

GRANDES DESAFIOS

Sociedade Brasileira de Computação

GRANDES DESAFIOS DA COMPUTAÇÃO NO BRASIL

2025 - 2035

2025

Sociedade Brasileira de Computação



**Grandes Desafios da
Computação no Brasil
2025-2035**

Porto Alegre

2025



Esta obra está sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 (CC-BY). Você pode redistribuir este livro em qualquer suporte ou formato e copiar, remixar, transformar e criar a partir do conteúdo deste livro para qualquer fim, desde que cite a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G752 Grandes desafios da computação no Brasil, 2025-2035. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2025.
69 p. : PDF

ISBN 978-85-7669-634-6

1. Computação. 2. Tecnologia. 3. Avanços científicos. I. Sociedade Brasileira de Computação. II. Título.

CDU 06.055.6

Ficha catalográfica elaborada por Annie Casali – CRB-10/2339



Sociedade Brasileira de Computação

Av. Bento Gonçalves, 9500

Setor 4 | Prédio 43.412 | Sala 219 | Bairro

Agronomia Caixa Postal 15012 | CEP 91501-970

Porto Alegre - RS

Fone: (51) 99252-

6018

sbc@sbc.org.br

Sumário

1. Introdução e Histórico	5
2. Metodologia	7
3. Desafios Científicos e Tecnológicos	9
3.1 Promoção da Evolução Responsável de Inteligência Artificial e Tecnologias Correlatas, Mitigando seus Riscos e Ampliando seus Benefícios Tecnológicos, Socioeconômicos e Culturais	10
3.2 Desenvolvimento da Cibersegurança Frente aos Riscos da Transição Quântica, da Inteligência Artificial e de Aspectos Humanos	15
3.3 Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas para a Construção de Redes Seguras, Soluções Computacionais de Alto Desempenho e Sistemas de Sensoriamento de Grande Precisão	19
3.4 Acesso Universal e Significativo à Internet através do Desenvolvimento Sustentável, Resiliente e Seguro de Infraestruturas Ubíquas de Comunicação	24
3.5 Redução do Impacto Socioambiental no Desenvolvimento e Uso de Aplicações por meio de Computação Sustentável	28
3.6 Construção de Ecossistemas Computacionais Éticos, Inclusivos, Interdisciplinares e Sustentáveis para a Promoção da Participação e da Equidade Social	32
4. Formação de Recursos Humanos	41
5. Recomendações ao Setor Público, às Agências de Fomento, ao Setor Produtivo, às Universidades e às Sociedades Científicas	46
Anexo I. Programação do Seminário	55
Anexo II. Trabalhos Apresentados Durante o Seminário	57
Anexo III. Organizadores e Comitê de Programa	60
Anexo IV. Relação de Participantes e Autores do Seminário	61
Referências	65

Capítulo

1

Introdução e Histórico

No início dos anos 2000, tivemos as primeiras iniciativas internacionais para a definição de Grandes Desafios da Computação realizadas por importantes sociedades internacionais. Destacam-se iniciativas da *National Science Foundation* e da *Computing Research Association* nos Estados Unidos, em 2002 [1], e a da *CRC/BCS* no Reino Unido, publicada em 2004, com uma edição com foco em pesquisa [2, 3] e outra em educação [4].

A SBC organizou em maio de 2006, em São Paulo, seu primeiro evento [5, 6] para definir Grandes Desafios, para um período de 10 anos, de 2006 a 2016. Neste seminário foram definidos cinco desafios, que se mostraram ao mesmo tempo precisos e abrangentes em sua visão do futuro da Computação, tendo servido de base para os eventos posteriores:

- Gestão da Informação em grandes volumes de dados multimídia distribuídos;
- Modelagem computacional de sistemas complexos artificiais, naturais e socioculturais e da interação homem-natureza;
- Impactos para a área da computação da transição do silício para novas tecnologias;
- Acesso participativo e universal do cidadão brasileiro ao conhecimento;
- Desenvolvimento tecnológico de qualidade: sistemas disponíveis, corretos, seguros, escaláveis, persistentes e ubíquos.

O seminário evidenciou que o tratamento dos desafios estabelecidos exigia competências multidisciplinares e trabalho colaborativo. A discussão dos perfis de formação de recursos humanos necessários e a integração com a indústria também foram identificados como elementos essenciais para abordar esses desafios. Também ficou claro que deveríamos buscar atingir parâmetros internacionais na pesquisa, observadas as restrições e limitações que se impõem em um país como o Brasil. A definição dos Grandes Desafios da SBC impactou grande parte da comunidade de pesquisadores, principalmente através das discussões e documentos elaborados. Os Grandes Desafios foram, por exemplo, o tema do Congresso da SBC de 2008.

Os Grandes Desafios também influenciaram editais de órgãos de fomento, como o CNPq e a FAPESP. O CNPq lançou um edital em 2007 com foco na seleção de projetos baseados

nos temas definidos no evento de 2006, com recursos da ordem de R\$ 9 milhões [7]. Também em 2007 foi lançado um edital pelo Instituto Virtual FAPESP-Microsoft, com base no quarto desafio, tratando de acessibilidade e acesso universal e participativo do cidadão brasileiro ao conhecimento [8].

Um desdobramento do primeiro seminário da SBC foi a realização de outro evento semelhante, mas com escopo ampliado para toda a América Latina, com apoio da Microsoft e do CLEI. O Workshop CharLA — Grand Challenges in Computer Science Research in Latin America foi realizado em 2008 e contou com a participação de 25 pesquisadores de diversos países. Nele foram definidos quatro desafios, com foco em desafios e perspectivas da América Latina:

- Tecnologias de informação e comunicação orientadas ao cidadão;
- Multilinguismo e identidade latino-americana em um mundo digital;
- Computação orientada ao monitoramento e controle ambiental;
- Redes colaborativas complexas (na América Latina).

O segundo evento nacional com foco nos Grandes Desafios foi realizado em março de 2009 [9], em Manaus, e teve participação da indústria, da comunidade científica e de empresas governamentais. Como resultado, foi feito o mapeamento dos Grandes Desafios já previamente identificados para domínios de aplicação, visando conectar pesquisadores com governo e indústria e buscando fomentar projetos colaborativos entre esses setores.

O terceiro evento foi realizado em duas fases. A primeira fase ocorreu em São Paulo, em abril de 2013 [10], na sede da Confederação Nacional da Indústria (CNI), contando com a participação de empresas e pesquisadores de diferentes universidades. A segunda fase foi um evento aberto, realizado na UFRJ em setembro de 2014, visando promover redes de colaboração temáticas em função de problemas reais que envolvessem governo, indústria e academia. A chamada de trabalhos buscou identificar parcerias possíveis ou já existentes entre governo-indústria-academia, nos domínios de Sistema Bancário/Financeiro, Petróleo, Energia, Defesa Cibernética, Saúde, Educação e Mobilidade.

Esses esforços da SBC tiveram repercussão em algumas de suas Comissões Especiais, que ao longo dos anos vêm também discutindo e definindo os Grandes Desafios da Computação em suas respectivas áreas. São exemplos disso a publicação de um volume em 2007 pela comunidade de Sistemas de Informação [11], com uma nova edição em preparação, e as iniciativas da comunidade de Jogos e Entretenimento Digital, entre 2020 e 2023 [12], e da comunidade de IHC, em 2015 [13] e que está organizando seus desafios para os próximos 10 anos.

Capítulo

2

Metodologia

O Seminário dos Grandes Desafios da Computação de 2024 teve uma chamada pública de trabalhos¹, preparada pela comissão organizadora, a partir de diálogo com a Diretoria da SBC e com pesquisadores experientes da comunidade. Deste diálogo, chegou-se ao estabelecimento preliminar de seis temas prioritários, já indicados na chamada de trabalhos: Inteligência Artificial, Ciência de Dados, Computação Quântica, Cibersegurança, Ubiquidade da Internet e Computação Sustentável.

Foi estabelecido que o Seminário também se dedicaria à relação entre os Grandes Desafios e os impactos socioeconômicos da Computação, tais como os aspectos éticos das soluções computacionais, o combate à desinformação e o fortalecimento da inovação e do empreendedorismo tecnológico. A chamada solicitou contribuições contemplando propostas de novos desafios, em relação àqueles já sugeridos na chamada, ou o refinamento dos desafios sugeridos, focando em problemas complexos e desafiadores na área de TICs para a indústria, a sociedade ou o governo.

Os trabalhos deveriam incluir potenciais métricas para avaliação do progresso de possíveis soluções para o problema/desafio apresentado, sendo particularmente bem-vinda a conexão entre os desafios científicos e tecnológicos e os grandes problemas que a sociedade deve enfrentar na próxima década. Foram submetidos 23 trabalhos, dos quais 18 foram selecionados para apresentação e discussão durante o evento. A avaliação e seleção dos trabalhos foi realizada por um Comitê de Programa, apresentado no Anexo III, convidado pela comissão organizadora. Os trabalhos selecionados estão listados no Anexo II deste documento e também estão publicados na Biblioteca Digital da Sociedade Brasileira de Computação (SBC-OpenLib — SOL) sob o título “IV Seminário dos Grandes Desafios da Computação no Brasil: Trabalhos Apresentados”.

Foi realizado um seminário fechado, com participação mediante convite, congregando cerca de 70 participantes, cujos nomes estão listados no Anexo IV deste documento. Entre os participantes estavam autores dos trabalhos selecionados, membros do Comitê de Programa, integrantes da Diretoria e Conselho da SBC e profissionais e pesquisadores convidados. O Anexo I deste documento contém a programação do evento. Na manhã do primeiro dia, um painel de abertura discutiu aspectos abrangentes dos Grandes Desafios da Computação para a próxima década, seguido de outro painel sobre os Grandes

¹<https://www2.sbc.org.br/grandesdesafios/computacao/#submissao>

Desafios da Educação em Computação. No turno da tarde ocorreram as apresentação dos trabalhos selecionados.

Na manhã do segundo dia, os participantes se dividiram em seis grupos, que corresponderam na maioria aos temas prioritários previamente identificados na chamada de trabalhos: Inteligência Artificial e Ciência de Dados, que se reuniram em um único grupo, pela proximidade dos temas, coordenado por Wagner Meira Jr (UFMG), André Ponce de Leon Ferreira de Carvalho (USP-SC) e Claudia Bauzer Medeiros (Unicamp); Computação Sustentável, coordenado por Luigi Carro (UFRGS) e Daniel Cordeiro (USP); Cibersegurança, coordenado por Marcos Antonio Simplício Junior (USP); Ubiquidade da Internet, coordenado por Lisandro Granville (UFRGS) e Luciano Gaspary (UFRGS); Computação Quântica, coordenado por Antonio Abelém (UFPA); e Computação e Sociedade, grupo formado durante o próprio seminário, em função de interesses comuns de participantes, e coordenado por Claudia Cappelli (UERJ). Na tarde do segundo dia, as ideias e conclusões dos grupos foram apresentadas e discutidas em uma sessão plenária.

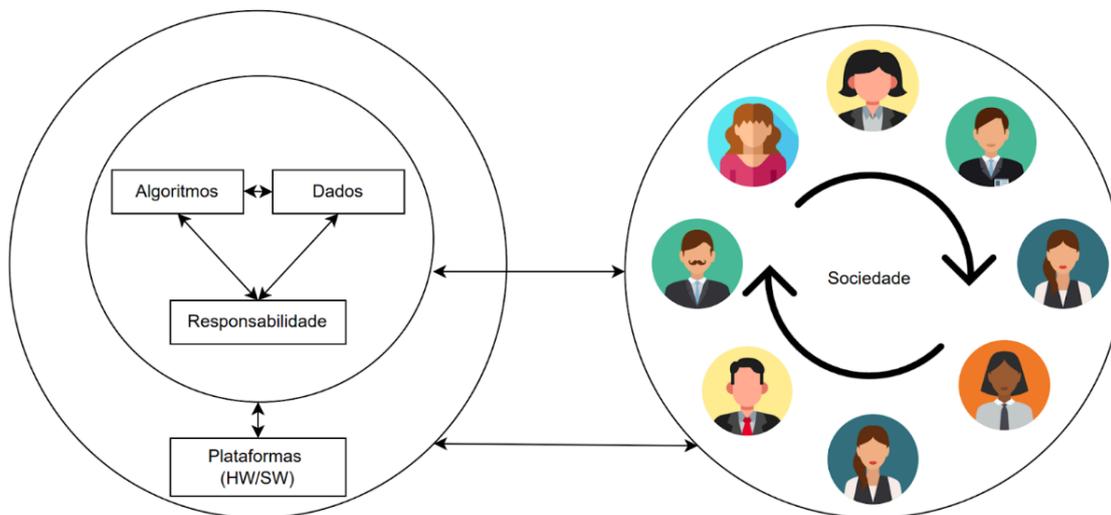
Capítulo

3

Desafios Científicos e Tecnológicos

Esta seção apresenta os Grandes Desafios da Computação, organizados em seis grandes temas, correspondentes aos seis grupos nos quais o Seminário foi organizado.

Figura 3.1. Visão de alto nível que simboliza os principais focos dos Grandes Desafios descritos neste documento — Dados, algoritmos, plataformas computacionais, e a sociedade como um todo.



A Figura 3.1 acima, adaptada de [14], dá uma visão geral do relacionamento entre os grandes temas envolvidos nos Grandes Desafios da Computação. Algoritmos atuam sobre dados e geram novos dados e algoritmos, sempre de forma responsável, na engenharia dos dados e na concepção de algoritmos. Algoritmos e dados são processados em plataformas de software e hardware, destacando-se a necessidade de pesquisa em sistemas sustentáveis que economizem energia e a emergência da computação quântica. A sociedade influencia e interage com algoritmos, dados e plataformas, e por eles é influenciada, tendo acessibilidade como princípio para promover inclusão e equidade. Desenvolvimento e interações entre algoritmos e dados (e destes com plataformas e a sociedade) devem ser

regidos por ética e responsabilidade. Interligações e comunicação entre plataformas, dados, algoritmos e a sociedade estão sujeitas a novos mecanismos de cibersegurança em todos os níveis, inclusive sociais. O termo “sociedade” é visto sob sua forma mais ampla, incluindo pesquisadores e profissionais de Computação, pesquisadores de todos os outros domínios do conhecimento, governantes, políticos, administradores de entidades de ensino e pesquisa, sociedades científicas, público em geral e os demais atores do complexo ecossistema mundial que gera, utiliza e contribui para o aprimoramento dos resultados de pesquisa em Computação. Todo esse ecossistema funciona em círculos virtuosos, que consideram revoluções causadas pela Inteligência Artificial e o rompimento de paradigmas que surgem com tecnologias disruptivas.

Os títulos das subseções a seguir correspondem à identificação dos Grandes Desafios, conforme estabelecidos como conclusão do seminário.

3.1. Promoção da Evolução Responsável de Inteligência Artificial e Tecnologias Correlatas, Mitigando seus Riscos e Ampliando seus Benefícios Tecnológicos, Socioeconômicos e Culturais

A emergência de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) [15] para apoiar decisões e soluções nos mais variados setores da sociedade motiva a necessidade de ações concertadas de pesquisa e desenvolvimento em Computação para melhor contribuir para este cenário. Esta seção trata dos desafios associados à IA e sua dependência e interligação com Ciência de Dados (CD) [16] e Engenharia de Dados (ED) [17], áreas correlatas. Aborda, dentre outras, questões de gestão de dados, concepção de algoritmos e plataformas para sua execução, e da área emergente de ética em IA, cobrindo vários aspectos no uso e geração de dados e algoritmos, além da interpretação dos resultados. Destaca-se, aqui, o fato de que a IA cobre uma variedade de disciplinas, como representação de conhecimento, processamento de imagens e de linguagem natural, tomada de decisão, aprendizado de máquina (AM), agentes, visão computacional e robótica. O aprendizado de máquina tornou-se a área mais conhecida da IA, pela ubiquidade do seu uso; no entanto, os sub-desafios abordados nesta seção consideram não apenas AM, mas todos os outros ramos da IA.

Este desafio requer colaboração com várias subáreas da Computação. Como IA combina dados, algoritmos e sistemas computacionais, há interação direta com, entre outros, **Teoria da Computação e Matemática Computacional, Engenharia de Software, Bancos de Dados** (incluindo **Segurança da informação**) e **Sistemas Operacionais**. Além disso, pela necessidade de novos paradigmas de programação e o funcionamento em infraestruturas escaláveis e novos tipos de hardware, há interação com **Sistemas Distribuídos, Arquiteturas de Computadores, Linguagens de Programação e Fatores Humanos em Sistemas Computacionais**.

Destaca-se ainda a necessidade de qualificação de recursos humanos em IA e tecnologias correlatas, ainda insuficientes para a enorme demanda do Brasil. Conforme já descrito nas Recomendações para o Avanço da IA no Brasil da Academia Brasileira de Ciências [18], “o Brasil não pode correr o risco de ser apenas um usuário de soluções de IA concebidas no exterior”. É essencial criar as bases necessárias para formação de mão de obra qualificada para desenvolver novos algoritmos e aplicar adequadamente a IA na solução de

problemas brasileiros, com bancos de dados brasileiros.

3.1.1. Detalhamento do Grande Desafio

Desenvolver soluções para questões de heterogeneidade, qualidade e proveniência de dados a partir das perspectivas de Ciência e Engenharia de Dados

CD e ED são campos multidisciplinares de pesquisa com aplicações em todos os setores da sociedade e ramos do conhecimento. A CD inclui “os processos e sistemas que permitem a extração de conhecimento ou compreensão de dados em várias formas, estruturadas ou não estruturadas”². A ED cobre um conjunto de pesquisas e técnicas de preparo, armazenamento e disponibilização de dados para que o resultado das análises subsequentes seja o mais confiável possível.

Não é possível utilizar ferramentas de IA, ou fazer qualquer tipo de análise computacional de dados, sem Engenharia de Dados. Por outro lado, a capacidade da IA generativa de produzir grandes volumes de dados de forma não transparente (e alucinações) traz novos desafios de pesquisa em CD e ED, revolucionando o ciclo de vida de dados.

Destacam-se, dentre outros, desafios associados à heterogeneidade, curadoria, proveniência e qualidade dos dados, além de propostas de novas linguagens que facilitem a usuários leigos acessar e consultar os dados, para não obrigá-los a conhecer linguagens como SQL. Isso demanda pesquisa de ponta no desenvolvimento interativo de workflows científicos de compreensão e preparo de dados para análise e visualização subsequente por IA.

A heterogeneidade sempre será um desafio: dados são sempre coletados e gerados a partir de demandas e visões diferentes do mundo. A coleta ocorre via observações por humanos, dispositivos ou geração de dados sintéticos. A heterogeneidade pode ser, dentre outros, temporal, espacial, ou definida pelo usuário. A IA generativa exacerbou a heterogeneidade, gerando dados sobre os quais se tem pouco controle, necessitando pesquisa de ponta para sua documentação, curadoria e proveniência.

Curadoria e limpeza são associadas à qualidade dos dados, definida como “adequação ao uso” — a qualidade dos dados não é absoluta, mas depende do propósito para o qual são gerados. A curadoria de dados criados por IA é um desafio em aberto. Proveniência e rastreabilidade de dados influenciam a qualidade e também a viabilidade, usabilidade e auditoria dos dados e seu processamento integrado. A integração mais comum visando posterior análise por IA tenta organizar dados em uma única estrutura (por exemplo, “fusão”). Formas mais flexíveis de integração interligam os dados a partir de estruturas intermediárias — por exemplo, “ontologias de conhecimento”, que irão auxiliar o entendimento dos dados segundo algum domínio específico de aplicação.

Tais questões são exacerbadas pelo movimento de Ciência Aberta [19], que resumidamente consiste em organizar e disponibilizar resultados de pesquisa de forma aberta para reuso, sem barreiras geográficas, políticas, culturais ou temporais. Um desafio é garantir que esta disponibilização seja feita segundo os princípios FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability e Reusability). Os processos para tornar dados “FAIR” geraram o novo termo em inglês “*fairification*”, que requer pesquisa integrada em todos os conceitos acima e também em documentação e indexação adequadas dos dados — o que requer

²<https://new.nsf.gov/cise/advisory-committee>

novas pesquisas em documentação, preparo e preservação de dados. Técnicas emergentes frente à IA exploram a nova noção de “*data visitation*”³.

Projetar e implementar algoritmos extensíveis e adaptáveis para construção de ferramentas de IA

Em IA, é importante diferenciar modelos de sistemas. Um modelo de IA, em geral uma função matemática, é o cerne de aplicações de IA. Um sistema de IA é um conjunto de vários componentes, que inclui um ou mais modelos de IA, projetado para, de alguma forma, ser útil para os humanos.

A UNESCO define sistemas de IA como [20]: “tecnologias de processamento de informações que integram modelos e algoritmos que produzem a capacidade de aprender e realizar tarefas cognitivas, as quais levam a resultados como a predição e a tomada de decisões em ambientes reais e virtuais. Sistemas de IA são projetados para operar com vários graus de autonomia por meio da modelagem e da representação de conhecimento e pela exploração de dados e cálculo de correlações”. Como toda subárea da Computação, a IA tem seus desafios específicos, influenciados pelo corpo de conhecimento gerado ao longo do tempo, para o desenvolvimento de soluções e ferramentas capazes de lidar com demandas e problemas da sociedade, do planeta, de instituições públicas, privadas, e do terceiro setor.. Atualmente, a IA tem ainda o desafio de apoiar e acelerar avanços em outras áreas de conhecimento.

Os desafios da IA variam de acordo com suas subáreas, como as mencionadas no início desta seção. O uso de metodologias sólidas, com boas práticas e uma sólida base formal, são fundamentais para lidar com sucesso de seus desafios.

Atualmente, há um grande interesse na subárea de AM, por conta dos avanços em aprendizado profundo e dos modelos fundacionais, como os modelos de IA generativa, que incluem os grandes modelos de linguagem, (LLMs, de *Large Language Models*) [21]. Os LLMs tornaram-se possíveis com o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado profundo (*deep learning*) para o treinamento de redes neurais profundas (DNNs, de *Deep Neural Networks*) [22, 23], deram origem às redes neurais convolucionais e aos modelos transformadores (de *transformers*) [24].

Grandes desafios nessa subárea são confiabilidade, escalabilidade, explicabilidade e robustez dos algoritmos de IA, desenvolvidos para aplicações gerais ou específicas. Em particular, para LLMs e modelos similares, é fundamental buscar maior controle e previsibilidade, para que tais modelos gerem resultados mais próximos dos esperados e especificados (p. ex. produzindo respostas com garantias de veracidade). Apesar desses avanços, para melhor usufruir dos benefícios da IA, é importante apoiar pesquisas em suas diferentes subáreas, incluindo seus fundamentos teóricos e matemáticos. Um grande desafio é combinar suas subáreas com outras subáreas da Computação.

Conceber e desenvolver novas plataformas de sistemas computacionais que acomodem as demandas do uso de sistemas IA, face à crescente demanda de recursos computacionais

Este desafio consiste em desenvolver plataformas de hardware e software eficientes, es-

³<https://www.rd-alliance.org/groups/artificial-intelligence-and-data-visitation-aidv-wg/outputs/>

caláveis e sustentáveis, compatíveis com a demanda dos atuais e futuros sistemas de IA. Em hardware, o grande desafio é encontrar um bom compromisso entre alto desempenho, escalabilidade, baixo consumo de energia e baixa emissão de carbono no projeto de novos processadores (CPU e aceleradores) e redes de interconexão. Para o processamento de DNNs em hardware e, conseqüentemente, de LLMs, um desafio é projetar arquiteturas eficientes para processar modelos com um número muito grande de parâmetros (por exemplo, 1 trilhão). Em software, o grande desafio é desenvolver uma pilha de software que trate um número muito grande de agentes/processos/threads, permitindo projetar, orquestrar, escalar e executar sistemas de IA em larga escala, de maneira eficiente. Outro desafio é considerar o reuso, a manutenibilidade e a extensibilidade, de modo a fazer face às necessidades das aplicações de IA, além de considerar o uso de técnicas de IA tanto para a pilha de software como para o software de apoio à IA.

Adotar Estratégias Computacionais e Sociotécnicas visando Inteligência Artificial Responsável

A pesquisa e o desenvolvimento envolvendo IA, bem como a construção e operacionalização de sistemas baseados nos recursos oferecidos pela IA, requerem uma abordagem de IA responsável. Na IA Responsável, componentes e sistemas de IA respeitam princípios éticos no seu inteiro ciclo de vida: concepção, desenvolvimento, implantação, uso e monitoramento. Para tal, modelos e sistemas de IA devem seguir: Beneficência (bem-estar, dignidade, sustentabilidade); Não-maleficência (privacidade, confiabilidade técnica); Justiça (não-discriminação, solidariedade); Autonomia (liberdade e poder de decidir); e Transparência (responsabilização, confiança, explicabilidade). No entanto, transformar esses princípios abstratos e subjetivos em mecanismos concretos é um desafio. Operacionalizá-los e quantificá-los de maneira eficaz, considerando diferentes contextos, culturas e legislações, é um desafio adicional, especialmente em aplicações globais. Por isso, é fundamental criar e implementar métricas e indicadores eficazes para governança de IA, integrando-os com os arcabouços (i.e., *frameworks*) e processos operacionais em um fluxo de monitoramento contínuo; e mecanismos com diferentes níveis de formalização focados em robustez e controle.

A promoção de uma IA ética deve considerar três desafios específicos. (1) o desenvolvimento de processos, ferramentas e técnicas que incorporem princípios éticos desde a concepção até a implementação de componentes e sistemas; (2) o estabelecimento de fundamentos sólidos para a criação de normatizações e regulações que assegurem a conformidade com padrões éticos; e (3) a formação de profissionais e pesquisadores, fornecendo subsídios para programas educacionais que integrem ética, regulação e boas práticas ao ensino técnico e à pesquisa.

As estratégias para promover uma IA responsável envolvem a criação de ambientes e mecanismos formais que incentivem a cooperação multidisciplinar entre profissionais de Computação e de outras áreas do conhecimento, ampliando perspectivas e abordagens. Também é fundamental estabelecer requisitos éticos claros e aderentes aos princípios de IA responsável, incluindo medidas de análise, definição de limiares aceitáveis e processos de verificação e acreditação para garantir que os sistemas estejam alinhados a padrões éticos. Além disso, a SBC pode propor uma disciplina sobre ética para IA, que pode ser adotada por cursos de graduação da área de Computação, e de outras áreas. Por fim, é

necessário fomentar pesquisas e iniciativas que viabilizem o monitoramento, auditoria e acreditação de sistemas de IA, garantindo a confiabilidade e a responsabilidade na aplicação de tecnologias de IA. Enfim, é preciso estabelecer cooperação com o setor produtivo para promover a ética em IA. A Seção 3.6 descreve desafios adicionais associados à ética no contexto de ecossistemas computacionais.

3.1.2. Contribuições de outras áreas do conhecimento

Pode-se dizer que todas as outras áreas do conhecimento vêm contribuindo para os avanços em IA. Da mesma forma, ferramentas de IA estão sendo aplicadas e contribuem para o crescimento de todas as áreas do conhecimento, sem exceção — quer acelerando o desenvolvimento de soluções, quer obtendo novos insights, quer apoiando a decisão, quer na economia de tempo ou de trabalho manual. Muitos avanços em IA vêm sendo obtidos graças a esta colaboração.

Certamente, pesquisas em Matemática e Estatística são fundamentais para acelerar os algoritmos em aprendizado de máquina — sendo que linguística e modelos de linguagem são necessários para o desenvolvimento contínuo de LLM. Por outro lado, ciências biológicas e vários ramos das engenharias vêm contribuindo para avanços em robótica e visão computacional. Ciências sociais e humanas também participam no desenvolvimento de sistemas robóticos e produção artística. A representação do conhecimento, utilizada e desenvolvida por pesquisa em IA tem se ramificado em vários resultados, dependendo do domínio do conhecimento que se deseja representar e suas especificidades.

3.1.3. Questões socioeconômicas relevantes

A IA e tecnologias correlatas estão sendo cada vez mais usadas para resolver um grande leque de questões socioeconômicas relevantes, em todos os domínios. Exemplos incluem mitigar efeitos de migrações humanas via planejamento urbano e simulação de alternativas usando IA, ou novas políticas de controle e monitoramento de tráfego — e consequentemente efeitos em saúde e qualidade de vida, ou ainda agricultura digital e produção e distribuição de alimentos.

A aplicação de IA e tecnologias correlatas para solução de problemas socioeconômicos requer, em última análise, a colaboração de pesquisadores e técnicos em Computação com pessoas e instituições: as que criaram a demanda pela solução, que geraram os dados (direta ou indiretamente via dispositivos), que selecionaram e implementaram os algoritmos, que definiram as plataformas. É preciso colaborar também com os especialistas que vão interpretar resultados — porque a qualidade de um resultado depende de todas essas etapas. Trata-se, assim, de uma questão sócio-técnica intimamente ligada à solução de problemas socioeconômicos com o apoio de ferramentas de IA e tecnologias associadas.

Um exemplo de problema com grande impacto socioeconômico são as mudanças climáticas. Qualquer estudo nesse grande domínio reúne, dentre outros, pesquisadores em ciências exatas, humanas e sociais, biológicas e engenharias, cada um contribuindo com seu conhecimento, metodologias de pesquisa, coleta e análise de dados — e consequências para CD e ED. Novos algoritmos de IA vêm sendo usados nesse contexto, para derivar cenários alternativos e previsão de “futuros”.

3.1.4. Métricas

As métricas de avaliação para estimar o sucesso das soluções propostas para lidar com todos esses desafios dos vários ramos da IA e tecnologias correlatas podem ser divididas em aspectos teórico e empírico. O teórico inclui análise formal de complexidade dos algoritmos e expressividade das linguagens de representação. No empírico, é necessária a criação de novas métricas, novos conjuntos de dados (por exemplo, corpora) e novos benchmarks, bem como a quantidade de empresas acreditadas, número de frameworks, processos e boas práticas propostas e adotadas. Além disso, cada sub-desafio deste Grande Desafio deve ser avaliado segundo métricas específicas de sucesso do caso considerado.

Há vários tipos de métricas usados para medir o sucesso de soluções para integração, heterogeneidade, qualidade e proveniência de dados, incluindo as usadas em avaliação de qualidade, do grau de reprodutibilidade de uma integração de dados heterogêneos, e da aceitação após testes dos dados processados ou das análises realizadas via CD. Sistemas de workflow (e seu monitoramento) são frequentemente usados para produzir métricas de desempenho que, associadas a critérios de qualidade pré-definidos, permitem estabelecer faixas de aceitação ou adequabilidade de uma solução. Com a ajuda desses mecanismos, é possível identificar quais os algoritmos mais adequados para processar um determinado conjunto de dados. As métricas de avaliação que permitirão acompanhar a evolução na busca de soluções para novas plataformas computacionais incluem medidas associadas à sustentabilidade, como FLOPS (desempenho) e Watts per FLOPS (consumo de energia por desempenho).

O sucesso na promoção de uma IA responsável pode ser medido pela quantidade de organizações que adotam práticas éticas em seus processos de desenvolvimento e uso de IA, bem como pela observação da ampla adoção de ferramentas e técnicas projetadas para garantir a conformidade ética. A implementação efetiva de processos de auditoria e acreditação de sistemas também é um indicador chave, assim como a disponibilidade e integração de cursos de ética em IA nas formações acadêmicas e a adesão a regulações e normatizações específicas que consolidam ambientes normativos robustos e número de cursos e treinamentos disponíveis em ética para IA.

3.2. Desenvolvimento da Cibersegurança Frente aos Riscos da Transição Quântica, da Inteligência Artificial e de Aspectos Humanos

A área de cibersegurança envolve métodos e ferramentas para detectar, monitorar, prevenir e mitigar tentativas de ataque contra sistemas computacionais. Assim, ela é transversal a todas as subáreas da Computação, em particular em cenários envolvendo potenciais agentes maliciosos. Esta seção descreve os principais desafios de pesquisa e inovação em Cibersegurança, se apoiando nos eixos temáticos definidos nos referenciais de formação do curso de Bacharelado em Cibersegurança (RFCS) [25]: Segurança de Dados, Segurança de Sistemas, Segurança de Conexão, Segurança de Software, Segurança de Componentes, Segurança Organizacional, Fatores Humanos em Segurança, e Segurança e Sociedade. Especificamente, os desafios identificados são: a cibersegurança frente às evoluções na computação quântica, que podem afetar de forma crítica a confiabilidade de algoritmos criptográficos amplamente utilizados em sistemas de comunicação e na

Internet; garantir a segurança de tecnologias emergentes, em particular na construção e operação de sistemas inteligentes, evitando que seus benefícios sejam ofuscados pelos riscos a eles inerentes; e a necessidade de reduzir os riscos de segurança decorrente da interação de humanos com sistemas computacionais, por decisões e comportamentos que levem a violações de segurança de forma acidental ou intencional.

Desta forma, pode-se dizer que os desafios em Cibersegurança apresentados como prioritários concentram-se em três subáreas da computação: **Sistemas Quânticos, Inteligência Artificial e Interação Humano-Computador**. Já a solução para esses desafios envolve a colaboração de uma variedade de subáreas, indo desde aquelas mais fundamentais, como **Algoritmos, Matemática Computacional e Teoria da Computação**, até aquelas que apresentam abordagens mais sistêmicas, como **Engenharia de Sistemas, Engenharia de Software e Redes de Computadores**.

3.2.1. Detalhamento do Grande Desafio

Preparar os sistemas computacionais para a transição quântica, com algoritmos e protocolos resistentes a ataques feitos via computadores quânticos

Mitigar a ameaça da Computação Quântica está entre os principais desafios nos eixos de Segurança de Dados e Segurança de Conexões, que tratam da proteção de dados armazenados, em processamento e enquanto atravessam interligações físicas e lógicas entre componentes computacionais. A razão é que, com computadores quânticos de grande porte, pode-se obter em tempo polinomial as chaves privadas dos principais esquemas criptográficos para assinatura digital e encapsulamento de chaves usados atualmente. Embora aumentar a capacidade e confiabilidade de computadores quânticos ainda seja um objetivo repleto de obstáculos, a área tem sido alvo de forte ação empreendedora e as inovações têm sido constantes. Logo, a eventual superação desses obstáculos pode trazer impactos graves à proteção de dados e às comunicações em nível global, dada a ubiquidade da Internet.

Existem atualmente duas linhas principais de investigação para a proteção de dados em um cenário pós-quântico: (1) o desenvolvimento de algoritmos criptográficos cujas propriedades de segurança se baseiem em problemas computacionais difíceis tanto em computadores clássicos como quânticos; e (2) para a transmissão de dados sigilosos, o uso de esquemas quânticos de distribuição de chaves secretas, explorando as propriedades físicas do meio de comunicação. Essas linhas têm sido alvo de iniciativas de padronização, respectivamente, por órgãos internacionais como NIST [26] e ITU [27]. Apesar desse avanço, questões importantes ainda existem, tanto para os esquemas já padronizados como para possíveis alternativas, considerando métricas de segurança, desempenho e flexibilidade. Em especial, destacam-se como temas de pesquisa: (1) análise de segurança dos algoritmos e protocolos, cobrindo aspectos teóricos e de implementação; (2) a otimização desses esquemas, considerando técnicas de projeto e de implementação, para que a eficiência resultante de sua adoção seja similar ou superior àquela fornecida por alternativas clássicas; e (3) a adaptação de soluções existentes para incorporar esquemas resistentes a computadores quânticos, preservando as funcionalidades das aplicações e a capacidade de adoção de técnicas modernas de projeto (e.g., no caso de redes, arquiteturas com uma camada de controle baseada em software).

Promover a evolução da Inteligência Artificial e da Ciência de Dados em um contexto de ameaças, mitigando riscos conhecidos e desconhecidos associados a essas tecnologias emergentes

As tecnologias emergentes, fruto da Inovação e do Empreendedorismo Tecnológico, costumam ser alvos bastante visados por atacantes. Isso acontece porque a segurança da integração entre seus componentes de hardware, software, infraestrutura de comunicação e sub-sistemas é tipicamente menos madura que em tecnologias bem estabelecidas. Essa preocupação, cerne do eixo de Segurança de Sistemas, e também associada aos eixos de Segurança de Software e de Componentes, atualmente tem se voltado a tecnologias emergentes como IA e CD. Em especial, um desafio notório com o crescente interesse em (e adoção de) mecanismos de IA refere-se à aplicação de Cibersegurança na construção e operação desses sistemas inteligentes, evitando que seus benefícios sejam ofuscados pelos riscos inerentes.

A pesquisa atual em torno desse desafio costuma ser associada a termos como *Adversarial AI*, “Aprendizado de Máquina em Contexto Adversário”, ou “Aprendizado de Máquina Seguro” [28]. Esses termos complementam, assim, uma área de investigação mais tradicional, no sentido “inverso”, de aplicação de técnicas de IA e Ciência de Dados para aumentar a eficácia de ferramentas de segurança para monitoramento e detecção de ataques, identificação de vulnerabilidades em software, entre outras. Muito da literatura emergente na área consiste na construção de ferramentas de ataque, voltadas a identificar e explorar vulnerabilidades (e.g., contornar filtros em sistemas de IA generativa, o chamado *jailbreaking*). Contudo, começam também a surgir propostas voltadas à mitigação de ataques de diferentes tipos: (1) perpetrados com o uso de IA, como a criação de *deep fakes* ou de *malware* capaz de evadir proteções atuais; (2) tendo módulos de IA como alvo, visando ao roubo de dados ou mesmo modelos completos; ou (3) mirando sistemas que usam IA (e.g., via envenenamento de bases de treinamento, ou explorando técnicas de *jailbreaking*). Mitigar essas ameaças é desafiador devido à própria natureza das técnicas de aprendizado de máquina, em que ocorre a transformação de dados em programas. Nesse cenário, bastante distinto do desenvolvimento de software tradicional, é complexo definir políticas de segurança adequadas, ou mesmo seguir boas práticas comuns para proteção de sistemas.

Integrar e consolidar fatores humanos na cibersegurança: da educação dos usuários e desenvolvedores à usabilidade no projeto dos sistemas de proteção

Os eixos de Segurança Organizacional, Segurança e Sociedade e Fatores Humanos em Segurança têm um ponto importante em comum: a interação entre indivíduos e sistemas computacionais (ver Figura 1). Nesse contexto, o desafio computacional crítico que se impõe refere-se à necessidade de reduzir potenciais vulnerabilidades criadas dependendo das decisões e comportamentos humanos adotados nessas interações, de forma intencional ou não [29]. Embora longe de ser novo, este desafio ainda é bastante presente na sociedade atual, um efeito direto da ubiquidade da computação e da Internet no mundo. Isso pode ser observado no crescente número de ataques na cadeia de suprimentos de hardware/software por agentes maliciosos, como ocorreu, por exemplo, com a inserção de *malware* no software distribuído pela empresa Solarwinds em 2019/2020, na biblioteca XZ Utils em 2024, e com a inserção de explosivos em dispositivos de comunicação ad-

quiridos pelo Hezbollah também em 2024. Já casos de problemas de segurança causados de forma não intencionais são observados na desastrosa atualização de software realizada pela CrowdStrike em 2024, que causou um apagão mundial de sistemas, e também em casos de engenharia social, responsáveis por 70% das fraudes bancárias em 2023 segundo a Febraban.

As investigações voltadas à solução desses desafios costumam adotar duas abordagens principais, complementares. A primeira delas busca transformar os humanos, tradicionais elos fracos na proteção de sistemas, em aliados do processo de cibersegurança. Um exemplo são propostas voltadas à educação de usuários, seja por meio de: treinamento formal, de aspecto geral (e.g., seguindo o RF-CS) ou com foco em áreas críticas; e campanhas de conscientização eficientes, abordagem essencial para evitar falhas, ataques de engenharia social, e também para ajudar no combate à desinformação. Outro exemplo são soluções de “segurança com usabilidade” (*usable security*), estratégia que busca tornar sistemas de cibersegurança mais amigáveis e personalizáveis para usuários de forma geral, aplicando conceitos muitas vezes explorados em estudos sobre interação humano-computador (IHC). Já a segunda abordagem busca incrementar a automatização e granularidade dos mecanismos de segurança, de forma invisível aos usuários. Soluções modernas nessa linha costumam seguir o conceito conhecido como Confiança Zero [30]: apoiando-se em sistemas de gestão de identidade, autenticação/autorização e detecção/prevenção de intrusões, as interações entre módulos de um sistema ou entre sistemas são constantemente validadas. Ao mesmo tempo, empregam-se políticas de segurança adaptáveis, baseadas em riscos, seguindo-se boas práticas como privilégio mínimo e separação de deveres para limitar eventuais danos em casos de violação de segurança.

3.2.2. Contribuições de outras áreas do conhecimento

A área de cibersegurança é, por natureza, altamente multidisciplinar. Afinal, os desafios na área não se limitam apenas a aspectos técnicos da Computação, mas envolvem também conhecimentos de Matemática, Direito, Ética, Psicologia, Gestão e comportamento humano. Exatamente por essa razão, não é incomum que a falta desse olhar holístico leve a soluções ineficazes, ou até mesmo facilite o surgimento e a exploração de vulnerabilidades.

No contexto específico dos desafios apresentados, entretanto, algumas áreas de conhecimento são especialmente relevantes. Em particular, a Engenharia e a Física apresentam forte influência no universo de tecnologias quânticas: ao mesmo tempo que tais disciplinas formam a base para a construção de computadores e redes quânticas, elas afetam as soluções de segurança voltadas a esse contexto. A Matemática também tem destaque nesse contexto, ao formar a base de esquemas criptográficos resistentes a computadores quânticos, e no cenário de IA, ao auxiliar na criação de modelos mais resistentes a ações de adversários. Finalmente, os desafios relacionados a fatores humanos dependem intensamente de conhecimentos das áreas de Psicologia e Ciências Sociais, tanto na identificação de limitações de sistemas existentes como na proposta de soluções mais robustas e adequadas ao contexto de cada usuário.

3.2.3. Questões socioeconômicas relevantes

Como a área de cibersegurança envolve a descoberta e mitigação de vulnerabilidades, a Ética é um aspecto social altamente relevante na área. Afinal, a Ética é um guia para o uso responsável de conhecimentos e tecnologias, e sua observância é um balizador, por exemplo, de uma decisão entre (1) informar fabricantes e usuários da existência de uma falha identificada, ou (2) explorar a falha com fins maliciosos, seja diretamente ou vendendo o conhecimento a terceiros. Esse aspecto se aplica, portanto, a todos os desafios apresentados.

Ao mesmo tempo, as questões de cibersegurança discutidas formam um alicerce fundamental para promover a Inovação e o Empreendedorismo sustentáveis em áreas emergentes, como a Inteligência Artificial e Computação Quântica, ao permitir que seu uso traga mais benefícios do que riscos.

Finalmente, os desafios relacionados a fatores humanos em cibersegurança têm forte relação com o combate à desinformação. A razão é que, ao promover uma postura de segurança mais adequada, conscientizando usuários de ameaças no mundo digital e estratégias para mitigá-las, a tendência é gerar usuários com um senso mais crítico, capazes de identificar mais facilmente informações enganosas e tentativas de manipulação.

3.2.4. Métricas

Comumente, a evolução de soluções desenvolvidas na área de cibersegurança é mensurável pelo meio de seu efetivo grau de adoção e maturidade. Para tal, podem ser usadas métricas indiretas, como análise estatística do número e gravidade de ataques envolvendo a tecnologia alvo; por exemplo, no caso de fatores humanos, de casos reais de abuso em pontos da cadeia de suprimento de hardware/software, ou causados por falhas de usuários. Adicionalmente, podem ser usadas métricas diretas, baseadas na quantidade e variedade de soluções de proteção empregadas em sistemas de produção e/ou incluídas em documentos de padronização, em comparação com a disponibilidade de ferramentas de ataque que continuam efetivas ao longo do tempo.

3.3. Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas para a Construção de Redes Seguras, Soluções Computacionais de Alto Desempenho e Sistemas de Sensoriamento de Grande Precisão

As tecnologias quânticas enfrentam desafios cruciais em hardware, software e infraestrutura. O desenvolvimento de hardware nacional para computação e comunicação quântica é essencial para garantir soberania tecnológica. Isso inclui superar limitações como a suscetibilidade de qubits a ruídos, escalabilidade e fidelidade, além de criar componentes como repetidores e roteadores quânticos para habilitar uma comunicação quântica eficiente. Em redes quânticas, a falta de protocolos maduros e de uma pilha de rede integrada que permita conexões transparentes entre camadas representa um entrave significativo. Simultaneamente, a cibersegurança está sob ameaça, com a necessidade urgente de desenvolver criptografia resistente a computadores quânticos, que em breve poderão comprometer sistemas baseados em algoritmos como RSA e ECDSA.

Além disso, o Brasil precisa de um plano nacional para infraestrutura quântica, capaz de

viabilizar experimentos e aplicações de impacto global, incluindo a expansão das atuais redes metropolitanas que começam a ser desenvolvidas. A abordagem dessas questões é fundamental para posicionar o Brasil como líder em tecnologias quânticas e responder às crescentes demandas globais por avanços nessa área estratégica.

3.3.1. Detalhamento do Grande Desafio

A Computação e a Comunicação Quântica estão emergindo como áreas de pesquisa disruptivas, redefinindo paradigmas fundamentais da Computação e das Tecnologias de Comunicação. A Computação Quântica promete solucionar problemas intratáveis para computadores clássicos, como a simulação de sistemas moleculares complexos, a fatoração de números grandes e a otimização de processos industriais. Já a Comunicação Quântica viabiliza níveis sem precedentes de segurança, utilizando princípios como o entrelaçamento quântico e a distribuição quântica de chaves (QKD) para garantir comunicações invioláveis.

Apesar do enorme potencial, essas tecnologias trazem desafios técnicos e estratégicos. A Computação Quântica ameaça a segurança dos esquemas de criptografia assimétrica amplamente usados hoje, exigindo a transição para algoritmos resistentes a ataques quânticos, tarefa que envolve significativa complexidade técnica e operacional. Além disso, o desenvolvimento de hardware robusto, algoritmos eficientes e infraestrutura para redes quânticas é indispensável para viabilizar sua ampla adoção. Reconhecendo sua relevância estratégica, o Brasil já implementou iniciativas como o Grupo de Interesse em Computação e Comunicação Quântica (GICQ) da SBC e o Grupo de Trabalho (GT) do MCTI, que atuam para construir um ecossistema integrado, fomentar a formação de talentos e promover a inovação no setor. Esta seção explora os desafios e oportunidades para consolidar o Brasil como um líder global em tecnologias quânticas.

Garantir a soberania nacional no desenvolvimento de componentes de hardware para o uso em aplicações quânticas

O desenvolvimento de tecnologias para Computação e Comunicação Quântica enfrenta desafios significativos relacionados ao hardware. Na Computação Quântica, a correção de erros é essencial para garantir a fidelidade das operações quânticas, uma vez que os qubits são altamente suscetíveis a ruídos e interferências externas. Além disso, a escala de qubits é crítica para a construção de computadores funcionais capazes de realizar cálculos úteis, exigindo avanços tanto na quantidade quanto na qualidade do entrelaçamento e operação em condições extremas, como temperaturas muito baixas.

Para as comunicações quânticas, há desafios técnicos como a conexão entre computadores e comutadores, que demanda tecnologias que minimizem perdas de informação e preservem o entrelaçamento quântico durante as transmissões. O meio físico, incluindo fibras ópticas e sistemas de multiplexação, deve ser aperfeiçoado para garantir a eficiência na transferência de qubits, lidando com problemas de atenuação e interferência. A interconexão com a rede clássica representa outro obstáculo, pois é necessário integrar protocolos clássicos e quânticos de forma eficiente e segura. Finalmente, alcançar longas distâncias requer o desenvolvimento de repetidores quânticos, memórias quânticas e satélites, permitindo comunicações globais sem comprometer as propriedades quânticas dos dados. Diversas necessidades de hardware são fundamentais para o estabelecimento

da Internet Quântica. Por exemplo, repetidores quânticos (e.g., responsáveis pela troca de emaranhamento) e roteadores quânticos (e.g., responsáveis pelo plano de controle da rede quântica).

Outra área bastante promissora relacionada às tecnologias quânticas é o sensoriamento, que também apresenta desafios significativos no desenvolvimento de hardware. Sensores quânticos prometem precisão e sensibilidade maiores que os atuais, utilizando fenômenos como superposição e entrelaçamento quântico para detectar variações mínimas em campos magnéticos, gravitacionais ou elétricos. No entanto, a criação de sensores funcionais exige dispositivos altamente especializados, capazes de operar em condições extremas, como ultracongelamento, ou em ambientes ruidosos sem perda de fidelidade. Além disso, a miniaturização de sensores quânticos para aplicações práticas é um desafio técnico, pois requer avanços na fabricação de materiais e dispositivos que preservem as propriedades quânticas em escalas menores. A integração desses sensores com sistemas de leitura e comunicação clássicos é outro ponto crítico, especialmente em aplicações que demandam coleta e análise de dados em tempo real.

Devido aos grandes avanços permitidos pelas tecnologias quânticas em processamento, sensoriamento e comunicação segura, o domínio desta tecnologia será estratégico para o desenvolvimento de um país. Observa-se atualmente uma grande corrida entre os países ricos no desenvolvimento destas tecnologias. Por uma questão de soberania nacional, torna-se essencial que o Brasil adquira o conhecimento necessário para o desenvolvimento de sua própria tecnologia para diminuir ao máximo a dependência de outros países.

Desenvolver Algoritmos para a Computação Quântica

Na Computação Quântica, a criação de algoritmos quânticos que demonstrem vantagem prática sobre métodos clássicos é uma prioridade. No entanto, o desenvolvimento de algoritmos quânticos de alto desempenho requer a aquisição de novos conceitos e conhecimentos, ligados à Física quântica, com o objetivo de alcançar a supremacia quântica, em que computadores quânticos superem os clássicos em tarefas específicas. Para o desenvolvimento destes algoritmos, é de extrema importância poder contar, numa fase inicial, com o uso de simuladores quânticos que executem em máquinas convencionais de alto desempenho e, numa fase seguinte, com computadores quânticos com um número adequado de qubits.

Desenvolver uma Rede Quântica Nacional para viabilizar a Internet Quântica no Brasil

Na Comunicação Quântica, o desenvolvimento de protocolos e arquiteturas robustos é essencial para integrar os planos de controle e de dados destas redes [31]. O plano de dados deve gerenciar a transmissão eficiente de qubits e manter informações correlacionadas, enquanto o plano de controle precisa coordenar tarefas como gerenciamento de recursos e distribuição de emaranhamento [32]. Além disso, em ambos os planos, a criação de aplicações específicas, como redes seguras e sistemas distribuídos quânticos, ainda está em estágios iniciais, demandando esforços significativos para transformar potenciais teóricos em soluções práticas [33].

A tecnologia quântica disponível atualmente apresenta limitações relacionadas às taxas de geração dos entrelaçamentos (pares EPR — *Einstein-Podolsky-Rosen pairs*), à capaci-

dade limitada de qubits (bits quânticos) disponíveis em cada nó, e à decoerência (*quantum decoherence*) que frequentemente resulta em pares EPR e qubits de baixa qualidade, devido à perda da coerência dos estados quânticos, a fidelidade. Essas limitações têm um impacto direto na eficácia das operações realizadas em redes quânticas, em particular no roteamento de informações.

Na camada de rede, por exemplo, o roteamento de informações quânticas em redes de entrelaçamento quântico representa um grande desafio. Diferentemente das redes clássicas (não quânticas), a informação quântica codificada no qubit não pode ser copiada e encaminhada (devido ao teorema da não-clonagem quântica), e depende de operações específicas da comunicação quântica para ser transmitida. Assim, a informação quântica deve percorrer rotas complexas enquanto preserva a fidelidade, consumindo menos recursos possível. O roteamento eficiente e confiável de informações é um componente essencial para o funcionamento eficaz de qualquer rede de comunicação, incluindo redes quânticas.

Para habilitar o uso amplo de aplicações de propósito geral é essencial desenvolver métodos que permitam que protocolos quânticos se conectem às implementações de hardware subjacentes de forma transparente. Classicamente, isso é alcançado por uma série de protocolos em camadas, como a pilha TCP/IP, fornecendo um conjunto de abstrações que permite que aplicações troquem dados sem precisar saber detalhes das camadas inferiores. Versões preliminares de pilha de rede para uma Internet quântica começam a ser propostas. Para viabilizar totalmente os potenciais da computação quântica, novos desafios e problemas em aberto de redes quânticas precisam ser abordados.

No Brasil, recentemente foi lançada a Rede Rio Quântica e, pelo menos, outras duas redes quânticas de âmbito metropolitano estão em desenvolvimento em Recife e em São Paulo. No entanto, tais redes operam principalmente para experimentos relacionados com distribuição quântica de chaves, não necessariamente usando uma pilha de protocolos completa. Torna-se imperativo um plano de desenvolvimento de uma infraestrutura quântica nacional para que o Brasil possa contribuir tempestivamente, tanto no contexto teórico como experimental.

3.3.2. Contribuições de Outras Áreas de Conhecimento

As tecnologias quânticas, com seus desafios complexos em hardware, algoritmos e infraestrutura, dependem profundamente das contribuições de outras áreas do conhecimento, especialmente da Física. A Física Quântica, como base teórica dessas tecnologias, fornece os princípios fundamentais que permitem compreender e manipular fenômenos como superposição, entrelaçamento e coerência quântica. Além disso, a Física Experimental desempenha um papel central no desenvolvimento de dispositivos quânticos mais robustos e eficientes, desde a criação de qubits estáveis até a construção de sensores ultrasensíveis e repetidores quânticos de alta performance. A compreensão detalhada das interações entre partículas, estados quânticos e os mecanismos de decoerência possibilita avanços essenciais na mitigação de erros e no aumento da fidelidade dos sistemas quânticos.

Além das contribuições diretas, a Física fornece ferramentas matemáticas e computacionais que são indispensáveis para modelagem, simulação e otimização de sistemas quânticos. Técnicas avançadas de Física Computacional permitem simular o comportamento de

sistemas quânticos complexos, viabilizando testes e validações antes da implementação física. A colaboração entre físicos, cientistas da computação e engenheiros é essencial para criar soluções integradas que superem os desafios tecnológicos e operacionais das redes e dispositivos quânticos. Assim, a sinergia entre Física e outras disciplinas promove uma abordagem multidisciplinar robusta, impulsionando o avanço das tecnologias quânticas e posicionando o Brasil de forma estratégica nesse cenário global competitivo.

A evolução da Computação Quântica também traz desafios para outras áreas, em especial para a área de cibersegurança, conforme discutido na Seção 3.2. Há previsão de que os computadores quânticos de futuras gerações, de maior capacidade, sejam capazes de quebrar em tempo reduzido algoritmos criptográficos amplamente utilizados, como RSA, ECDH e ECDSA, que formam a base de segurança da Internet atual. A atualização dos sistemas existentes para utilizar criptografia resistente à computação quântica ou criptografia quântica é necessária para garantir a segurança das comunicações no longo prazo, em particular para proteger contra a ameaça de que dados capturados hoje sejam decifrados por entidades com acesso a computadores quânticos no futuro.

3.3.3. Questões socioeconômicas relevantes

As tecnologias quânticas apresentam não apenas desafios técnicos e científicos, mas também importantes implicações socioeconômicas que precisam ser cuidadosamente consideradas. O mercado global para essas tecnologias tem um potencial significativo, com projeções que variam entre 70 e 173 bilhões de dólares até 2040, de acordo com a consultoria McKinsey. A Computação Quântica, com aplicações em otimização, simulação de materiais e criptografia, deve representar a maior fatia desse mercado, estimada entre 45 e 131 bilhões de dólares. A Comunicação Quântica, fundamental para garantir segurança cibernética em nível global, pode atingir de 24 a 36 bilhões de dólares, enquanto o Sensoriamento Quântico, com aplicações críticas em áreas como medicina, defesa e exploração geológica, tem projeções entre 1 e 6 bilhões de dólares. Esse cenário evidencia não apenas o potencial econômico dessas tecnologias, mas também a necessidade urgente de políticas públicas e investimentos robustos para garantir que o Brasil não apenas consuma essas soluções, mas também as desenvolva e exporte. A participação ativa nesse mercado emergente pode reduzir desigualdades tecnológicas, impulsionar setores estratégicos da economia e criar empregos altamente qualificados, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a soberania nacional.

3.3.4. Métricas

O acompanhamento do desenvolvimento de soluções para os desafios das tecnologias quânticas exige a definição de métricas claras e objetivas que permitam avaliar o progresso técnico, científico e socioeconômico ao longo do tempo. Entre as possíveis métricas de monitoramento, sugere-se: (i) Capacidade Tecnológica, medida pelo número de qubits operacionais, taxas de fidelidade e estabilidade dos sistemas quânticos desenvolvidos; (ii) Infraestrutura Disponível, avaliada pela quantidade de redes quânticas metropolitanas implantadas, bem como pela presença de centros de pesquisa e laboratórios especializados; (iii) Desenvolvimento de Capital Humano, mensurado pelo número de profissionais capacitados, publicações científicas e programas de formação acadêmica específicos na área; (iv) Inovação e Propriedade Intelectual, com foco na quantidade de patentes re-

gistradas e tecnologias transferidas para o setor produtivo; (v) Parcerias e Colaborações Internacionais, avaliadas pelo número de acordos firmados com instituições estrangeiras e participação em projetos multilaterais; e (vi) Impacto Econômico, com métricas que envolvam o crescimento do mercado interno relacionado às tecnologias quânticas, bem como o volume de investimentos públicos e privados captados. Essas métricas, se monitoradas periodicamente, fornecerão uma visão abrangente do avanço brasileiro na área, permitindo ajustes estratégicos para garantir competitividade global e alinhamento com objetivos de longo prazo.

3.4. Acesso Universal e Significativo à Internet através do Desenvolvimento Sustentável, Resiliente e Seguro de Infraestruturas Ubíquas de Comunicação

Este Grande Desafio analisa sub-desafios computacionais associados ao tema do acesso universal e significativo à Internet, explorando as perspectivas para a próxima década. São identificados problemas emergentes e discutida sua relevância, e são propostas recomendações para instrumentalizar a área de Computação na formulação de soluções robustas e sustentáveis para esses sub-desafios. A abordagem adotada reflete a complexidade multidisciplinar inerente ao tema e reconhece a Internet não apenas como uma infraestrutura tecnológica essencial, mas também como um catalisador para o desenvolvimento socioeconômico e cultural e avanços científicos de amplo espectro.

A existência de acesso significativo à Internet representa um dos pilares fundamentais para a transformação digital, revisitando uma série de desafios computacionais frequentemente multidisciplinares. Tais desafios não são apenas tecnológicos, mas também refletem questões sociais, culturais, econômicas e éticas. A identificação e o endereçamento desses problemas é essencial para garantir que a Internet se torne um recurso acessível, seguro e inclusivo, atendendo às necessidades da sociedade brasileira [34, 35].

O enfrentamento dos desafios relacionados à ubiquidade da Internet requer a colaboração de várias subáreas da Computação, cada uma desempenhando um papel crucial. **Redes de Computadores** são fundamentais para projetar infraestruturas escaláveis e eficientes, enquanto a **Computação Distribuída** contribui para a gestão de sistemas interconectados de larga escala. A **Engenharia de Software** é indispensável no desenvolvimento de soluções robustas e adaptáveis, garantindo qualidade e segurança. A **Interação Humano-Computador (IHC)** assegura que as tecnologias criadas sejam acessíveis e centradas nas necessidades dos usuários. Por sua vez, a **Segurança da Informação** fornece as bases para proteger dados e privacidade, elementos essenciais em um ambiente digital cada vez mais complexo e interligado.

A ubiquidade da Internet intersecciona com diversos outros temas cruciais para o avanço da sociedade e da tecnologia. Na área de **Sustentabilidade**, ela impulsiona o desenvolvimento de soluções energéticas mais eficientes e práticas de economia circular, reduzindo impactos ambientais. No campo da **Saúde e Bem-Estar**, habilita inovações como a telemedicina e o monitoramento remoto de pacientes, ampliando o acesso a cuidados médicos. Em **Educação**, possibilita plataformas de ensino remoto e personalização de aprendizado, promovendo a inclusão digital e reduzindo desigualdades. No setor de **Economia**, facilita o empreendedorismo digital e a expansão de mercados globais, gerando

novas oportunidades de emprego e inovação.

3.4.1. Detalhamento do Grande Desafio

Implantar e Promover Acesso Universal à Infraestrutura Capilarizada

A ausência de infraestrutura básica de conectividade em áreas remotas e economicamente desfavorecidas representa uma barreira substancial para a inclusão digital. Essa limitação é exacerbada por desafios relacionados ao custo elevado de implementação de redes de acesso à Internet em regiões geograficamente isoladas, onde há dificuldade técnica de implantação e o retorno financeiro para grandes ISPs (*Internet Service Providers*) é muitas vezes insuficiente. Nesse contexto, redes comunitárias e dispositivos de baixa potência, baixo consumo e longo alcance têm potencial para desempenhar um papel fundamental na universalização do acesso à Internet [36, 37]. Além disso, a infraestrutura existente frequentemente carece de manutenção adequada e de recursos humanos com capacidade técnica para atender às crescentes demandas dos usuários. Para isso, estratégias “*zero-touch*” de gerenciamento da infraestrutura de rede poderão reduzir ou eliminar a necessidade de configurações manuais.

Além do acesso propriamente dito, é necessário garantir a adequada instrução da população (literacia digital) para que esse acesso seja significativo, de forma que os serviços e funcionalidades habilitados pela Internet possam ser usados no exercício da cidadania [38]. Abordar esses problemas exige o desenvolvimento de soluções econômicas e escaláveis, bem como a formulação de políticas públicas que incentivem a universalização e a qualificação do acesso.

Implementar e Implantar Sensores como Plataforma para Aplicações Nacionais em Extensas Áreas Geográficas

O Brasil enfrenta desafios únicos e complexos em conectividade devido à sua vasta extensão territorial e à diversidade de cenários geográficos. Regiões rurais extensas, florestas tropicais, áreas costeiras de baixa densidade populacional e metrópoles densamente povoadas demandam soluções inovadoras para garantir acesso significativo à Internet. Essa conectividade é fundamental não apenas para integrar comunidades e fomentar o desenvolvimento econômico, mas também para implementar tecnologias essenciais, como sensores para Internet das Coisas (IoT), muitas vezes usada no monitoramento ambiental e em infraestruturas resilientes em cenários urbanos [39]. No entanto, a interoperabilidade entre dispositivos heterogêneos e a escalabilidade das redes enfrentam barreiras significativas devido ao crescimento exponencial de dispositivos conectados, gerando grandes volumes de dados não estruturados (ver, a respeito, o Desafio 3.1). Além disso, questões regulatórias e de governança dificultam a padronização e a implementação eficaz de soluções avançadas.

Superar esses desafios exige pesquisas focadas em três pilares principais: escalabilidade, interoperabilidade e eficiência. Para escalabilidade, investigações devem explorar arquiteturas de redes resilientes, capazes de integrar bilhões de dispositivos em ambientes variados, mantendo alto desempenho. A interoperabilidade demanda o desenvolvimento de protocolos universais ou adaptativos que facilitem a comunicação eficiente entre dispositivos heterogêneos em cenários rurais e urbanos. Já para eficiência, é crucial avançar em

algoritmos de processamento distribuído e modelos para agregação e análise de grandes volumes de dados produzidos pela IoT. Além disso, estudos sobre governança e padrões de compatibilidade são essenciais para permitir a aplicação prática e segura dessas tecnologias.

Para superar os desafios de conectividade no Brasil, é essencial explorar tecnologias avançadas como Redes Definidas por Software (SDN) e Virtualização de Funções de Rede (NFV), que oferecem maior flexibilidade e eficiência no gerenciamento de redes complexas [40]. Tecnologias de comunicação, como 6G e redes de próxima geração, são fundamentais para fornecer conectividade de alta velocidade e baixa latência em regiões diversificadas. Soluções baseadas em *Edge Computing* e *Fog Computing* podem reduzir a latência ao processar dados mais próximos dos dispositivos, enquanto a IoT viabiliza monitoramento e automação em áreas remotas e urbanas. Além disso, a aplicação de Inteligência Artificial (notadamente Aprendizado de Máquina) é crucial para otimizar redes e prever problemas, e o uso de Blockchain pode garantir segurança e confiabilidade na comunicação de dispositivos heterogêneos. Essas tecnologias, integradas, oferecem o potencial necessário para enfrentar as barreiras técnicas e regulatórias, promovendo conectividade eficiente e sustentável.

Gerenciar Comunicações Verdes e Sustentáveis

O gerenciamento de infraestruturas de comunicação é um campo crítico para a operação eficiente de sistemas de Tecnologia da Informação (TI) em organizações contemporâneas. No entanto, preocupações com a eficiência operacional, o aumento do consumo de energia e a elevação dos níveis de emissão de CO₂ por essas infraestruturas têm se tornado importantes tópicos de debate [41]. O desenvolvimento de aplicações sustentáveis, como será visto na Seção 3.5, é um desafio crítico. Para além das aplicações, o presente desafio foca nas questões relacionadas à comunicação de dados e habilitam aplicações distribuídas, o que é complementar ao desafio 3.5. Provisionamento de redes sob demanda, de maneira flexível e eficiente, possibilita a criação de infraestruturas virtualizadas, que são mais escaláveis e podem ser gerenciadas de maneira centralizada, otimizando o uso de recursos físicos. Além disso, a virtualização de funções de rede (NFV — *Network Function Virtualization*) torna possível reduzir o número de equipamentos físicos necessários para a operação, impactando diretamente no consumo de energia e no custo de manutenção. O consumo excessivo de energia por dispositivos conectados, redes e *data centers* representa um impacto ambiental considerável, exacerbado pelo aumento contínuo da digitalização global. Para mitigar esse problema, é imperativo adotar tecnologias que priorizem a eficiência energética, como arquiteturas de baixo consumo e algoritmos otimizados. Além disso, práticas de sustentabilidade, como o uso de fontes de energia renováveis devem ser integradas ao ciclo de vida das infraestruturas digitais. Esse desafio demanda esforços coordenados entre a indústria, o governo e a academia para criar soluções ambientalmente responsáveis.

Promover uma Infraestrutura de Internet Segura

Ataques cibernéticos contra infraestruturas de redes podem ter consequências devastadoras para indivíduos e organizações, minando a confiança na infraestrutura de comunicação. Abordar essas questões requer uma combinação de medidas técnicas, como a implementação de protocolos de segurança avançados, redefinição automática de confi-

gurações da infraestrutura e ações regulatórias que garantam o cumprimento de padrões globais de privacidade. Além disso, é crucial promover a conscientização entre os usuários sobre boas práticas de segurança [42], ampliando a resiliência do ecossistema digital, como já enfatizado na Seção 3.2.

Implementar Meios de Computação e Comunicação Resilientes

Resiliência refere-se à capacidade de sistemas computacionais de se manterem operacionais mesmo diante de desastres naturais, falhas de componentes, ataques cibernéticos, erros operacionais ou outros eventos adversos. Por exemplo, eventos extremos, como enchentes, ciclones e tempestades intensas podem comprometer as infraestruturas das quais a sociedade depende. Para garantir essa robustez, é essencial a implementação de arquiteturas redundantes, protocolos de redefinição automática de elementos da rede, e mecanismos de adaptação dinâmica que minimizem interrupções e assegurem a continuidade dos serviços para a população [43]. Estratégias de resiliência devem contemplar etapas proativas e reativas, incluindo tanto mecanismos de defesa a ameaças previamente antecipadas, como também mecanismos de remediação para lidar com situações adversas de forma reativa. Por exemplo, sensores de monitoramento e telemetria da infraestrutura podem ser empregados para identificar situações adversas, levando ao redirecionamento do tráfego de rede em torno de áreas de infraestrutura com falha ou a própria migração e provisionamento de infraestruturas de computação e comunicação para localizações alternativas.

3.4.2. Contribuições de Outras Áreas de Conhecimento

A resolução dos desafios relacionados à ubiquidade da Internet requer colaborações interdisciplinares que ampliem as perspectivas e forneçam soluções complementares. A **Engenharia Elétrica e de Telecomunicações** desempenha um papel central no desenvolvimento de dispositivos e tecnologias para infraestrutura digital, como sensores energeticamente eficientes, dispositivos IoT e sistemas de comunicação de longo alcance. Além disso, iniciativas voltadas para energia renovável e eficiência dos circuitos eletrônicos são essenciais para garantir redes sustentáveis e acessíveis, especialmente em áreas remotas.

As **Ciências Humanas e Sociais** analisam os impactos culturais e econômicos da inclusão digital, promovendo a criação de soluções adaptadas a diferentes comunidades. O **Direito** assegura a proteção de dados e a regulamentação de tecnologias, equilibrando inovação e direitos fundamentais. Já a **Educação** foca no letramento digital, capacitando populações vulneráveis a participar ativamente da economia conectada. Juntas, essas áreas viabilizam uma abordagem inclusiva e sustentável para superar os desafios da ubiquidade da Internet.

3.4.3. Questões Socioeconômicas Relevantes

Inclusão digital — A inclusão digital é fundamental para reduzir desigualdades sociais e econômicas, garantindo que comunidades marginalizadas tenham acesso a recursos essenciais como educação, saúde e oportunidades de emprego. Além de expandir a infraestrutura, é necessário investir em alfabetização digital, acessibilidade e políticas públicas que tornem dispositivos e serviços mais acessíveis.

Impactos no mercado de trabalho — A transformação digital está redefinindo o mercado de trabalho, substituindo empregos tradicionais por novas funções que exigem competên-

cias tecnológicas. Requalificar a força de trabalho e fomentar programas educacionais focados em habilidades digitais são medidas essenciais para garantir uma transição justa e inclusiva.

Segurança e privacidade — O aumento da conectividade traz também desafios à segurança e privacidade dos usuários. Para enfrentar esses riscos, é necessário adotar soluções tecnológicas avançadas, como criptografia e autenticação robusta, além de implementar regulamentações claras que protejam os dados pessoais e promovam a confiança no ambiente digital.

Em sintonia com os tópicos recém mencionados e ampliando questões socioeconômicas relevantes, o desafio apresentado na Seção 3.6 enumera aspectos que são cruciais para a promoção de acesso universal e significativo à Internet. Entre eles, destacam-se o incentivo à interdisciplinaridade no desenvolvimento de soluções, o estabelecimento de mecanismos centrados no usuário para identificação de necessidades dos diferentes segmentos e a definição de ações visando ao letramento digital dos cidadãos.

3.4.4. Métricas

A avaliação do progresso em direção à ubiquidade da Internet exige métricas claras e abrangentes que orientem investimentos e identifiquem lacunas. Entre as principais, destaca-se a **cobertura de acesso**, que mede a porcentagem de indivíduos conectados, especialmente em áreas rurais. O **nível de habilidades digitais** monitora a alfabetização tecnológica da população, enquanto a **eficiência energética** avalia a sustentabilidade das infraestruturas. Além disso, o **uso eficiente da Internet** e o **impacto socioeconômico** ajudam a entender como a conectividade melhora qualidade de vida e oportunidades econômicas. Por fim, índices compostos integram múltiplas métricas, oferecendo uma visão global do progresso e das áreas críticas.

3.5. Redução do Impacto Socioambiental no Desenvolvimento e Uso de Aplicações por meio de Computação Sustentável

As Nações Unidas consideram que o mundo está em estado de emergência climática. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à queima de combustíveis fósseis foram suficientes para aumentar a temperatura média global entre 1,1 e 1,2 °C [44]. Desde 2015, o Brasil é signatário do Acordo de Paris, um tratado internacional que cobre a mitigação, adaptação e financiamento de ações de mitigação das mudanças climáticas. Em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution* — iNDC) ajustada, o governo brasileiro se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa de 43% até 2030 e 60% até 2035, em relação ao nível de 2019, e atingir emissões líquidas zero de dióxido de carbono até 2050 [45].

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 [46], 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% de emissões de GEE em 2022.

A Agência Internacional de Energia alerta [47] para uma tendência de forte aumento na demanda de energia. 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 um dos 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 à tamanha quantidade de energia. Enquanto países desenvolvidos promovem iniciativas como o *Energy Efficiency Directive* da União Europeia [48], 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.

Reduzir 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** [49]. O fim da Lei de Moore e o aumento da carga de trabalho computacional não permitirá que apenas melhorias no hardware sejam eficazes para limitar o consumo de energia da Computação.

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. Uma parte essencial deste grande desafio será adaptar as técnicas tradicionais de Computação de Alto Desempenho — área da Computação que estuda como otimizar o uso de recursos computacionais para tornar aplicações mais eficientes — para considerar as emissões de gases de efeito estufa no processo de otimização da execução.

3.5.1. Detalhamento do Grande Desafio

Desenvolver algoritmos energeticamente eficientes

Será necessário projetar algoritmos que resolvam problemas computacionais de maneira energeticamente eficiente através da otimização e uso consciente dos recursos, mediante

técnicas diversas, tais como computação aproximada e algoritmos aproximados, obtendo soluções sub-ótimas, porém, acuradas para o destino a que se presta.

Incentivar 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, um gerenciador de recursos pode tomar decisões que minimizem o custo e recursos energéticos da execução, postergando 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 de consumo energético.

Criar novas formas de automação inteligente para apoiar o processo de desenvolvimento

Novas ferramentas que automatizem a aplicação de técnicas de redução de energia deverão ser desenvolvidas, tornando a aplicação dessas técnicas mais acessíveis aos programadores. Por exemplo, novos perfiladores poderiam permitir avaliar o desempenho computacional de uma aplicação considerando todos os escopos do Protocolo GHG [50].

Desenvolver hardware e software especializados

Investir no desenvolvimento de hardware e software especializados para aplicações específicas, explorando novas arquiteturas e abordagens para considerar os indicadores de energia como fator de qualidade do produto. A criptominação 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. 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.

Incorporar sustentabilidade às métricas de desempenho para Computação de Alto Desempenho

As novas plataformas de computação de alto desempenho deverão também priorizar a eficiência energética e a gestão sustentável de recursos, equilibrando desempenho e consumo. Serão necessárias novas soluções para gerenciar e executar com eficiência as aplicações e fluxos de trabalho 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. Para tal, é preciso aperfeiçoar o gerenciamento de hardware, balanceamento de carga e minimizar a movimentação de dados para reduzir o consumo energético.

3.5.2. Contribuições de outras áreas do conhecimento

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

- **Engenharia:** melhorar a eficiência energética do hardware e da infraestrutura computacional, com novas tecnologias de resfriamento de *data centers*, de infraestrutura de comunicação, etc.
- **Gestão Ambiental e Engenharia Ambiental:** melhorar a gestão do impacto ambiental da Computação, incluindo novas métricas de poluição (p. ex.: 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 [51] 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.

Computação sustentável não é algo que faça parte dos assuntos comumente estudados por pesquisadores de 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, Modelagem Matemática e Computacional, Computação Distribuída, Computação de Alto Desempenho e Arquitetura de Computadores, Engenharia de Software, Sistemas Operacionais e Redes de Computadores.

A solução deste grande desafio também permeia os demais 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 sobre a eficiência operacional, o aumento do consumo de energia e a elevação dos níveis de emissão de GEE.

3.5.3. Questões socioeconômicas relevantes

Além de contribuir com a desaceleração das mudanças climáticas e outros aspectos socioambientais, avanços em Computação Sustentável contribuirão para a obtenção de **Sustentabilidade Econômica** — reduzir a ineficiência energética reduzirá os custos de acesso aos 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.

3.5.4. Métricas

Os avanços da comunidade científica brasileira nesse grande desafio poderão ser medido por indicadores como:

- Os Indicadores Nacionais de Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo Federal⁴, medindo o investimento do setor público e privado, formação de recursos humanos, bolsas de formação, produção científica e patentes de projetos em Computação Sustentável;
- Número de disciplinas de graduação e pós-graduação com ementas relacionadas ao desenvolvimento de sistemas de baixo carbono e/ou de baixa energia;
- Análise dos softwares de baixo carbono e das infraestruturas computacionais gerenciadas de forma ciente de emissões usando algoritmos e sistemas desenvolvidos que incluam também métricas tradicionais de avaliação de eficiência energética, como MIPS/Joules ou GFLOPS/Joule e estimativas de emissões de gases de efeito estufa com base em seu potencial de aquecimento global (equivalência em dióxido de carbono);
- Eventos científicos envolvendo academia e indústria focados na temática de Computação Sustentável.

3.6. Construção de Ecossistemas Computacionais Éticos, Inclusivos, Interdisciplinares e Sustentáveis para a Promoção da Participação e da Equidade Social

A construção de ecossistemas computacionais integrados que alinhem princípios éticos, diversidade cultural e inclusão digital é essencial para atender às demandas da sociedade contemporânea. Esses ecossistemas devem basear-se na colaboração interdisciplinar, incorporar mecanismos de interação natural centrados no usuário e conseguir monitorar, avaliar e adaptar suas implicações sociais de forma transparente e responsável. Além disso, precisam promover a participação social, combater a desinformação e contribuir para a formulação de políticas públicas sustentáveis baseadas em evidências.

⁴<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/indicadores>

O enfrentamento desses desafios é fundamental para assegurar o desenvolvimento de soluções tecnológicas que realmente atendam às necessidades sociais mais urgentes. Isso envolve não apenas a criação de tecnologias acessíveis e inclusivas, mas também a garantia de que elas respeitem as diversidades regionais e culturais e que consigam lidar com os impactos sociais de forma ética e responsável. Tecnologias computacionais devem agir como ferramentas de empoderamento, permitindo que indivíduos e comunidades participem ativamente na tomada de decisões, ao mesmo tempo em que criam condições para reduzir desigualdades e ampliar o acesso a serviços essenciais. O combate à exclusão digital e a promoção do letramento digital são passos fundamentais nesse processo, aliados ao uso consciente e ético de dados para mitigar possíveis riscos e maximizar os benefícios.

Para alcançar esses objetivos, é imprescindível integrar conhecimentos de várias áreas e subáreas da Computação, incluindo Engenharia de Software, Sistemas de Informação, Inteligência Artificial (aplicada à análise de dados sociais), Interação Humano-Computador, Computação Ubíqua, Ciência de Dados (especialmente para a análise de padrões de uso), Educação Assistida por Computador, Computação Móvel, Redes, Computação Distribuída, Processamento de Linguagem Natural, Segurança da Informação, Privacidade, Computação em Nuvem e Ética em Computação. Essa interdisciplinaridade permite que as soluções sejam mais robustas, inclusivas e capazes de enfrentar os desafios de um mundo cada vez mais digital e interconectado.

3.6.1. Detalhamento do Grande Desafio

Criar estratégias para promoção da interdisciplinaridade para construção de soluções de computação alinhadas com as diferentes nuances socioeconômicas

A promoção da interdisciplinaridade na construção de soluções de computação alinhadas às diferentes nuances socioeconômicas é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias mais completas e impactantes. Essa abordagem considera não apenas os aspectos técnicos, mas também os contextos socioeconômicos, culturais e ambientais, garantindo maior sensibilidade às diversidades locais e atendendo a necessidades globais eficientemente. A integração de diferentes saberes enriquece o processo, permitindo que as soluções computacionais tenham um impacto mais positivo e abrangente.

Entre as principais linhas de investigação que sustentam esse objetivo está a Computação Social, que examina como as tecnologias computacionais interagem com dinâmicas sociais, culturais e políticas. Essa linha de pesquisa busca compreender e aprimorar o papel das tecnologias na facilitação de interações humanas, na promoção da inclusão digital e na criação de sistemas que respondam de maneira eficaz às necessidades das comunidades. Exemplos incluem plataformas colaborativas, redes sociais e sistemas que abordem desigualdades sociais por meio de tecnologia. Já o Design Centrado em Valores (Value-Sensitive Design) propõe desenvolver tecnologias que respeitem e incorporem valores humanos fundamentais, como privacidade, equidade, inclusão, segurança e autonomia. Essa abordagem garante que, desde a concepção até a implementação, as soluções computacionais reflitam os princípios éticos e as necessidades das pessoas afetadas por elas. Um exemplo prático seria o design de algoritmos de Inteligência Artificial que evitem discriminações ou vieses implícitos. Na Engenharia de Software temos também linhas de pesquisa importantes, como a engenharia de requisitos sociotécnicos, que combina

aspectos sociais e técnicos no levantamento e análise de requisitos para sistemas computacionais buscando identificar, entender e incorporar as complexidades socioculturais que influenciam o uso e a eficácia dos sistemas, garantindo que eles atendam tanto às necessidades técnicas quanto às expectativas sociais dos usuários. Isso pode envolver, por exemplo, o uso de metodologias participativas para envolver comunidades na concepção de sistemas. Por fim, a modelagem de sistemas adaptativos sensíveis ao contexto social explora a criação de sistemas que possam se ajustar dinamicamente às mudanças no contexto social e às necessidades dos usuários. Esses sistemas utilizam dados contextuais para oferecer experiências mais relevantes e personalizadas, como em plataformas educacionais que adaptam conteúdos para diferentes perfis de aprendizado ou sistemas de saúde que consideram fatores socioeconômicos e culturais dos pacientes no atendimento.

Estabelecer mecanismos centrados no usuário para identificação de demandas com relevância social dos diferentes segmentos

Essa abordagem requer o uso de metodologias participativas, como design thinking e pesquisa etnográfica, para captar as reais necessidades sociais. Essas metodologias permitem compreender de forma mais aprofundada o contexto em que as tecnologias serão aplicadas, garantindo que os recursos tecnológicos desenvolvidos tenham relevância prática e contribuam efetivamente para o fortalecimento de comunidades e indivíduos. Além disso, o processo participativo fomenta a criação de soluções mais inclusivas, inovadoras e ajustadas às realidades locais.

As principais linhas de investigação associadas a esse objetivo envolvem metodologias participativas de design, buscando promover o envolvimento direto dos usuários no processo de concepção de soluções computacionais e colocando os usuários como cocriadores, permitindo que suas perspectivas, experiências e demandas específicas sejam integradas ao desenvolvimento de tecnologias. Devem ser usadas também ferramentas como workshops colaborativos, prototipagem rápida e sessões de feedback iterativo para garantir que os resultados atendam às expectativas dos usuários. Exemplos incluem o design de interfaces amigáveis para populações com baixa alfabetização digital ou soluções tecnológicas para comunidades com acesso limitado à internet. A análise de necessidades de usuários diversificados também se torna uma linha de investigação importante, dado que foca em identificar e entender as demandas específicas de grupos variados, como idosos, crianças, pessoas com deficiência e populações vulneráveis. Essa linha de pesquisa utiliza métodos qualitativos e quantitativos para mapear necessidades únicas, para projetar tecnologias que atendam a esses públicos de forma eficiente e digna. Exemplos práticos incluem o desenvolvimento de aplicativos acessíveis para pessoas com deficiências visuais ou a criação de ferramentas educacionais personalizadas para crianças em idade escolar. Por fim, outra linha de investigação é a personalização e adaptabilidade em sistemas computacionais, que visa desenvolver tecnologias que possam ser customizadas conforme as preferências, características e necessidades individuais dos usuários. Nesta linha, os sistemas adaptativos utilizam dados coletados em tempo real para ajustar funcionalidades, interfaces ou conteúdos, proporcionando experiências mais relevantes e eficazes. Um exemplo seria uma plataforma de saúde que adapta recomendações com base nos hábitos de vida e condições de saúde do usuário ou sistemas educacionais que ajustam o conteúdo conforme o ritmo de aprendizado de cada estudante.

Promover a cidadania e o letramento digital para os cidadãos participarem da sociedade por meio das tecnologias, de forma consciente e responsável

Promover o letramento digital significa ir além do simples ensino do uso de ferramentas tecnológicas, desenvolvendo também uma consciência crítica sobre o impacto dessas tecnologias na sociedade. Esse processo envolve orientar os cidadãos sobre questões fundamentais como privacidade, segurança e ética no uso da tecnologia, além de capacitá-los para identificar e evitar a desinformação. O letramento digital, assim, torna-se um elemento-chave para fortalecer a cidadania ativa, permitindo que os indivíduos participem de maneira responsável e consciente na sociedade digital, contribuindo para a construção de um ambiente digital mais ético e inclusivo.

Dentre as principais linhas de investigação que sustentam essa proposta estão as plataformas educacionais digitais inclusivas que exploram a criação de ambientes de aprendizagem digital que sejam acessíveis e adaptáveis a diferentes perfis de usuários. Isso inclui o desenvolvimento de interfaces que atendam a necessidades específicas, como ferramentas para pessoas com deficiência, e a oferta de conteúdos que se ajustem a diferentes níveis de habilidade digital. Um exemplo prático seria uma plataforma de ensino que utiliza inteligência artificial para personalizar o conteúdo com base no nível de conhecimento do aluno ou que disponibiliza recursos acessíveis para pessoas com deficiência visual. Outra linha de investigação que pode ser citada é o desenvolvimento de conteúdos de letramento digital, focando na criação de materiais e ferramentas que capacitem os cidadãos a utilizarem tecnologias de forma consciente, segura e ética. Isso inclui a elaboração de cursos online, jogos educativos e recursos interativos que abordem temas como segurança digital, combate às *fake news* e ética no uso da tecnologia. Por exemplo, um aplicativo gamificado pode ensinar crianças e adolescentes a identificar riscos de privacidade e a lidar com interações seguras em redes sociais. Por fim pode ser explorada ainda outra linha de investigação que é a de estudos de usabilidade e acessibilidade, na qual se deve analisar como diferentes grupos de pessoas interagem com sistemas computacionais, para identificar barreiras e melhorar a experiência do usuário. Esses estudos envolvem avaliar interfaces, ferramentas e dispositivos tecnológicos para torná-los mais intuitivos e inclusivos. Um exemplo seria a pesquisa sobre melhorias em dispositivos móveis para idosos ou a adaptação de aplicativos para linguagens de sinais, garantindo que a experiência tecnológica seja efetiva para todos.

Criar soluções computacionais baseadas em interação natural alinhadas com inclusão digital, diversidades regionais/culturais e características específicas de grupos como crianças, adolescentes, idosos e analfabetos funcionais

Desenvolver soluções que considerem as características e limitações de diferentes públicos, como crianças, adolescentes, idosos e analfabetos funcionais, é fundamental para garantir a inclusão digital e promover o uso equitativo das tecnologias. Tecnologias baseadas em interação natural, como comandos por voz ou interfaces intuitivas, podem facilitar significativamente o acesso e a utilização de sistemas, especialmente para aqueles com menor familiaridade com dispositivos digitais. Além disso, é essencial respeitar as diversidades regionais e culturais, garantindo que as soluções tecnológicas atendam às particularidades locais. Essa abordagem não apenas amplia a acessibilidade, mas também promove maior equidade no uso das tecnologias digitais, permitindo que mais pessoas

participem plenamente da sociedade digital.

Uma primeira linha de investigação para enfrentar esse desafio seria o desenvolvimento de interfaces naturais e acessíveis, que se concentra em soluções intuitivas por meio do uso de interações naturais, como gestos, reconhecimento facial ou comandos de voz, para facilitar o uso por pessoas com diferentes habilidades ou limitações. Essas tecnologias tornam dispositivos mais acessíveis e inclusivos, permitindo, por exemplo, que pessoas idosas possam realizar tarefas digitais usando apenas a voz ou que crianças interajam com sistemas por meio de gestos simples e intuitivos. Outra linha para investigação é o reconhecimento de fala e linguagem natural para inclusão digital, que explora o uso de tecnologias de linguagem natural para criar sistemas mais acessíveis, especialmente para pessoas com baixa alfabetização, dificuldades físicas ou limitações motoras. Essas tecnologias podem ser empregadas em assistentes virtuais, aplicativos de leitura em voz alta e sistemas que traduzem texto para fala em tempo real. Um exemplo seria o uso de reconhecimento de fala em dispositivos móveis para auxiliar analfabetos funcionais a acessar informações importantes ou se comunicar por mensagens de áudio. Uma terceira linha de investigação é o design inclusivo, considerando especificidades culturais e regionais, que foca no desenvolvimento de soluções que respeitem e integrem as diversidades culturais e regionais, criando tecnologias que se adaptam ao contexto local dos usuários. Isso pode incluir interfaces que utilizem idiomas locais, símbolos culturais familiares e funcionalidades ajustadas às práticas regionais. Por exemplo, um aplicativo educacional pode ser projetado para incluir expressões regionais ou tradições culturais em seu conteúdo, tornando-o mais relevante para os usuários.

Criar estratégias para mapear e monitorar as implicações das soluções computacionais na sociedade de forma descentralizada e independente de plataforma

Estratégias para mapear e monitorar as implicações sociais de tecnologias precisam ser descentralizadas e independentes de plataformas específicas, de modo a garantir transparência e imparcialidade no processo. Essas estratégias envolvem a avaliação contínua do impacto de soluções digitais em diferentes contextos, identificando possíveis consequências negativas, como exclusão digital, exploração indevida de dados ou amplificação de desigualdades sociais. Com base nesses diagnósticos, é essencial promover ajustes nas tecnologias para mitigar problemas e garantir que seu uso contribua positivamente para a sociedade.

Uma linha de investigação bastante importante é a de auditoria algorítmica, cujo objetivo é criar mecanismos que avaliem algoritmos quanto a possíveis vieses ou impactos negativos. Faz-se muito importante a criação de ferramentas que permitam identificar decisões automatizadas que possam reforçar discriminações ou priorizar interesses corporativos em detrimento de valores sociais. Um exemplo seria o desenvolvimento de sistemas para verificar se algoritmos de recomendação de conteúdo estão favorecendo *fake news* ou criando bolhas de informação. Outra linha bastante importante para o desenvolvimento de pesquisas é a de construção de sistemas de monitoramento ético e impacto social voltados para o acompanhamento contínuo das implicações sociais e éticas de soluções computacionais, garantindo que elas permaneçam alinhadas aos valores fundamentais da sociedade. Esses sistemas podem avaliar como as tecnologias afetam diferentes grupos populacionais e propor ajustes antes que problemas se agravem. Por exemplo, ferramentas que moni-

toram como plataformas digitais impactam comunidades marginalizadas podem ajudar a prevenir exclusões ou injustiças. Pode ser citada ainda outra linha de investigação que é a de modelos descentralizados de análise e feedback, que busca desenvolver sistemas que permitam coletar e analisar feedback diretamente dos usuários, de maneira descentralizada e democrática. Isso garante que as avaliações sejam imparciais e representem uma diversidade de perspectivas. Esses modelos podem ser aplicados em plataformas que coletam sugestões de melhoria, relatórios de problemas ou percepções dos usuários sobre o impacto social de determinadas tecnologias, promovendo ajustes mais rápidos e eficientes.

Participar efetivamente da construção de políticas públicas para garantir a equidade, a responsabilização, a transparência e a ética do uso de soluções computacionais na sociedade

Colaborar na criação de legislações e regulamentações que assegurem equidade, transparência e responsabilização no uso de soluções digitais é essencial para garantir que a tecnologia seja uma ferramenta de inclusão e desenvolvimento social. Ao participar ativamente da formulação de políticas públicas, a área de Computação pode contribuir para proteger os direitos dos cidadãos e promover uma sociedade mais justa, conectada e inclusiva. Essa colaboração permite que as tecnologias sejam usadas de forma ética e responsável, reduzindo riscos como discriminação algorítmica, violações de privacidade e exclusão digital.

Entre as principais linhas de investigação está a análise de impacto ético de tecnologias computacionais, que se concentra na avaliação das implicações morais e éticas associadas ao desenvolvimento e uso de novas tecnologias. Essa linha de pesquisa examina questões como vieses algorítmicos, impactos sobre a privacidade e possíveis consequências sociais negativas, propondo diretrizes para que tecnologias respeitem valores fundamentais. Um exemplo seria a análise de sistemas de reconhecimento facial quanto a discriminações ou riscos de uso abusivo. Outra linha também necessária é o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para políticas públicas, buscando criar ferramentas computacionais que auxiliem governos e gestores públicos a tomarem decisões mais informadas, baseadas em dados concretos. Esses sistemas podem ser usados para prever o impacto de políticas, otimizar a alocação de recursos ou monitorar a eficácia de regulamentações. Por exemplo, uma plataforma pode ajudar a identificar desigualdades no acesso digital e propor soluções para mitigá-las. Outra linha de investigação também bastante necessária é o estudo sobre governança de dados e algoritmos, explorando formas de regular e gerenciar o uso de dados e algoritmos, garantindo segurança, privacidade e equidade. Essa linha de pesquisa abrange desde o desenvolvimento de estruturas para auditoria de algoritmos até a criação de diretrizes que assegurem o uso ético e transparente de dados por organizações públicas e privadas. Exemplos que podem ser citados incluem propostas para regulamentar a coleta e uso de dados pessoais ou políticas para aumentar a transparência em algoritmos de recomendação.

3.6.2. Contribuições de outras áreas do conhecimento

Estes desafios podem ser melhor enfrentados se suas soluções receberem contribuições de outras áreas de conhecimento. Algumas das principais são citadas aqui:

Ciências Sociais — Ajudam a compreender os impactos sociais e culturais das tecnologias. Oferecem ferramentas para investigar desigualdades, comportamentos coletivos e processos de inclusão digital.

Ciências Sociais Aplicadas — Contribuem com o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias práticas para aplicar soluções tecnológicas em problemas reais. Auxiliam na criação de modelos sustentáveis e na implementação eficiente de projetos tecnológicos com impacto social.

Ciências Políticas — Ajudam a moldar o papel das tecnologias na governança, garantindo transparência, participação pública e equidade. Orientam como formular regulamentações e políticas que assegurem o uso ético e responsável das soluções computacionais.

Antropologia — Contribui na análise da relação entre cultura, tecnologia e sociedade. Permite entender como diferentes grupos sociais e culturais interagem com tecnologias, garantindo que as soluções sejam culturalmente adaptadas, inclusivas e respeitem as diversidades regionais.

Educação — Desempenha um papel crucial na formação de cidadãos críticos e capazes de lidar com as transformações digitais. Ajuda a desenvolver programas de letramento digital, promove o uso consciente das tecnologias e incentiva a integração da computação no ensino.

Comunicação — Auxilia no combate à desinformação, criando estratégias para disseminar informações precisas e confiáveis. Também é essencial para promover campanhas de conscientização sobre o uso ético das tecnologias.

Saúde — Pode integrar tecnologias computacionais para melhorar a qualidade e o acesso aos serviços de saúde, como telemedicina, análise de dados e sistemas de gestão hospitalar. Contribui para entender os impactos da tecnologia no bem-estar mental e físico.

Filosofia — Fornece uma base ética e crítica para o desenvolvimento de tecnologias. Ajuda a refletir sobre as implicações morais e existenciais das soluções computacionais, orientando decisões em áreas como inteligência artificial, privacidade e responsabilidade social.

Psicologia — Contribui com o entendimento do comportamento humano frente às tecnologias, ajudando a criar interfaces mais acessíveis e intuitivas. Auxilia na análise de questões relacionadas à saúde mental, dependência digital e impacto das redes sociais.

3.6.3. Questões socioeconômicas relevantes

Aspectos éticos na Computação — É necessário criar diretrizes e regulamentações que garantam o uso responsável da tecnologia, respeitando os direitos humanos e promovendo a equidade. A ética na Computação não é apenas uma questão técnica, mas também social, exigindo uma abordagem multidisciplinar para lidar com os impactos das tecnologias emergentes.

Combate à desinformação — A desinformação e *fake news* têm impactos profundos na democracia, na confiança social e na segurança pública. Combater a desinformação requer combinar tecnologias avançadas, como inteligência artificial para detecção automática de conteúdos falsos, com iniciativas educacionais que desenvolvam o pensamento crítico nos

cidadãos.

Desigualdade social — A desigualdade no acesso à Computação limita a inclusão social e econômica de comunidades menos favorecidas e vulneráveis. É fundamental implementar políticas públicas e iniciativas privadas que garantam infraestrutura, conectividade e capacitação em áreas marginalizadas.

Fortalecimento da inovação social e empreendedorismo tecnológico — Startups, projetos comunitários e soluções digitais podem ser usados para melhorar serviços públicos, apoiar populações vulneráveis e fomentar economias locais. Isso exige a criação de ambientes favoráveis, como hubs de inovação, acesso a financiamento, mentorias e parcerias entre setor público, privado e academia.

Participação pública — Plataformas digitais podem ser usadas para consultas públicas, votação online, coleta de dados participativos e deliberações comunitárias, promovendo maior transparência e engajamento. Contudo, para que essa participação seja efetiva, é necessário garantir acesso inclusivo às tecnologias e desenvolver sistemas que sejam confiáveis, seguros e intuitivos.

3.6.4. Métricas

A avaliação do alcance dos objetivos propostos para os desafios elencados pode ser organizada em quatro eixos principais: (i) a promoção da interdisciplinaridade e colaboração — focando no envolvimento de diferentes disciplinas e especialistas no desenvolvimento de soluções; (ii) o impacto e adesão pelos usuários — focando em métricas relacionadas à adoção, satisfação e inclusão das soluções pelos grupos sociais-alvo; (iii) a capacitação, inclusão digital e dados sociais — reunindo métricas voltadas ao fortalecimento da alfabetização digital e análise de dados contextuais; e (iv) o monitoramento, governança e políticas públicas — abordando o impacto ético, regulatório e de governança das soluções.

Existem vários tipos de métricas que podem ser usadas para medir estes principais eixos citados. No primeiro deles, para promover a interdisciplinaridade e colaboração, podemos calcular, por exemplo, o número de projetos colaborativos envolvendo múltiplas disciplinas, a quantidade de publicações científicas interdisciplinares e a participação de especialistas de diferentes áreas em iniciativas computacionais. No segundo, para descobrir o impacto e adesão pelos usuários, podemos calcular, a taxa de adoção de sistemas desenvolvidos por grupos sociais-alvo, a qualidade do feedback dos usuários (avaliação de usabilidade e satisfação), o número de iterações de design baseadas em co-criação com usuários a diversidade de perfis de usuários envolvidos no processo de identificação de demandas, o índice de qualidade de vida dos usuários-alvo e indicadores de inclusão digital (como acesso a dispositivos e conectividade). No terceiro, para medir o fortalecimento da alfabetização digital e análise de dados contextuais, podemos calcular, a taxa de alfabetização digital em comunidades-alvo o número de cidadãos treinados em programas de letramento digital a frequência de uso consciente e seguro de tecnologias (por exemplo, hábitos de privacidade e segurança online), a taxa de diversidade cultural e regional na base de dados e analisar dados estatísticos históricos de entidades como CGI.br, PISA, IBGE, entre outras fontes. No quarto, para verificar o impacto ético, regulatório e de governança das soluções podemos calcular, a precisão no reconhecimento de fala, a

quantidade de sistemas de monitoramento descentralizado implementados a diversidade de indicadores sociais e éticos monitorados, a frequência de relatórios de impacto social gerados o nível de independência das plataformas no monitoramento das soluções o número de políticas públicas ou regulamentações influenciadas pelas soluções propostas, a participação de pesquisadores e desenvolvedores em comissões ou fóruns de políticas públicas, a taxa de adoção de práticas éticas em soluções computacionais (auditoria de algoritmos, transparência, etc.), o impacto das políticas públicas desenvolvidas (como equidade digital ou inclusão social).

Capítulo

4

Formação de Recursos Humanos

4.1. Visão Geral e Desafios Comuns

A formação de recursos humanos em Computação é um fator crítico para o enfrentamento dos desafios tecnológicos e sociais do Brasil nas próximas décadas. O fortalecimento de uma educação interdisciplinar, inclusiva e alinhada às demandas globais é essencial para posicionar o país como um líder em inovação e desenvolvimento tecnológico. A Computação permeia praticamente todos os setores da sociedade, e sua evolução requer profissionais com conhecimentos interdisciplinares, capazes de desenvolver soluções inovadoras que respondam às necessidades tecnológicas emergentes.

A seguir, são apresentados alguns desafios e recomendações transversais que permeiam as áreas dos seis Grandes Desafios:

Inovação e formação continuada — A velocidade dos avanços tecnológicos torna essencial a educação continuada dos profissionais de Computação. Investir em programas de capacitação, cursos especializados e parcerias entre universidades e o setor produtivo é fundamental para manter o Brasil competitivo globalmente.

Interdisciplinaridade — A complexidade dos problemas contemporâneos exige uma formação que integre Computação a outras áreas, como Ciências Sociais, Filosofia, Engenharias e Ciências da Saúde. Isso permite a criação de soluções mais robustas e com maior impacto social.

Inclusão digital e ética — A educação deve fomentar uma visão crítica sobre o impacto das tecnologias na sociedade. A formação de profissionais conscientes, comprometidos com a ética e a responsabilidade social, é indispensável.

Infraestrutura e colaboração — O Brasil precisa fortalecer redes de colaboração nacional e internacional para potencializar pesquisas e formação em Computação. Isso inclui investir em infraestrutura tecnológica para educação e pesquisa.

Fomento à pesquisa — Incentivar a pesquisa em Computação em todos os níveis acadêmicos é crucial para desenvolver soluções tecnológicas que atendam aos desafios nacionais.

Além desses elementos transversais, destacam-se a seguir desafios e recomendações para

a formação de recursos humanos específicos de cada um dos seis Grandes Desafios.

4.2. Promoção da Evolução Responsável de Inteligência Artificial e Tecnologias Correlatas, Mitigando seus Riscos e Ampliando seus Benefícios Tecnológicos, Socioeconômicos e Culturais

A Inteligência Artificial (IA) já começou a impactar o desenvolvimento em todos os setores da economia. Países que conseguirem formar e atrair profissionais qualificados para desenvolver e suas adequadamente as várias técnicas de IA, e aplicar em soluções para beneficiar a sociedade, estarão na vanguarda dessa nova revolução tecnológica, assim como poderão garantir a sua soberania nacional.

Desafios específicos:

- Baixo número de pesquisadores especializados em IA, Ciência de Dados e Engenharia de Dados no Brasil.
- Necessidade de cooperação nacional para otimizar o potencial existente.
- Formação de talentos alinhada aos padrões das principais instituições globais.

Recomendações específicas:

- Criar programas nacionais de formação em IA, CD e ED.
- Incentivar a pesquisa aplicada em problemas nacionais.
- Investir massivamente na formação de jovens talentos, para atuar na solução dos problemas nacionais.

4.3. Desenvolvimento da Cibersegurança Frente aos Riscos da Transição Quântica, da Inteligência Artificial e de Aspectos Humanos

O domínio de conceitos e técnicas de Cibersegurança é crucial para enfrentar a evolução constante das ameaças digitais, com ataques sofisticados e vazamentos de dados explorando vulnerabilidades nas mais diversas tecnologias. Por esta razão, países que apresentam uma ampla infraestrutura tecnológica têm sido taxativos em colocar a formação de profissionais na área como uma prioridade para garantir a segurança nacional e de todos os setores da sociedade. Apenas no Brasil, o déficit estimado de profissionais especializados no ano de 2024 estaria entre 140 e 750 mil.

Desafios específicos:

- Rápida evolução das ameaças digitais.
- Insuficiência de cursos especializados e abrangentes.
- Lacunas global e nacional de profissionais qualificados.

Recomendações específicas:

- Estabelecer cursos especializados, seguindo documentos como os Referenciais de Formação do Curso de Bacharelado em Cibersegurança desenvolvidos pela Comissão Especial de Cibersegurança (CESeg) da Sociedade Brasileira de Computação (SBC).
- Promover educação continuada em Cibersegurança.
- Reforçar a educação, conscientização e formação de pessoal em cibersegurança, com foco especial nas áreas críticas relacionadas aos desafios aqui apresentados.

4.4. Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas para a Construção de Redes Seguras, Soluções Computacionais de Alto Desempenho e Sistemas de Sensoriamento de Grande Precisão

A Computação Quântica promete transformar a resolução de problemas complexos. A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias quânticas requer profissionais com uma forte formação interdisciplinar, envolvendo Física Quântica, Computação e Eletrônica. Um consenso entre os profissionais da área é que essa formação deve ser adquirida durante a graduação em cursos especificamente voltados para esse domínio tecnológico.

Desafios específicos:

- Complexidade dos conceitos envolvidos.
- Baixa atratividade da área para novos talentos.

Recomendação específica:

- Criar cursos especializados que integrem Computação, Física e Eletrônica.

4.5. Acesso Universal e Significativo à Internet através do Desenvolvimento Sustentável, Resiliente e Seguro de Infraestruturas Ubíquas de Comunicação

O desenvolvimento de acesso universal e significativo à Internet requer profissionais com sólida formação em habilidades relacionadas a infraestruturas computacionais, incluindo sistemas operacionais, redes de comunicação, sistemas distribuídos e segurança da informação. É fundamental reconhecer que esses tópicos, de natureza mais tecnológica, estão em constante evolução, com ciclos que variam de meses a poucos anos.

Desafios específicos:

- Evolução constante das tecnologias.
- Necessidade de abordagens interdisciplinares na graduação.

Recomendações específicas:

- Focar a formação em fundamentos de infraestrutura computacional, como arquiteturas, mecanismos, protocolos e tecnologias-chave.
- Oferecer projetos integradores durante a graduação.
- Integrar o estudo de novas tecnologias em disciplinas eletivas, cursos de extensão, tutoriais e minicursos oferecidos em simpósios.

4.6. Redução do Impacto Socioambiental no Desenvolvimento e Uso de Aplicações por meio de Computação Sustentável

Para a construção de ecossistemas computacionais exibindo baixo consumo de energia e sustentabilidade é necessário contemplar conteúdos estratégicos que incluem as origens do consumo de energia e seu impacto no projeto de algoritmos e sistemas computacionais. Esta não é uma tarefa fácil, pois muitos professores também não estão devidamente treinados para explicar os conceitos envolvidos. Uma atualização de currículo, mas, sobretudo, dos próprios professores deve ser tentada.

Pode-se realizar este treinamento por meio de encontros e escolas de computação, como as organizadas pela SBC, por exemplo, em sucessivos JAIs que atendam a diferentes aspectos envolvidos, como origem do consumo, programação visando ao baixo consumo, estratégias de automação.

Desafios específicos:

- Falta de formação docente sobre sustentabilidade.
- Baixa inserção do tema nos currículos.

Recomendações específicas:

- Atualizar currículos para incluir computação verde.
- Oferecer capacitação docente em energia e sustentabilidade.
- Realizar treinamento por meio de encontros e escolas de computação, como as organizadas pela SBC, por exemplo, em sucessivos JAIs, que atendam a diferentes aspectos envolvidos, como origem do consumo, programação visando ao baixo consumo e estratégias de automação.

4.7. Construção de Ecossistemas Computacionais Éticos, Inclusivos, Interdisciplinares e Sustentáveis para a Promoção da Participação e da Equidade Social

Para a construção de ecossistemas computacionais éticos, inclusivos, interdisciplinares e sustentáveis, é necessário ampliar as abordagens educacionais para contemplar conteúdos

estratégicos que incluem temas como ética e de responsabilidade social, interdisciplinaridade, inclusão digital e diversidade, cidadania e letramento digital, inovação social, comunicação e colaboração.

Desafios específicos:

- Poucas disciplinas sobre ética, inclusão e cidadania digital.
- A introdução de viés sociotécnico em cursos mais técnicos exige experiência e profissionais que tenham esta formação.
- Necessidade de integrar visões interdisciplinares.

Recomendações específicas:

- Incluir Ética em Computação nos currículos.
- Estimular a reflexão crítica sobre o papel da Computação na sociedade.
- Desenvolver projetos integrados que envolvam alunos de diferentes áreas de conhecimento.
- Incentivar a extensão universitária para promover o letramento digital.
- Incorporar conteúdos sobre diversidade cultural e regional e o impacto das tecnologias em diferentes contextos socioeconômicos.
- Promover o ensino de estratégias para combater a desinformação e garantir o uso seguro e consciente das tecnologias.
- Promover o ensino de habilidades de comunicação para articular o impacto de soluções tecnológicas para diferentes públicos.

Capítulo

5

Recomendações ao Setor Público, às Agências de Fomento, ao Setor Produtivo, às Universidades e às Sociedades Científicas

A Computação desempenhará um papel cada vez mais relevante na sociedade brasileira nos próximos anos. Para enfrentar os desafios científicos e tecnológicos que se apresentam, é fundamental uma articulação abrangente entre o setor público, as agências de fomento, o setor produtivo, as universidades e as sociedades científicas.

Abaixo são apresentadas recomendações comuns dirigidas aos diferentes setores da sociedade, que podem nortear o avanço de todos os seis Grandes Desafios detalhados nesse documento. As seções seguintes contêm recomendações específicas relacionadas a cada um dos Grandes Desafios.

Para o setor público:

- Desenvolver políticas públicas que assegurem investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) na área de Computação.
- Promover a inclusão digital e garantir que regulações tecnológicas contemplem boas práticas de segurança e ética.
- Incentivar parcerias público-privadas para o desenvolvimento tecnológico.

Para as agências de fomento:

- Estabelecer editais multidisciplinares para projetos em Computação.
- Priorizar financiamentos para pesquisas que integrem Ciências Exatas, Sociais e aplicações práticas. Incentivar iniciativas voltadas à sustentabilidade computacional e à inclusão digital.

Para o setor produtivo:

- Estimular a criação de soluções tecnológicas inovadoras alinhadas às necessidades nacionais.

- Adotar práticas éticas no desenvolvimento e utilização de tecnologias.
- Participar de colaborações com universidades para pesquisa aplicada.

Para as universidades:

- Atualizar currículos com a inclusão de temáticas emergentes como Sustentabilidade e Ética em Computação.
- Estimular projetos interdisciplinares e parcerias com o setor produtivo.

Para as sociedades científicas:

- Organizar eventos para disseminação de boas práticas e avanços tecnológicos.
- Facilitar redes de pesquisa interdisciplinares.
- Promover a conscientização sobre o impacto social das tecnologias.

5.1. Promoção da Evolução Responsável de Inteligência Artificial e Tecnologias Correlatas, Mitigando seus Riscos e Ampliando seus Benefícios Tecnológicos, Socioeconômicos e Culturais

Para todos os setores:

- Considerar que IA é uma subárea da Computação e não uma área independente, de modo que questões como regulamentação, utilização adequada e aplicação de sistemas e algoritmos de IA devem sempre ser resolvidas com a participação ativa de pesquisadores e especialistas nos aspectos relevantes da Computação.
- Considerar que várias outras subáreas da Computação são inerentemente relacionadas com o projeto, implementação e utilização eficaz e eficiente de sistemas de IA, como, por exemplo, bancos de dados e processamento paralelo e distribuído.

Para os setores público e produtivo e as agências de fomento:

- Entender que, apesar da ubiquidade e aceitação da IA para auxiliar a solução de problemas em várias áreas e setores, ela nem sempre é o caminho mais adequado, havendo soluções computacionais muitas vezes mais práticas e menos custosas.
- Reconhecer o alto custo energético de certos algoritmos de IA e suas consequências para o aquecimento global. Ver, a respeito, o desafio relacionado à Computação Sustentável.

Para as universidades e sociedades científicas:

- Promover o treinamento em IA e tecnologias correlatas, em que o Brasil ainda requer qualificação de mão de obra para poder corresponder às necessidades econômicas e sociais que utilizam IA, sempre incluindo a necessidade de práticas éticas e responsáveis.

Para as universidades, o setor produtivo e as sociedades científicas:

- Envolver equipes multidisciplinares (com pesquisadores de várias áreas da Computação, mas também de outras áreas do conhecimento) para o estudo e propostas de soluções para problemas que envolvam grandes volumes de dados e que exijam soluções eficientes usando IA (tanto do ponto de vista de CD+ED quanto questões algorítmicas, de arquiteturas, e participação de especialistas das áreas-alvo).

Para as agências de fomento:

- Montar comitês com composição multidisciplinar para avaliação de projetos envolvendo IA e tecnologias correlatas, para melhor avaliar todos os aspectos das propostas — sempre incluindo a avaliação de pesquisadores nas áreas-alvo e também de especialistas em Computação quanto à exequibilidade da solução proposta.

5.2. Desenvolvimento da Cibersegurança Frente aos Riscos da Transição Quântica, da Inteligência Artificial e de Aspectos Humanos**Para o setor público:**

- Dar atenção a questões de Cibersegurança na construção de regulamentações envolvendo a área de Computação: no mínimo, novas regras não devem fragilizar ou dificultar mecanismos de segurança; idealmente, novas regras devem reforçar aspectos de Cibersegurança desde sua concepção.
- Envolver a comunidade científica na construção de propostas de regulamentação e planos estratégicos sobre tecnologia, facilitando a incorporação do estado-da-arte a essas propostas.
- Promover a participação de pessoas, entidades e órgãos brasileiros na proposta, construção e análise de padrões internacionais vinculados aos desafios aqui apresentados.

Para as universidades e sociedades científicas:

- Reforçar a educação, conscientização e formação de pessoal em Cibersegurança, com foco especial nas áreas críticas relacionadas aos desafios aqui apresentados.

Para todos os setores:

- Promover a interação entre a academia e representantes do mercado e da sociedade civil, a fim de estimular a pesquisa científica e a inovação na área de Cibersegurança.
- Criar um repositório brasileiro de dados de Cibersegurança, no intuito de estimular a indústria e órgãos governamentais a compartilhar informações úteis para a construção e otimização de soluções em conjunto com a comunidade científica.

5.3. Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas para a Construção de Redes Seguras, Soluções Computacionais de Alto Desempenho e Sistemas de Sensoriamento de Grande Precisão**Para todos os setores:**

- Promover o desenvolvimento de uma infraestrutura nacional para redes e computação quântica, garantindo que o Brasil acompanhe os avanços internacionais e possa contribuir ativamente para o setor.
- Incentivar políticas e investimentos que viabilizem a transição da pesquisa teórica para aplicações práticas em computação e comunicação quântica.
- Criar programas de conscientização e disseminação do conhecimento sobre tecnologias quânticas, reduzindo a barreira de entrada e facilitando a formação de especialistas na área.

Para o setor público e as agências de fomento:

- Estabelecer programas de financiamento contínuo e estratégico para pesquisa e inovação em computação e redes quânticas, com foco em hardware, software e protocolos de comunicação.
- Criar centros de pesquisa e inovação em tecnologias quânticas em parceria com universidades e empresas, promovendo a colaboração entre diferentes setores.
- Desenvolver marcos regulatórios e políticas públicas que incentivem a adoção segura e eficiente de tecnologias quânticas, incluindo normas para cibersegurança e privacidade.
- Priorizar investimentos em infraestrutura de redes quânticas nacionais, incluindo a construção de uma rede de comunicações quânticas segura e a criação de um ecossistema tecnológico sustentável.

Para o setor produtivo e as agências de fomento:

- Estimular a participação da indústria no desenvolvimento de tecnologias quânticas, promovendo a transferência de conhecimento entre a academia e o setor empresarial.

- Investir em pesquisa aplicada para a criação de soluções quânticas voltadas para setores estratégicos, como telecomunicações, finanças, saúde e defesa.
- Criar incentivos para startups e empresas inovadoras que desenvolvam tecnologias quânticas no Brasil, garantindo competitividade global e independência tecnológica.
- Explorar sinergias entre computação clássica e quântica, permitindo a adoção gradual dessas tecnologias sem comprometer a eficiência dos sistemas já implementados.

Para as universidades e sociedades científicas:

- Expandir programas de ensino e formação em computação e redes quânticas, garantindo que o Brasil tenha profissionais capacitados para atuar no setor.
- Criar laboratórios e centros de pesquisa colaborativos para o desenvolvimento de novos algoritmos, arquiteturas de hardware e aplicações para computação e comunicação quântica.
- Incentivar a pesquisa multidisciplinar, integrando áreas como Física, Computação, Engenharia e Matemática para acelerar avanços científicos e tecnológicos.
- Fortalecer colaborações internacionais e parcerias acadêmicas para acesso a equipamentos de última geração e compartilhamento de conhecimento com centros de excelência globais.

5.4. Acesso Universal e Significativo à Internet através do Desenvolvimento Sustentável, Resiliente e Seguro de Infraestruturas Ubíquas de Comunicação

Para o setor público:

- *Implantação de Redes em Áreas Remotas:* Criar programas nacionais voltados à implantação de redes de acesso em regiões remotas com baixa ou nenhuma conectividade, em colaboração com entidades como o CGI.br, RNP e MCTI.
- *Mecanismos de Monitoramento e Avaliação:* Estabelecer sistemas para coleta e análise de métricas de desempenho que permitam acompanhar a evolução da universalidade do acesso, garantindo a mensuração da qualidade e cobertura das redes implantadas. Um observatório sobre a ubiquidade da Internet do Brasil poderia ser estabelecido.
- *Incentivos para Infraestrutura Sustentável:* Promover programas de migração e implantação de redes sustentáveis, com foco na eficiência energética e na redução do impacto ambiental das infraestruturas digitais. Programas governamentais focados em isenções fiscais para organizações proprietárias de redes que pretendam reduzir o impacto ambiental a partir da modernização de suas estruturas poderiam ser considerados.

Para as agências de fomento:

- *Apoio à Pesquisa em Redes Sustentáveis:* Financiar pesquisas voltadas ao desenvolvimento de soluções tecnológicas que promovam redes sustentáveis e energeticamente eficientes, incluindo novos protocolos e arquiteturas.
- *Fomento à Inovação em IoT e Redes de Sensores:* Incentivar o uso e a pesquisa multidisciplinar em tecnologias de redes de sensores que integrem dispositivos IoT, possibilitando aplicações em diferentes setores, como saúde, agricultura e indústria.

Para as universidades:

- *Letramento Digital e Inclusão:* Desenvolver programas de letramento digital para populações vulneráveis, garantindo acesso seguro e significativo à Internet, com ênfase em habilidades digitais básicas e avançadas. Cursos de extensão poderiam ser um bom mecanismo aqui.
- *Desenvolvimento de Tecnologias de Rede:* Priorizar pesquisas em infraestrutura de redes para áreas remotas e tecnologias que viabilizem maior alcance e escalabilidade em regiões com recursos limitados. A ação de reitorias de pesquisa, para promoção da multidisciplinaridade, seria essencial aqui.

Para as sociedades científicas e outras organizações relevantes:

- *Promoção de Boas Práticas:* Disseminar boas práticas e diretrizes para a implantação e operação de redes sustentáveis e acessíveis. Cartilhas coorganizadas por SBC, SBrT, LARC, CGI.br e RNP seriam um resultado importante.
- *Eventos e Colaborações:* Organizar conferências e workshops para promover a troca de conhecimentos e experiências sobre soluções inovadoras para os desafios da ubiquidade da Internet. O trabalho multidisciplinar entre Comissões Especiais (CEs) complementares da SBC seria uma ação inovadora nesta frente, por exemplo, com a concepção de eventos coorganizados por CEs complementares.

5.5. Redução do Impacto Socioambiental no Desenvolvimento e Uso de Aplicações por meio de Computação Sustentável**Para todos os setores:**

- Conscientizar a sociedade que o uso de tecnologias de informação e comunicação possui um custo ambiental associado que contribui significativamente para as mudanças climáticas. Para isso, é necessário tornar esses custos mensuráveis e disponibilizar as informações sobre esses custos publicamente.

Para o setor público:

- Elaborar políticas públicas que auxiliem o setor produtivo a ter acesso à informação necessária para implementar inovações que levem à redução das emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia.
- Expandir a geração de energia elétrica por fontes renováveis para que o crescente consumo energético das tecnologias de informação e comunicação não resulte em maiores emissões de gases de efeito estufa.

Para as agências de fomento:

- Fomentar a pesquisa científica básica e a inovação tecnológica voltadas ao desenvolvimento de aplicações mais sustentáveis.

Para as universidades:

- Incluir nas ementas de diferentes disciplinas a sustentabilidade da Computação como uma medida de desempenho a ser otimizada.

Para o setor produtivo:

- Incluir a redução do impacto ambiental do uso de Computação pelas empresas em iniciativas de governança ambiental, social e corporativa (Environmental, social, and corporate governance — ESG).

5.6. Construção de Ecossistemas Computacionais Éticos, Inclusivos, Interdisciplinares e Sustentáveis para a Promoção da Participação e da Equidade Social**Para o setor público:**

- *Elaboração de Políticas Públicas Inclusivas:* Formular e implementar políticas que garantam o acesso universal às tecnologias, promovendo infraestrutura digital em regiões marginalizadas e incentivos para iniciativas de inclusão digital.
- *Regulamentação Ética:* Criar e reforçar regulamentações que assegurem transparência, responsabilidade e equidade no uso de dados e algoritmos, combatendo vieses e práticas discriminatórias.
- *Fomento à Educação Digital:* Investir em programas de letramento digital e cidadania digital para capacitar a população a utilizar tecnologias de forma consciente e responsável.

Para as agências de fomento:

- *Fomento à Pesquisa Interdisciplinar:* Priorizar financiamentos para projetos que integrem áreas como Computação, Ciências Sociais, Saúde e Educação, com foco em soluções éticas, inclusivas e sustentáveis.
- *Apoio à Inovação com Impacto Social:* Criar editais específicos para iniciativas tecnológicas que atendam demandas sociais, promovam inclusão e respeitem a diversidade cultural e regional.

Para o setor produtivo:

- *Investimento em Tecnologia Ética:* Adotar práticas que garantam o desenvolvimento de soluções tecnológicas alinhadas a princípios éticos e que promovam a inclusão e equidade.
- *Parcerias para Inovação Social:* Estabelecer colaborações com universidades e instituições de pesquisa para desenvolver produtos que atendam às necessidades sociais e culturais dos usuários.
- *Adoção de Diversidade:* Implementar políticas de inclusão no ambiente corporativo, promovendo a diversidade de gênero, raça, idade e região, tanto em equipes quanto em produtos.
- *Responsabilidade Social Corporativa:* Investir em projetos de impacto social, como capacitação em letramento digital, e apoiar iniciativas voltadas à redução da exclusão digital.

Para as universidades:

- *Currículos Atualizados:* Incluir disciplinas e conteúdos que abordem Ética em Computação, inclusão digital, metodologias participativas e impactos sociais das tecnologias.
- *Fomento à Interdisciplinaridade:* Criar programas que integrem diferentes áreas do conhecimento, como computação, ciências humanas e saúde, para resolver problemas sociais complexos.
- *Pesquisa Aplicada:* Incentivar projetos que desenvolvam soluções práticas para os desafios de inclusão digital, governança de dados e impacto ético das tecnologias.
- *Extensão Universitária:* Desenvolver ações de extensão que levem conhecimento tecnológico a comunidades vulneráveis, promovendo inclusão e capacitação digital.

Para as sociedades científicas:

- *Sensibilização:* Atuar como intermediárias entre pesquisadores, setor público e privado para destacar a importância da inclusão e impacto social no desenvolvimento tecnológico.

- *Promoção de Eventos:* Organizar congressos, seminários e workshops para debater os desafios inclusivos da computação, promovendo a troca de conhecimentos interdisciplinares.
- *Estímulo à Colaboração:* Facilitar redes de pesquisa que conectem cientistas de diferentes áreas e países para abordar desafios globais relacionados à tecnologia e sociedade.
- *Comunicação Científica:* Produzir materiais acessíveis para o público geral sobre os impactos positivos e negativos das tecnologias, fomentando o letramento digital e o uso consciente das tecnologias.

Anexo

I**Programação do Seminário****DIA 27 DE NOVEMBRO DE 2024**

HORÁRIO	ATIVIDADE	LOCAL
8:30	Credenciamento	Entrada do Anfiteatro
9:00	Abertura	Anfiteatro
9:30	PAINEL GRANDES DESAFIOS DA COMPUTAÇÃO com André Carlos Ponce de Leon Ferreira de Carvalho (Professor Titular da USP), Claudia Maria Bauzer Medeiros (Professora Titular da UNICAMP), Marcus Fontoura (Diretor de Tecnologia da Stone).	Anfiteatro
11:00	Coffee-break	
11:30	PAINEL GRANDES DESAFIOS DA EDUCAÇÃO EM COMPUTAÇÃO com Avelino Francisco Zorzo (Coordenador de Área na CAPES), Rosa Maria Vicari (Professora Titular da UFRGS), Rubem Saldanha (Gerente de Desenvolvimento de Negócios da AWS).	Anfiteatro
13:00	Almoço	
14:00	DISCUSSÃO TEMÁTICA EM GRUPOS	SALA 1 e SALA 2
16:00	Coffee-break	
16:30 às 19:00	DISCUSSÃO TEMÁTICA EM GRUPOS	SALA 1 e SALA 2

DIA 28 DE NOVEMBRO DE 2024

HORÁRIO	ATIVIDADE	LOCAL
9:00	DISCUSSÃO TEMÁTICA EM GRUPOS	SALA 1 e SALA 2
11:00	Coffee-break	
11:30	DISCUSSÃO TEMÁTICA EM GRUPOS	SALA 1 e SALA 2
13:00	Almoço	
14:00	PLENÁRIA TEMÁTICA	SALA 1 e SALA
15:30	Coffee-break	
16:00 às 17:00	PLENÁRIA GERAL E ENCERRAMENTO	ANFITEATRO

Anexo

II

Trabalhos Apresentados Durante o Seminário

TÍTULO	AUTORES
Ética na Inteligência Artificial	Geber Ramalho (UFPE)
A Big Challenge: Tools to Guarantee Robust and Controlled Behavior of Large Language Models	Fabio Cozman (USP), Sarajane Peres (USP), Marcelo Finger (USP), Renata Wassermann (USP), Anna Costa (USP), Edson Gomi (USP), Artur Correia (USP), Anarosa Brandão (USP), Karina Delgado (USP), Denis Mauá (USP), Thiago Pardo (USP), Fátima Marques (USP)
Adversarial Machine Learning: Aprendizado de Máquina em Contextos Inseguros	Oscar Paiva (Bradesco, USP), Marcos Simplício Jr (USP), Charles Miers (UDESC)
Interações Humano-IA (IHIA): Desafios e Oportunidades para a Inclusão Digital	Vasco Furtado (UNIFOR), Elizabeth Furtado (UNIFOR)
A Supercomputação na Era da Inteligência Artificial	Alba Melo (UnB), Philippe Navaux (UFRGS), Lucia Drummond (UFF), Cristina Boeres (UFF), Vinod Rebello (UFF), Alfredo Goldman (USP), Márcio Castro (UFSC)
This Future Without SQL	Eduardo Almeida (UFPR), Eduardo Pena (UTFPR), Altigran Silva (UFAM)
“Mais com Menos” — Processamento de Linguagem Natural Inteligente e Sustentável baseado em Engenharia de Dados e Inteligência Artificial Avançada	Marcos Gonçalves (UFMG), Leonardo Rocha (UFSJ), Washington Cunha (UFMG), Guilherme Dal Bianco (UFFS)

TÍTULO	AUTORES
Desenvolvimento e Automação de Software de Baixa Energia	Luigi Carro (UFRGS)
Computação Sustentável e Energeticamente Eficiente	Daniel Cordeiro (USP), Emilio Franceschini (UFABC), Alessandro Santos (IPT), Alvaro Fazenda (UNIFESP), Silvana Rossetto (UFRJ)
Os Desafios de Cibersegurança dos Referenciais do BCS/SBC	Aldri Santos (UFMG), Altair Santin (PUCPR), André Grégio (UFPR), Carlos Raniery (UFSM), Daniel Batista (USP), Dianne Medeiros (UFF), Diego Kreutz (UNIPAMPA), Diogo Mattos (UFF), Edelberto Franco (UFJF), Igor Moraes (UFF), Lourenco Pereira Jr (ITA), Marcos Simplício (USP), Michele Nogueira (UFMG), Michelle Wingham (UNIVALI, RNP), Natalia Fernandes (UFF), Rodrigo Miani (UFU)
Desafios Computacionais para uma Internet Quântica Brasileira	Antônio Abelém (UFPA), Alberto Schaeffer-Filho (UFRGS), Gabriel Nazar (UFRGS), Jéferson Nobre (UFRGS), Juliano Wickboldt (UFRGS), Lisandro Granville (UFRGS), Luciano Gaspary (UFRGS), Weverton Cordeiro (UFRGS)
Internet Disponível para Todos: Desafios do Acesso Ubíquo	Anelise Munaretto (UTFPR), Carlos Kamienski (UFABC), Eduardo Cerqueira (UFPA), Leobino Sampaio (UFBA), Miguel Campista (UFRJ), Rossana Andrade (UFC)
Mundo Desconectado e Invisível: Desafios e Oportunidades para Mitigar a Desigualdade Digital	Alberto Schaeffer-Filho (UFRGS), Antônio Abelém (UFPA), Gabriel Nazar (UFRGS), Jéferson Nobre (UFRGS), Juliano Wickboldt (UFRGS), Lisandro Granville (UFRGS), Luciano Gaspary (UFRGS), Weverton Cordeiro (UFRGS)
Desafios Computacionais para Resiliência a Desastres Naturais	Alberto Schaeffer-Filho (UFRGS), Gabriel Nazar (UFRGS), Jéferson Nobre (UFRGS), Juliano Wickboldt (UFRGS), Lisandro Granville (UFRGS), Luciano Gaspary (UFRGS), Weverton Cordeiro (UFRGS)

TÍTULO	AUTORES
Kids Online: como contribuir para a proteção de crianças e adolescentes em ambientes de mídias sociais?	Humberto Marques-Neto (PUC-Minas), Jussara Almeida (UFMG), Fabrício Benevenuto (UFMG)
O Combate à Desinformação nas Plataformas Sociais: Desafios e Oportunidades	Julio Reis (UFV), Philipe Melo (UFV), Márcio Silva (UFMS), Fabrício Benevenuto (UFMG)
A Urgente Necessidade da Literacia Digital	Glaucio de Sousa Santos (PCRJ, UFRJ), Cláudia Motta (UFRJ)
Universalização da Cidadania Digital	Flávia Bernardini (UFF), Raissa Barcellos (UERJ), Cláudia Cappelli (UERJ), José Viterbo (UFF), Cristiano Maciel (UFMT)

Anexo

III

Organizadores e Comitê de Programa

Organizadores

André Santos (UFPE)
Flávio Rech Wagner (UFRGS)

Comitê de Programa

Altigran Soares da Silva (UFAM)
André C. Ponce de Leon F. de Carvalho (USP)
André Santos (UFPE)
Avelino Francisco Zorzo (PUCRS)
Claudia Bauzer Medeiros (UNICAMP)
Cristiano Maciel (UFMT)
Edmundo Souza e Silva (UFRJ)
Flávio Rech Wagner (UFRGS)
José Carlos Maldonado (USP)
Lisandro Granville (UFRGS)
Luigi Carro (UFRGS)
Paulo R. F. Cunha (UFPE)
Raimundo José de Araújo Macêdo (UFBA)
Soraia Raupp Musse (PUCRS)
Thais Vasconcelos Batista (UFRN)
Virgílio A. F. de Almeida (UFMG)
Wagner Meira Jr. (UFMG)

Anexo**IV****Relação de Participantes e Autores do Seminário**

Adenilso Simão (USP)
Alba Melo (UnB)
Alberto Schaeffer-Filho (UFRGS)
Aldri Santos (UFMG)
Alessandro Santos (IPT)
Alfredo Goldman (USP)
Altair Santin (PUC-PR)
Altigran Silva (UFAM)
Álvaro Fazenda (UNIFESP)
Amaury Castro Junior (UFMS)
Anarosa Brandão (USP)
André Carvalho (USP)
André Grégio (UFPR)
André Santos (UFPE)
Anelise Munaretto (UTFPR)
Anna Costa (USP)
Antonio Abelém (UFPA)
Artur Correia (USP)
Avelino Zorzo (PUC-RS)
Bruno Gadelha (UFAM)
Carla Delgado (UFRJ)
Carlos Kamienski (UFABC)
Carlos Raniery (UFMS)
Charles Gomes (UFPE)
Charles Miers (UDESC)
Claudia Cappelli (UERJ)
Claudia Medeiros (UNICAMP)
Claudia Motta (UFRJ)
Crishna Irion (UFU)
Cristiano Maciel (UFMT)
Cristina Boeres (UFF)
Daniel Batista (USP)
Daniel Cordeiro (USP)
Daniel Gatti (PUC-SP)

Denis Mauá (USP)
Dianne Medeiros (UFF)
Diego Kreutz (UNIPAMPA)
Diogo Mattos (UFF)
Edelberto Franco (UFJF)
Edison Ishikawa (UnB)
Edmundo Silva (UFRJ)
Edson Gomi (USP)
Eduardo Almeida (UFPR)
Eduardo Cerqueira (UFPA)
Eduardo Gomes (PUC-SP)
Eduardo Pena (UTFPR)
Elizabeth Furtado (UNIFOR)
Ellen Barbosa (USP)
Emilio Francesquini (UFABC)
Esdras Bispo Jr. (UFJ)
Eunice Nunes (UFMT)
Fabio Cozman (USP)
Fabrício Benevenuto (UFMG)
Fátima Marques (USP)
Filippo Valiante Filho (USP)
Flavia Bernardini (UFF)
Flavia Santoro (inteli)
Flávio Wagner (UFRGS)
Gabriel Nazar (UFRGS)
Geber Ramalho (UFPE)
Glaucio de Sousa Santos (PCRJ, UFRJ)
Guilherme Dal Bianco (UFFS)
Humberto Marques-Neto (PUC-Minas)
Igor Moraes (UFF)
Italo Vega (PUC-SP)
Jacques Wainer (UNICAMP)
Jair Leite (UFRN)
Jean Rosa (ITI, Portugal)
Jéferson Nobre (UFRGS)
Jorge Fernandes (UnB)
José Carlos Maldonado (USP)
José Neuman (UFC)
José Palazzo Oliveira (UFRGS)
José Rezende (RNP)
José Viterbo (UFF)
Juliana França (UFRJ)
Juliano Wickboldt (UFRGS)
Julio Reis (UFV)
Jussara Almeida (UFMG)
Karina Delgado (USP)
Keylla Saes (USP)

Leila Ribeiro (UFRGS)
Leobino Sampaio (UFBA)
Leonardo Rocha (UFSJ)
Lisandro Granville (UFRGS)
Lourenço Pereira Jr (ITA)
Lucia Drummond (UFF)
Luciano Gasparly (UFRGS)
Lucy Tabuti (PUC-SP)
Luigi Carro (UFRGS)
Luiz Bittencourt (UNICAMP)
Maíra Fróes (UFRJ)
Marcelo Loutfi (UNIRIO)
Márcio Castro (UFSC)
Márcio Silva (UFMS)
Marcos Gonçalves (UFMG)
Marcos Simplício (USP)
Marcus Fontoura (Stone)
Maria Augusta Nunes (UNIRIO)
Michele Nogueira (UFMG)
Michelle Wangham (UNIVALI, RNP)
Miguel Campista (UFRJ)
Milene Silveira (PUC-RS)
Mirella Moro (UFMG)
Natalia Fernandes (UFF)
Oscar Paiva (Bradesco, USP)
Paulo Cunha (UFPE)
Philippe Melo (UFV)
Philippe Navaux (UFRGS)
Rafael Kunst (UNISINOS)
Raimundo Macêdo (UFBA)
Raissa Barcellos (UERJ)
Ramon Martins (IFSC)
Renata Galante (UFRGS)
Renata Wassermann (USP)
Rodolfo Azevedo (UNICAMP)
Rodrigo Duran (IFMS)
Rodrigo Miani (UFU)
Rosa Vicari (UFRGS)
Rossana Andrade (UFC)
Rubem Saldanha (AWS)
Sarajane Peres (USP)
Sean Siqueira (UNIRIO)
Sérgio Soares (UFPE)
Silvana Rossetto (UFRJ)
Simone Cavalheiro (UFPEL)
Soraia Musse (PUC-RS)
Stefane Menezes Rodrigues (UFSCAR)

Taciana Pontual (UFRPE)
Thais Batista (UFRN)
Thiago Pardo (USP)
Vasco Furtado (UNIFOR)
Vinod Rebello (UFF)
Virgílio Almeida (UFMG)
Viviane Santos (UFSJ)
Wagner Meira Jr. (UFMG)
Washington Cunha (UFMG)
Weverton Cordeiro (UFRGS)

Referências

- [1] *Grand Research Challenges in Information Systems*. Computing Research Association, 2002.
- [2] Tony Hoare and Robin Milner, editors. *Grand Challenges in Computing – Research*. The British Computer Society, 2004.
- [3] John Kavanagh and Wendy Hall, editors. *Grand Challenges in Computing Research Conference 2008*. UK Computer Research Committee, 2008.
- [4] Andrew McGettrick, Roger Boyle, Roland Ibbett, John Lloyd, Gillian Lovegrove, and Keith Mander. *Grand Challenges in Computing Education*. The British Computer Society, 2004.
- [5] Carlos Lucena, Claudia Bauzer Medeiros, Cláudio Lucchesi, José Carlos Maldonado, and Virgílio Almeida, editors. *Grandes Desafios da Pesquisa em Computação no Brasil – 2006 – 2016*. Sociedade Brasileira de Computação, 2006.
- [6] Claudia M. B. Medeiros. Grand Research Challenges in Computer Science in Brazil. *Computer*, 41(6):59–65, 2008. doi: 10.1109/MC.2008.188.
- [7] Prioridade para os Grandes Desafios. *Revista Pesquisa FAPESP*, (140), October 2007.
- [8] Claudia Bauzer Medeiros: Visões do Futuro da Computação. *Revista Pesquisa FAPESP*, (135), May 2007. Entrevista.
- [9] Altigran Silva, Augusto Sampaio, Claudia Medeiros, Cláudio Lucchesi, Carlos Lucena, Flávio Wagner, José Maldonado, Luís F. G. Soares, Silvio Meira, and Virgílio Almeida, editors. *II Seminário sobre os Grandes Desafios da Computação no Brasil*. Sociedade Brasileira de Computação, 2009.
- [10] Ana Carolina Salgado, Claudia Motta, and Flávia Santoro, editors. *Grandes Desafios da Computação no Brasil – Relatos do Terceiro Seminário*. Sociedade Brasileira de Computação, 2015.
- [11] Clodis Boscarioli, Renata Mendes de Araujo, and Rita Suzana Maciel, editors. *I GrandDSI-BR: Grand Research Challenges in Information Systems in Brazil 2016–2026*. Sociedade Brasileira de Computação, 2017.

- [12] Rodrigo Pereira dos Santos and Marcelo da Silva Hounsell, editors. *Grand Research Challenges in Games and Entertainment Computing in Brazil – GrandGamesBR 2020–2030*. Springer, 2023.
- [13] M. Cecília C. Baranauskas, Clarisse Sieckenius de Souza, and Roberto Pereira, editors. *I GranDIHC-BR Grand Research Challenges in Human-Computer Interaction in Brazil*. Sociedade Brasileira de Computação, 2015.
- [14] Claudia M. B. Medeiros, André C. P. L. F. de Carvalho, Helder Nakaya, João M. T. Romano, Marcelo Knorich Zuffo, and Virgílio A. F. Almeida. Computação: Ciência, engenharia e arte. In Adriano Andricopulo, editor, *A Ciência no Desenvolvimento Nacional*, pages 1–16. Editora Cubo, 2022. URL <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/978-65-86819-27-4.1000005.pdf>.
- [15] Stuart Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall Press, USA, 3 edition, 2009.
- [16] Chaitanya Shah. *A Hands-On Introduction to Data Science*. Cambridge University Press, Cambridge, 2020.
- [17] Joe Reis and Matt Housley. *Fundamentals of Data Engineering: Plan and Build Robust Data Systems*. O’Reilly, 2022.
- [18] Virgílio A. F. Almeida, Adalberto Fazzio, Anderson S. da Silva, Anderson S. Soares, André C. P. L. F. de Carvalho, Edmundo A. Souza e Silva, Eduardo M. C. P. Reis, Fabio G. Cozman, Helder Nakaya, João R. B. Marca, Luis C. Lamb, Marcelo V. F. Pereira, Nivio Ziviani, Sérgio R. Mousse, Teresa B. Ludermir, and Wagner Meira Jr. *Recomendações para o Avanço da IA no Brasil da Academia Brasileira de Ciências*. 2023. ISBN 97865-981763-0-3. URL <https://www.abc.org.br/wp-content/uploads/2023/11/recomendacoes-para-o-avanco-da-inteligencia-artificial-no-brasil-abc-novembro-2023-GT-IA.pdf>.
- [19] Claudia M. B. Medeiros, Alberto H. F. Laender, Adriana Packer, Adalberto L. Val, Carlos Henrique Brito Cruz, Carlos V. F. G. Chavez, Edson C. L. Marques, Fabio Kon, Isaias L. CENDES, Manoel A. BARCINSKI, Marcel V. SLUYS, and Ulisses B. ALMEIDA. *Open Science - Overview and General Recommendations*, volume 1. Academia Brasileira de Ciências, 2023. ISBN 978-65-981763-2-7. URL <https://www.abc.org.br/wp-content/uploads/2023/11/Open-Science-Overview-and-General-Recommendations.pdf>.
- [20] UNESCO. Recommendations on the ethics of artificial intelligence. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137>, 2021. SHS/BI-O/PI/2021/1.
- [21] Tom B. Brown, Benjamin Mann, Nick Ryder, Melanie Subbiah, Jared Kaplan, Prafulla Dhariwal, Arvind Neelakantan, Pranav Shyam, Girish Sastry, Amanda Askell, and et al. Language models are few-shot learners. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2020.

- [22] Yann LeCun and Yoshua Bengio. Convolutional networks for images, speech, and time-series. In Michael A. Arbib, editor, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. MIT Press, 1995.
- [23] Yoshua Bengio, Ian Goodfellow, and Aaron Courville. *Deep Learning*. MIT Press, Massachusetts, 2017.
- [24] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Łukasz Kaiser, and Illia Polosukhin. Attention is all you need. In *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17)*, pages 6000–6010, Red Hook, NY, USA, 2017. Curran Associates Inc.
- [25] SBC. Referenciais de formação para o curso de bacharelado em cibersegurança. Technical report, Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2023.
- [26] NIST. Sp 1800-38b: Migration to post-quantum cryptography. quantum readiness: Cryptographic discovery. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2023.
- [27] ITU-T. Recommendation itu-t y.3800 - overview on networks supporting quantum key distribution. Technical report, International Telecommunication Union, 2019.
- [28] A. Vassilev, A. Oprea, A. Fordyce, and H. Anderson. Adversarial machine learning: A taxonomy and terminology of attacks and mitigations. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2024.
- [29] A. Pollini, T. C. Callari, A. Tedeschi, D. Ruscio, L. Save, F. Chiarugi, and D. Guerri. Leveraging human factors in cybersecurity: An integrated methodological approach. *Cognition, Technology & Work*, 24(2):371–390, 2022.
- [30] S. Rose, O. Borchert, S. Mitchell, and S. Connelly. Nist sp 800-207: Zero trust architecture. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2020.
- [31] J. Illiano, M. Caleffi, A. Manzalini, and A. S. Cacciapuoti. Quantum internet protocol stack: A comprehensive survey. *Computer Networks*, 213:109092, 2022.
- [32] A. S. Cacciapuoti, M. Caleffi, F. Tafuri, F. S. Cataliotti, S. Gherardini, and G. Bianchi. Quantum internet: Networking challenges in distributed quantum computing. *IEEE Network*, 34(1):137–143, 2019.
- [33] S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson. Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412):eaam9288, 2018.
- [34] CETIC.BR. Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nos domicílios brasileiros. tic domicílios. Technical report, CETIC.BR, 2023. URL https://www.cgi.br/media/docs/publicacoes/2/20240826111431/tic_domicilios_2023_livro_eletronico.pdf. Acessado em 2024-08-26.

- [35] NIC.BR. Conectividade significativa: Propostas para medição e o retrato da população no Brasil. Technical report, NIC.BR, 2024. URL <https://cetic.br/media/docs/publicacoes/7/20240415183307/estudossetoriais-conectividadesignificativa.pdf>.
- [36] J. Crowcroft, A. Wolisz, and A. Sathiseelan. Towards an affordable internet access for everyone: The quest for enabling universal service commitment (dagstuhl seminar 14471). *Dagstuhl Reports*, 4(11):78–137, 2015.
- [37] A. Scheibe, W. Reichert, L. Gaspar, and W. Cordeiro. Programmable low-end networks: Powering internet connectivity for the other three billion. In *2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pages 187–195. IEEE, 2021.
- [38] L. Robinson, S. R. Cotten, H. Ono, A. Quan-Haase, G. Mesch, W. Chen, J. Schulz, T. M. Hale, and M. J. Stern. Digital inequalities and why they matter. *Information, Communication & Society*, 18(5):569–582, 2015.
- [39] M. Weiser. The computer for the 21st century. *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 3(3):3–11, 1999.
- [40] W. L. da Costa Cordeiro, J. A. Marques, and L. P. Gaspar. Data plane programmability beyond openflow: Opportunities and challenges for network and service operations and management. *Journal of Network and Systems Management*, 25:784–818, 2017. doi: 10.1007/s10922-017-9423-2.
- [41] L. Carro and G. L. Nazar. *Desafios para a Computação Energeticamente Eficiente*. Sociedade Brasileira de Computação, 2023.
- [42] J. Holgersson, J. Kavrestad, and M. Nohlberg. Cybersecurity and digital exclusion of seniors: What do they fear? In *International Symposium on Human Aspects of Information Security and Assurance*, pages 12–21. Springer, 2021.
- [43] J. P. G. Sterbenz, D. Hutchison, E. K. Çetinkaya, A. Jabbar, J. P. Rohrer, M. Schöller, and P. Smith. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8):1245–1265, 2010. doi: 10.1016/j.comnet.2010.03.005.
- [44] IPCC. Sections. In Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero, editors, *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*, pages 35–115. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [45] Brazil’s Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement, 2024. URL https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf.

- [46] S. Ayers, S. Ballan, V. Gray, and R. McDonald. Measuring the emissions and energy footprint of the ICT sector: Implications for climate action. A joint itu/wb report, World Bank Group, Washington, D.C., 2024. URL <http://documents.worldbank.org/curated/en/099121223165540890/P17859712a98880541a4b71d57876048abb>.
- [47] Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026. Technical report, Paris, 2024. URL <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.
- [48] Energy efficiency directive, 2024. URL https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en.
- [49] R. D. Caballar. We need to decarbonize software: The way we write software has unappreciated environmental impacts. *IEEE Spectrum*, 61(4):26–31, 2024. doi: 10.1109/MSPEC.2024.10491388.
- [50] The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard, 2024. URL <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.
- [51] T. C. Fishman. Climate Tech: The AI Boom Rests on Billions of Tonnes of Concrete: Why Tech’s Climate Pledges Require the Reinvention of Concrete. *IEEE Spectrum*, 61(11):58–69, November 2024. doi: 10.1109/MSPEC.2024.10748563.



Sociedade Brasileira
de Computação

PATROCÍNIO

