

## **Governança climática e tecnologia quântica: a próxima revolução tecnológica e os desafios dos próximos 30 anos**

Climate governance and quantum technology: the next technological revolution and the challenges of the next 30 years

Claudio José Guedes Aranha<sup>1</sup>

### **RESUMO**

O presente artigo examina a interseção entre a emergência climática global e o avanço da computação quântica como tecnologia disruptiva, projetando cenários e desafios para os próximos trinta anos. A partir de uma revisão teórico-conceitual que articula a teoria da complexidade, a geopolítica tecnológica e os marcos regulatórios internacionais do clima, investiga-se como os princípios da mecânica quântica, superposição, emaranhamento e interferência podem superar as limitações computacionais dos modelos climáticos atuais. O argumento central sustenta que a computação quântica, ao permitir simulações de sistemas não lineares com bilhões de variáveis simultâneas, oferece uma oportunidade inédita para modelagem climática de alta precisão, otimização de redes energéticas, descoberta de novos materiais para energia limpa e monitoramento ambiental em tempo real. Contudo, a pesquisa também revela riscos significativos: concentração geopolítica do domínio quântico, potencial ampliação da desigualdade digital, desafios à criptografia e paradoxo energético. Conclui-se que o aproveitamento ético e sustentável dessa revolução tecnológica exige uma governança

---

<sup>1</sup>Doutorando em Ciências Empresariais e Sociais pela UCES – Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, Buenos Aires – Argentina

climática antecipatória, baseada em cooperação científica internacional, regulação multilateral e democratização do conhecimento. O artigo oferece uma agenda de pesquisa e recomendações para formuladores de políticas públicas, defendendo que a sabedoria na aplicação da tecnologia definirá o futuro da vida no planeta.

**Palavras-chave:** Governança Climática; Computação Quântica; Sustentabilidade; Tecnologia Disruptiva; Geopolítica Ambiental; Transição Energética; Futuro do Desenvolvimento

## **ABSTRACT**

This article examines the intersection between the global climate emergency and the advancement of quantum computing as a disruptive technology, projecting scenarios and challenges for the next thirty years. Drawing on a theoretical-conceptual review that articulates complexity theory, technological geopolitics, and international climate regulatory frameworks, it investigates how the principles of quantum mechanics — superposition, entanglement, and interference — may overcome the computational limitations of current climate models. The central argument holds that quantum computing, by enabling simulations of nonlinear systems with billions of simultaneous variables, offers an unprecedented opportunity for high-precision climate modeling, energy network optimization, discovery of new materials for clean energy, and real-time environmental monitoring. However, the research also reveals significant risks: geopolitical concentration of quantum dominance, the potential widening of the digital divide, challenges to cryptography, and an energy paradox. It is concluded that the ethical and sustainable harnessing of this technological revolution requires anticipatory climate governance, grounded in international scientific cooperation, multilateral regulation, and the democratization of knowledge. The article offers a research agenda and recommendations for public policymakers, arguing that wisdom in the application of technology will define the future of life on the planet.

**Keywords:** Climate Governance; Quantum Computing; Sustainability; Disruptive Technology; Environmental Geopolitics; Energy Transition; Future of Development.

## **1 INTRODUÇÃO**

Vivemos um momento histórico em que a humanidade enfrenta simultaneamente uma emergência climática sem precedentes, uma transformação tecnológica que redefine os limites do possível e uma crise civilizatória que coloca em questão o próprio significado de desenvolvimento. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6), publicado em 2023, alerta que as emissões globais de gases de efeito estufa continuam em trajetória de aumento, e que as janelas de oportunidade para limitar o aquecimento global a 1,5°C estão se fechando rapidamente (IPCC, 2023). Simultaneamente, a computação quântica emerge como uma das tecnologias mais promissoras e disruptivas do século XXI, com potencial para transformar radicalmente setores que vão da criptografia à descoberta de medicamentos, da inteligência artificial à modelagem climática.

A pergunta central que orienta este artigo é: como utilizar as tecnologias do futuro para preservar o futuro da vida no planeta? Essa indagação não é meramente retórica, ela expressa uma tensão fundamental entre o ritmo acelerado da inovação tecnológica e a urgência das transformações socioambientais necessárias. De um lado, a computação quântica promete revolucionar nossa capacidade de compreender e intervir em sistemas complexos como o clima, os ecossistemas e as cadeias produtivas globais. De outro, sua concentração em poucos países e empresas, seus altos custos de desenvolvimento e seus potenciais riscos à segurança podem, se mal geridos, aprofundar desigualdades e criar novas formas de exclusão tecnológica.

O objetivo geral deste artigo é analisar, de forma interdisciplinar, as interfaces entre governança climática e tecnologia quântica, projetando cenários e desafios para o período 2026-2056. Especificamente, busca-se: (i) contextualizar a computação quântica no quadro das revoluções industriais e paradigmas tecnológicos; (ii) explicar seus fundamentos e seu caráter revolucionário para a modelagem de sistemas complexos; (iii) identificar aplicações concretas na área climática, da modelagem à captura de carbono; (iv) examinar as implicações geopolíticas e os riscos associados; e (v) propor diretrizes para uma governança climática que integre a dimensão quântica.

A justificativa acadêmica deste estudo reside na lacuna existente na literatura nacional e internacional sobre a convergência entre essas duas áreas. Enquanto a computação quântica tem sido amplamente discutida em termos técnicos e de inovação, e a governança climática em termos políticos e econômicos, poucos trabalhos articulam ambas de forma integrada e prospectiva. Este artigo pretende contribuir para preencher essa lacuna, oferecendo uma

análise acessível a pesquisadores de ciências humanas, mas com rigor conceitual suficiente para dialogar com especialistas em tecnologia.

O artigo está estruturado em catorze seções, além das considerações finais. Após esta introdução, a seção 2 apresenta a fundamentação teórica, situando a discussão no contexto das revoluções industriais e dos marcos da governança climática global. A seção 3 explica o que é computação quântica e seu caráter revolucionário. As seções 4 a 6 exploram as aplicações na governança climática, o impacto geopolítico e os riscos. A seção 7 reflete sobre o papel da governança climática no século XXI, seguida por uma visão prospectiva para os próximos trinta anos (seção 8). As considerações finais sintetizam os achados e apontam agendas futuras.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Revoluções Industriais e Paradigmas Tecnológicos**

A história das sociedades humanas pode ser compreendida como uma sucessão de ondas tecnológicas que reorganizam a produção, o poder e o conhecimento. A Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra do final do século XVIII com a máquina a vapor, substituiu a força muscular por energia mecânica e criou a fábrica como unidade produtiva central. A Segunda Revolução Industrial, no final do século XIX, trouxe a eletricidade, o motor de combustão interna e a química industrial, inaugurando a era da produção em massa e da globalização incipiente. A Terceira Revolução Industrial, ou Revolução Digital, a partir da metade do século XX, digitalizou a informação e conectou o planeta por meio da internet, da computação pessoal e das telecomunicações.

Cada uma dessas ondas, como observou o economista Carlota Perez (2002), foi acompanhada por transformações institucionais e sociais profundas, que incluíram novas formas de regulação, novas estruturas de poder e novos conflitos distributivos. A Quarta Revolução Industrial, conceito popularizado por Klaus Schwab (2016), caracteriza-se pela confluência de tecnologias digitais, físicas e biológicas: inteligência artificial, internet das coisas, biotecnologia, nanotecnologia e, sobretudo, computação quântica. Diferentemente das revoluções anteriores, sua velocidade de difusão exponencial e sua capacidade de modificar a própria natureza da inteligência e do processamento de informações colocam desafios inéditos à governança global.

## **2.2 A Ciência do Clima como Sistema Complexo**

O sistema climático terrestre é um dos exemplos mais emblemáticos de sistema complexo adaptativo. Conforme definido pelo IPCC (2023), ele envolve interações não lineares entre atmosfera, oceanos, criosfera, biosfera e litosfera, com feedbacks que podem amplificar ou amortecer perturbações iniciais. O conceito de Antropoceno, proposto por Crutzen e Stoermer (2000) e amplamente debatido nas últimas décadas, designa a nova época geológica em que a atividade humana se tornou a principal força motriz das mudanças no sistema terrestre.

Os limites planetários, formulados por Rockström et al. (2009) e atualizados por Steffen et al. (2015), estabelecem nove fronteiras biofísicas que, se ultrapassadas, podem desencadear mudanças ambientais abruptas e irreversíveis. Atualmente, quatro desses limites já foram ultrapassados: mudanças climáticas, perda de biodiversidade, alteração dos ciclos de nitrogênio e fósforo, e mudanças no uso da terra. A complexidade desses sistemas torna extremamente difícil prever com precisão os efeitos de intervenções humanas, e os modelos climáticos atuais, apesar de seus avanços, enfrentam limitações computacionais significativas.

## **2.3 Governança Global e Acordos Climáticos**

A resposta internacional às mudanças climáticas tem evoluído desde a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), de 1992, até o Acordo de Paris, de 2015. Este último estabeleceu o objetivo de limitar o aquecimento global a bem abaixo de 2°C, preferencialmente a 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais, por meio de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) que cada país deve apresentar e atualizar periodicamente. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), complementa esse arcabouço ao integrar dimensões sociais, econômicas e ambientais.

No entanto, a governança climática global enfrenta desafios persistentes: assimetria de poder entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, dificuldade de implementação dos compromissos assumidos, influência de interesses econômicos e setoriais, e insuficiência das metas atuais para evitar os piores cenários de aquecimento. A cada nova Conferência das Partes (COP), a distância entre as promessas e as ações concretas se revela mais dramática.

Nesse contexto, a emergência de novas tecnologias abre tanto oportunidades quanto riscos para o regime climático internacional.

## **3 O QUE É COMPUTAÇÃO QUÂNTICA?**

### **3.1 Fundamentos Físicos e Conceituais**

A computação quântica baseia-se nos princípios da mecânica quântica, a teoria que descreve o comportamento da matéria e da energia em escala atômica e subatômica. Enquanto os computadores tradicionais processam informações na forma de bits, que podem assumir os valores 0 ou 1, os computadores quânticos utilizam qubits (bits quânticos). Um qubit pode representar simultaneamente 0 e 1 graças ao fenômeno da superposição quântica. Além disso, dois ou mais qubits podem estar emaranhados, ou seja, o estado de um qubit está correlacionado instantaneamente com o estado de outro, independentemente da distância entre eles (Nielsen; Chuang, 2010).

Essas propriedades conferem à computação quântica uma capacidade exponencialmente maior de processamento paralelo. Enquanto  $n$  bits clássicos podem representar apenas um estado de cada vez,  $n$  qubits podem representar  $2^n$  estados simultaneamente. Isso significa que, para certos tipos de problemas, um computador quântico pode realizar cálculos que levariam bilhões de anos para um supercomputador clássico.

### **3.2 Breve Histórico e Estado Atual**

A ideia de utilizar sistemas quânticos para computação foi proposta inicialmente pelo físico Richard Feynman em 1981, que sugeriu que simular fenômenos quânticos com computadores clássicos seria ineficiente. David Deutsch, em 1985, formalizou o conceito de computador quântico universal. Peter Shor, em 1994, demonstrou um algoritmo quântico capaz de fatorar números grandes exponencialmente mais rápido do que qualquer algoritmo clássico, um marco que despertou enorme interesse devido às implicações para a criptografia.

Atualmente, a computação quântica encontra-se na chamada era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), termo cunhado por John Preskill (2018) para descrever dispositivos quânticos de escala intermediária (50 a alguns milhares de qubits) que ainda não são totalmente tolerantes a falhas. Empresas como Google, IBM, Microsoft e startups como

IonQ e Rigetti têm demonstrado avanços significativos, incluindo a chamada "supremacia quântica" — o ponto em que um computador quântico realiza uma tarefa que um supercomputador clássico não conseguiria em tempo razoável. Em 2019, o processador Sycamore, do Google, realizou em 200 segundos um cálculo que estimou que levaria 10.000 anos em um supercomputador clássico (Arute et al., 2019). Embora esse marco seja celebrado, especialistas alertam que aplicações práticas em larga escala ainda podem levar uma ou duas décadas.

### **3.3 Principais Players Tecnológicos**

A corrida quântica global envolve atores estatais e privados. Os Estados Unidos, por meio do National Quantum Initiative Act (2018), investiram mais de US\$ 1,2 bilhão em pesquisa quântica. A China, por sua vez, anunciou um investimento estimado em US\$ 10 bilhões para o National Laboratory for Quantum Information Sciences, além de ter lançado o satélite experimental Micius para comunicação quântica. A União Europeia, com seu Quantum Flagship, alocou € 1 bilhão para um programa de dez anos. Empresas como Google, IBM e Microsoft competem para desenvolver processadores quânticos comerciais, enquanto startups exploram nichos como sensoriamento quântico, criptografia pós-quântica e algoritmos quânticos para finanças e logística.

## **4 O CARÁTER REVOLUCIONÁRIO DA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA**

### **4.1 Capacidade de Resolver Problemas Intratáveis**

O caráter revolucionário da computação quântica reside não apenas na velocidade de processamento, mas na capacidade de resolver classes de problemas que são fundamentalmente intratáveis para computadores clássicos. Esses problemas incluem a simulação de sistemas quânticos (como moléculas para novos medicamentos e materiais), a otimização combinatorial (como rotas logísticas ou alocação de recursos) e a fatoração de números grandes (base da criptografia atual). Para esses problemas, algoritmos quânticos podem oferecer acelerações exponenciais ou polinomiais significativas.

Por exemplo, simular o comportamento de uma molécula com 100 elétrons exigiria, em um computador clássico, armazenar  $2^{100}$  estados, número maior que o de átomos no

universo. Um computador quântico, ao simular diretamente a mecânica quântica, poderia realizar essa tarefa de forma eficiente. Essa capacidade tem implicações diretas para a descoberta de novos materiais, catalisadores e processos químicos essenciais para a transição energética.

## **4.2 Limitações Atuais e Projeções Futuras**

Apesar do enorme potencial, a computação quântica enfrenta desafios técnicos significativos. Os qubits são extremamente sensíveis a interferências externas (ruído), o que causa erros computacionais. A correção de erros quânticos requer uma grande redundância de qubits físicos para cada qubit lógico, aumentando exponencialmente a complexidade dos sistemas. Atualmente, os dispositivos NISQ possuem entre 50 e 1.000 qubits, mas a maioria deles opera com altas taxas de erro.

Projeções indicam que computadores quânticos tolerantes a falhas — capazes de executar algoritmos quânticos longos e complexos com correção de erros — podem estar disponíveis comercialmente entre 2030 e 2040 (Preskill, 2018; National Academies, 2019). Até lá, a computação híbrida (combinando processadores clássicos e quânticos) será a principal forma de exploração prática. Empresas como IBM planejam lançar sistemas com mais de 4.000 qubits até 2025, embora ainda na era NISQ.

# **5 A CONEXÃO ENTRE TECNOLOGIA QUÂNTICA E CLIMA**

## **5.1 O Clima como Sistema Complexo e Não Linear**

O clima da Terra é regido por equações diferenciais parciais não lineares que descrevem a dinâmica de fluidos, transferência de radiação, química atmosférica e interações oceano-atmosfera. A resolução dessas equações requer aproximações numéricas que consomem imenso poder computacional. Os modelos climáticos globais (General Circulation Models, GCMs) dividem a atmosfera e os oceanos em grades tridimensionais, com células que variam de dezenas a centenas de quilômetros. Cada aumento na resolução necessário para capturar processos de pequena escala, como nuvens e tempestades, multiplica exponencialmente os requisitos computacionais.

Além disso, os modelos climáticos incluem dezenas de processos parametrizados (representações simplificadas de fenômenos complexos, como convecção, formação de nuvens e turbulência) que introduzem incertezas significativas. A computação quântica promete não apenas acelerar as simulações, mas também permitir a representação explícita de processos que hoje são parametrizados, reduzindo as margens de erro das projeções climáticas.

## **5.2 Como a Computação Quântica Pode Superar Barreiras**

A simulação de sistemas quânticos é uma aplicação natural da computação quântica, mas sua utilidade para a modelagem climática vai além. Algoritmos quânticos podem resolver problemas de otimização global, como encontrar a configuração ótima de parâmetros em modelos climáticos ou otimizar a alocação de recursos em sistemas energéticos. Técnicas como o quantum annealing, já utilizadas por empresas como D-Wave, são particularmente adequadas para problemas combinatórios presentes no planejamento de redes elétricas e logística.

A simulação de materiais e reações químicas como a captura de CO<sub>2</sub> em solventes ou a catálise para conversão de carbono, também pode ser acelerada por computadores quânticos, permitindo a descoberta de novos materiais com propriedades desejadas para baterias, painéis solares e sistemas de armazenamento de energia. Embora a aplicação climática da computação quântica ainda esteja em estágio inicial, grupos de pesquisa em instituições como o MIT e o Google Quantum AI já exploram casos de uso específicos, como a modelagem de fluxos turbulentos e a otimização de turbinas eólicas.

# **6 APLICAÇÕES NA GOVERNANÇA CLIMÁTICA**

## **6.1 Modelagem Climática Avançada**

A principal contribuição da computação quântica para a governança climática reside na possibilidade de modelos climáticos de altíssima resolução que integrem múltiplas variáveis, atmosfera, oceanos, cobertura vegetal, uso da terra, atividades econômicas e emissões — em tempo real. Com algoritmos quânticos, seria possível simular cenários de

aquecimento com muito mais precisão, incluindo a ocorrência de eventos extremos (furacões, secas, ondas de calor) e suas interações com fatores socioeconômicos.

Sensores quânticos, dispositivos que exploram fenômenos quânticos para medições de altíssima precisão, podem revolucionar o monitoramento ambiental. Por exemplo, sensores quânticos baseados em NV-centers em diamante podem medir campos magnéticos e elétricos com precisão nanométrica, permitindo monitorar fluxos subterrâneos de água ou detectar vazamentos de gases de efeito estufa em tempo real. Satélites equipados com sensores quânticos podem mapear a distribuição de carbono na atmosfera com resolução e acurácia jamais alcançadas.

## **6.2 Energia Limpa**

A transição energética é um dos pilares da governança climática. A computação quântica pode acelerar essa transição de múltiplas formas. Em primeiro lugar, a otimização quântica pode projetar redes elétricas inteligentes (smart grids) que equilibrem oferta e demanda de energia renovável de forma eficiente, considerando milhares de pontos de geração distribuída (painéis solares residenciais, parques eólicos) e armazenamento (baterias).

Em segundo lugar, a simulação quântica de materiais pode acelerar a descoberta de novas baterias com maior densidade energética e menor custo, essenciais para a eletrificação do transporte e o armazenamento em larga escala. A descoberta de novos catalisadores para a produção de hidrogênio verde, por eletrólise da água, também pode ser significativamente acelerada, reduzindo os custos dessa fonte energética.

Em terceiro lugar, algoritmos quânticos podem otimizar o planejamento de parques eólicos e solares, maximizando sua eficiência e minimizando impactos ambientais. A localização de turbinas em um parque eólico, por exemplo, é um problema combinatório complexo que pode ser resolvido com técnicas de quantum annealing.

## **6.3 Mobilidade Urbana**

As cidades são responsáveis por cerca de 70% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. A computação quântica pode otimizar sistemas de transporte urbano, reduzindo congestionamentos e emissões. Algoritmos quânticos podem processar dados de tráfego em

tempo real, considerando milhões de veículos, semáforos, rotas alternativas e eventos imprevistos, para propor rotas ótimas que minimizem tempo de viagem e consumo de combustível. Empresas de logística como Volkswagen e DHL já exploram a otimização quântica para rotas de entrega e frota.

Cidades inteligentes podem integrar sensoriamento quântico para monitorar qualidade do ar, níveis de ruído e fluxo de pessoas, alimentando modelos de planejamento urbano que reduzam a pegada de carbono. A eficiência energética de edifícios também pode ser otimizada com algoritmos quânticos que consideram isolamento térmico, iluminação natural, aquecimento e refrigeração em tempo real.

## **6.4 Agricultura Sustentável**

A agricultura é simultaneamente vítima e causa das mudanças climáticas. A computação quântica pode contribuir para uma agricultura de precisão, que maximize a produtividade com mínimo impacto ambiental. Modelos quânticos podem processar dados de sensores de solo, clima e vegetação para recomendar o momento ideal para plantio, irrigação e aplicação de fertilizantes, reduzindo o desperdício de água e nutrientes.

A predição de safras com modelos climáticos de alta resolução pode ajudar agricultores a planejar culturas e evitar perdas devido a eventos climáticos extremos. Simulações moleculares podem auxiliar no desenvolvimento de culturas mais resistentes ao calor, seca e salinidade, sem recorrer a transgênicos controversos. A otimização de cadeias produtivas alimentares do campo à mesa, também pode reduzir perdas e emissões.

## **6.5 Captura e Armazenamento de Carbono**

A captura e armazenamento de carbono (CCS) é uma tecnologia crucial, embora controversa, para atingir emissões líquidas zero. A simulação quântica de materiais pode acelerar a descoberta de novos sorventes e membranas para captura de CO<sub>2</sub>, bem como otimizar processos de mineralização e armazenamento geológico. Sumidouros naturais de carbono, como florestas e oceanos, podem ser monitorados com sensores quânticos e modelados com algoritmos quânticos para maximizar sua capacidade de sequestro.

## **7 O IMPACTO GEOPOLÍTICO**

### **7.1 A Nova Corrida Tecnológica Global**

A tecnologia quântica tornou-se um campo de disputa estratégica entre as principais potências mundiais. Os Estados Unidos, a China e a União Europeia investiram bilhões de dólares em programas nacionais, reconhecendo que a liderança quântica se traduzirá em vantagens econômicas, militares e diplomáticas. A China, em particular, fez da computação quântica uma prioridade máxima do seu plano quinquenal, construindo laboratórios de ponta e formando milhares de pesquisadores. O projeto de US\$ 10 bilhões do National Laboratory for Quantum Information Sciences, em Hefei, simboliza essa ambição (State Council of China, 2020).

Do ponto de vista climático, quem dominar a computação quântica terá uma vantagem decisiva na modelagem climática, no desenvolvimento de tecnologias de energia limpa e na formulação de políticas baseadas em dados. Isso pode criar uma nova assimetria: países com capacidade quântica avançada poderão antecipar e mitigar impactos climáticos com muito mais eficiência do que aqueles sem acesso à tecnologia. O conceito de "soberania quântica" emerge como extensão da soberania digital e tecnológica.

### **7.2 Implicações para o Sul Global**

Os países em desenvolvimento, que geralmente são os mais vulneráveis às mudanças climáticas, correm o risco de ficar à margem da revolução quântica. Os altos custos de pesquisa, a necessidade de infraestrutura especializada (laboratórios de criogenia, suprimento de hélio líquido) e a escassez de mão de obra qualificada criam barreiras significativas. Sem políticas ativas de transferência de tecnologia e cooperação internacional, a lacuna quântica pode se somar à já existente lacuna digital, aprofundando desigualdades globais.

Iniciativas como o Quantum for Development (proposta por pesquisadores de países africanos) e parcerias com instituições como a Unesco podem ajudar a democratizar o acesso, mas ainda são incipientes. A governança climática quântica precisará incluir mecanismos de solidariedade tecnológica, como fundos globais para capacitação e compartilhamento de infraestrutura quântica.

### **7.3 Correlação entre Poder Tecnológico e Poder Climático**

A história mostra que as potências tecnológicas dominantes também lideram a definição das agendas ambientais globais. No século XIX, a Grã-Bretanha moldou as regras do comércio de carbono por meio de sua supremacia industrial. No século XX, os EUA definiram os padrões de eficiência energética e poluição veicular. No século XXI, a China tornou-se líder na produção de painéis solares e veículos elétricos, influenciando os mercados globais de energia limpa.

A computação quântica pode reforçar essa correlação. Países que desenvolverem capacidades quânticas robustas terão mais ferramentas para cumprir suas NDCs, adaptar-se a impactos climáticos e influenciar negociações internacionais. Ao mesmo tempo, a concentração dessa tecnologia pode gerar tensões: se apenas algumas nações tiverem modelos climáticos ultra-precisos, a confiança nas negociações multilaterais pode ser abalada, com acusações de manipulação de dados.

## **8 OS RISCOS DA REVOLUÇÃO QUÂNTICA**

### **8.1 Concentração de Poder Tecnológico**

O desenvolvimento da computação quântica requer investimentos que apenas governos e grandes corporações podem arcar. Até o momento, a pesquisa e a propriedade intelectual estão fortemente concentradas em poucos países e empresas. A Google, IBM, Microsoft, Intel e startups americanas e chinesas dominam o cenário. Essa concentração levanta preocupações sobre o controle de tecnologias críticas para o futuro da humanidade.

Se a computação quântica se tornar essencial para a modelagem climática, a energia limpa e a segurança, o monopólio tecnológico pode se traduzir em poder político desmedido. Governos que controlarem o acesso a algoritmos quânticos de previsão climática poderão influenciar mercados de carbono, seguros agrícolas e até mesmo decisões sobre realocação de populações em áreas de risco.

### **8.2 Desigualdade Digital e Quantum Divide**

O "quantum divide" refere-se à lacuna entre países e comunidades que têm acesso à tecnologia quântica e aqueles que não têm. Essa divisão pode se sobrepor a outras formas de

desigualdade, renda, educação, infraestrutura digital, criando um novo estrato de exclusão. Países em desenvolvimento podem se tornar consumidores passivos de soluções quânticas importadas, sem capacidade de adaptá-las a suas realidades locais.

A educação é um fator crítico: formar especialistas em computação quântica exige anos de treinamento avançado em física, matemática e ciência da computação. Sem programas de capacitação em massa, a maioria dos países não terá capital humano para participar dessa revolução. Iniciativas como cursos online gratuitos (Qiskit, da IBM; Cirq, do Google) e programas de mestrado em computação quântica podem ajudar, mas precisam de escala.

### **8.3 Riscos à Segurança Cibernética**

Um dos impactos mais imediatos da computação quântica será a quebra da criptografia de chave pública atualmente usada para proteger comunicações, transações financeiras e sistemas de infraestrutura crítica. O algoritmo de Shor pode fatorar números grandes exponencialmente mais rápido que algoritmos clássicos, ameaçando protocolos como RSA e ECC. Embora a criptografia pós-quântica esteja sendo desenvolvida, a transição levará anos e exporá dados históricos a riscos de decifração futura.

Para a governança climática, isso significa que sistemas de monitoramento de emissões, plataformas de comércio de carbono e bases de dados ambientais podem se tornar vulneráveis. Se agentes maliciosos explorarem essa fragilidade, poderão manipular informações climáticas, fraudar compromissos de redução de emissões ou desestabilizar acordos internacionais.

### **8.4 Paradoxo Energético**

Os computadores quânticos, para funcionar, precisam ser resfriados a temperaturas próximas do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), o que exige sistemas de criogenia que consomem grandes quantidades de energia. Estima-se que um computador quântico de grande escala possa consumir centenas de quilowatts-hora, gerando uma pegada de carbono significativa. Esse paradoxo energético, usar uma tecnologia potencialmente intensiva em energia para ajudar a resolver a crise climática, precisa ser enfrentado com o desenvolvimento de qubits

que operem em temperaturas mais altas (qubits de estado sólido, por exemplo) e com fontes de energia limpa para os data centers quânticos.

## **9 O PAPEL DA GOVERNANÇA CLIMÁTICA NO SÉCULO XXI**

### **9.1 A Necessidade de Governança Antecipatória**

A governança climática tradicional tem sido reativa: os acordos internacionais surgem após a constatação de danos, os investimentos em adaptação são feitos após desastres. A revolução quântica exige uma abordagem antecipatória, que identifique riscos e oportunidades antes que se consolidem. Como propõe a teoria da governança antecipatória (Guston, 2014), é preciso criar instituições capazes de imaginar futuros alternativos, avaliar implicações éticas e sociais de novas tecnologias e moldar seu desenvolvimento de forma responsável.

No caso da computação quântica, isso implica estabelecer princípios éticos para seu desenvolvimento e uso, análogos aos princípios da IA responsável. Diretrizes como transparência algorítmica, justiça distributiva, privacidade e prestação de contas precisam ser adaptadas ao contexto quântico. A comunidade científica, em parceria com governos e sociedade civil, deve liderar esse debate.

### **9.2 Propostas de Regulação Internacional**

A experiência com a regulação de tecnologias emergentes, como engenharia genética, inteligência artificial e armas autônomas, mostra que acordos internacionais são difíceis de negociar, mas cruciais para evitar externalidades negativas. Para a computação quântica, alguns instrumentos podem ser considerados:

- Tratado de não proliferação quântica: similar ao Tratado de Não Proliferação Nuclear, visando evitar o uso militar irrestrito da tecnologia e promover a cooperação para fins pacíficos, especialmente climáticos.
- Padrões de criptografia pós-quântica: definidos por organismos como o NIST e a ISO, para garantir a segurança de dados ambientais e transações de carbono.

- Fundo global de acesso quântico: inspirado no Fundo Global de Combate à AIDS, Tuberculose e Malária, mas voltado para capacitar países em desenvolvimento em tecnologias quânticas aplicadas ao clima.

- Mecanismo de revisão ética: nos moldes do Comitê de Bioética da UNESCO, para avaliar projetos de pesquisa quântica com potenciais impactos climáticos e sociais.

### **9.3 O Papel Das Nações Unidas E De Novos Fóruns**

A ONU, por meio de suas agências (UNFCCC, PNUMA, UNESCO), pode atuar como facilitadora do diálogo global sobre governança quântica e climática. A criação de um Grupo de Trabalho sobre Tecnologias Quânticas e Clima, no âmbito da UNFCCC, poderia reunir cientistas, formuladores de políticas e representantes da indústria para elaborar recomendações. Além disso, novos fóruns como o Conselho de Cooperação em Tecnologias Quânticas (proposto por alguns acadêmicos) poderiam complementar as estruturas existentes.

A governança multinível, envolvendo governos nacionais, organizações regionais (como a União Europeia e a União Africana), empresas e academia, é essencial para lidar com a complexidade do tema. Abordagens de "governança adaptativa", que permitam ajustes à luz de novas informações, são particularmente adequadas para um campo em rápida evolução.

## **10 VISÃO PARA OS PRÓXIMOS 30 ANOS**

### **10.1 Período 2026–2035: Consolidação e Primeiras Aplicações**

Nesta década, a computação quântica híbrida (clássico-quântica) se consolida como ferramenta de pesquisa em climática. Grandes centros de modelagem climática, como o ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo) e o NCAR (Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica dos EUA), começam a integrar módulos quânticos para resolver problemas específicos, como parametrização de nuvens ou otimização de parâmetros. Sensores quânticos são instalados em satélites e estações terrestres para monitorar concentrações de metano e CO<sub>2</sub> com precisão sem precedentes.

Cidades inteligentes piloto, em Singapura, Helsínki e Dubai implantam sistemas de otimização quântica de tráfego e energia, reduzindo emissões urbanas entre 10% e 15%. A agricultura de precisão quântica é testada em propriedades rurais na Austrália e no Brasil, com ganhos de eficiência hídrica de até 30%. No entanto, o acesso à tecnologia ainda é restrito a países desenvolvidos e grandes corporações, e a governança internacional permanece incipiente.

## **10.2 Período 2035–2045: Integração e Escala**

Na década seguinte, computadores quânticos tolerantes a falhas começam a operar comercialmente, aumentando drasticamente a capacidade de modelagem climática. Modelos climáticos globais com resolução de 1 km se tornam viáveis, permitindo simulações de eventos extremos com alta precisão. Redes elétricas inteligentes em escala continental são otimizadas por algoritmos quânticos, integrando milhões de fontes renováveis e sistemas de armazenamento.

A descoberta de novos materiais para baterias e painéis solares acelera, reduzindo custos e aumentando eficiência. A agricultura hiperprecisa se torna realidade, com sensores quânticos monitorando solo, plantas e clima em tempo real, ajustando irrigação e fertilização automaticamente. O primeiro modelo climático quântico operacional é utilizado para apoiar as negociações da COP, gerando maior confiança nas projeções.

Porém, os riscos geopolíticos se intensificam: a China e os EUA lideram a corrida quântica, enquanto o Sul Global luta para acompanhar. Iniciativas de transferência de tecnologia, como o Fundo Global de Acesso Quântico, são criadas, mas com recursos limitados. A criptografia pós-quântica é amplamente adotada, protegendo dados climáticos e transações de carbono.

## **10.3 Período 2045–2056: Transformação e Desafios Civilizatórios**

Na última década do horizonte analisado, a computação quântica está integrada a todos os aspectos da governança climática. Sistemas quânticos de suporte a decisão ajudam governos e organizações internacionais a elaborar políticas baseadas em simulações em tempo real. A economia regenerativa, que combina princípios ecológicos e tecnológicos, ganha

tração, com modelos quânticos otimizando fluxos de materiais, energia e carbono em ciclos fechados.

Atingir emissões líquidas zero até 2050, meta estabelecida pelo Acordo de Paris, torna-se viável com a aceleração proporcionada pela computação quântica. No entanto, o sucesso depende de escolhas políticas e éticas feitas nas décadas anteriores. Se a governança falhar, o quantum divide pode gerar um mundo ainda mais desigual, com ilhas de prosperidade tecnológica em meio a áreas de vulnerabilidade climática.

A integração entre inteligência artificial, biotecnologia e computação quântica cria novas fronteiras, mas também novos dilemas. A capacidade de manipular sistemas planetários em escala, a chamada geoengenharia quântica, levanta questões éticas profundas: quem decide intervir no clima global? Com que limites? Como garantir a participação democrática? Essas perguntas estarão no centro do debate civilizatório.

## **11 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este artigo buscou demonstrar que a convergência entre governança climática e tecnologia quântica não é uma especulação futurista, mas uma realidade em formação que exigirá respostas intelectuais, políticas e éticas imediatas. A computação quântica oferece ferramentas sem precedentes para compreender e enfrentar a crise climática: modelagem de alta precisão, otimização de sistemas energéticos, descoberta de novos materiais e monitoramento ambiental. No entanto, seu potencial só se concretizará se for acompanhada por uma governança sólida, democrática e inclusiva.

Os riscos são reais: concentração de poder tecnológico, aprofundamento das desigualdades globais, ameaças à cibersegurança e paradoxo energético. A história mostra que as tecnologias não são neutras, seu impacto depende de quem as controla, com que fins e sob que regras. A corrida quântica em curso não pode ser deixada apenas a critério de governos nacionais e corporações. A sociedade civil, a academia e as organizações multilaterais precisam se engajar ativamente para garantir que a revolução quântica sirva ao bem comum e à sustentabilidade planetária.

As limitações deste estudo incluem a ausência de dados empíricos sobre aplicações quânticas climáticas, uma vez que a tecnologia ainda está em estágio inicial, e a dependência de projeções que podem ser superadas ou invalidadas por avanços imprevistos. Pesquisas

futuras devem focar em: (i) prototipagem de algoritmos quânticos para problemas climáticos específicos; (ii) análise de custo-benefício de investimentos quânticos para países em desenvolvimento; (iii) desenvolvimento de indicadores de governança quântica; e (iv) estudos de percepção pública sobre a tecnologia quântica e o clima.

Por fim, retomamos a frase que norteia este artigo: a próxima revolução tecnológica não será definida apenas pela inteligência das máquinas, mas pela sabedoria humana em utilizá-las para proteger a vida, o clima e as futuras gerações. A janela de oportunidade está aberta, mas não será eterna. Cabe a nós, como comunidade global, escolher o caminho que leva a um futuro sustentável e justo.

A próxima revolução tecnológica não será definida apenas pela inteligência das máquinas, mas pela sabedoria humana em utilizá-las para proteger a vida, o clima e as futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

ARORA, A. *et al.* Quantum technology for sustainable development. **Nature Sustainability**, v. 6, p. 498-501, 2023.

ARUTE, F. *et al.* Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. **Nature**, v. 574, p. 505-510, 2019.

BERNHARDT, C. **Quantum computing for everyone**. Cambridge: The MIT Press, 2019.

CRUTZEN, P. J.; STOERMER, E. F. The "Anthropocene". **Global Change Newsletter**, v. 41, p. 17-18, 2000.

DEUTSCH, D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. **Proceedings of the Royal Society of London A**, v. 400, p. 97-117, 1985.

FEYNMAN, R. Simulating physics with computers. **International Journal of Theoretical Physics**, v. 21, p. 467-488, 1982.

FLAMMIA, S. T. Quantum computing and climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, p. 898-900, 2022.

GUSTON, D. Understanding 'anticipatory governance'. **Social Studies of Science**, v. 44, n. 2, p. 218-242, 2014.

HARARI, Y. N. **Homo Deus**: uma breve história do amanhã. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net zero by 2050**: a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023**: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2023.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Quantum computing**: progress and prospects. Washington, DC: The National Academies Press, 2019.

NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. **Quantum computation and quantum information**. 10. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

NORDHAUS, W. **The climate casino**: risk, uncertainty, and economics for a warming world. New Haven: Yale University Press, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transforming our world**: the 2030 agenda for sustainable development. New York: United Nations, 2015.

PEREZ, C. **Technological revolutions and financial capital**: the dynamics of bubbles and golden ages. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.

PRESKILL, J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. **Quantum**, v. 2, p. 79, 2018.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472-475, 2009.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SHOR, P. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *In*: ANNUAL SYMPOSIUM ON FOUNDATIONS OF COMPUTER SCIENCE, 35., 1994. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 1994. p. 124-134.

STEFFEN, W. *et al.* Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, 2015.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Acordo de Paris**. Paris: UNFCCC, 2015.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The global risks report 2024**. 19. ed. Geneva: WEF, 2024.