

A COMPUTAÇÃO QUÂNTICA E O DESAFIO DA CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA

Bianca Belila Rusinelli¹

Maurício Messias de Souza²

Mariana Godoy Vazquez Miano³

RESUMO

Este artigo explora as iniciativas educacionais para o ensino de tecnologias quânticas nas escolas e universidades, destacando suas finalidades, metodologias e desafios. Com o objetivo de aproximar os estudantes dos conceitos fundamentais das tecnologias quânticas, diversos programas de ensino adotam atividades interativas e simuladores, oferecendo uma introdução prática e intuitiva ao tema. A necessidade de profissionais qualificados na área é crescente, pois, com o avanço da computação quântica, espera-se uma grande demanda de mão de obra especializada nos próximos anos. Indústrias em diversos setores reconhecem o potencial dessa tecnologia, reforçando a urgência na formação de profissionais aptos a desenvolver e aplicar soluções quânticas. Realizou-se uma pesquisa exploratória de instituições que têm integrado os computadores quânticos da SPINQ, que são dispositivos compactos e de custo relativamente mais acessível que computadores quânticos tradicionais e oferecem uma experiência prática e interativa. Com eles, os alunos visualizam conceitos teóricos em um contexto prático, promovendo maior compreensão e interesse pelo campo de atuação. Entretanto, a adoção de computadores quânticos no ensino enfrenta desafios substanciais. Os custos elevados, a infraestrutura limitada e a falta de professores especializados são as principais barreiras, principalmente em países com menor investimento na área educacional. Assim, enquanto as tecnologias quânticas mostram grande potencial educacional, sua implementação requer investimentos estruturais significativos para se tornar viável e eficaz.

PALAVRAS-CHAVES: computação quântica, física quântica, ensino, capacitação tecnológica, SPINQ.

ABSTRACT

This article explores educational initiatives for teaching quantum technologies in schools and universities, highlighting their purposes, methodologies, and challenges. To bring students closer to the fundamental concepts of quantum technologies, several teaching programs adopt interactive activities and simulators, offering a practical and intuitive introduction to the subject. The need for qualified professionals in the area is growing, since, with the advancement of quantum computing, a great demand for specialized labor is expected in the coming years. Industries in several sectors recognize the potential of this technology, reinforcing the urgency of training professionals capable of developing and applying quantum solutions. An exploration survey was conducted by institutions that have integrated SPINQ quantum computers, which are compact devices that are more affordable than traditional quantum computers and offer practical and interactive experience. With them, students visualize theoretical concepts in a practical context, promoting greater understanding and interest in the field. However, the

¹ Graduanda pela Faculdade de Tecnologia de Americana.

² Graduando pela Faculdade de Tecnologia de Americana.

³ Pós-Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos

adoption of quantum computers in education faces substantial challenges. Excessive costs, limited infrastructure and a lack of specialized teachers are the main barriers, especially in countries with lower investment in education. Thus, while quantum technologies show great educational potential, their implementation requires significant structural investments to become viable and effective.

KEYWORDS: *quantum computing, quantum physics, teaching, technological training, SPINQ.*

1. INTRODUÇÃO

À medida que a área da computação quântica se expande globalmente, torna-se evidente a escassez de talentos capacitados para atender às exigências desse setor em crescimento, por isso é crucial fomentar o desenvolvimento de habilidades quânticas desde a educação básica, preparando os jovens para ingressar nesse campo promissor.

Os impactos potenciais das tecnologias quânticas foram reconhecidos em todo o mundo e muitos países estão aumentando esforços para iniciar estratégias quânticas nacionais para promover o seu desenvolvimento no cenário global (Kaur, 2022).

Os governos nacionais e as organizações comerciais estão formulando estratégias críticas que acabarão por fundamentar a florescente economia quântica. O governo dos EUA delineou quatro estratégias principais em seu Plano de Desenvolvimento para a Força de Trabalho de Tecnologia e Informação Quântica. Uma das principais estratégias tem sido focada na ampliação da participação dos alunos e na acessibilidade ao ensino superior, incluindo programas de bacharelado, mestrado e treinamento profissional com um foco em competências quânticas em todos os níveis para resolver as lacunas da força de trabalho.

Para impulsionar a indústria quântica européia foi criado o European Quantum Industry Consortium (QuIC), com uma estratégia de roteiro industrial para moldar a educação e a formação do mundo europeu preparado para a tecnologia quântica. Foram criados vários consórcios, como o Consórcio de indústrias regionais, o *Quantum Strategy Institute*, *Quantum Industry Canada*, *Quantum Technology and Application* e o *Quantum O*, Conselho de Tecnologia de Ecossistemas da Índia. Esses consórcios estão identificando pontos fortes e lacunas na atual educação existente e o desenvolvimento da força de trabalho no ecossistema quântico. No Brasil, uma iniciativa recente do Governo de Alagoas ocorre por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (Fapeal), o Programa de Iniciação

Científica Júnior (Pibic Jr), que tem beneficiado alunos e professores da rede pública estadual.

O projeto iniciado em julho/23 investiga uma tecnologia emergente, que pode revolucionar o processamento de informações. A ideia foi intitulada de “Introdução à computação quântica no ensino médio: para a alfabetização científica e tecnológica.” Iniciativas como a criação de currículos específicos sobre fundamentos da física quântica, programas de capacitação para professores, parcerias com universidades internacionais e a implementação de plataformas tecnológicas, como simuladores quânticos, são exemplos de abordagens que podem ser exploradas. Essas ações visam acelerar o preparo de uma nova geração de profissionais, capazes de contribuir para o desenvolvimento e inovação tecnológica na computação quântica.

Iniciativas como a criação de currículos específicos sobre fundamentos da física quântica, programas de capacitação para professores, parcerias com universidades internacionais, e a implementação de plataformas tecnológicas, como simuladores quânticos, são exemplos de abordagens que podem ser exploradas. Essas ações visam acelerar o preparo de uma nova geração de profissionais, capazes de contribuir para o desenvolvimento e inovação tecnológica na computação quântica.

No Brasil, diversas instituições estão na vanguarda do avanço da computação quântica, servindo como exemplo para o crescimento dessa área emergente. Essas organizações oferecem desde centros de pesquisa de ponta até programas educacionais focados em tecnologias quânticas, utilizando *softwares* específicos para a simulação e desenvolvimento de algoritmos quânticos. O objetivo é aumentar significativamente o número de futuros profissionais especializados, preparando-os para atender às demandas de um mercado em rápida expansão e contribuindo para o fortalecimento da inovação tecnológica no país.

Em 2021, foi lançado o primeiro centro dedicado à tecnologia de computação quântica aplicada ao setor empresarial do Brasil, o *Latin America Quantum Computer Center* (LAQCC) pelo SENAI CIMATEC e a líder global em transformação digital, a francesa Atos.

O centro de pesquisa conta com um *Quantum Learning Machine* (QLM), o simulador que permite a criação de algoritmos quânticos de grande capacidade, batizado de CIMATEC KUATOMU (Quantum em Iorubá), o simulador usa um *hardware* clássico de supercomputação e poderá simular sistemas e algoritmos quânticos de até 35 qubits. Pesquisadores e cientistas terão acesso à tecnologia que, assim como o centro, ficará alocada na sede do SENAI CIMATEC, em Salvador (SENAI, 2021).

Desenvolvidos pela Atos, o equipamento permite testes muito próximos da realidade, podendo gerar novas soluções e a tomada de decisões cada vez mais assertivas.

O LAQCC visa disseminar a tecnologia quântica no país, impulsionar a capacitação de mão de obra e incentivar pesquisas científicas nas mais diversas áreas, como química e biologia. Além disso, pretende facilitar a formação de pesquisadores, programadores, engenheiros e técnicos como uma das bases para consolidação de um ecossistema de computação quântica nacional e internacional (CIMATEC, 2021).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão apresentados e discutidos temas relativos às áreas mais relevantes para essa pesquisa, como iniciativas de aprendizado e capacitação de computação quântica no Brasil e no mundo e a necessidade de mão de obra qualificada para o desenvolvimento de tecnologias quânticas.

2.1 Iniciativas no Brasil

Em 2023, o Grupo de Informação Quântica e Fenômenos Emergentes na UFSM, coordenado pelo professor Jonas Maziero (Departamento de Física), desenvolveu projetos de aprendizado de máquina em computação quântica, levando em consideração que os modelos atuais de aprendizado de máquina “sofrem de problemas tais como a quantidade de dados de treinamento necessários e o elevado número de operações matemáticas que devem fazer”.

Como alternativa promissora, o aprendizado de máquina quântica está ganhando destaque. O projeto adota uma metodologia que examina como a arquitetura das unidades de processamento quântico impacta os modelos de aprendizado de máquina, incorporando simulações numéricas em máquinas clássicas e computadores quânticos, além da aplicação de estratégias diversas para mitigar erros.

Dado o papel da computação clássica no avanço científico e tecnológico ao longo dos anos, acredita-se que, no futuro, os algoritmos quânticos possam abrir novas possibilidades e impulsionar progressos significativos em muitas áreas do conhecimento.

Isso inclui, entre outras áreas, “a química quântica (simulação de moléculas),

transporte e logística (otimização de rotas, organização de estoques e agendas, controle portuário), física de materiais (descoberta de novos materiais, materiais supercondutores a altas temperaturas), machine learning (veículos autônomos, visão computacional, determinação de padrões), medicina (descoberta de novos fármacos, medicina personalizada) e segurança cibernética (quebra de códigos criptográficos)”, conforme consta no projeto desenvolvido em parceria entre UFSM e UFSC (UFSM, 2023).

No Rio de Janeiro (2024), a Universidade Federal Fluminense (UFF), instituição vinculada ao Ministério da Educação (MEC), coordenou a Rede Rio Quântica, primeira rede de internet quântica do Brasil que insere o país no mapa global da criptografia quântica, para avançar na proteção de dados sensíveis.

A pesquisa trabalha a segurança das chaves criptográficas com fundamento na física quântica, em contrapartida aos protocolos atuais, que se baseiam na matemática dos algoritmos de decodificação, fazendo com que o progresso da técnica possa contribuir diretamente para proteger setores sensíveis e dados sigilosos de interferências e acessos externos. Visando a disseminação dessa tecnologia, criou-se um projeto para implementar o Laboratório de Tecnologias Quânticas do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

A distribuição da computação quântica é liberada da UFF para o CBPF, que a distribui para as outras instituições. A iniciativa busca viabilizar o acesso a longa distância dos computadores por meio de canais quânticos, ampliando as possibilidades para além da simples troca de chaves criptográficas. Além da UFF e da CBPF, o projeto conta com a participação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

As instituições são conectadas por dois meios, aéreo e via cabeamento, com perspectivas para incorporar o Instituto Militar de Engenharia (IME) à Rede. A parceria interinstitucional é um dos pilares para o desenvolvimento do projeto, uma vez que os representantes mantêm diálogo constante, com reuniões para identificação e resolução de desafios técnicos que surgem durante o desenvolvimento da Rede.

A Rede Rio Quântica representa um grande passo para a criação de um campo de testes, a fim de aprimorar as tecnologias emergentes e avançar a posição do país nesse cenário de pesquisa. A expectativa é que os investimentos cresçam conforme os projetos consigam alcançar resultados concretos (UFF, 2024).

Essas iniciativas são marcos cruciais para o avanço tecnológico no país, não apenas

posicionando o Brasil como um ator relevante na pesquisa e desenvolvimento em computação quântica, mas também desempenhando um papel muito importante na formação de novos profissionais capacitados para enfrentar os desafios dessa área emergente. Ao promover a integração entre pesquisa acadêmica, inovação tecnológica e formação de talentos, essas iniciativas indicam o caminho para o crescimento sustentável e competitivo do Brasil no cenário global da computação quântica.

2.2 Iniciativas no mundo

Assim como no Brasil, países ao redor do mundo estão em busca de maior capacitação na área da mecânica quântica. Para isso, várias iniciativas de capacitação estão em andamento. As iniciativas para capacitação de profissionais deverão começar no ensino médio, ao apresentar a área da física quântica aos alunos. Atualmente, os currículos escolares de física tornaram-se ultrapassados e muitas vezes com abordagens que não estimulam o aprendizado dos alunos. Introduzir conceitos da física quântica no ensino médio ajudaria os alunos a se familiarizarem com conceitos fundamentais que estão na base das tecnologias contemporâneas, como a computação quântica.

Para auxiliar no incentivo e desenvolvimento de iniciativas, foi fundado em 1966 o GIREP, uma organização internacional com o intuito de melhorar o ensino de física (GIREP, 2024). Atualmente, o GIREP ao trabalhar para melhorar a qualidade de ensino da física apoia a produção de resultados de pesquisa, estudos e propostas de ensino baseadas na Physics Education Research (PER). Sendo a física moderna um dos tópicos considerados importantes, o GIREP criou uma comunidade sobre ensino/aprendizagem de física quântica como forma de melhorar e atualizar o aprendizado (Michellini *et al.*, 2021).

Iniciativas focadas em estudantes do ensino médio são altamente significativas para o desenvolvimento desses alunos em pesquisas científicas, conscientizando como a pesquisa funciona e suas inúmeras aplicações. Com esse propósito, o INSPYRE (International School on Modern PhYsics and REsearch) é uma escola com duração de uma semana, organizada no Laboratório Nacional INFN Frascati. Essa iniciativa existe desde 2011 e já atendeu 600 alunos de 17 países. Diante do crescimento das ciências quânticas, o foco da escola em 2024 será voltado a tópicos fundamentais de mecânica quântica (Postiglione *et al.*, 2024).

No âmbito universitário, há aproximadamente 162 universidades e instituições ao

redor do mundo com programas educacionais de pesquisas na área das tecnologias quânticas, programas de doutorado especializado como o programa Central Doctoral Training da University College London (UCL), a International Graduate School for Quantum Technologies no Reino Unido e a Quantum Science and Technologies no European Campus, são alguns exemplos. Porém, apesar de serem treinamentos aprofundados e especializados, esses programas são por muitas vezes caros e limitados, o que dificulta o ingresso e capacitação de profissionais (Kaur; Venegas-Gomez, 2022).

Uma maneira de minimizar o problema é por meio da introdução das ciências quânticas através dos currículos STEM (Scientific Technologies Engineering and Mathematics). Desta forma, ao oferecer um currículo mais multidisciplinar, os graduados terão um melhor conhecimento sobre as tecnologias quânticas.

Outras formas de aprendizagem estão ganhando forma e força, como por exemplo alguns cursos online, que são especializados em ciência quântica fundamental (edX e Coursera) e os mais avançados (QURECA), de curta duração e mais flexível. A Quantum Resources and Careers (QURECA) foi a primeira plataforma online de treinamento para preencher lacunas e capacitar profissionais da comunidade quântica.

Há ainda outras instituições e plataformas que possuem cursos on-line especializados em física quântica, como: Centro de Engenharia Quântica (CQE) do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), Udemy, Delft University of Technology, Purdue University, Universidade de Toronto, entre outros.

A fim de promover a educação quântica e melhorar a sua qualidade, o Departamento de Física da University of Western Australia (UWA) e o Pawsey Supercomputing Centre criaram o UWA & Pawsey Quantum Computing Centre (UP-QCC), utilizando os computadores quânticos de ressonância magnética nuclear de mesa da SpinQ (o Gemini, que pode ser visto na Figura 1 e o Triangulum, representado na figura 2). Esses computadores oferecem aos alunos experiências interativas com design de controle quântico para melhorar suas habilidades e se envolver cada vez mais com o Quantum Supercomputing Innovation Centre da Pawsey (SPINQUANTA, 2023).

Figura 1 - Computador SpinQ Gemini



Fonte: GEMINI (2024)

Baseado na teoria da ressonância magnética nuclear, o SpinQ Gemini usa o fenômeno de giro nuclear como portador de qubit, para ler e operar estados de qubits por pulso de RF (Rádio Frequência). É uma boa opção para o ensino de computação quântica e algumas pesquisas científicas simples. Pode realizar diversas operações envolvendo um único qubit, por ser baseado no design de computação quântica real de 2 qubits combinado com *software* operacional. O Gemini, na figura 1, fornece operação experimental quântica completa, sendo uma solução geral independente, intuitiva, controlável e muito eficiente para o ensino (GEMINI, 2024).

O SpinQ Triangulum (Figura2) é um computador quântico de Ressonância Magnética Nuclear (NMR) de mesa de 3 qubits, sendo um modelo superior ao Gemini. O Triangulum permite que os usuários personalizem circuitos quânticos no equipamento e a programação de portas externas é permitida. Destaca-se por ser um equipamento estável, de baixo custo e sem manutenção. Possui capacidade para realizar variadas operações, tanto de um único qubit quanto de qubits múltiplos, oferecendo uma experiência quântica completa (TRIANGULUM, 2024).

Figura 2 - Computador SpinQ Triangulum



Fonte: TRIANGULUM, 2024

Dentro da universidade, o Gemini e Triangulum operam de forma estável em temperatura ambiente, facilitando seu uso por parte de educadores. Na sala de aula, os instrutores da UWA podem demonstrar os principais processos de computação quântica e aprofundar cada vez mais a compreensão dos alunos por meio de aulas práticas.

Na visão dos alunos, desde que os computadores foram colocados em operação, eles não apenas aprofundaram sua própria compreensão dos conceitos e princípios da computação quântica devido às experiências práticas, como ainda desenvolveram habilidades relevantes, como programação quântica. Para os educadores, os computadores quânticos da SpinQ oferecem recursos de ensino muito intuitivos e abrangentes, que despertam o interesse dos alunos pela computação quântica (SPINQUANTA, 2023).

2.3 Previsão de necessidade de mão de obra qualificada para a computação Quântica

A computação quântica, uma das áreas mais promissoras da ciência e tecnologia, está rapidamente transformando o panorama da indústria de tecnologia da informação. À medida

que as empresas e instituições de pesquisa investem em inovação quântica, a necessidade de mão de obra qualificada nessa área torna-se cada vez mais evidente. O crescimento da computação quântica exige uma força de trabalho com um conjunto único e multidisciplinar de competências. Além de sólidos conhecimentos em física quântica e ciência da computação, profissionais dessa área precisarão dominar tópicos como algoritmos quânticos, teoria da informação quântica e habilidades práticas em plataformas de programação quântica, como Qiskit.

Habilidades de matemática avançada, como álgebra linear e teoria dos grupos, serão essenciais, juntamente com a capacidade de entender os princípios de correção de erros quânticos e otimização de circuitos. No entanto, o desenvolvimento de habilidades interpessoais, como resolução de problemas complexos e trabalho em equipe multidisciplinar, será crucial à medida que os profissionais se desenvolvam nesse novo campo.

Segundo o Departamento de Física da Universidade do Colorado, o artigo *Education for expanding the quantum workforce* (2024) levou em consideração a formação de profissionais para a área da computação quântica desde os primeiros anos escolares. A indústria quântica se envolve em várias atividades distintas que contribuem para o objetivo final de fazer avançar tecnologias quânticas e criar produtos quânticos bem-sucedidos. Para se obter resultados razoáveis no que é esperado pelo mercado de trabalho, é preciso saber quais são as áreas afetadas, e existem várias maneiras de classificar as atividades em que as empresas quânticas se envolvem. Os esforços das empresas quânticas têm sido direcionados para cinco categorias: sensores quânticos, redes e comunicação quânticas, hardware de computação quântica, algoritmos e aplicativos quânticos e tecnologias facilitadoras.

Existem várias habilidades técnicas destacadas pela indústria como importantes para futuros funcionários. Devido à variação de empresas e funções de trabalho dentro da indústria quântica, é altamente provável que seja exigido dos funcionários habilidades diferentes, no início da carreira e durante sua evolução.

No entanto, existem alguns pontos em comum em toda a indústria. O primeiro é a dependência de habilidades de codificação ou programação de computadores, que é bastante comum na indústria, assim como a dependência de habilidades estatísticas para análise de dados. Outras habilidades importantes mencionadas por membros da indústria quântica são: solução de problemas; identificação de fontes de ruído; modelagem; compreensão de conceitos quânticos como correção de erros, (des)coerência, dinâmica de sistemas abertos, hardware

qubit, hamiltonianos, álgebra linear e design de circuitos quânticos.

Curiosamente, as "habilidades específicas quânticas" - ou seja, aquelas competências exclusivas da indústria quântica que exigem conhecimento especializado no tema - não são essenciais para todas as categorias de trabalho. Isso sugere que profissionais sem formação específica em física quântica podem ocupar funções essenciais dentro do setor quântico (Oliver, 2024).

2.4 Compra e uso dos computadores quânticos da SPINQ em escolas no mundo

Computadores quânticos no ambiente educacional têm se tornado uma tendência crescente, especialmente com o desenvolvimento de dispositivos acessíveis e práticos, como os da SpinQ Technology. Conhecida por seus computadores quânticos de mesa baseados em tecnologia de ressonância magnética nuclear (NMR), como o SpinQ Gemini e o SpinQ Triangulum, a SpinQ tem transformado o modo como escolas e universidades ao redor do mundo abordam a educação quântica. Colégios e instituições de ensino superior, incluindo universidades de destaque, começaram a usar essas máquinas. Países como México, China, Indonésia e Austrália lideram essa iniciativa, integrando computadores da SpinQ em seus currículos educacionais para promover o aprendizado prático da física quântica e da ciência da computação (SPINQUANTA, 2023).

No site da empresa é possível encontrar as instituições de ensino que já possuem o computador quântico. Dentre elas estão: *The University Of Western Australia*; *The Hong Kong University Of Science And Technology*; *National Taiwan University*; *The University Of Tokyo*; entre outras. No Brasil, o Senai-SP é a única instituição de ensino que dispõe de um dispositivo da SpinQ, o desktop em questão é o SpinQ Triangulum (SENAI, 2021).

No ano de 2021, uma *startup* chinesa revelou planos para vender um computador quântico de mesa custando menos de US\$ 5.000 para escolas e faculdades. Seria um novo dispositivo portátil que faz parte da linha SpinQ, desenvolvido pela *Shenzhen SpinQ Technology*, sediada em Shenzhen, China.

Este não é o primeiro computador quântico desta empresa. Em 2020, a empresa vendia um computador de mesa pelo valor de US\$ 50.000, mas essa nova máquina é mais simples, portátil e acessível economicamente, com seu preço ficando em forte contraste com os computadores quânticos comerciais, que podem custar aproximadamente US\$ 10 milhões e

processar mais de 50 qubits. Em contrapartida, a máquina da SpinQ é muito menos potente, capaz de processar apenas 2 qubits (SPARAVIGNA, 2022).

Na mesma cidade onde se localiza a empresa responsável por essas máquinas, uma escola secundária faz o uso desses computadores para o ensino quântico. Os alunos se envolvem com computadores quânticos de ressonância magnética nuclear da SpinQ, que podem ser configurados em um desktop e são do tamanho de uma mini impressora. O SpinQ Mini Triangulum é representado na Figura 3. O computador quântico portátil de 3 qubits inicia uma gama de práticas usando a computação quântica (SPINQUANTA, 2024).

Figura 3 - Computador SpinQ Mini Triangulum



Fonte: TRIANGULUMMINI (2024)

O modelo em questão suporta portas lógicas quânticas reais de 1 a 3 qubits, permitindo a criação e execução de algoritmos multi-qubit complexos em um sistema quântico verdadeiro. A interface gráfica própria para programação quântica e frameworks híbridos são baseados em linguagem Python, permitindo assim um design de algoritmo muito flexível e com um caminho de aprendizado que evolui do básico até técnicas avançadas. Oferece ainda acesso à medição e controle de qubits, permitindo um entendimento mais aprofundado da computação quântica, explorando os fenômenos físicos e a manipulação de qubit (TRIANGULUMMINI, 2024).

Esses computadores quânticos portáteis na sala de aula são uma parte importante do curso de "Computação Quântica" na Escola Secundária de Shenzhen, que realiza a construção do sistema inovador de treinamento de novos talentos de 0 a 1 por meio do método "teoria + prática". O curso eletivo de computação quântica entrou oficialmente na sala de aula

(SPINQUANTA, 2024).

Não se trata apenas de uma nova exploração da implementação da educação em ciência e tecnologia nas escolas de ensino médio chinesas, mas a definição de um novo padrão para a criação de talentos no estágio de educação básica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

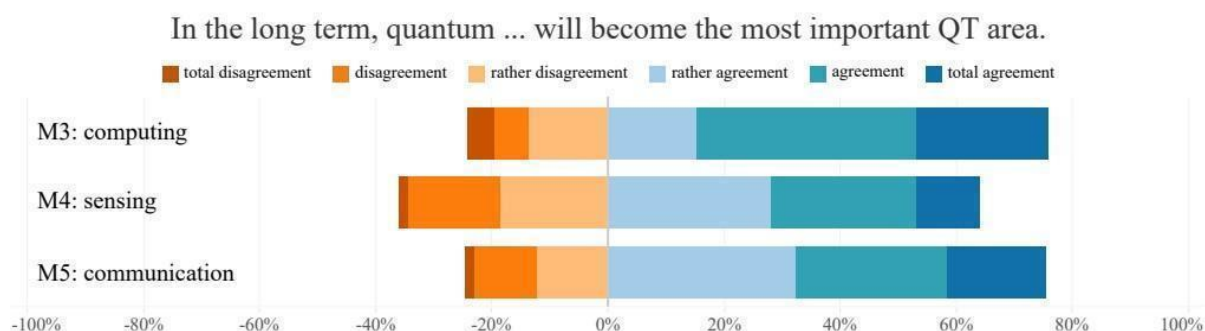
O método de pesquisa utilizado foi o exploratório, com o objetivo de coletar resultados, dados e informações quantitativas e qualitativas relevantes, que possam contribuir para os tópicos selecionados neste artigo. Deve-se considerar a dificuldade de obtenção de artigos científicos, uma vez que as publicações mais atuais são escassas devido à corrida pela Supremacia Quântica mundial.

Para obter os dados teóricos deste projeto, foram utilizados artigos científicos e documentações que abrangem pesquisas sobre o uso do SpinQ Gemini e SpinQ Triangulum no ensino em diversos países e o mapeamento de necessidades e iniciativas para o ensino tecnológico quântico no Brasil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora algumas funções na indústria quântica possam ser preenchidas por profissionais sem formação específica em física quântica, as áreas de computação quântica e comunicação quântica enfrentarão uma carência significativa de talentos especializados. Na Figura 4 é possível analisar o gráfico que mostra que essas áreas serão as mais afetadas em termos de importância/falta de mão de obra.

Figura 4 - Força de trabalho quântica do futuro



Fonte: GREINERT (2023)

Esse estudo publicado pela Universidade Leibniz Hannover, Instituto de Óptica Quântica, em Welfengarten, enfatiza uma pesquisa envolvendo vários grupos de profissionais na área de tecnologia e educadores universitários, buscando saber qual seria a área da computação quântica que se tornaria a mais importante a longo termo e consequentemente, a que mais exigiria força de trabalho especializada.

Esses setores exigem um conjunto mais profundo de competências técnicas, como a compreensão de algoritmos quânticos, redes quânticas e correção de erros, que são essenciais para o desenvolvimento e a implementação de tecnologias quânticas mais recentes. A escassez de profissionais com habilidades avançadas nestas áreas é uma grande preocupação, já que essas tecnologias estão na vanguarda da revolução quântica, impactando diretamente o desenvolvimento de soluções de criptografia, otimização, e processamento de dados em larga escala.

Uma pesquisa publicada em 2024 realizada pelo Instituto de Didática das Ciências Naturais, Universidade Técnica de Braunschweig, na Alemanha, utilizou uma abordagem qualitativa por meio de entrevistas. Os entrevistados tinham diversas origens profissionais, incluindo Diretores Executivos também chamados de Chief Executive Officer's(CEO's), diretoria-executiva ou Diretores de Tecnologia conhecidos também como Chief Technology Officer(CTO) ou de startups, consultores de computação quântica, especialistas em tecnologia quântica em grandes empresas ou profissionais de RH e engenheiros de vendas em pequenas e médias empresas conhecidos como PMEs (GREINERT, 2024).

Essa diversidade permite capturar e avaliar diferentes desafios e necessidades na indústria. Alguns dos tópicos mencionados pelos entrevistados podem ser muito específicos,

até mesmo exclusivos de uma empresa. Como resultado dessa pesquisa obteve-se um panorama sobre quais tipos de treinamento são mais relevantes para a criação de uma força de trabalho quântica. As entrevistas revelaram diferentes necessidades para diferentes grupos, porém, todos eles podem começar com uma conscientização básica de tecnologia quântica. Entretanto, se desenvolverão em diferentes direções para treinamento posterior. Um exemplo seriam os grupos de engenheiros e técnicos que trabalham na construção de Tecnologias Quânticas (QT), que precisam de habilidades específicas, dependendo do hardware ou software em que estão trabalhando.

Muitos dos entrevistados, representando uma gama diversificada de empresas, relatam várias formas de treinamento interno e mentoria, bem como programas de integração que envolvem o envio de novos contratados a um laboratório com o foco na aprendizagem por vários dias. Aprender no trabalho é um método importante para fornecer aos funcionários as habilidades específicas exigidas pela empresa.

Para que os novatos se beneficiem da expertise de um profissional experiente, eles já devem ter atingido um nível intermediário de proficiência; para aqueles que são menos experientes, a lacuna entre suas habilidades atuais e aquelas exigidas pelo especialista é muito grande. Além disso, profissionais avançados podem ser enviados para cursos externos para se tornarem especialistas. Start-ups em processo de expansão relataram a implementação de reuniões regulares de intercâmbio, com um indivíduo apresentando seu trabalho de uma publicação recente ou similar, semanalmente ou mensalmente. Deste modo, os funcionários conseguem obter insights sobre as atividades de seus colegas e identificar potenciais fontes de suporte caso surja um problema (GREINERT, 2024).

A crescente demanda por profissionais qualificados na computação quântica reflete a rápida evolução dessa tecnologia e suas aplicações industriais, embora existam diversas habilidades técnicas e interpessoais necessárias para integrar essa força de trabalho. As competências variam conforme o nível de especialização e o tipo de empresa.

A interdisciplinaridade, o conhecimento prático em plataformas de programação quântica, a capacidade de resolver problemas complexos e a adaptabilidade são características essenciais que transcendem as necessidades específicas de hardware ou software. O mercado de trabalho exigirá não apenas conhecimento profundo de conceitos quânticos, mas também a habilidade de transitar entre áreas diversas como física, ciência da computação e engenharia.

Essa realidade mostra como a formação de profissionais para o setor de computação quântica precisará de abordagens variadas, que incluam tanto a capacitação inicial quanto o desenvolvimento contínuo ao longo da carreira.

Uma alternativa para favorecer as instituições a criarem ou reformularem cursos voltados para a área quântica é compreender melhor o nível de formação exigido para os trabalhos específicos. Para o desenvolvimento de profissionais capacitados para o âmbito quântico são necessárias habilidades adequadas em diversos níveis de educação. A Figura 5 ilustra os níveis acadêmicos necessários para diversas funções que são encontradas na indústria quântica (Hughes *et al.*, 2022).

Figura 5 - Nível acadêmico essencial para funções da indústria quântica



Fonte: Hughes *et al.* (2022)

É notório observar que para funções direcionadas à montagem de *hardware*, o nível acadêmico mais exigido são de mestres e doutores. Outro fator relevante com o crescente aumento de produção será a necessidade de incluir na força de trabalho quântica profissionais tecnólogos.

De modo análogo, outro fator que ajudará na compreensão e elaboração de novos

cursos é a maior compreensão de quais habilidades quânticas específicas serão essenciais. Desse modo, ao se analisar os dados reais das indústrias, torna-se possível visualizar a estruturação de currículos acadêmicos mais certos e eficazes para suprir as necessidades do mercado.

5. CONCLUSÃO

Diante do crescente avanço das tecnologias quânticas em empresas e universidades, a necessidade da aquisição de computadores quânticos é crescente, porém ainda não é um processo simples.

Um dos principais fatores que impede a compra de computadores quânticos é seu alto valor. As grandes máquinas da pioneira D-Wave, que chegam a ocupar uma sala inteira e utilizam 2 mil qubits, tem seu preço na casa dos milhões de dólares. Além do custo para adquirir esses computadores, há também o de manter o hardware quântico funcionando apropriadamente, já que essas máquinas precisam de estabilidade e de baixas temperaturas para minimizar as interferências do ambiente (D-WAVE, 2024; LAPOLA, 2023).

Os desktops quânticos desenvolvidos pela SpinQ são alternativas para o estudo e a pesquisa da computação quântica. Os computadores possuem uma tecnologia de ímãs permanentes que reduz seu peso e não precisa de manutenções, além do baixo custo em comparação às grandes máquinas. O preço dos computadores da SpinQ podem variar de US\$ 8.700 até cerca de US\$ 58.000, convertendo para reais seria um custo de R\$49 mil até R\$330 mil, aproximadamente. Assim, a falta de investimento no setor educacional, especialmente em países do 3º. mundo, causa um grande atraso e deficiência no desenvolvimento de tecnologias quânticas nacionais, fazendo com que “talentos reconhecidos” busquem países como EUA, Canadá, França, Inglaterra entre outros, para desenvolverem pesquisas tecnológicas.

Outro fator influenciador na compra e uso dos computadores quânticos é a falta de profissionais especializados para manusear e aplicar os conhecimentos, como mencionado anteriormente e que mais uma vez, se justifica pela falta de incentivos educacionais. A falta de conhecimento acadêmico e profissional vem sendo reconhecida como um "gargalo quântico", várias iniciativas pelo mundo estão sendo tomadas, mas o processo de ensino-aprendizagem demanda tempo de médio e longo prazo, causando a escassez acentuada de profissionais com

tais competências. A educação quântica deveria permear os currículos educacionais desde os primeiros anos de formação, como alguns países estão fazendo.

Vale ressaltar que no Brasil, distribuído em quatro regiões diferentes, são ao todo 20 instituições públicas e um centro de pesquisa do MCTI que possuem pesquisas com foco em computação quântica. Além disso, a Portaria MCTI nº 8194/2024 criou uma equipe de trabalho com o objetivo de elaborar as diretrizes bases para uma iniciativa brasileira voltada às tecnologias quânticas (GOV.BR, 2024). Essas iniciativas têm o intuito de suprir a falta de profissionais capazes de manusear essas máquinas, além de possibilitar o desenvolvimento de tecnologias quânticas dentro do próprio país.

REFERÊNCIAS

CIMATEC, S. S. **SENAI CIMATEC e Atos lançam o primeiro centro de computação quântica no Brasil - SITE SENAI CIMATEC**. 2021. Disponível em: <<https://www.senaicimatec.com.br/noticias/senai-cimatec-e-atos-lancam-o-primeiro-centro-de-computacao-quantica-no-brasil/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

D-WAVE. **About D-Wave: the practical quantum computing company. The Practical Quantum Computing Company**. 2024. Disponível em: <<https://www.dwavesys.com/company/about-d-wave/>>. Acesso em: 26 out. 2024.

GEMINI. **Gemini2-qubit desktop NMR quantum computer - SpinQ**. 2024. Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/products-solutions/gemini>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

GIREP. **GIREP Group International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique**. Disponível em: <<https://www.girep.org/>>. Acesso em: 06 out. 2024.

GOV.BR. **Cientistas apresentam possibilidades para desenvolver a computação e internet quântica no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/08/cientistas-apresentam-possibilidades-para-desenvolver-a-computacao-e-internet-quantica-no-brasil>. Acesso em: 27 out. 2024.

GREINERT, F. *et al.* Future quantum workforce: Competences, requirements, and forecasts. **Physical Review Physics Education Research**, v. 19, n. 1, p. 010137, 2023. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2208.08249>>. Acesso em: 12 out. 2024.

GREINERT, F. *et al.* Advancing quantum technology workforce: industry insights into qualification and training needs. **arXiv preprint arXiv:2407.21598**, 2024. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2407.21598>>. Acesso em: 12 out. 2024.

HUGHES, C. *et al.* **Assessing the Needs of the Quantum Industry.** *Ieee Transactions On Education*, [S.L.], v. 65, n. 4, p. 592-601, nov. 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/te.2022.3153841>. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9733176>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

KAUR, M.; VENEGAS-GOMEZ, A. *Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives.* **Optical Engineering**, [S.L.], v. 61, n. 08, p. 081806-081806, 19 maio 2022. *SPIE-Intl Soc Optical Eng.* <http://dx.doi.org/10.1117/1.oe.61.8.081806>.

LAPOLA, M. Como funciona um computador quântico. **Físico explica ciência por trás. Available on the website**<<https://revistagalileu.globo.com/colunistas/quanticas/coluna/2023/11/comofunciona-um-computador-quantico-fisico-explica-ciencia-por-tras.ghml>>. Acesso em: 27 out. 2024.

MICHELINI, M. *et al.* *GIREP Community on teaching/learning quantum physics in secondary school.* In: **Journal of Physics: Conference Series.** IOP Publishing, 2021. p. 012044.

OLIVER, K. A. *et al.* Education for expanding the quantum workforce: Student perceptions of the quantum industry in an upper-division physics capstone course. **arXiv preprint arXiv:2407.07902**, 2024. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2407.07902>>. Acesso em: 13 out. 2024.

POSTIGLIONE, A. *et al.* **A quantum mechanics educational proposal implemented in the INSPYRE School.** Apresentação Oral - 4th World Conference on Physics Education 2024, Kraków, Poland, 26 de ago. 2024.

SENAI. **Primeiro centro de computação quântica no Brasil é inaugurado no SENAI CIMATEC.** 2021. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/primeiro-centro-de-computacao-quantica-no-brasil-e-inaugurado-no-senai-cimatec/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

SPARAVIGNA, A. C. *Quantum computing logistics.* **SSRN Electronic Journal**, 2022. Disponível em: <<https://hal.science/hal-03821942/document>>. Acesso em: 18 out. 2024.

SPINQUANTA. **Shenzhen Middle School : Building a Quantum Computing Elective Program from the Ground Up.** 2024. Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/newsDetail/c10868c4-2aa2-44ed-abd2-abab45f914d8>>. Acesso em: 20 out. 2024.

SPINQUANTA. **University of western Australia: SpinQ desktop Quantum Computers, crafting a real quantum teaching interactive experience.** 2023. Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/newsDetail/f376b4eb-28a0-41b6-8183-3452c080391d>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TRIANGULUM. **Triangulum-3-qubit desktop NMR quantum computer - SpinQ.** 2024.

Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/products-solutions/Triangulum>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TRIANGULUMMINI. **SPINQ Triangulum Mini**. 2024. Disponível em: <<https://www.spinquanta.com/products-services/triangulumMini>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

UFF. **UFF lidera primeira rede de internet quântica do Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mec/pt-br/assuntos/noticias/2024/setembro/uff-lidera-primeira-rede-de-internet-quantica-do-brasil>>. Acesso em: 6 out. 2024.

UFSM. **Grupo da UFSM desenvolve projetos de aprendizado de máquina em computação quântica**. 2023. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/2023/05/12/grupo-da-ufsm-desenvolve-projetos-de-aprendizado-de-maquina-em-computacao-quantica>>. Acesso em: 6 out. 2024.

