



ARTIGO

COMPUTAÇÃO SUSTENTÁVEL PARA A REDUÇÃO DO IMPACTO SOCIOAMBIENTAL NO DESENVOLVIMENTO DE MODERNAS APLICAÇÕES

POR

Carro, Luigi; Cordeiro, Daniel
carro@inf.ufrgs.br, daniel.cordeiro@usp.br

As Nações Unidas consideram que o mundo está em estado de emergência climática. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à queima de combustíveis fósseis foram suficientes para elevar a temperatura média global entre 1,1 e 1,2 °C [1]. Desde 2015, o Brasil é signatário do Acordo de Paris, tratado internacional que abrange mitigação, adaptação e financiamento de ações voltadas ao enfrentamento das mudanças climáticas. Em seu Plano Clima, que subsidiou a nova Contribuição Nacionalmente Deter-

minada (NDC, na sigla em inglês), que define as metas de mitigação e adaptação do Brasil para 2035 no âmbito do Acordo de Paris, o governo brasileiro se comprometeu a reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% até 2035, em relação aos níveis de 2005 [2].

Os avanços significativos em Tecnologias de Informação 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.

Estima-se que o setor de TIC seja responsável pelo uso de 5 a 6% de toda a energia produzida no mundo. Segundo relatório do Banco Mundial e da União Internacional das Telecomunicações da ONU, TICs foram responsáveis por pelo menos 1,7% de todas as emissões globais de gases de efeito estufa, enquanto outros estudos alertam que o setor pode ser responsável por até 4% de todas as emissões. Para efeito de comparação, o setor de aviação contribuiu com 2% das emissões de GEE em 2022.

A Agência Internacional de Energia alerta para uma tendência de forte aumento na demanda de energia [4]. O aumento do uso de tecnologias de Blockchain e de Inteligência Artificial poderá fazer com que o consumo de energia por data centers passe de 460 TWh (2% da demanda global em 2022) para o dobro até 2026; um aumento na demanda global de energia equivalente à adição de ao menos uma Suécia e no máximo uma Alemanha.

Tal tendência é insustentável. Não só a Computação passa a ser uma das grandes responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa mundiais, como também torna o acesso a essas novas tecnologias restrito àqueles que tiverem condições econômicas e políticas de prover e ter acesso a tamanha quantidade de energia. Enquanto países desenvolvidos promovem iniciativas como o Energy Efficiency Directive da União Europeia, que limitam

a quantidade de energia que pode ser utilizada por data centers e implementa políticas públicas de uso de energia renovável, países emergentes como o Brasil podem ser incapazes de aumentar a produção e distribuição de energia em tempo hábil e ter seu acesso a essas tecnologias limitado, aumentando a exclusão digital e prejudicando a soberania digital do país.

Reducir o impacto socioambiental da Computação é um grande (e urgente) desafio que envolve um trabalho de otimização em várias camadas, desde o desenvolvimento das aplicações até a sua execução em plataformas de computação.

Por um lado, precisamos de novas tecnologias que nos auxiliem a desenvolver software de baixo carbono [5]. O fim da Lei de Moore e o aumento da carga de trabalho computacional não permitirão que apenas melhorias no hardware sejam eficazes para limitar o consumo de energia da Computação. Para a criação de software de baixo carbono, precisamos trabalhar nos seguintes problemas que ainda requerem mais pesquisa científica:

Algoritmos Energeticamente Eficientes: desenvolver algoritmos que resolvam problemas computacionais de maneira energeticamente eficiente através da otimização e do uso consciente dos recursos, mediante técnicas diversas, tais como computação aproximada e algoritmos aproximados, obtendo soluções subótimas, porém, acuradas para o destino a que se presta;

Métodos de Programação Conscientes: o desenvolvimento de aplicações eficientes em energia e emissões deve permitir que

programadores monitorem seu desempenho e informem aos sistemas de execução características que os ajudem a otimizar os recursos computacionais, por exemplo, ao classificar tarefas de uma aplicação como sendo tarefas em lote (batch) ou iterativas, o gerenciador de recursos pode tomar decisões que minimizem o custo e recursos energéticos da execução, como postergar tarefas não urgentes ou movendo-as para outras localidades com mais disponibilidade de energias de baixo carbono. Hoje há escassez de programadores com treinamento adequado em técnicas de redução do consumo energético;

Automação Inteligente: desenvolver ferramentas que automatizem a aplicação de técnicas de redução de energia, tornando-as mais acessíveis aos programadores (por exemplo, perfiladores que permitam avaliar o desempenho computacional de uma aplicação considerando todos os escopos do Protocolo GHG).

De outro lado, o gerenciamento de recursos ciente de emissões permitirá que a execução dos softwares de baixo carbono faça melhor uso da energia renovável ou de baixo carbono disponível em diferentes localidades do planeta. Infraestruturas de computação distribuídas de grande escala, tais como plataformas públicas de Computação em Nuvem, permitem que desenvolvedores tenham acesso a recursos computacionais com diferentes níveis de emissões por kWh. Entretanto, ainda cabe ao programador utilizar eficientemente os recursos disponíveis.

A Computação de Alto Desempenho

estuda como otimizar o uso de recursos computacionais para tornar aplicações mais eficientes em termos de diferentes métricas de desempenho. Um desafio será adaptar tais técnicas para que as emissões de gases de efeito estufa sejam consideradas no processo de otimização da execução. Para isso, temos que revisitar as técnicas de computação de alto desempenho para fazer melhor uso de:

Hardware e Software Especializados: investir no desenvolvimento de hardware e software especializados para aplicações específicas, como a computação aproximada, a redução de energia em redes neurais, explorando novas arquiteturas e abordagens para considerar os indicadores de energia como fator de qualidade do produto;

Computação de Alto Desempenho Sustentável: criar plataformas de computação de alto desempenho que priorizem a eficiência energética e a gestão sustentável de recursos, equilibrando desempenho e consumo. Para tal, é preciso aperfeiçoar o gerenciamento de hardware, o balanceamento de carga e minimizar a movimentação de dados para reduzir o consumo energético.

Computação sustentável não é algo que faça parte dos assuntos comumente estudados por pesquisadores da Computação. Contudo, atualmente, este assunto ganhou relevância suficiente para que seja discutido como uma preocupação transversal em praticamente todas as subáreas da Computação. Em particular, as técnicas para a redução das emissões estão ligadas às áreas de Algoritmos e

Estrutura de Dados, Computação Distribuída, Computação de Alto Desempenho e Arquitetura de Computadores, Engenharia de Software, Sistemas Operacionais e Redes de Computadores.

Da mesma forma, Computação Sustentável também permeia os demais Grandes Desafios discutidos neste documento, em particular:

Inteligência Artificial e Ciência de Dados: é preciso investigar a criação de algoritmos de IA frugais (que façam o mesmo trabalho, mas com modificações que requeiram menos computação) e mais eficientes energeticamente;

Computação Social: o impacto da Computação nas mudanças climáticas deve ser uma das métricas a serem usadas para garantir a equidade, a responsabilização, a transparência e a ética do uso de soluções computacionais na sociedade;

Acesso Universal e Significativo à Internet: as infraestruturas de comunicação devem ser implantadas com preocupações com a eficiência operacional, o aumento do consumo de energia e a elevação dos níveis de emissão de GEE.

Outras áreas do conhecimento podem contribuir para a redução dos impactos socioambientais da Computação, tais como:

- *Engenharia:* a eficiência energética do hardware e da infraestrutura computacional deve ser aprimorada com novas tecnologias de resfriamento de data centers, de infraestrutura de comunicação, etc.
- *Gestão Ambiental e Engenharia*

Ambiental: a gestão do impacto ambiental deve passar a incluir o impacto da Computação, sendo necessário considerar novas métricas de poluição (por exemplo, como considerar o uso de minérios raros como impacto socioambiental da Computação?).

- *Química:* processos de resfriamento e de construção de data centers emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa e os estudos realizados na área podem ajudar a reduzir os impactos da Computação. Por exemplo, é sabido que parte significativa do impacto ambiental da construção de novos data centers se deve às emissões relacionadas ao concreto e os avanços nas pesquisas sobre “concreto verde” poderão mitigar esses impactos.
- *Ciências sociais:* pesquisas em Ciências Sociais podem contribuir para melhorar o entendimento dos impactos sociais, culturais e econômicos das emissões de carbono devidas à Computação. Também podem ajudar a definir novas políticas públicas que permitam que a sociedade brasileira possa fazer uso de Computação dentro de parâmetros de sustentabilidade bem definidos.

Além de contribuir com a desaceleração das mudanças climáticas e outros aspectos socioambientais, avanços em Computação Sustentável contribuirão para a obtenção de Sustentabilidade Eco-

nômica – reduzir a ineficiência energética reduzirá os custos de acesso à serviços de computação ao mesmo tempo que a torna mais sustentável – e de Inclusão Digital, já que uma consequência importante do trabalho neste desafio será a diminuição dos custos de acesso aos recursos computacionais, pelo uso de máquinas em que o software consome menos, e consequentemente, CPUs e GPUs menos potentes e mais baratas podem ser utilizadas. Tornar a Computação mais sustentável é, portanto, também torná-la mais democrática.

Referências

1. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. A Emergência Climática. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/climate-emergency>. Acesso em: 11 dez. 2025.
2. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Plano Clima. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smrc/plano-clima>. Acesso em: 11 dez. 2025.
3. WORLD BANK; INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Measuring the emissions and energy footprint of the ICT sector: implications for climate action. Washington, DC, 2024.
4. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electricity 2024: analysis and forecast to 2026. Paris: IEA, jan. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>. Acesso em: 11 dez. 2025.
5. CABALLAR, R. D. We need to decarbonize software: the way we write software has unappreciated environmental impacts. IEEE Spectrum, v. 61, n. 4, p. 26–31, 2024.



LUIGI CARRO é Professor Titular de Ciência da Computação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Fez doutorado em Computação no Inf-UFRGS no século passado. Já neste século, foi professor visitante na UC San Diego, no Lirmm em Montpellier, no Politecnico di Torino e na TU Delft. Atualmente é bolsista PQ-1A do CNPq. Recebeu em 2007 o prêmio pesquisador Destaque FAPERGS, e em 2021 a Comenda Ordem Nacional do Mérito Científico. Apesar de já ter orientado dezenas de alunos, o prof. Luigi acredita que a falta de mão de obra qualificada é ainda um grande problema.

DANIEL CORDEIRO é professor da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, mestre em Ciência da Computação pela USP e doutor em Mathématiques et Informatique pela Université Grenoble Alpes. Sua pesquisa se concentra em Computação Sustentável, com enfoque em Computação de Alto Desempenho e Teoria de Escalonamento, buscando mitigar o impacto ambiental por meio da gestão de recursos cliente de emissões em sistemas distribuídos de larga escala, bem como no uso da Computação para tornar as cidades mais inteligentes e sustentáveis.