da evolução da computação, é fundamental buscar soluções mais eficazes para transformar algoritmos complexos em hardware capaz de executá-los de maneira eficiente e com economia de energia. Eles argumentam que a simples ampliação da quantidade de hardware para melhorar o desempenho computacional não tem se mostrado uma solução escalável nem ambientalmente sustentável. No âmbito do software e suas aplicações, um exemplo relevante é a computação aproximada, que propõe reduzir controladamente a precisão dos resultados em troca de uma economia significativa de energia durante o processamento. Alguns exemplos dessa abordagem incluem desde cálculos numéricos [Sudo et al. 2022] até simulações de tráfego urbano em cidades verdes [Rocha et al. 2022].

Outro aspecto diz respeito ao modelo de computação em nuvem que hoje é praticamente o padrão para novos desenvolvimentos e implantação de software escalável. Tecnologias vinculadas à virtualização e à computação em nuvem têm transformado a indústria, ao reduzir os custos de infraestrutura de TI, facilitar a implantação de novos produtos, diminuir os gastos com manutenção e permitir o ajuste rápido dos recursos conforme as variações de carga de trabalho [Oda et al. 2018]. Grandes empresas, como Netflix, LinkedIn e Facebook, adotam a computação em nuvem para oferecer soluções eficientes e escaláveis. No entanto, na base desse modelo estão os *data centers* de grande escala, que concentram um elevado consumo de energia em áreas relativamente pequenas. Além disso, para garantir alta disponibilidade e tolerância a falhas, esses *data centers* costumam ser geograficamente distribuídos, gerando impactos ambientais em várias regiões. À medida que o uso de soluções em nuvem cresce, aumenta também a necessidade de melhorar a eficiência energética e reduzir a pegada de carbono dessas grandes instalações [Cordeiro et al. 2023]. *Computação Verde* é uma área consolidada da Computação, mas repensar a Computação para torná-la adaptável aos seus impactos ambientais (ou seja, torná-la sustentável) em tal escala é um novo problema em si. O desafio que se apresenta é, portanto, desenvolver estratégias que tornem as aplicações que dependem de infraestruturas de nuvem em larga escala mais sustentáveis, por meio do projeto, gerenciamento e otimização de sua execução de forma eficiente. Esse esforço envolverá não apenas a academia e a indústria, mas também profissionais de ciência da computação de diversas áreas [Cordeiro et al. 2023]. Como mencionado

anteriormente, essa questão transcende a tecnologia, englobando também a formação humana. Os currículos acadêmicos em computação precisarão se adaptar para refletir os avanços nas pesquisas dessa área, promovendo uma nova cultura de desenvolvimento de soluções computacionais que considere não apenas a complexidade de processamento, o uso de memória e a comunicação, mas também o consumo de energia.

Tais exemplos destacam a relevância da computação sustentável e como esta se torna cada vez mais evidente e urgente. A criação de soluções computacionais que considerem tanto o consumo energético quanto o impacto ambiental é uma necessidade crítica. Trata-se de uma área estratégica, pois possibilita o desenvolvimento de sistemas capazes de resolver problemas complexos e processar grandes volumes de dados de forma eficiente, robusta e sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto social. O gerenciamento de recursos ciente de energia traz desafios desde o dimensionamento do hardware, considerando a pegada de carbono (manufatura, uso e descarte) até o escalonamento de recursos ciente de energia com garantia de qualidade de serviço, levando-se em conta a intermitência imposta pelo uso de energias renováveis. O uso de soluções de software e hardware especializado (ex., FPGAs, ASICs, TPUs, VPUs) pode tornar mais eficientes — em termos de consumo de energia, tempo de processamento e custo financeiro — a resolução de problemas de domínio específico. Nesse sentido, faz-se necessário a construção de ambientes de desenvolvimento de software mais acessíveis para os desenvolvedores.

2. Desafio

O desafio que se coloca pode ser subdividido nas seguintes questões: (i) como desenvolver soluções computacionais — tanto em termos de hardware como de software — energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis? (ii) como tornar as infraestruturas de computação em larga escala — necessárias para lidar com problemas complexos — mais sustentáveis? (iii) como definir e inserir métricas de consumo de energia na avaliação de algoritmos e aplicações? (iv) como motivar e dar condições para que os programadores desenvolvam soluções cientes do consumo de energia e dos impactos ambientais?

3. Soluções possíveis

[Cordeiro et al. 2023] apontam algumas possíveis direções para lidar com as questões colocadas, organizadas em três temáticas apresentadas nas subseções seguintes:

Gerenciamento de Recursos Ciente de Consumo de Energia. As plataformas de nuvem estão investindo no uso de energia renovável, mas ainda cabe ao programador utilizar eficientemente os recursos disponíveis (incluindo hardware especializado), garantir o balanceamento de carga e minimizar a movimentação de dados. Os futuros *data centers* com baixo impacto ambiental e alta eficiência energética precisarão aumentar ainda mais o uso de fontes de energia renováveis. Será necessário fornecer aos desenvolvedores de aplicações ferramentas para manter o escopo de seu desenvolvimento dentro do problema investigado e para minimizar o esforço necessário para executar suas aplicações na nuvem, de forma eficiente em termos de desempenho e energia. **Hardware e Software Especializados.** A criptomineração é um caso de sucesso de hardware especializado para fornecer soluções com melhor desempenho e menor consumo de energia para um problema específico (com transição de CPUs para GPUs, FPGAs e ASICs). Melhorias adicionais podem ser alcançadas por software especializado que considera as características

intrínsecas de uma aplicação. A Computação Aproximada é um exemplo de abordagem na qual a eficiência energética e o ganho de desempenho podem ser alcançados com soluções não exatas. Os futuros *data centers* podem se tornar mais eficientes ao fornecer hardware especializado ou soluções de Software como Serviço (SaaS) que considerem as características de cada aplicação, em vez de uma solução única. **Computação de Alto Desempenho.** No contexto da computação de alto desempenho, os benefícios de usar recursos de nuvem pública a tornam uma alternativa atraente aos caros clusters locais. No entanto, o ecossistema de software necessário para tornar possível uma plataforma de nuvem sustentável para computação de alto desempenho ainda não está maduro. Serão necessárias novas soluções para gerenciar e executar com eficiência as aplicações e fluxos de trabalho científicos em nuvens. As soluções atuais deverão ser adaptadas para prever o consumo de energia e a pegada de carbono das aplicações, ajudando os pesquisadores a construir novos escalonadores e soluções de forma geral, cientes da energia.

4. Potenciais métricas de avaliação

Como potenciais métricas de avaliação, podemos considerar as listadas a seguir. Essas métricas podem ajudar a fornecer uma avaliação abrangente, permitindo identificar áreas de melhoria e assegurar que os objetivos de sustentabilidade sejam alcançados. **Consumo de Energia:** (i) *Energia Total Consumida*, medida em kilowatt-hora (kWh) durante a execução de uma aplicação ou consumida por um *data center*; e (ii) *Eficiência Energética*, relação entre os resultados obtidos e a energia consumida. **Impacto Ambiental:** (i) *Pegada de Carbono*, emissões de CO₂ associadas à energia consumida, incluindo a análise do ciclo de vida do hardware; e (ii) *Redução de Resíduos*, avaliação do volume de resíduos eletrônicos gerados e estratégias de reciclagem ou reutilização. **Desempenho Computacional:** (i) *Makespan*, duração total para executar tarefas específicas ou processar grandes volumes de dados; e (ii) *Vazão*, quantidade de dados processados por unidade de tempo. **Escalabilidade:** *Capacidade de Expansão*, avaliação de como o sistema pode ser ampliado para atender a aumentos na carga de trabalho sem comprometer o desempenho ou a eficiência energética. **Custo Financeiro:** (i) *Custo Operacional*, total gasto com energia e recursos; e (ii) *Custo por Tarefa/Processamento*, custo médio associado à execução de tarefas específicas. Importante destacar que para que uma proposta sustentável tenha atratividade, é necessário que o custo financeiro seja compatível com o custo atual. **Sustentabilidade Social:** *Acessibilidade*, medida de quão acessíveis são as soluções desenvolvidas para diferentes usuários e desenvolvedores. **Utilização de Hardware Especializado:** *Desempenho do Hardware*, comparação entre hardware especializado (ex. FPGAs, ASICs) e hardware genérico em termos de eficiência energética e desempenho.

Referências

- Carro, L. and Nazar, G. L. (2023). Desafios para a computação energeticamente eficiente. *Sociedade Brasileira de Computação*.
- Cordeiro, D., Franceschini, E., Amarís, M., Castro, M., Baldassin, A., and Lima, J. (2023). Green cloud computing: Challenges and opportunities. In *Anais Estendidos do XIX Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, pages 129–131, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

- Jones, N. et al. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *nature*, 561(7722):163–166.
- Oda, R., Cordeiro, D., and Braghetto, K. R. (2018). Dynamic resource provisioning for scientific workflow executions in clouds. In *2018 IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*, pages 291–294. IEEE.
- Rocha, F. W., Fukuda, J. C., Francesquini, E., and Cordeiro, D. (2022). Accelerating smart city simulations. In Gitler, I., Barrios Hernández, C. J., and Meneses, E., editors, *High Performance Computing*, pages 148–162, Cham. Springer International Publishing.
- Sudo, M. A., Fazenda, A. L., and Souto, R. P. (2022). Mixed precision applied on common mathematical procedures over gpu. In *Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho (SSCAD)*, pages 265–275. SBC.

Sobre os proponentes:

Daniel Cordeiro é Professor Doutor na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP. É Doutor em *Mathématiques et en Informatique* pela Université de Grenoble, França, e Mestre e Bacharel em Ciência da Computação pela USP. Suas áreas de pesquisa incluem Computação de Alto Desempenho, Teoria do Escalonamento e Computação Sustentável. Seus projetos de pesquisa atuais estão relacionados à execução sustentável (de baixo carbono) de aplicações de alto desempenho em plataformas de Computação em Nuvem geo-distribuídas (ID Lattes: 5322325760113475).

Emilio Francesquini é professor adjunto do Centro de Matemática, Computação e Cognição da UFABC. Possui pós-doutorado na UNICAMP, doutorado em dupla titulação pela USP (Doutor em Ciências) e pela Universidade de Grenoble-Alpes, França (UGA, *Docteur Spécialité Informatique*). É também Mestre e Bacharel em Ciência da Computação pela USP. Seus projetos de pesquisa atuais incluem o emprego de computação aproximada para redução do impacto ambiental de sistemas de alto desempenho; além do estudo e implantação de soluções de escalonamento verdes em plataformas de computação em nuvem geo-distribuídas (ID Lattes: 8949216028517727).

Alessandro Santiago possui pós-doutorado na Universidade de Lisboa no tema de cidades neutras de carbono, doutorado e mestrado pela USP e bacharelado em Ciência da Computação pela UFMT. Atualmente é coordenador do mestrado profissional em computação aplicada e gerente de apoio de negócios de tecnologias digitais do IPT, lidando com desafios de pesquisa em cidades inteligentes, internet das coisas e monitoramento digital em sociedades de baixo carbono. Foi membro do comitê de contingência de combate ao coronavírus em São Paulo atuando no Sistema de Monitoramento Inteligente, em projetos de rodovias inteligentes pelo Estado de SP, e cooperação internacional com redes de pesquisas europeias (ID Lattes: 9738704704763672).

Álvaro Fazenda possui graduação em Computação Científica pela Universidade de Taubaté, mestrado e doutorado em Computação Aplicada pelo INPE e Pós-Doutorado pela University of Illinois at Urbana-Champaign. Atualmente é Professor Associado na UNIFESP. Atuou como Pesquisador Visitante no CPTEC/INPE e como professor assistente na Universidade de Taubaté. Tem experiência na área de Ciência da Computação e Computação Científica, com ênfase em: processamento de alto desempenho, sistemas distribuídos, ciência cidadã, dinâmica de fluídos computacional, modelos numéricos de

previsão de tempo/clima e geoprocessamento (ID Lattes: 7606159905559544).

Silvana Rossetto possui graduação em Ciência da Computação e mestrado em Informática pela UFES, e doutorado em Informática pela PUC-Rio. Realizou o programa de doutorado sanduíche no exterior, pela Politecnico di Milano (2004/2005). Atua na área de Ciência da Computação, com ênfase em computação concorrente, paralela e distribuída. Atualmente exerce o cargo de Professor Associado no Instituto de Computação da UFRJ (ID Lattes: 0054098292730720).