

IBM Institute for
Business Value

A Quantum Decade

Um playbook para obter conhecimento,
prontidão e vantagem



Como a IBM pode ajudar

As parcerias em quantum computing entre fornecedores de tecnologia e organizações visionárias estão se expandindo. O objetivo é desenvolver casos de uso de quantum computing e aplicações correspondentes que solucionem problemas reais que antes não podiam ser solucionados. O IBM Quantum Network é um ecossistema global com mais de 140 empresas da Fortune 500, instituições acadêmicas líderes, startups e laboratórios nacionais de pesquisa, suportados por computadores quânticos, cientistas, engenheiros e consultores da IBM. Os participantes colaboram para acelerar os avanços em quantum computing a fim de produzir aplicações comerciais antecipadas. As organizações que participam do IBM Quantum Network conseguem descobrir como seus problemas mais críticos são mapeados para um sistema computacional quantum real. Hoje, elas podem acessar mais de 20 sistemas de quantum computing, incluindo um processador IBM Quantum de 65 qubits por meio da IBM Cloud. Até 2023, esperamos que um computador quantum de 1.000 qubits esteja disponível para analisar problemas práticos importantes para o mercado. Acesse <https://www.ibm.com/quantum-computing/> para obter mais informações.

IBM Institute for Business Value

O IBM Institute for Business Value (IBV) oferece insights de negócios confiáveis e baseados em tecnologia, combinando o conhecimento de pensadores da indústria, líderes acadêmicos e especialistas no assunto com pesquisas globais e dados de desempenho. O portfólio de liderança inovadora do IBV inclui detalhamentos de pesquisa, benchmarking e comparações de desempenho, além de visualizações de dados que fornecem suporte à tomada de decisão de negócios em regiões, setores e tecnologias. Para obter mais informações, siga @IBMIBV no Twitter e, para receber os insights mais recentes por e-mail, acesse ibm.com/ibv

A Quantum Decade

Um playbook para obter
conscientização, prontidão
e vantagem



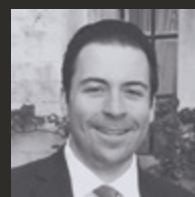
Um engenheiro da IBM Quantum trabalha no “super-refrigerador”, um refrigerador de diluição de 12 pés de altura desenvolvido e construído pela IBM Quantum para hospedar sistemas quantum de mais de 1000 qubits a uma temperatura próxima do zero absoluto.

A Quantum Decade

Índice

ii	Equipe da Quantum Decade da IBM
iv	Perspectivas de todo o campo
vii	Prefácio
1	Introdução
9	Capítulo 1: compreensão quantum e a era do descobrimento
29	Capítulo 2: prontidão quantum e o poder da experimentação
49	Capítulo 3: vantagem quantum e a busca pelo valor de negócios
69	Guias da indústria:
71	<i>Companhias aéreas</i>
77	<i>Setor bancário e mercados financeiros</i>
83	<i>Produtos químicos e petróleo</i>
89	<i>Assistência médica</i>
95	<i>Ciências biológicas</i>

Equipe da Quantum Decade da IBM



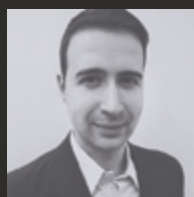
Anthony Annunziata
Diretor de
descoberta acelerada
IBM Quantum



Joseph Broz
Vice-Presidente
Crescimento e mercados
IBM Quantum



David Bryant
Diretor do programa
IBM Quantum



Joel Chudow
Líder global de parcerias
estratégicas e industriais
IBM Quantum



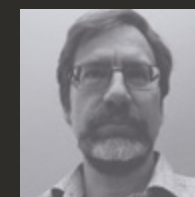
Charles Chung
Consultor de eletroeletrônicos
da indústria
IBM Quantum



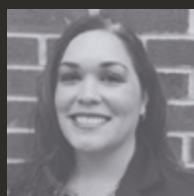
Christopher Codella
Futuro da Computação,
Distinguished Engineer
IBM Quantum



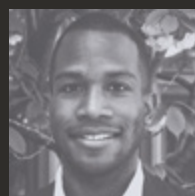
Dan Colangelo
Gerente do programa
de planejamento de
peças de serviço
IBM Systems



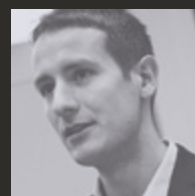
Scott Crowder
Vice-Presidente
IBM Quantum
CTO
IBM Systems



Kristal Diaz-Rojas
Líder da equipe de Jamie Thomas,
gerente geral
IBM Systems



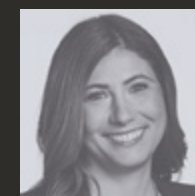
Stefan Elrington
Líder global para startups
IBM Quantum



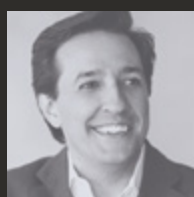
Frederik Flöther
Consultor do setor de ciências
biológicas e assistência médica
IBM Quantum



Jay Gambetta
Parceiro IBM e Vice-Presidente
de quantum computing
IBM Quantum



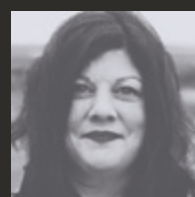
Jeannette Garcia
Gerente sênior, Algoritmos,
aplicações e teoria
IBM Quantum



Darío Gil
Vice-Presidente sênior
e Diretor
Laboratório de Pesquisas IBM



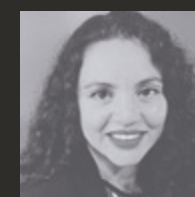
Jonas Gillberg
Consultor do mercado
de químicos e petróleo
IBM Quantum



Heather Higgins
Parceira de mercado
e serviços técnicos
IBM Quantum



Michael Hsieh
Líder da equipe de governo
IBM Quantum

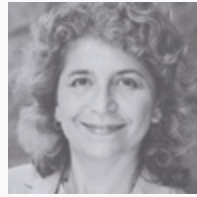


Noel Ibrahim
Consultora de serviços
financeiros industriais
IBM Quantum



Blake Johnson

Líder da plataforma quantum
IBM Quantum



Mariana LaDue

Consultora do mercado
de viagens e transportes
IBM Quantum



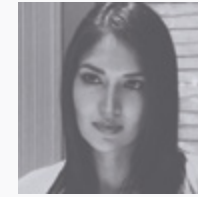
Jesus Mantas

Parceiro sênior de
gerenciamento
IBM Global Business Services



Tushar Mittal

Gerente de produto sênior
IBM Quantum



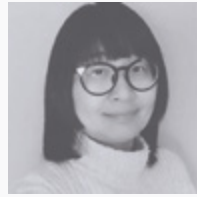
Zaira Nazario

Líder técnica de teoria,
algoritmos e aplicações
IBM Quantum



Imed Othmani

Parceiro de consultoria de mercado
IBM Quantum



Hanhee Paik

Membro da equipe de pesquisa
IBM Quantum



Nitin Parekh

Alianças de desenvolvimento
de negócios e propriedade
intelectual de pesquisa
Sede corporativa da IBM



Bob Parney

Líder da equipe de
processos industriais
IBM Quantum



Jean-Stephane Payraudeau

Parceiro de gerenciamento—
Gerenciamento de ofertas e ativos,
IBM Institute for Business Value
e Industry Centers of Competence
IBM Global Business Services



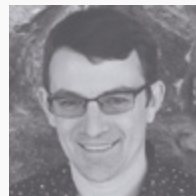
Veena Pureswaran

Parceira associada e líder
de pesquisa global em
quantum computing
IBM Institute for Business Value



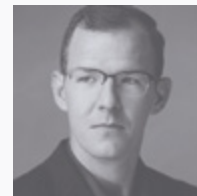
Edward Pyzer-Knapp

Membro da equipe técnica sênior
e líder mundial de pesquisa
de modelagem e simulação
enriquecidas com IA
Laboratório de Pesquisas IBM



Chris Schnabel

Diretor de gerenciamento
de ofertas
IBM Quantum



Travis Scholten

Pesquisador de aplicações
de quantum computing
IBM Quantum



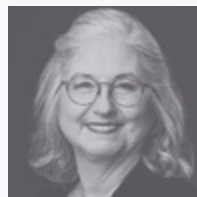
James Sexton

Parceiro da IBM e diretor de
sistemas centrados em dados
Laboratório de Pesquisas IBM



Claudine Simson

Diretora, Core AI, ciência
exploratória, graduação em contas
estratégicas, executiva global de
petróleo e gás/energia/produtos
químicos
Sede corporativa da IBM



Galen Smith

Gerente de cadeia de
suprimentos, Blockchain, IA e IoT
IBM Systems



Robert Sutor

Líder e expoente quantum
IBM Quantum



Jamie Thomas

Gerente geral, estratégia e
desenvolvimento de sistemas
IBM Systems



Kenneth Wood

Diretor de desenvolvimento
de negócios globais
IBM Quantum

A Quantum Decade

Perspectivas de todo o campo

Agradecemos às seguintes autoridades em quantum computing que compartilharam seus conhecimentos conosco:



Ching-Ray Chang

Professor honorário
Departamento de Física
National Taiwan University



Richard Debney

Vice-Presidente
Tecnologia digital
Parceiro de negócios



Todd Hughes

Diretor técnico
Projetos e iniciativas estratégicas
CACI



Ilyas Khan

Fundador e CEO
Cambridge Quantum Computing



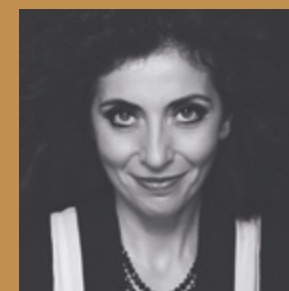
Glenn Kurowski

Vice-Presidente sênior e diretor executivo de tecnologia
CACI



Doug Kushnerick

anteriormente na Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research and Engineering



Sabrina Maniscalco

Professora de informação quantum e lógica
Universidade de Helsinque
CEO
Algorithmiq Oy



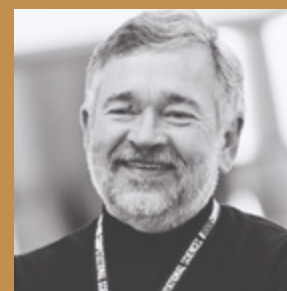
Ajit Manocha

Presidente e CEO
SEMI



Prineha Narang

Professora assistente de ciência de materiais computacionais
Universidade de Harvard



Jeff Nichols

Diretor de laboratório associado
Laboratório Nacional de Oak Ridge



Christopher Savoie

Fundador e CEO
Zapata Computing



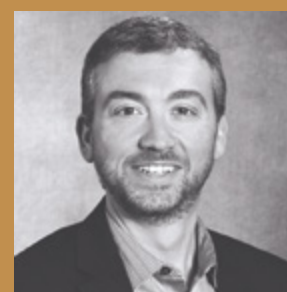
Irfan Siddiqi

Professor da Universidade de Física da Califórnia Berkeley



Coronel (aposentado) Stoney Trent

Fundador e Presidente
The Bulls Run Group



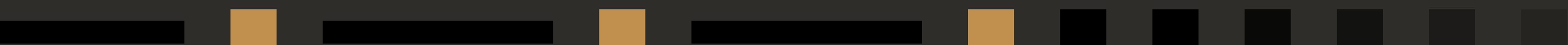
Peter Tsahalís

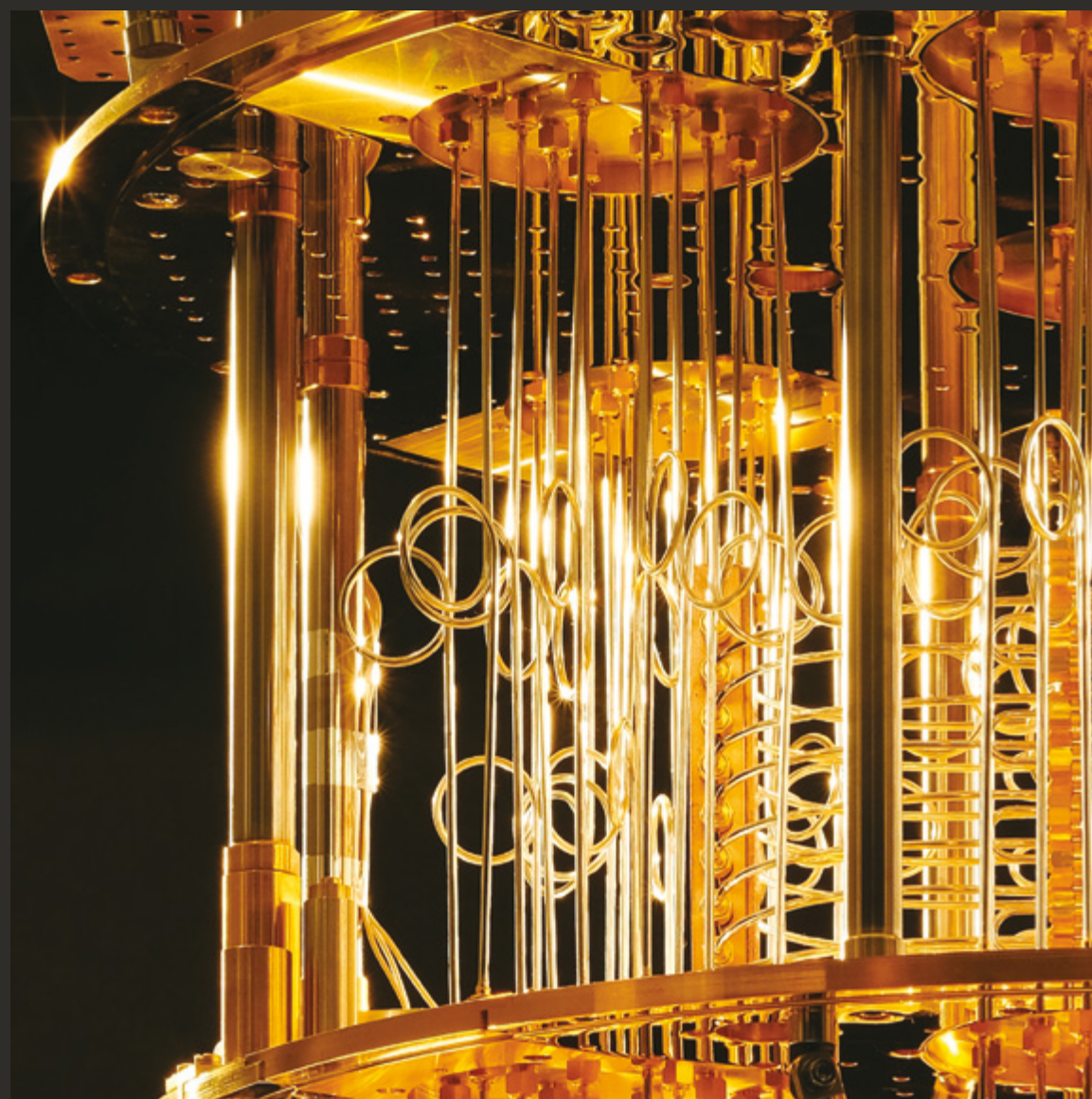
CIO de serviços estratégicos e tecnologia avançada
Wells Fargo



Christian Weedbrook

CEO
Xanadu Quantum Technologies





Os componentes internos da quantum computing são mantidos a temperaturas próximas do zero absoluto. As linhas de controle de micro-ondas contêm loops que permitem a contração à medida que o dispositivo esfria.



Darío Gil

Vice-presidente sênior e diretor
da IBM Research

Prefácio

Primeiro, havia a teoria.

Charlie Bennett escreveu as palavras “teoria da informação quantum” em seu caderno pela primeira vez em 1971. Paul Benioff, Richard Feynman, Yuri Manin e outros pioneiros da quantum computing do início dos anos 80 usaram a matemática e a mecânica quantum teórica para argumentar sobre seus casos. A mensagem deles era clara: para acelerar o progresso, foi preciso simular a natureza. Tivemos de imitar o estranho comportamento dos átomos e construir um sistema computacional quantum.

Em seguida, vieram os qubits. Num piscar de olhos, com o primeiro sistema computacional quantum de dois qubits construído em 1998, a teoria virou realidade. Qubits são os blocos de construção de um sistema computacional quantum e, atualmente na IBM, eles são criados através de minúsculos circuitos supercondutores que se comportam como átomos. Eles podem estar em diversos estados de uma só vez, podem interferir entre si e se entrelaçar, de modo que quando um qubit muda seu estado, o parceiro entrelaçado a ele também muda.

Parece extraordinário, e é.

Esse é o estranho e maravilhoso universo microscópico, e nós o controlamos para reproduzir seus poderes. São essas estranhas habilidades que os qubits têm de estar em diversos estados de uma só vez, de entrelaçar-se e de interferir uns com os outros que devem permitir que futuros computadores quantum executem computações muito mais poderosas do que um sistema computacional clássico tradicional.

Estamos quase lá. Nós estamos na Quantum Decade, quando os computadores quantum estão se preparando para superar os computadores clássicos em uma tarefa importante, alcançando o que chamamos de Vantagem Quantum. Nossos qubits estão se tornando cada vez mais estáveis, capazes de permanecer em seu mundo quantum por mais tempo, o que permite executar computações cada vez mais complexas. Há anos, pesquisadores e desenvolvedores de todo o mercado e meio acadêmico têm usado os computadores quantum da IBM por meio da nuvem para criar novos algoritmos que serão cruciais no futuro. Eles estão se preparando quanticamente.

Peço que outros também se juntem a eles.

Ao explorar os computadores quantum hoje, estamos moldando o mundo de amanhã. Seja um banco, uma empresa farmacêutica, uma companhia aérea ou um gigante da manufatura, a quantum computing fornece uma vantagem aos clientes. Os pequenos qubits analisarão rapidamente uma infinidade de possibilidades para encontrar a melhor configuração molecular para um novo material ou medicamento, prever com precisão seu risco financeiro ou escolher a forma ideal de expedição das suas mercadorias de Melbourne para Atlanta.

Leia *A Quantum Decade* para descobrir como também se preparar quanticamente e como esta tecnologia de ponta pode ajudar você e seus negócios a prosperarem na era dos computadores quantum.

E isso é porque esse momento está mais próximo do que você pensa.



*Imagem do teto do
"super-refrigerador" visto
de seu interior*

Insights

Prioridades de um mundo pós-pandemia

Devido às grandes incertezas que pairam sobre todos os setores, os modelos de negócios estão se tornando mais sensíveis e dependentes de novas tecnologias. A quantum computing está preparada para expandir o escopo e a complexidade dos problemas de negócios que podemos resolver.

O futuro da computação

A integração da quantum computing, da IA e da computação clássica em fluxos de trabalho multicloud híbridos resultará na mais significativa revolução da computação em 60 anos. Os fluxos de trabalho desenvolvidos com quantum transformarão radicalmente a forma como as empresas trabalham.

A empresa orientada à descoberta

As empresas passarão da análise de dados para a descoberta de novas formas de resolver problemas. Ao combinar isso com a hiper-automatização e a integração aberta, novos modelos de negócios surgirão.

A Quantum Decade

Introdução

Durante décadas, a quantum computing foi entendida como uma tecnologia futurista: ela mudaria tudo, se saísse da fantasia e virasse uma realidade prática. Mesmo recentemente, apesar dos bilhões de dólares investidos em pesquisa e da extensa cobertura dos meios de comunicação, o campo é muitas vezes ignorado pelos efetivos responsáveis pelas decisões, sendo considerado muito misterioso e uma busca distante de acadêmicos e teóricos. À medida que entramos na Quantum Decade, a década em que as empresas começam a ver o valor de negócios da quantum computing, essa perspectiva está rapidamente se tornando anacrônica.

Isso se deve ao amadurecimento da quantum computing e os líderes que não entenderem, nem se adaptarem à Quantum Decade poderão ficar alguns passos, ou melhor, alguns anos para trás. Ao longo dos próximos anos, prevemos uma profunda revolução computacional que poderá transformar significativamente os modelos de negócios estabelecidos e redefinir completamente os mercados. Historicamente, as crises têm sido o impulso para novas tecnologias e sua adoção generalizada. A Primeira Guerra Mundial deu início a processos de fabricação que estão em vigor até hoje. A Guerra Fria acelerou a criação da Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), um antecessor da Internet, no final dos anos 60. E, atualmente, a COVID-19 tem impulsionado uma maior necessidade de agilidade, flexibilidade e maturidade digital acelerada. Nós prevemos que a quantum computing, em combinação com as tecnologias avançadas existentes, impactará drasticamente a maneira como a ciência e os negócios se desenvolvem. Ao acelerar a descoberta de soluções para grandes desafios globais, a quantum computing pode

Perspectiva Os fundamentos básicos

Entendendo o poder
exponencial da
quantum computing

Os bits computacionais clássicos podem armazenar informações como 0 ou 1. O mundo físico mantém uma estrutura fixa devido à mecânica clássica. Mas, à medida que os cientistas foram capazes de explorar a questão subatômica, mais estados probabilísticos foram encontrados: essa questão assumiu muitas características possíveis em condições diferentes. O campo da física quantum surgiu para explorar e entender esse fenômeno.

O poder da quantum computing tem como pilares dois conceitos de base da mecânica quantum: a interferência e o entrelaçamento. O princípio da interferência permite que um sistema computacional quantum cancele as soluções indesejadas e aprimore as corretas. O entrelaçamento significa que o estado combinado dos qubits contém mais informações do que os qubits isoladamente. Juntos, esses dois princípios não têm uma analogia clássica e a modelagem deles em um sistema computacional clássico exigiria recursos exponenciais. Por exemplo, como a tabela abaixo descreve, representar a complexidade de um sistema computacional quantum de 100 qubits exigiria mais bits clássicos do que os átomos existentes no planeta Terra.

Qubits	2	3	10	16	20	30	35	100	280
Bits clássicos necessários para representar um estado de entrelaçamento	512 bits	1.024 bits	16 kilobytes	1 megabytes	17 megabytes	17 gigabytes	550 gigabytes	mais do que todos os átomos no planeta Terra	mais do que todos os átomos no universo

Elevado a enésima potência
O poder do crescimento exponencial

“O período entre a primeira Revolução Industrial e a segunda foi de cerca de 80 anos. Entre a segunda e a terceira, cerca de 90 anos. No entanto, o período entre a terceira e a quarta foi reduzido para cerca de 45 anos graças a inovações possibilitadas por semicondutores como a Internet das Coisas (IoT), a inteligência artificial (IA), o aprendizado de máquina, a realidade virtual e o 4G. Eu acredito que o tempo até a Indústria 5.0 seja ainda mais acelerado (cerca de 30 anos) pela quantum computing e por muitas inovações adicionais”.

Ajit Manocha

Presidente e CEO
SEMI

desencadear rupturas positivas de forma muito mais abrupta do que as ondas tecnológicas das últimas décadas.

Os blocos de construção de quantum computing já estão surgindo. Os sistemas de quantum computing estão sendo executados na nuvem em uma escala sem precedentes. Compiladores e algoritmos estão avançando rapidamente, comunidades de talentos proficientes em quantum estão em ascensão e fornecedores de hardware e software líderes estão publicando roadmaps de tecnologia. A aplicabilidade da tecnologia não é mais uma teoria, mas uma realidade a ser compreendida e incluída estrategicamente no planejamento. Além disso, há boas notícias: as etapas necessárias para se preparar para a futura adoção quantum podem beneficiar seus negócios *agora*.

O objetivo da quantum computing é ampliar e complementar a computação clássica, não substituí-la. Mesmo para os problemas que os computadores quânticos podem resolver sozinhos, os computadores clássicos ainda serão necessários. Como a entrada e a saída de dados continuarão sendo clássicas, os computadores e programas quânticos precisarão de uma combinação do processamento clássico e do quantum.

São precisamente os avanços na computação clássica tradicional, somados aos avanços na IA, que estão impulsionando a mais importante revolução na computação desde a Lei de Moore, há quase 60 anos.¹ A quantum computing completa a trindade das tecnologias: a interseção de bits clássicos, qubits e “neurônios” de IA. As sinergias criadas por essa tríade, não só pela quantum computing, estão impulsionando o futuro da computação (veja a Figura 1).

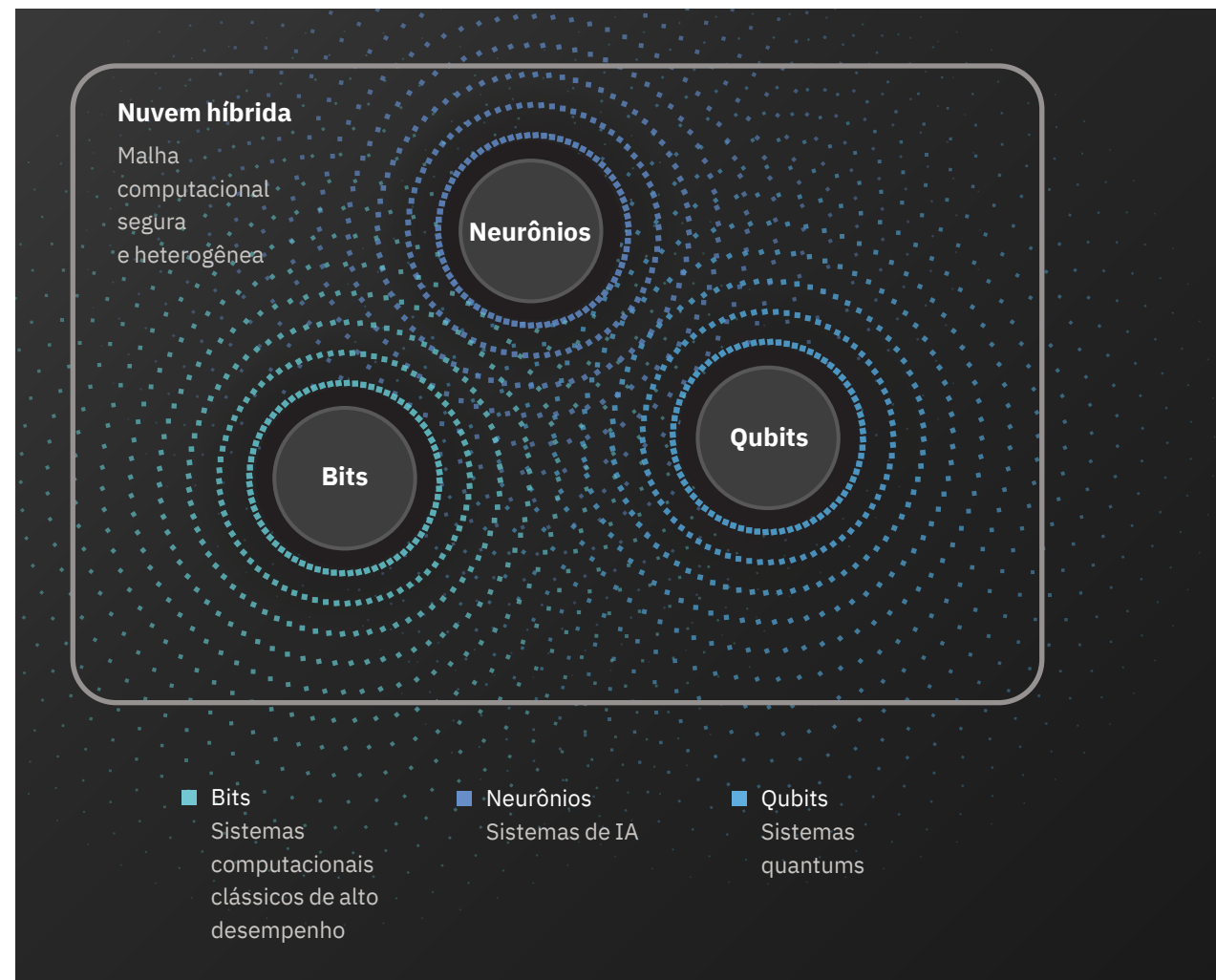


Figura 1

A mais interessante revolução da computação em 60 anos

A convergência de três tecnologias importantes

O IBM Institute for Business Value (IBV) realizou mais de doze estudos baseados no mercado e na prática da quantum computing.² Aqui, essa pesquisa foi ampliada com novos insights de entrevistas com mais de 50 especialistas, incluindo pesquisadores de IBM quantum computing, clientes, parceiros e acadêmicos. Este relatório sobre a Quantum Decade fornece aos executivos estratégias de preparação para a próxima transformação de negócios da quantum computing. Ele identifica os fatores, temas e ações mais importantes a serem considerados nesse ponto de inflexão significativo.

Por que estamos na Quantum Decade? Como será o mundo desenvolvido com tecnologia quantum? E, além disso, o que os líderes e organizações perspicazes podem e devem fazer agora para se educar e posicionar de maneira efetiva? Os principais aprendizados compreendem três fases da

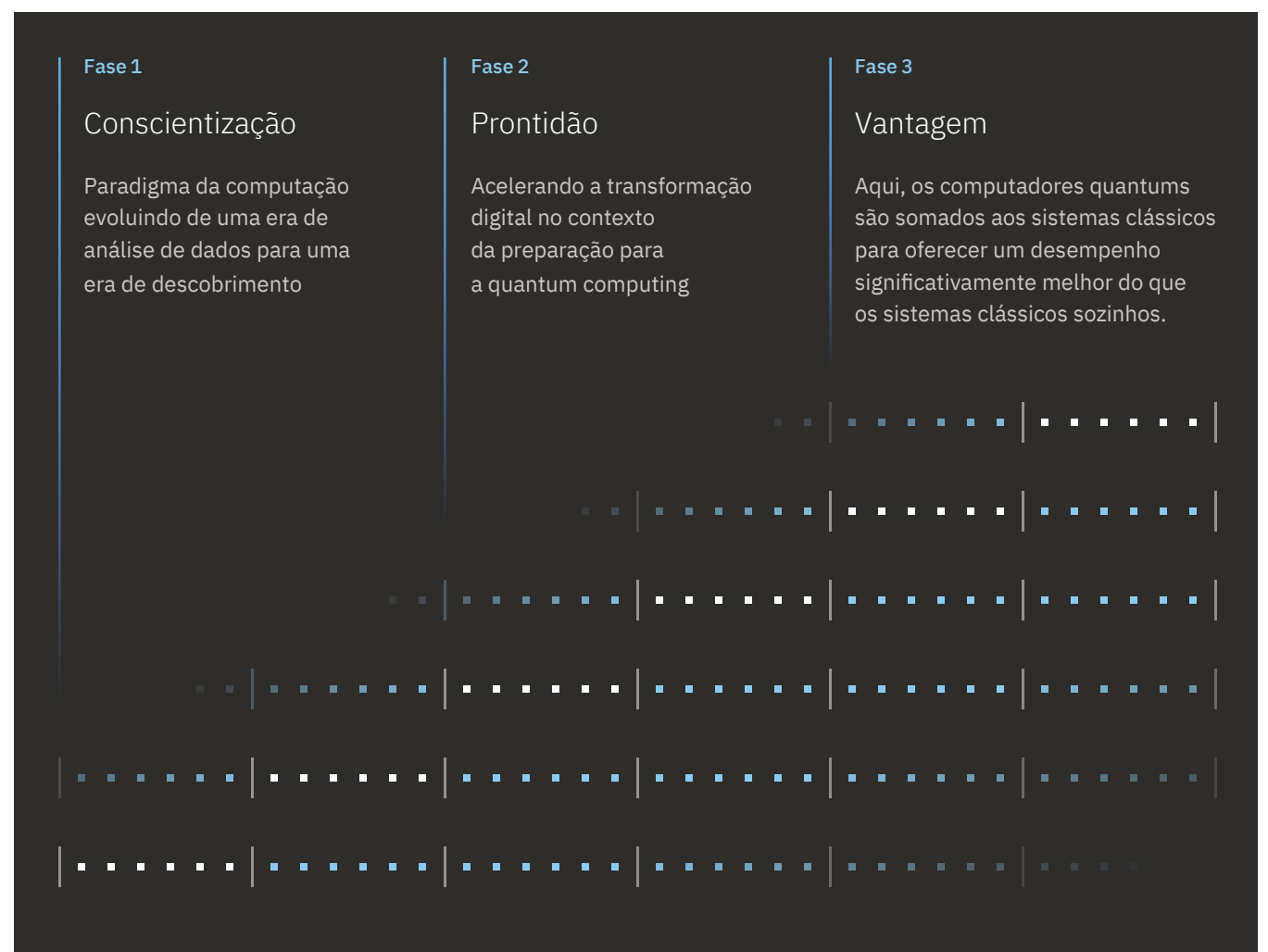


Figura 2

O caminho para a Vantagem Quantum

Adotando uma abordagem de base para a transformação digital

evolução organizacional: conscientização, prontidão e vantagem (veja a Figura 2).

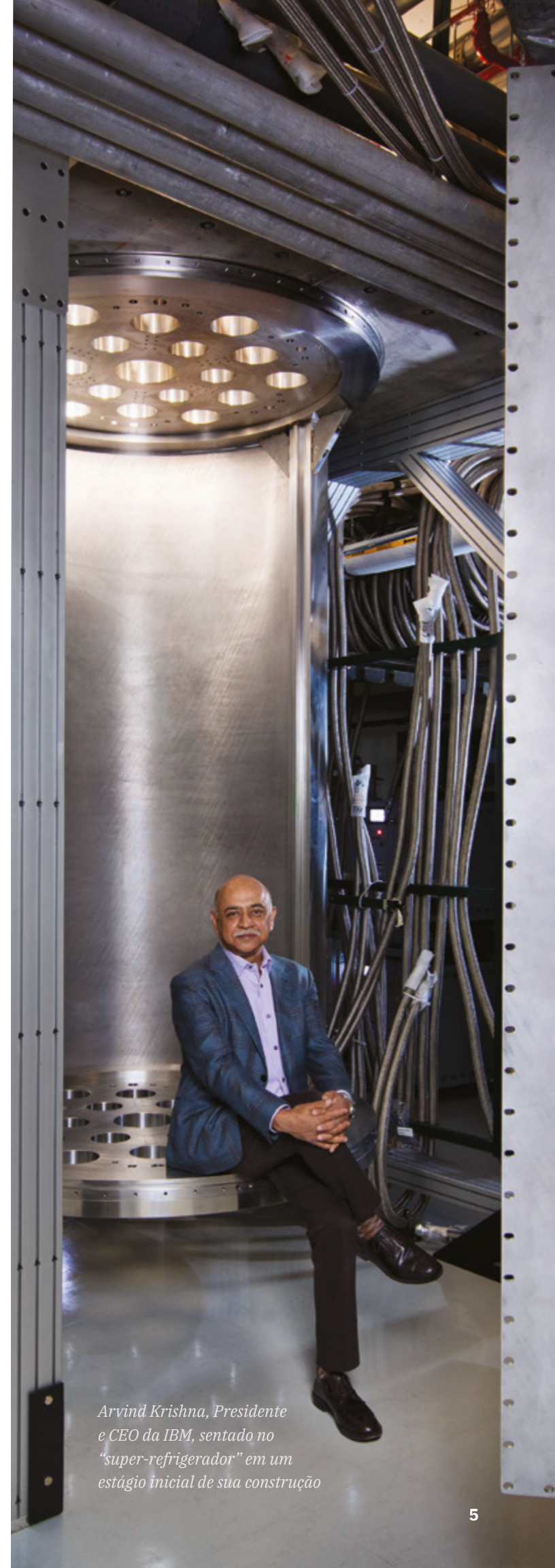
Conscientização

De acordo com o estudo CEO 2021 do IBV, 89% dos mais de 3.000 CEOs entrevistados *não citaram a quantum computing* como uma tecnologia importante para o fornecimento de resultados comerciais ao longo dos próximos dois a três anos.³ No curto prazo, isso é compreensível. No entanto, a quantum computing com 1.000 qubits foi projetada para estar disponível já em 2023, daqui a poucos anos.⁴ Dado o potencial inovador da tecnologia nesta década, os CEOs devem iniciar uma mobilização de recursos para assegurar aprendizados antecipados e começar agora a jornada para a quantum computing. Os CEOs que ignoram o potencial quantum estão assumindo um grande risco, pois as consequências serão muito maiores do que a perda das oportunidades de IA da década passada.⁵

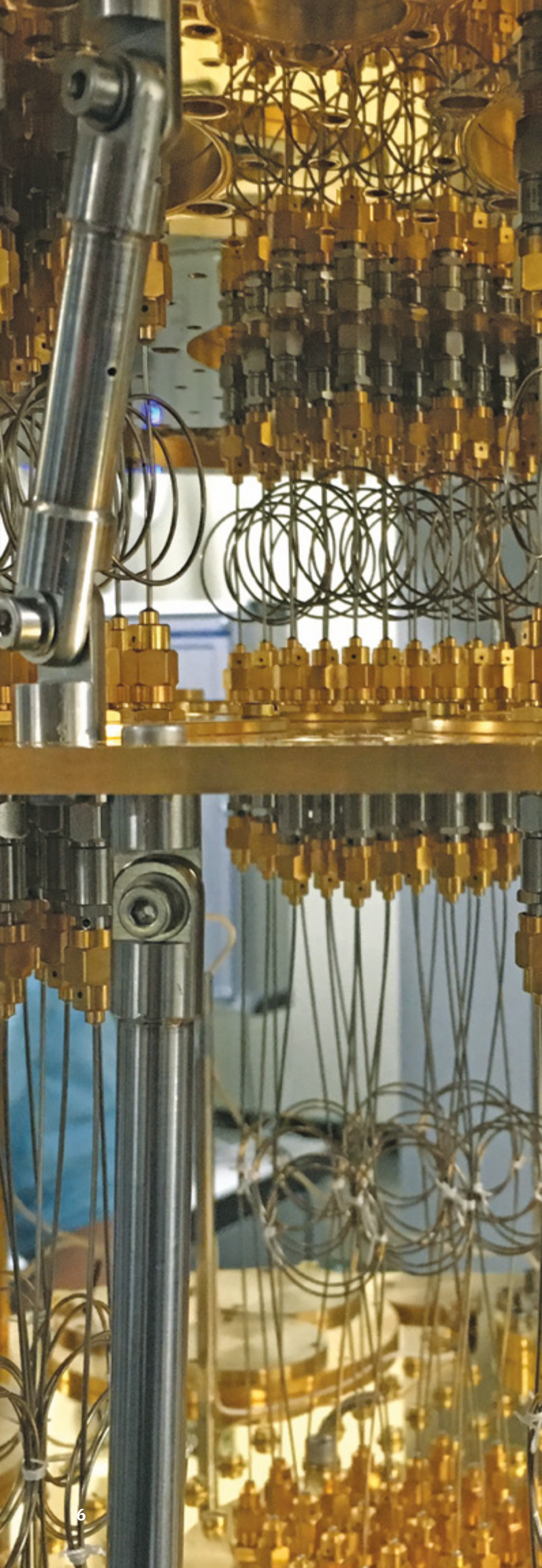
A fase 1 do playbook de quantum computing requer um amplo reconhecimento da mudança de cenário. A principal mudança é um paradigma de computação que está evoluindo de uma era de análises de dados (analisando os dados já estabelecidos e aprendendo com eles) para uma era de descobrimento (inferindo e criando modelos mais precisos para simulação, previsão e otimização). Há um potencial real de descoberta de soluções que antes eram impossíveis.

“Os CEOs das empresas da Fortune 500 têm uma oportunidade única. Eles não podem se dar ao luxo de esperar e se recuperar mais tarde. É hora de quebrar a tradição e informar-se sobre o que a quantum computing pode fazer por eles”.

Ilyas Khan
Fundador e CEO
da Cambridge Quantum Computing



Arvind Krishna, Presidente e CEO da IBM, sentado no “super-refrigerador” em um estágio inicial de sua construção



Prontidão

As empresas ainda não podem usar a quantum computing para resolver grandes problemas. Porém, a quantum computing surpreendeu cronogramas e superou as expectativas a cada fase do desenvolvimento. Não é cedo demais para os líderes organizacionais analisarem como o advento dessa nova tecnologia pode alterar os planos e expectativas. A fase 2 envolve investigar grandes questões: como seu modelo comercial poderia ser afetado e reformulado? Como a quantum computing poderia sobrecarregar seus fluxos de trabalho atuais de IA e de computação clássica? Qual é o “aplicativo ideal” da quantum computing para o seu setor? Como é possível ampliar os recursos de quantum computing da sua organização, seja internamente ou por meio de ecossistemas? Agora é o momento certo para experimentar e iterar com o planejamento de cenários. Encontre ou produza talentos fluentes em quantum computing e capazes de educar as partes interessadas internas sobre as possibilidades, além de estabelecer parcerias para obter recursos de quantum computing de ponta.

Há outra questão crítica tão importante quanto essa: o que sua empresa precisa estabelecer agora para aplicar a quantum computing quando ela estiver pronta para produção? De fato, construir a base para a quantum computing também significa aumentar o nível da computação clássica. Proficiências aprimoradas em dados, IA e nuvem são necessárias para fornecer a base fértil necessária para a quantum computing. Acelerar sua transformação digital no contexto da prontidão para a quantum computing proporcionará um avanço pragmático e benefícios significativos desde já. Afinal, a quantum computing não vence a computação clássica. A trindade da quantum computing, computação clássica e IA forma uma parceria progressiva e iterativa, em que elas são mais poderosas juntas do que separadas.

“Quando as pessoas pensam em quantum computing atualmente, elas pensam em pesquisadores tentando descobrir maneiras de aplicá-la. Daqui a dez anos, essas perguntas estarão respondidas. Lá, haverá outras perguntas sobre o uso mais adequado da quantum computing.”

Prineha Narang

Professora assistente de ciência de materiais computacionais na Universidade de Harvard

“Há uma enorme concorrência na área de ‘problemas graves’ do setor de energia. Quem chegar lá primeiro terá uma vantagem significativa.”

Doug Kushnerick,

anteriormente na Technology Scouting and Ventures,
ExxonMobil Research and Engineering

Vantagem

A fase 3, Vantagem Quantum, ocorre quando uma tarefa de computação de interesse para os negócios ou a ciência pode ser realizada de forma mais eficiente, mais econômica ou com melhor qualidade utilizando computadores quânticos. Este é o caso em que os computadores quânticos podem se juntar aos sistemas clássicos para oferecer um desempenho significativamente melhor do que os sistemas clássicos sozinhos. Ao reunir os avanços de hardware, software e algoritmos em quantum computing para permitir uma melhoria significativa do desempenho em relação à computação clássica, surgirão novas oportunidades vantajosas em todos os setores. No entanto, priorizar os casos de uso certos, aqueles que podem verdadeiramente *transformar* uma empresa ou setor, é crítico para obter o valor de negócios da quantum computing.

Atingir a Vantagem Quantum não acontecerá da noite para o dia. Embora essa vantagem possa se desenvolver ao longo de meses e anos, ela ainda pode acionar realizações exponenciais em uso e aprendizado. A mudança está chegando, da exploração de novos materiais aos tratamentos médicos personalizados e às mudanças radicais nos modelos de negócios em toda a economia. As organizações que melhorarem seus recursos de computação clássica e explorarem agressivamente o potencial de transformação do setor estarão melhor posicionadas para aproveitar a Vantagem Quantum.


“O melhor da quantum computing ainda está por vir. Há previsões sobre as aplicações da Vantagem Quantum. Há também uma gama mais abrangente de aplicações de quantum computing que ainda não conhecemos. Isso é o que redefinirá o que é possível.”

Irfan Siddiqi

Diretor do Laboratório Nacional de Lawrence
Berkeley no Advanced Quantum Testbed

e Professor da
Universidade de Física
da Califórnia, Berkeley





IBM Quantum
System One

IBM Quantum System One, um dos mais poderosos computadores quantum disponíveis comercialmente do mundo

Insights

Enfrentando os problemas do mundo

Da descoberta de novos medicamentos ao gerenciamento do risco financeiro e à reengenharia das cadeias de suprimentos, há uma urgência quanto à aceleração das soluções dos problemas sociais, macroeconômicos e ambientais, cada vez mais complexos e em escala global.

O marco de 1.000 qubits

O hardware de quantum computing está em uma trajetória de escalabilidade de 127 qubits em 2021 para 1.000 qubits até 2023 e, em seguida, para a quantum computing na prática, sendo caracterizado pela adoção generalizada e por sistemas que executam circuitos com erros corrigidos até 2030. Os ambientes de desenvolvimento de software livre baseados na nuvem simplificarão o uso de computadores quantum tornando-o ideal.

O futuro da multicloud híbrida

Muitos programas quantum envolvem interações entre os hardwares clássico e quantum. No entanto, essas interações introduzem latências, ou atrasos, que devem ser reduzidos para otimizar a capacidade. Isso torna as multiclouds híbridas o futuro mais viável para a quantum computing.

O poder dos ecossistemas

Ecossistemas de quantum computing, com oportunidades de colaboração, inovação ativa e desenvolvimento de software livre, estão se tornando rapidamente o local ideal para treinar usuários na aplicação da quantum computing aos problemas reais.

Capítulo 1

Compreensão quantum e a era do descobrimento

Quando novas tecnologias surgem, elas podem ser difíceis de entender completamente, especialmente em casos tão complexos quanto o da quantum computing. No entanto, é crítico desenvolver uma base de entendimento para alinhar adequadamente a tecnologia e a estratégia de negócios.

Neste capítulo, explicamos o caso da quantum computing, o que está acontecendo agora para a criação de um ponto de inflexão e como a tríade da computação clássica, da IA e da quantum computing nos moverá de uma era de análises de dados orientada pela mineração de dados em busca de insights para uma era definida pela experimentação e pelo descobrimento acelerados. Nós também descrevemos as implicações para as empresas em um ambiente orientado à descoberta.

O caso da Quantum Decade

Pressão crescente
para resolver
problemas
exponenciais



Descoberta de novos
materiais

Gerenciamento do risco
financeiro complexo

Reengenharia de cadeias
de suprimento para fins
de resiliência

Tecnologia quantum
em um momento
crucial



Ajuste de escala de
hardware de 127 qubits
em 2021 para 1.000
qubits em 2023

Desenvolvimentos de
software para uma
quantum computing sem
erros

Melhorias algorítmicas
e maior qualidade de
circuito, capacidade
e variedade

Ajuste de escala
de ecossistemas
quantums



A inovação aberta
fomenta o aprendizado
colaborativo

Usuários treinados
para aplicar a quantum
computing a problemas
reais

>2 bilhões de circuitos
no IBM Quantum Services
por dia

A Quantum Decade será impulsionada pela pressão crescente para resolver os maiores problemas computacionais dos negócios e da sociedade, representando uma trajetória rumo a 1.000 qubits até 2023 e à aplicação prática da quantum computing até o final da década, com ecossistemas de desenvolvedores capazes de aplicar esse poder na resolução de problemas reais e inacessíveis (ver Figura 3).

Uma maior urgência para resolver grandes problemas

Imagine descobrir novos materiais para painéis solares que nos ajudam a adquirir energia limpa de forma mais eficiente. Imagine também a simulação precisa de peças de aeronave em minutos ao invés de em anos. E se o desenvolvimento de medicamentos, que às vezes pode levar uma década para acontecer, ocorresse em meses?

Cada vez mais, esses problemas são levados à ambiciosa ciência direcionada por dados que altera a indústria. Nesta área, a descoberta corporativa se baseia em dados e na IA, acelerando ciclos de exploração que permitem às organizações agregar conhecimento, resolver questões e melhorar as operações e as ofertas.⁶

Problemas de escala planetária, como a mudança climática, a fome no mundo e a possibilidade de mais pandemias, requerem novas ferramentas poderosas para a obtenção de avanços. A quantum computing pode ajudar a agilizar soluções para estes problemas computacionais complexos que confrontam os negócios e a sociedade.

Figura 3

O que faz desta década a Quantum Decade?

*Três fatores que nos
fazem avançar*

“Devemos aplicar a quantum computing para melhorar a vida das pessoas. A nova geração precisa se beneficiar da quantum computing.”

Ching-Ray Chang

Professor honorário
do Departamento de Física
da Universidade Nacional de Taiwan

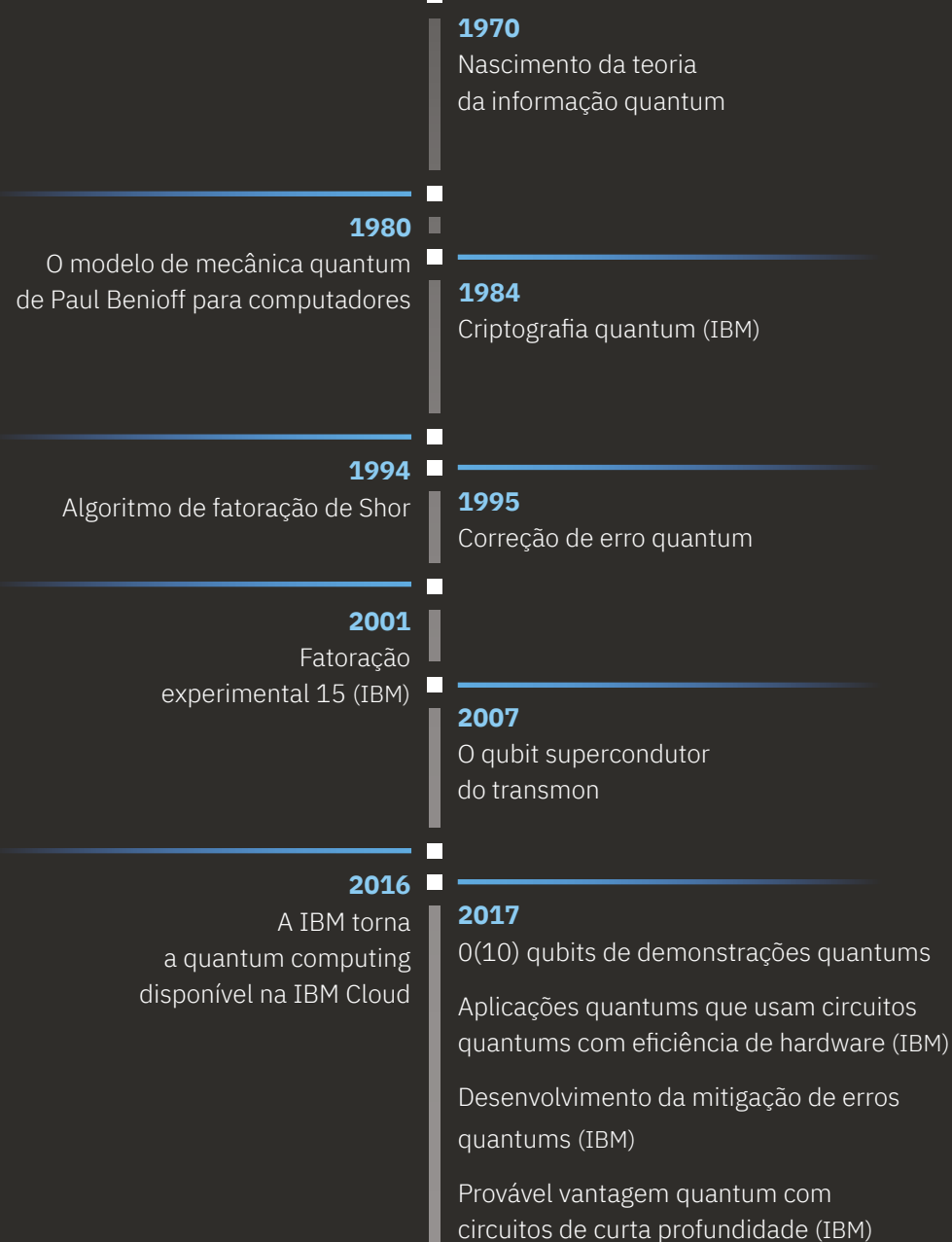
É possível que a informação que precisamos para fazer avanços significativos com relação aos problemas globais exista, mas nos falta a capacidade de computação para aproveitá-la e usá-la de forma produtiva. Para entender o porquê são necessários alguns conhecimentos importantes. Já faz muito tempo que a computação clássica tem viabilizado uma era de análises de dados. Os sistemas existentes dependem do armazenamento e da manipulação de bits computacionais individuais, armazenados em formato binário como 1s ou 0s, para nos ajudar a processar grandes volumes de dados. Os computadores quantum trabalham de forma fundamentalmente diferente por meio dos chamados bits quantum ou qubits, que podem representar informações usando mais dimensões (ver Perspectiva, “Fatos incríveis sobre a quantum computing” na página 15). Ao explorar as propriedades da mecânica quantum, os computadores quantum destacam-se no desafio de avaliar uma imensidão de opções que se adequam bem a estas propriedades, além de explorar problemas que até agora têm sido impossíveis de abordar.

O momento crucial da quantum computing

A quantum computing não é nova. Ela tem sido objeto de teorias e experimentos desde seu primeiro postulado feito por Paul Benioff, Richard Feynman, entre outros, no início dos anos 80.⁷ Durante a década de 90, ocorreu o trabalho matemático e algorítmico preliminar. Nos anos 2000, o foco estava na representação física dos qubit e, nos anos 2010, demonstrou-se que os sistemas multi-qubit eram viáveis, além de acessíveis na nuvem (ver Figura 4).

Figura 4

Um salto quantum
Marcos históricos na quantum computing



2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Executar circuitos quantum na IBM Cloud	Demonstrar e criar protótipos de aplicativos quantum	Executar aplicativos quantum 100x mais rápido na IBM Cloud	Circuitos dinâmicos para maior variedade de circuitos, além de complexidade algorítmica	Desenvolvimento contínuo com fluxos de trabalho quantum construídos na nuvem	Chamar serviços com mais de 1.000 qubits com a API de nuvem e investigar a correção de erros	Fluxos de trabalho quantum aprimorados por meio de computação de alto desempenho e recursos quantum

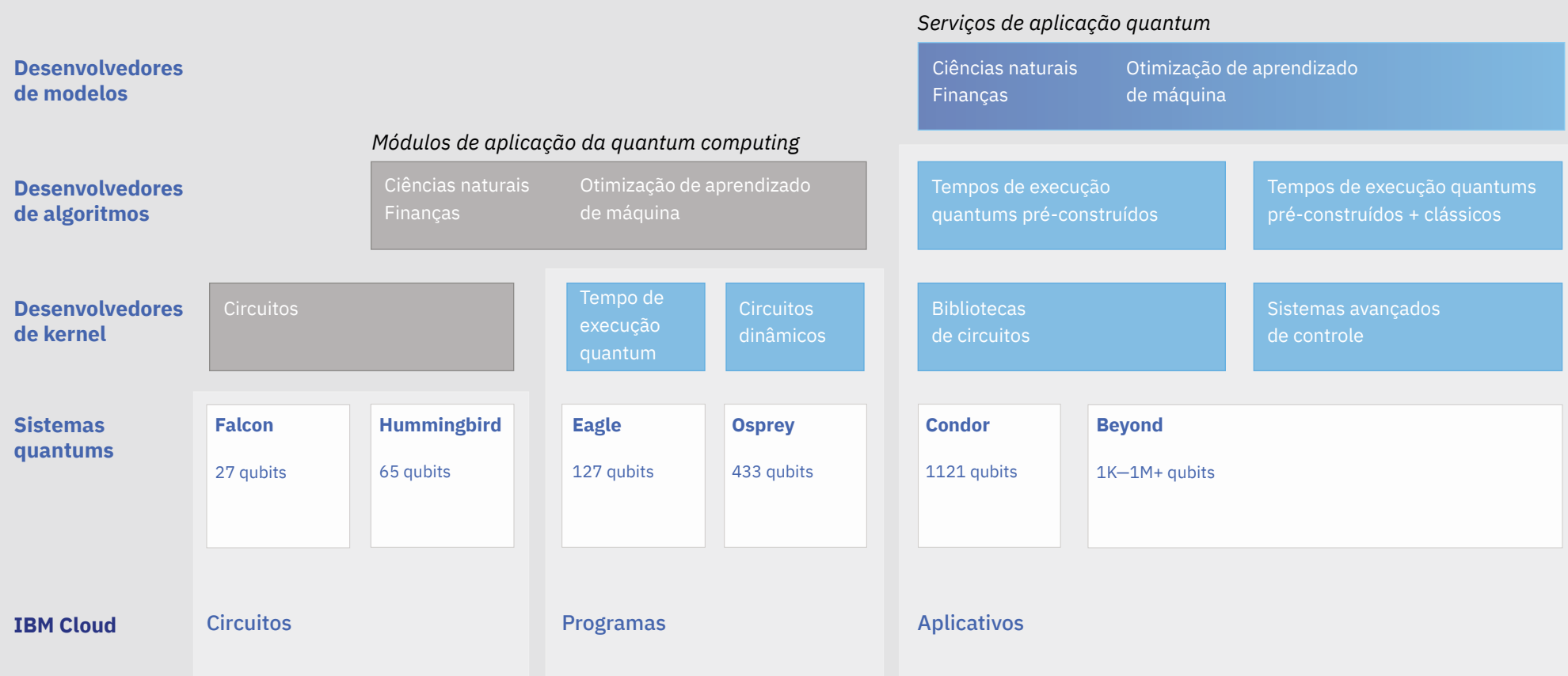


Figura 5

O roadmap da IBM quantum computing

Progresso recente e perspectivas

Então, o que está acontecendo agora? O avanço da quantum computing atingiu um ponto crucial. Em 2020, a tecnologia de ponta em quantum computing era um sistema IBM com 65 qubits. Espera-se aproximadamente o dobro em 2021, o triplo ou mais de 400 qubits em 2022 e mais do que o dobro, novamente, com mais de 1.000 qubits, até 2023. Além de aumentar a quantidade bruta de qubits, controles mais eficientes e densos e uma infraestrutura criogênica ajudarão a melhorar o desempenho dos qubits individualmente, limitando o ruído e a área de cobertura. Os cientistas e engenheiros quantum também irão introduzir técnicas de correção de erro e mitigação capazes de aumentar a variedade de problemas que podem ser resolvidos com computadores quantum (ver Figura 5).⁸

Há várias abordagens de criação de qubits, como a supercondutividade, os fótons e os íons presos, cada uma com suas respectivas características e habilidades de ajuste de escala. Os qubits são usados frequentemente como uma etapa, mas não contam toda a história, pois são apenas um componente do todo. Por exemplo, o conceito de circuitos quânticos é crítico. Semelhante a um circuito na ciência da computação clássica, um circuito quântico representa o conjunto de operações realizadas naquele momento nos qubits.

Três importantes atributos são necessários para criar computadores quânticos que possam ser usados de forma produtiva para resolver problemas de valor de negócios: *qualidade*, *capacidade* e *variedade*. Em 2019, a IBM desenvolveu a métrica de Volume Quantum (QV) para medir o poder computacional de um sistema computacional quântico. O QV lida com problemas altamente técnicos, incluindo erros de porta e medição, diafonia, conectividade de dispositivo e eficiência do compilador. Outros fornecedores estão começando a relatar seu progresso na *qualidade* computacional usando QV.

A IBM tem duplicado o QV com sucesso a cada ano. Para ser mais exato, a empresa o dobrou três vezes em 2020. Este é um nível de aumento relativo à Lei de Moore, mesmo que a própria Lei de Moore tenha sido superada pela computação tradicional (ver Perspectiva, “Computação clássica – O problema com a Lei de Moore na página 16”).

*“A Lei de Moore está chegando ao fim,
a computação clássica está atingindo seu limite
e nossa demanda está começando a aumentar.”*

Richard Debney
Vice-presidente,
BP de tecnologia digital

Perspectiva

Três tipos de problemas que a quantum computing pode solucionar

No curto a médio prazo, a quantum computing pode vir a ser especialmente hábil na resolução de três tipos de problemas:

simulação

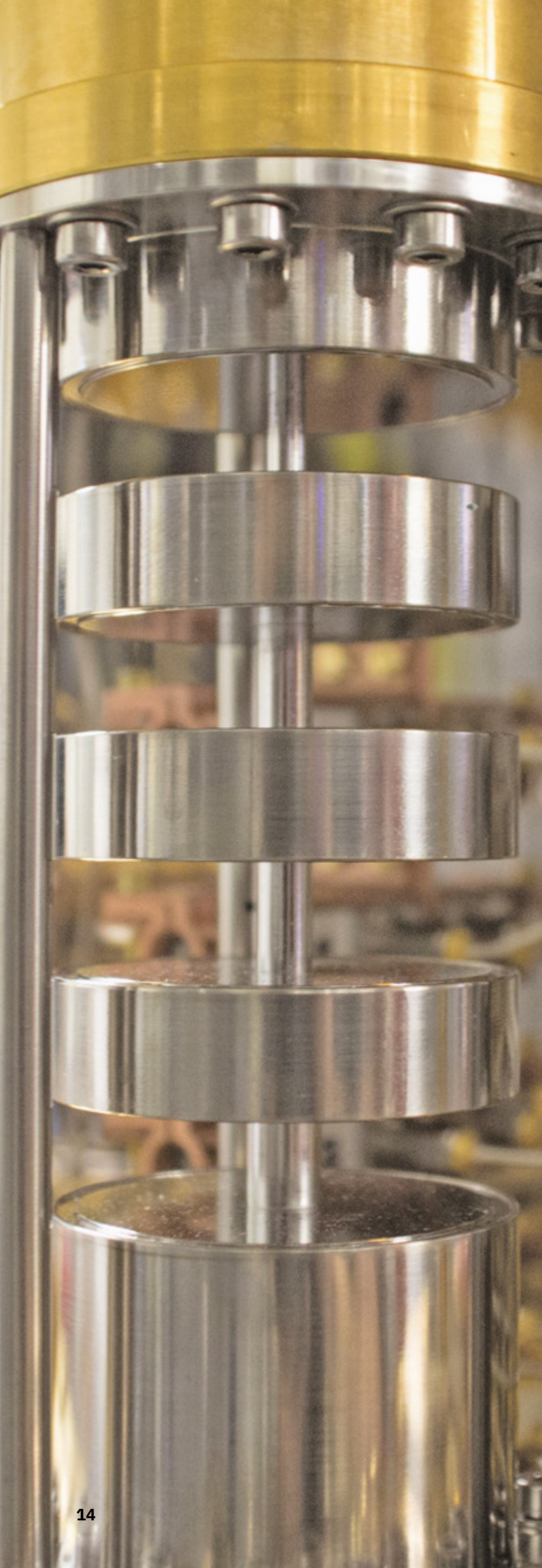
como processos e sistemas de modelagem que ocorrem na natureza

procura e gráfico

que envolvem a procura da melhor solução ou da solução “ideal” em uma situação com muitas respostas possíveis

algébrico

que inclui aplicativos para aprendizado de máquina.



O segundo requisito para o uso produtivo de computadores quantum é um aumento na *capacidade* do sistema. A quantidade de operações de vírgula flutuante por segundo (FLOPS) em um sistema clássico de alto desempenho é um exemplo de uma métrica de capacidade clássica. A capacidade de um sistema computacional quantum é uma medida de quantos circuitos quantum um sistema pode executar por unidade de tempo. Os programas quantum são uma combinação de instruções clássicas e circuitos quantum que se baseiam na memória clássica. Como resultado, um sistema computacional quantum é uma combinação de recursos computacionais clássicos e quantum conciliados para a execução eficiente de programas quantum. Quando o programa faz chamadas além dos limites entre os computadores quantum e clássicos, essas chamadas introduzem latências, ou atrasos, que devem ser reduzidos para otimizar a capacidade. Essa capacidade também depende muito da tecnologia de qubit subjacente e é possível que ela seja capaz de determinar qual tecnologia será bem-sucedida na entrega do valor de negócios.

O terceiro requisito para o uso produtivo é a *variedade*, ou seja, a capacidade de criar circuitos mais complexos e dinâmicos. Circuitos dinâmicos usam instruções clássicas de latência muito baixa que são capazes de inserir medições no circuito quantum para definir as próximas operações dele. Isso permite a construção de circuitos quantum mais eficientes e representa um recurso fundamental para a correção de erros quantum. A correção de erros quantum pode proteger informações quantum por meio do uso de diversos qubits físicos a fim de codificar informações em um único qubit lógico. Em termos de variedade, os computadores quantum devem ser capazes de executar uma diversidade de circuitos para resolver de forma eficaz uma variedade de problemas (ver estudo de caso, “Woodside Energy” na página 17).

Perspectiva Fatos incríveis sobre a quantum computing

(mas que você
não precisa saber)

Para dizer o mínimo, muito sobre a quantum computing é contraintuitivo. Embora seja necessário compreender o poder e o potencial da quantum computing para desenvolver estratégias e avaliar casos de uso, a boa notícia é que não é necessário ser um físico ou teórico quantum. É para isso que servem os parceiros e os ecossistemas. Ainda assim, é interessante refletir sobre o seguinte:

Fato um. A quantum computing explora um princípio fundamental da mecânica quantum: um sistema físico em um estado definido ainda pode se comportar de forma aleatória. O sistema está em uma *sobreposição*, que é uma combinação linear de dois ou mais estados.

Fato dois. Os bits de computação clássica são 0 ou 1. No entanto, na quantum computing, os bits quantum, ou qubits, podem estar em uma quantidade infinita de estados, todos ao mesmo tempo, com uma sobreposição de 0 e 1. Pense em uma moeda. Ao virar uma moeda, você se depara com o lado de cima ou o lado de baixo. Mas, se você girar uma moeda, as suas possibilidades dimensionais aumentam exponencialmente.

Fato três. Nessa mesma linha de pensamento, na lógica binária, as coisas “são” ou “não são”. Os computadores quantum não têm essa limitação, e permitem um reflexo mais preciso da realidade.

Fato quatro. As sobreposições não são inerentemente quantum. Por exemplo, quando diversos tons de música criam um som simultaneamente, o ar no ambiente está em uma sobreposição. O que é peculiar na mecânica quantum é que, em algumas circunstâncias em que você *mede* uma sobreposição quantum, você obtém resultados aleatórios mesmo quando o estado do sistema está definido.

Fato cinco. Medir um bit clássico não o altera. Se um bit é um 0, ele é medido como um 0, e o mesmo se aplica para um bit 1. Mas, se o qubit estiver em uma sobreposição quantum, medi-lo o transforma em um bit clássico, refletindo 0 ou 1.

Fato seis. *Entrelaçamento* é uma propriedade de um sistema quantum em que dois qubits muito afastados se comportam de formas individualmente aleatórias, mas inexplicavelmente correlacionadas. Dois qubits entrelaçados que são medidos individualmente podem fornecer resultados aleatórios. Mas, ao analisar o sistema como um todo, o estado de um é dependente do outro. O sistema combinado contém mais informações do que as partes individuais. Difícil de entender? O próprio Einstein chamou isso de “ação assustadora à distância”.⁹

Fato sete. Os computadores quantum podem usar *interferência* para cancelar os caminhos que levam a soluções incorretas e melhorar os caminhos que contêm a solução certa.

Fato oito. Como o ruído faz com que os qubits percam suas propriedades mecânicas quantum, eles devem ser mantidos isolados de qualquer fonte de ruído. Há diferentes maneiras de construir qubits. A principal é por meio da supercondutividade, que ajuda na criação de dispositivos com propriedades mecânicas quantum que podem ser controladas à vontade. Mas, para que os qubits funcionem, eles precisam ser mantidos em um “super-refrigerador” a temperaturas extremamente frias, de 10 a 20 milikelvins, o que é mais frio do que o vácuo do espaço.¹⁰

Perspectiva Computação clássica

O problema com
a Lei de Moore

Em 1965, Gordon Moore observou que a quantidade de transistores em uma determinada área de um chip de sistema computacional de silício estava dobrando a cada ano. Ele previu que esta duplicação de densidade continuaria por muito tempo no futuro, porém, o prazo foi revisto posteriormente para 18 a 24 meses.¹¹

Para que a Lei de Moore sobrevivesse todo esse tempo, designers e engenheiros de chips diminuíram consistentemente o tamanho dos recursos nos chips. Atualmente, os laboratórios mais avançados estão testando recursos de chip que medem apenas 5 nanômetros. (Um nanômetro é 1 bilionésimo de um metro). Esses recursos são tão pequenos que alguns precisam ser medidos em átomos individuais.

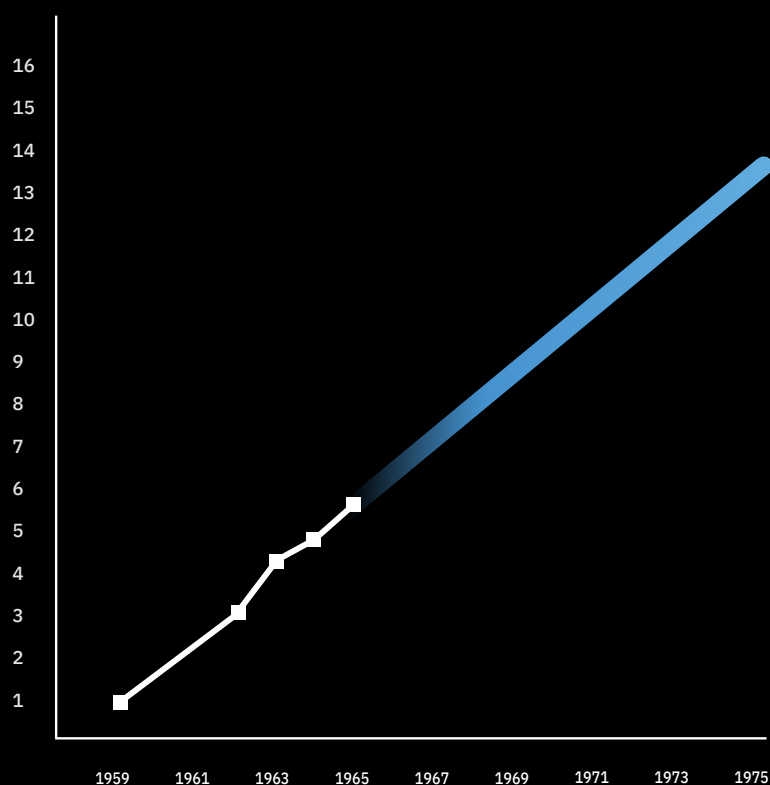
Mas agora, os limites físicos estão criando sérios obstáculos para a Lei de Moore. Algumas indústrias de chips líderes apontam para as despesas e os esforços enormes necessários para manter isso. Estima-se que o esforço de pesquisa para manter a Lei de Moore no caminho certo até aqui aumentou em 18 vezes desde 1971. Com isso, as instalações necessárias para construir chips modernos custarão US\$ 16 bilhões cada até 2022.¹²

Isso tudo indica que a desaceleração das melhorias na computação clássica apenas aumenta a importância da integração da quantum computing com os sistemas clássicos.

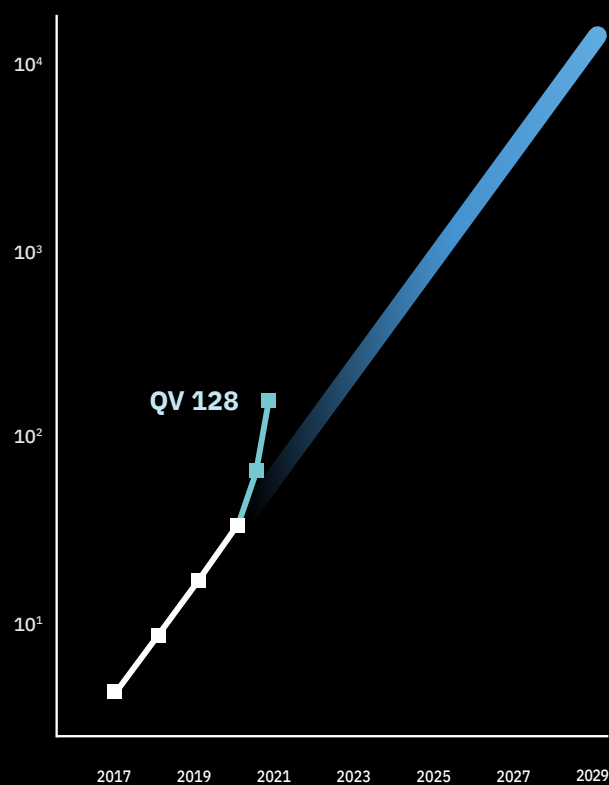
Duplicação

*Ajuste do volume quantum para
o dobro de escala por ano*

Log² da quantidade de computações
por função integrada



Volume
Quantum (QV)



Woodside Energy Introduzindo kernels quantums nos fluxos de trabalho clássicos de aprendizado de máquina¹³

No aprendizado de máquina clássico, os algoritmos usam kernels às vezes (medidas de similaridade entre duas partes de dados) para resolver problemas de classificação ou regressão. Normalmente, os kernels são usados para aumentar a dimensionalidade dos dados a fim de distingui-los, aumentando a precisão do algoritmo dessa maneira. Recentemente, os pesquisadores da IBM provaram a existência de kernels quantums, fornecendo uma vantagem super-polinomial sobre todos os possíveis classificadores clássicos de binário e exigindo apenas o acesso aos dados clássicos.

Pesquisadores da Woodside Energy, líder na produção de gás natural na Austrália, viram uma oportunidade interessante de colaborar com os pesquisadores quantums da IBM. Os kernels quantums poderiam ser implementados de forma realista em fluxos de trabalho clássicos de aprendizado de máquina relevantes para o mercado?

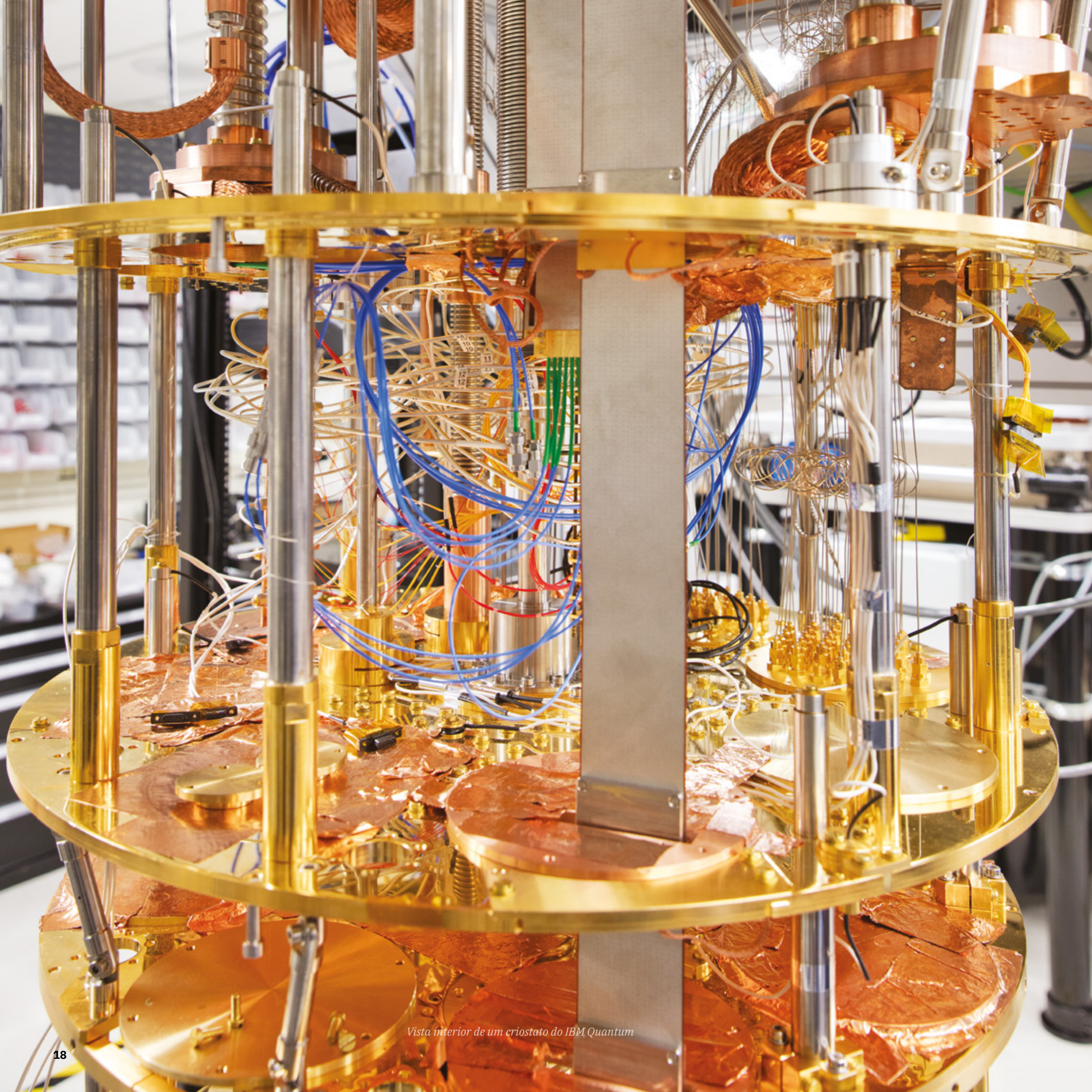
Como parte de sua exploração da quantum computing, as equipes quiseram entender como definir esses kernels usando circuitos quantums e como reduzir a quantidade de recursos de quantum computing necessários para avaliá-los. Isso envolveu conectar propriedades de circuitos quantums a propriedades dos kernels e avaliar o quão bem esses kernels funcionaram.

A forma comumente entendida de usar kernels quantums nos fluxos de trabalho clássicos de aprendizado de máquina requer uma consulta a um processador quantum para que cada valor de kernel seja calculado. Ao invés de avaliar cada valor desta forma, para reduzir

as chamadas ao sistema computacional quantum e torná-las mais práticas, a equipe começou a pesquisar combinações de kernels quantums com algoritmos clássicos para uma conclusão de matriz que responde à seguinte questão: no caso de uma compilação de valores de kernel calculados por meio de um sistema computacional quantum, os pesquisadores poderiam usar essa informação com o algoritmo clássico para prever com precisão como poderia ser um valor não calculado?

A investigação desta abordagem levantou algumas questões essenciais, incluindo: o uso de técnicas de conclusão de última geração poderia diminuir a quantidade de consultas necessárias, tornando o uso dos kernels quantums mais prático de forma mais rápida? Esses kernels fornecem benefícios úteis à Woodside Energy, como maior precisão de classificação em seus conjuntos de dados do setor? É possível fazer previsões relacionando as propriedades dos circuitos quantums à facilidade de conclusão dos kernels quantums?

A Woodside Energy considera esta pesquisa um “projeto pioneiro” que estabelece uma base para experimentação posterior. A empresa continua com esta linha de pensamento, pesquisando na literatura outras famílias de circuitos quantums usadas como blocos de construção para outras aplicações. No futuro, dados adicionais podem ajudar a Woodside a refinar suas previsões sobre o trato dos kernels quantums e onde eles poderiam ser mais úteis. Um caso de uso potencial: aplicar essa tecnologia à análise petrofísica dos dados de log de um poço.



Vista interior de um criostato do IBM Quantum

“A quantum computing não é apenas uma expansão da computação clássica. Nós não podemos simplesmente levar os problemas para os computadores quantum. Nós precisamos dividi-los e construir comunidades que possam aplicar efetivamente essa tecnologia aos problemas certos.”

Richard Debney

Vice-presidente,
BP de tecnologia digital

No entanto, a velocidade e o poder da quantum computing por si só não definem a Quantum Decade. O aumento exponencial dos qubits é impressionante, mas se essa força computacional bruta for inacessível e inaplicável aos problemas reais, voltaremos à teoria abstrata.

Felizmente, o poder da quantum computing está acessível. Historicamente, para ter maior capacidade de computação, é necessário construir ou instalar e manter as máquinas por conta própria. Mas agora, graças à nuvem, até mesmo computadores quantum altamente avançados são acessíveis.

De fato, um programador pode sentar-se em seu notebook e criar um circuito quantum usando portas quantum. Quando o software envia o circuito por meio da nuvem para um sistema computacional quantum, a máquina converte essas portas em pulsos de micro-ondas. Por sua vez, os pulsos controlam os qubits físicos, que trabalham para lidar com o problema em questão. Os resultados são retornados ao programador por meio de sua conversão novamente em bits clássicos.¹⁴ Essa interface ideal despertará a quantum computing para as comunidades de desenvolvedores de hoje.

A escala dos ecossistemas abertos está sendo ajustada

Há uma década, os especialistas em quantum computing eram predominantemente físicos Ph.D. em laboratórios, uma mercadoria valiosa que ainda é escassa. Porém, comunidades de desenvolvedores, não necessariamente Ph.D.s ou outros físicos, estão começando a aparecer. Essas comunidades incluem químicos, engenheiros elétricos e matemáticos, entre outros. Eles estão aprendendo e aplicando conceitos quantum, mesmo em ambientes de computação clássica.

Ecossistemas que promovem a inovação aberta surgiram e estão treinando desenvolvedores de software para aplicar a quantum computing a problemas reais. A IBM iniciou uma dessas comunidades de software livre, a Qiskit, para a construção das ferramentas de desenvolvimento de código e das bibliotecas necessárias para os desenvolvedores quantum. A comunidade também oferece desenvolvimento de habilidades para milhares de estudantes de quantum. Mais de 2 bilhões de circuitos quantum são executados por dia no IBM Quantum Services usando computadores quantum reais.¹⁵

Da análise ao descobrimento

Os avanços na quantum computing têm sido significativos, mas quais são as suas implicações práticas? Qual será o impacto deles em nossa capacidade de abordar problemas complexos em escala?

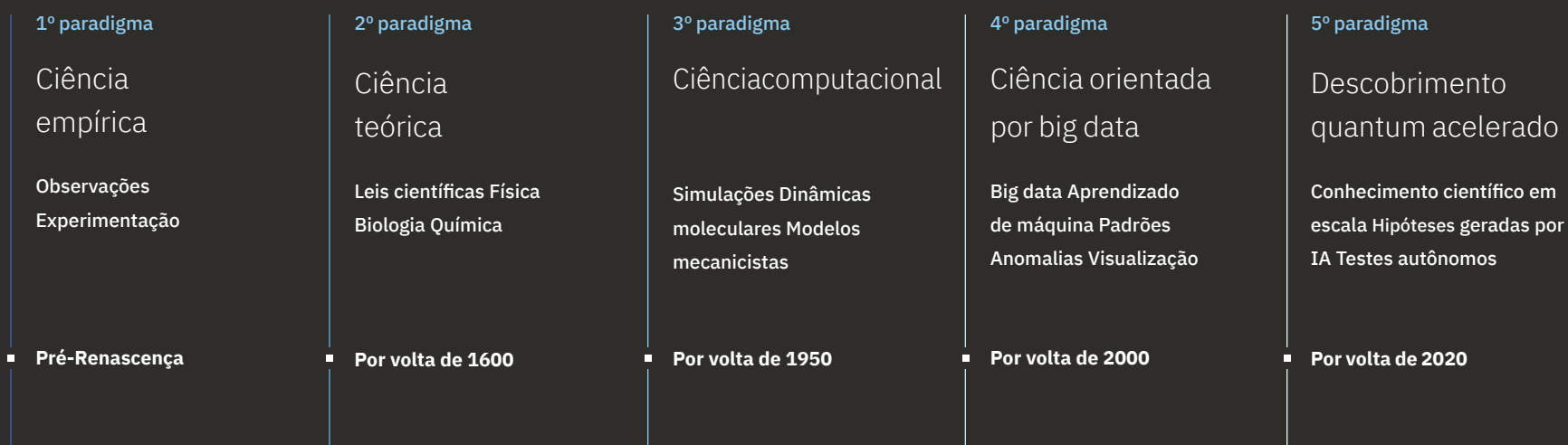
Em seus primórdios, a ciência era empírica e teórica. As pessoas observavam e mediam fenômenos, como o movimento de objetos, criando hipóteses e previsões sobre o porquê de eles acontecerem e testando-as repetidamente. Isso foi alterado pelos computadores e, eventualmente, pela IA e os supercomputadores, o que deu início à era da análise de dados. Agora, é possível ingerir grandes quantidades de dados e desenvolver modelos para o comportamento dos sistemas. Também é possível modelar sistemas químicos, mover átomos individuais e simular o desempenho ou a reação de alguns materiais em milhões de usos diferente.

No entanto, alguns desafios permanecem além do nosso alcance. Embora possamos modelar um sistema químico, esses modelos clássicos funcionam bem para problemas sobre os quais já temos dados. Esses modelos não são baseados na física subjacente de como as moléculas se comportam e, portanto, são imprecisos. Nós não temos o conjunto de ferramentas para lidar com essas dificuldades. Por mais poderosa que seja, a computação clássica tem limitações fundamentais diante de problemas exponenciais (veja a Figura 6).

Figura 6

Progresso ao longo do tempo

O caminho para o descobrimento quantum acelerado



Maior velocidade, automação e escala



IBM e Cleveland Clinic Usando o poder da quantum para enfrentar os principais desafios da assistência médica⁽¹⁶⁾

A IBM e a Cleveland Clinic, um centro médico acadêmico sem fins lucrativos que integra clínica e assistência hospitalar com pesquisa e educação, anunciaram uma parceria planejada de 10 anos para estabelecer o Discovery Accelerator. A Cleveland Clinic e a IBM farão esforços rumo ao avanço da descoberta em saúde e ciências biológicas por meio da computação de alto desempenho usando a multicloud híbrida, a IA e as tecnologias de quantum computing.

Por meio do Discovery Accelerator, pesquisadores preveem o uso de tecnologia computacional avançada para gerar e analisar dados a fim de ajudar a melhorar a pesquisa no novo Global Center for Pathogen Research & Human Health. Espera-se que a pesquisa se concentre em áreas como genoma, transcriptoma de célula única, saúde da população, aplicações clínicas e descoberta de produtos químicos e medicamentos.

Como um componente crítico, a IBM planeja instalar um IBM Quantum System One local do setor privado no campus da Cleveland Clinic, a primeira instalação no EUA. Este programa quantum será desenvolvido para engajar universidades, governo, indústria, startups e outras organizações. Ele impulsionará o empreendimento global da Cleveland Clinic para atuar como a base de um novo ecossistema quantum para ciências da vida, focado no avanço de habilidades quantum e na missão do centro.

Além do IBM Quantum System One local, a Cleveland Clinic terá acesso à atual frota da IBM de mais de 20 sistemas quantum, acessível por meio da nuvem. A IBM tem como objetivo apresentar o primeiro sistema quantum de mais de 1.000 qubits de nova geração em 2023, e a Cleveland Clinic está prevista como o local do primeiro sistema local do setor privado.

“Esta será a Quantum Decade se conseguirmos aplicar a quantum computing para descobrir uma única coisa, anteriormente inimaginável, que avance a nossa linha de consulta para o futuro.”

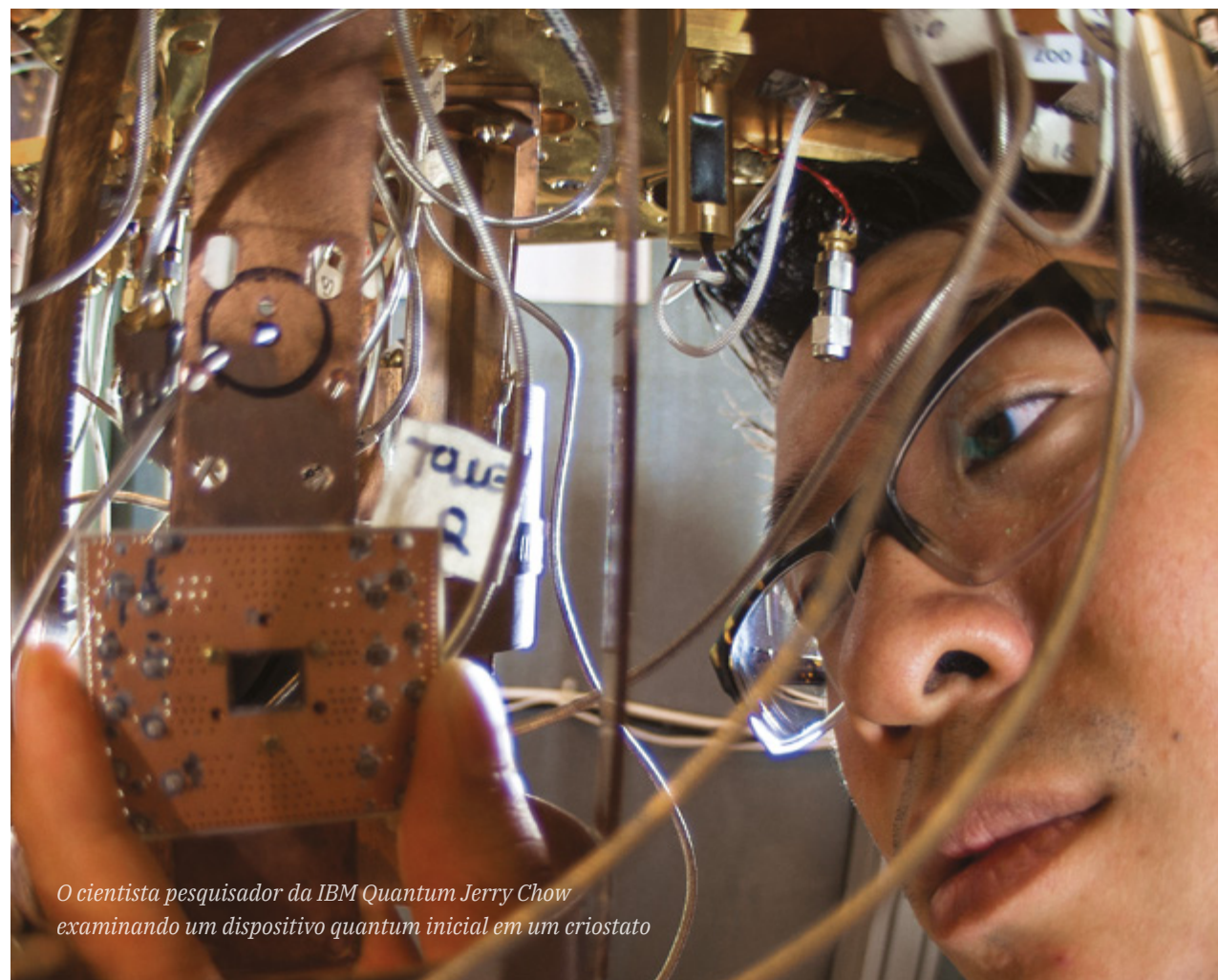
Todd Hughes

Diretor Técnico, Projetos estratégicos e iniciativas CACI

Este é o uso ideal para a quantum computing, em conjunto com os computadores clássicos e a IA. Esta tríade está preparada para gerar descobrimento a um ritmo radicalmente mais rápido. Considere o incrível impacto da pesquisa que envolve o mRNA, uma molécula de RNA de cadeia única que é complementar a uma das cadeias de um gene do DNA.¹⁷ Esta pesquisa acelerou o desenvolvimento da vacina da COVID-19: a decodificação do vírus para a criação da vacina levou somente algumas semanas, seguida por meses de ensaios clínicos e ampla liberação em um ano.¹⁸ Porém, isso só foi possível porque já tínhamos uma década de pesquisa de mRNA para utilizar.

Com a quantum computing, esse tipo de descobrimento pode ser mais rápido, especialmente quando se começa do zero, acelerando enormemente o desenvolvimento e a eficácia da vacina e aliviando o impacto de futuras pandemias.

Muitas de nossas melhores práticas em assistência médica continuam sendo aproximadas: extrapolando informações de grandes conjuntos de dados e aplicando-as a indivíduos. Em muitos aspectos, ainda estamos usando técnicas de tentativa e erro, que são certamente mais sofisticadas, mas dificilmente o tratamento é personalizado para cada indivíduo específico. Os recursos de mudança radical da quantum computing mantêm a promessa de eventualmente criar uma medicina personalizada, correspondendo terapias ao genoma de um indivíduo (ver estudo de caso, “IBM e Cleveland Clinic”).

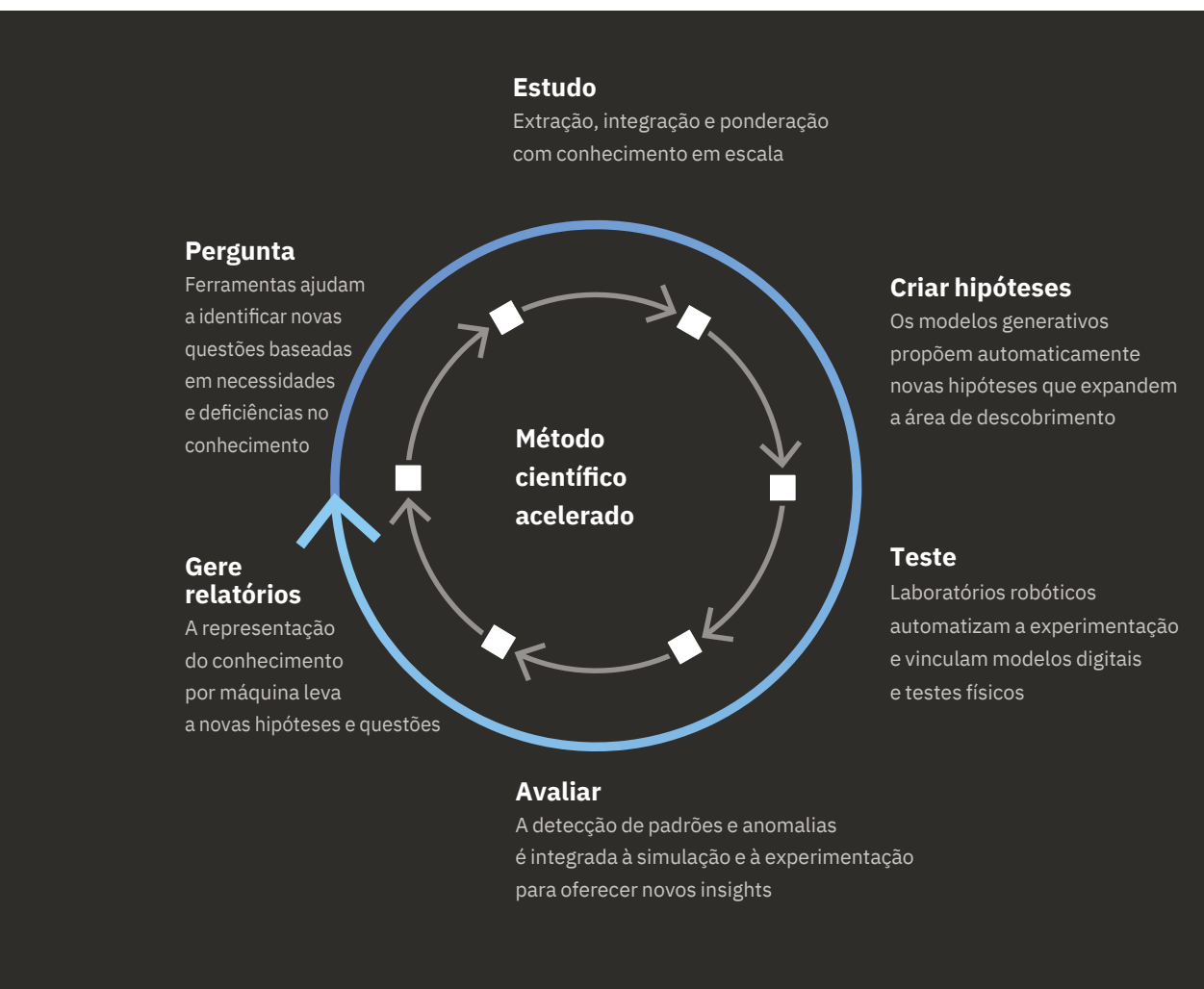


O cientista pesquisador da IBM Quantum Jerry Chow examinando um dispositivo quantum inicial em um criostato

“O processo de descoberta de materiais é insuportavelmente lento. As empresas não têm tempo para experimentos sem fim. A quantum computing pode possibilitar um salto exponencial no descobrimento.”

Doug Kushnerick

anteriormente na Technology Scouting and Ventures,
ExxonMobil Research



Este sonho pode se tornar uma realidade ao impulsionar a forma como a experimentação é feita. Talvez você conheça os fundamentos do método científico desde criança: uma sequência que vai da observação, à pergunta, à hipótese, ao experimento, aos resultados e, finalmente, à conclusão. Com a computação clássica, tem sido possível acelerar esse processo. A tríade da computação clássica, da IA e da quantum computing pode aprimorar significativamente o método científico (ver Figura 7).

A capacidade sem precedentes de modelar sistemas complexos irá acelerar a capacidade de extração, integração e validação em busca de conclusões. Nós já estamos usando a IA para gerar hipóteses automaticamente e laboratórios robóticos para automatizar a experimentação física. A maior capacidade da quantum computing irá expandir as possibilidades que podem ser avaliadas antes de passar para a experimentação física, acelerando todo o processo de descoberta como resultado. “Pela primeira vez, o loop no método científico está se fechando”, como indicado pelo *Science and Technology Outlook de 2021* da IBM Research. “Cada inovação é um passo rumo à realização do sonho do descobrimento como um processo inesgotável, contínuo e autoimpulsionado.”¹⁹

Ao acelerar o descobrimento e traduzir o conhecimento mais rapidamente em prática, serão possíveis todos os tipos de novos saltos. A saúde é apenas uma das áreas de aplicação. Outro cenário: a quantum computing pode ser utilizada no trabalho de descoberta de novos materiais. Estes recursos podem melhorar a eficiência dos painéis solares, das turbinas eólicas e da vida útil de baterias. Como iremos explorar nos Guias do Setor, na página 69, as aplicações em setores específicos são infinitas.

Figura 7

Ajustando a escala do método científico

Das perguntas às hipóteses e aos relatórios

A empresa orientada à descoberta

Em termos organizacionais, o que surgirá com a Quantum Decade é um novo tipo de empresa orientada à descoberta (veja a Figura 8). Assim como a nuvem tem virtualizado cada vez mais a empresa tradicional, a injeção de quantum computing abrirá novas possibilidades.

A tríade de computação irá revolucionar a forma como as empresas gerenciam e operam plataformas de negócios de criação de mercado, com suporte de fluxos de trabalho *inteligentes* ou orientados por IA. Ao examinar como as pessoas trabalham, a IA já pode ajudar a determinar os fluxos de trabalho mais eficientes ou efetivos. Assim, as tarefas podem ser encaminhadas a sistemas tradicionais ou quantum, com um ou mais computadores quantum trabalhando com um sistema computacional clássico, dependendo da melhor opção. Depois que os tecnólogos da informação estabelecem um fluxo de trabalho, um usuário não precisa saber onde ou como a computação está sendo feita. Nenhum conhecimento especializado de quantum computing seria necessário.

Há apenas uma década, aqueles que valorizaram o potencial da IA e tomaram medidas para se preparar para ela e implementar o que fosse possível ao longo do caminho são os que agora têm melhor desempenho.²⁰ Hoje, estamos na Quantum Decade e, à medida que aceleramos o ritmo de descobrimento, empresas de todos os tipos precisam prestar muita atenção.

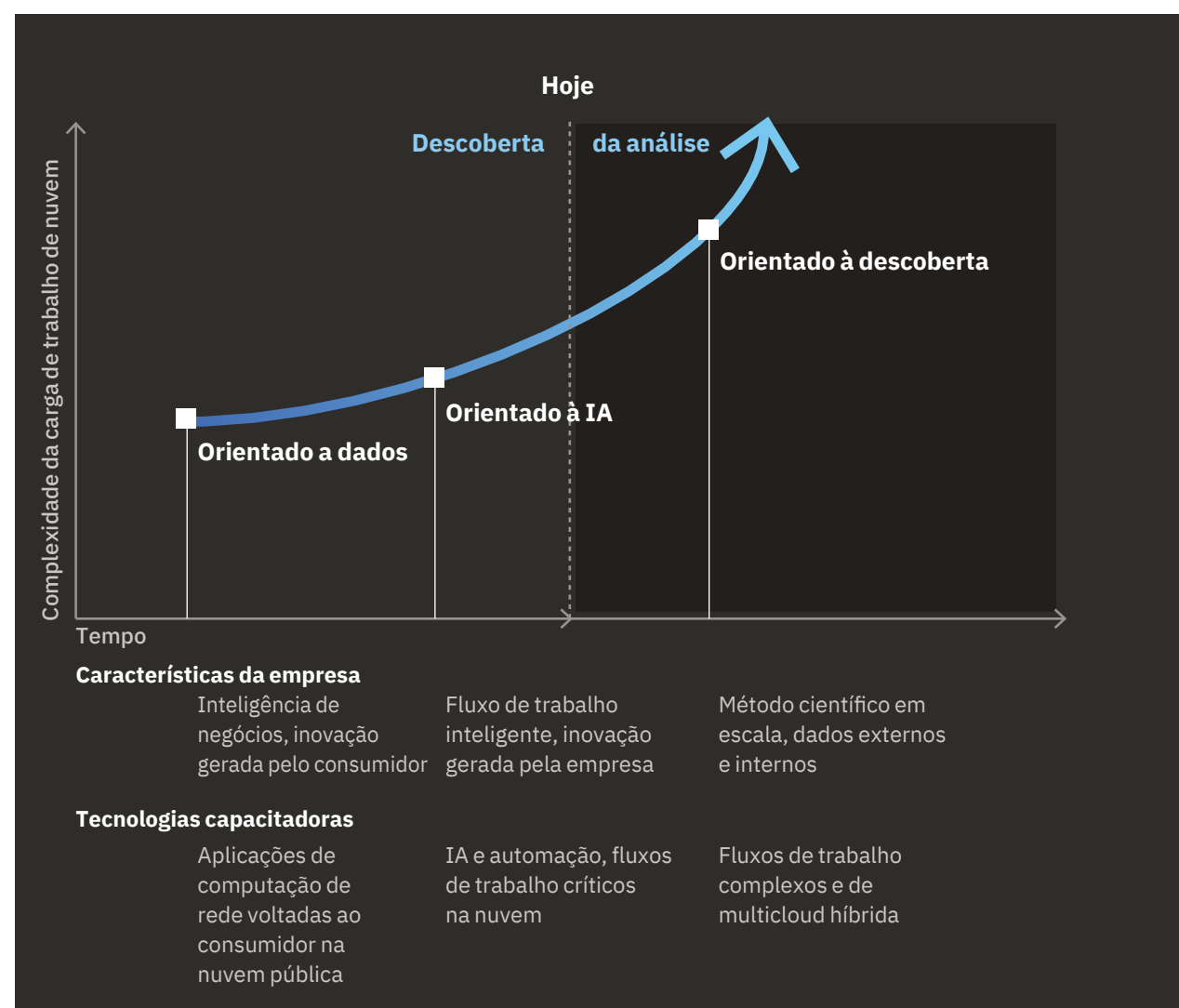
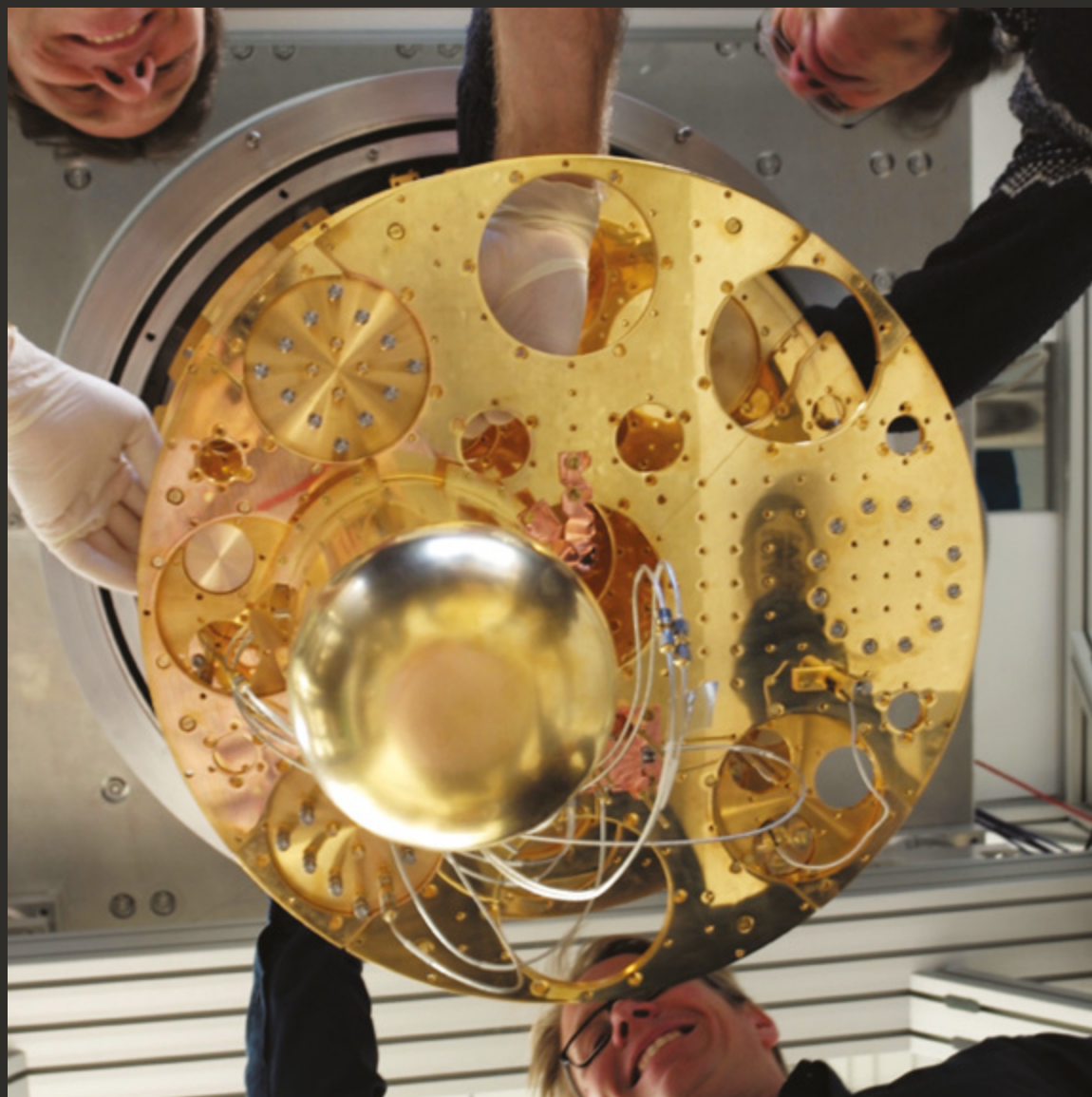


Figura 8

Um novo normal

A emergência de uma empresa orientada à descoberta



Visão de baixo de um criostato do IBM Quantum

■ Perguntas que devem ser feitas

Primeira pergunta

Como sua equipe, seus executivos e sua diretoria definiriam o caso da quantum computing?

Terceira pergunta

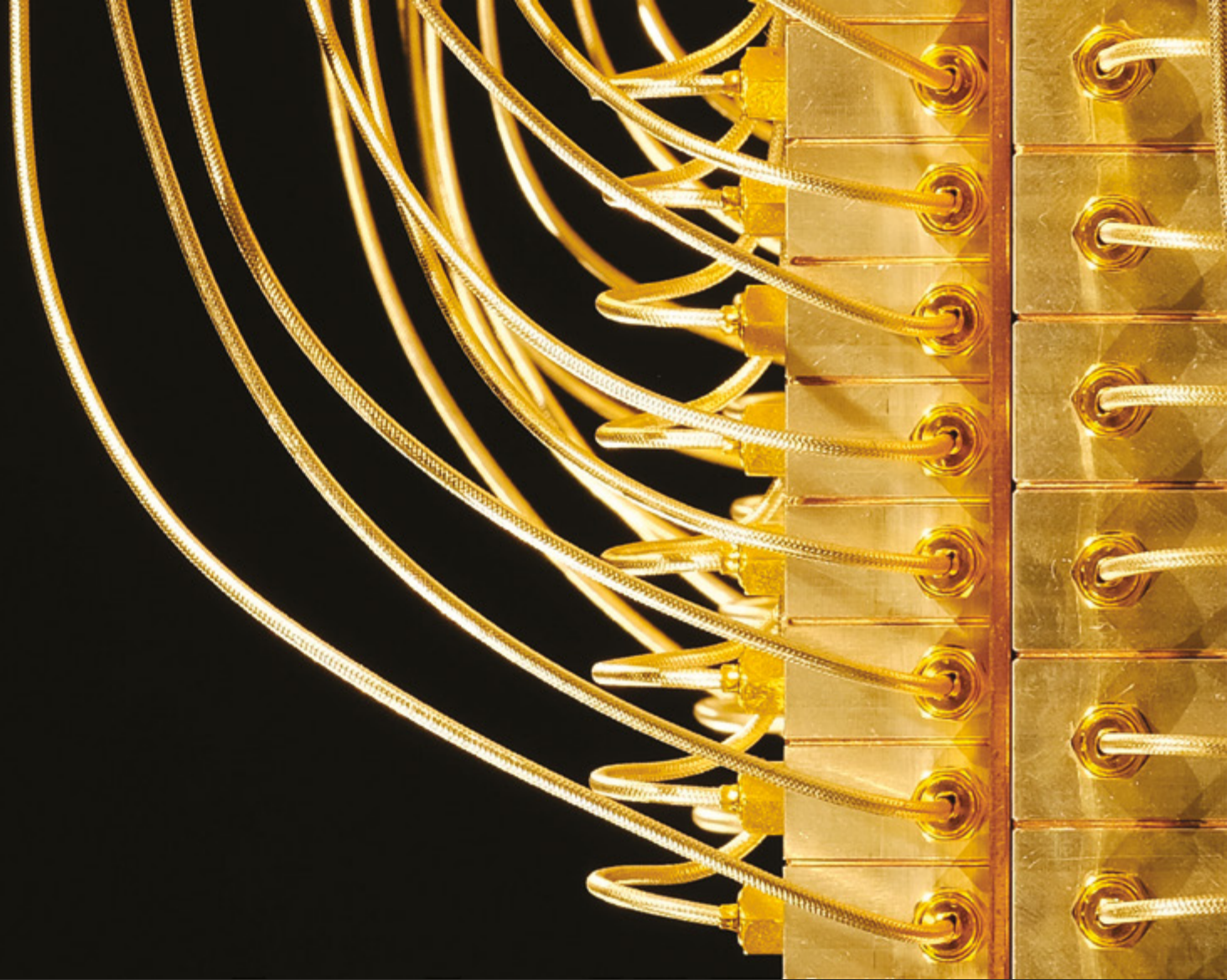
Como você está estudando e educando seus principais talentos sobre as possibilidades da quantum computing?

Segunda pergunta

Que medidas você está tomando para se tornar uma empresa que inclui a quantum computing ou para competir com elas?

Quarta pergunta

Quais são alguns ecossistemas viáveis por meio dos quais é possível acessar poderosos recursos de quantum computing na nuvem?



Insights

O poder do treinamento quantum

Desenvolva parcerias e participe de ecossistemas para obter um conhecimento quantum profundamente tecnológico. O que você precisa em sua equipe é treinamento sobre o potencial da quantum computing, uma fluência que pode ajudá-lo a conduzir experimentos e a buscar as vantagens para a sua empresa.

A oportunidade oculta do fluxo de trabalho

Obter mais valor da quantum computing requer o exame de fluxos de trabalho quanto a oportunidades de quantum computing e modos de interação com sistemas clássicos. No entanto, a prontidão exigirá mais do que treinamento em quantum computing e experimentação. É necessário preparar a sua empresa clássica para integrar a quantum computing profundamente em novas formas de trabalho e novos modelos de negócios.

Não comece sozinho

A velocidade na qual a quantum computing está melhorando e expandindo torna difícil para muitas empresas acompanhar o ritmo. Ser parte de um ecossistema de quantum computing pode fornecer acesso a tecnologias e talentos que podem não ser acessíveis de outra forma.

Capítulo 2

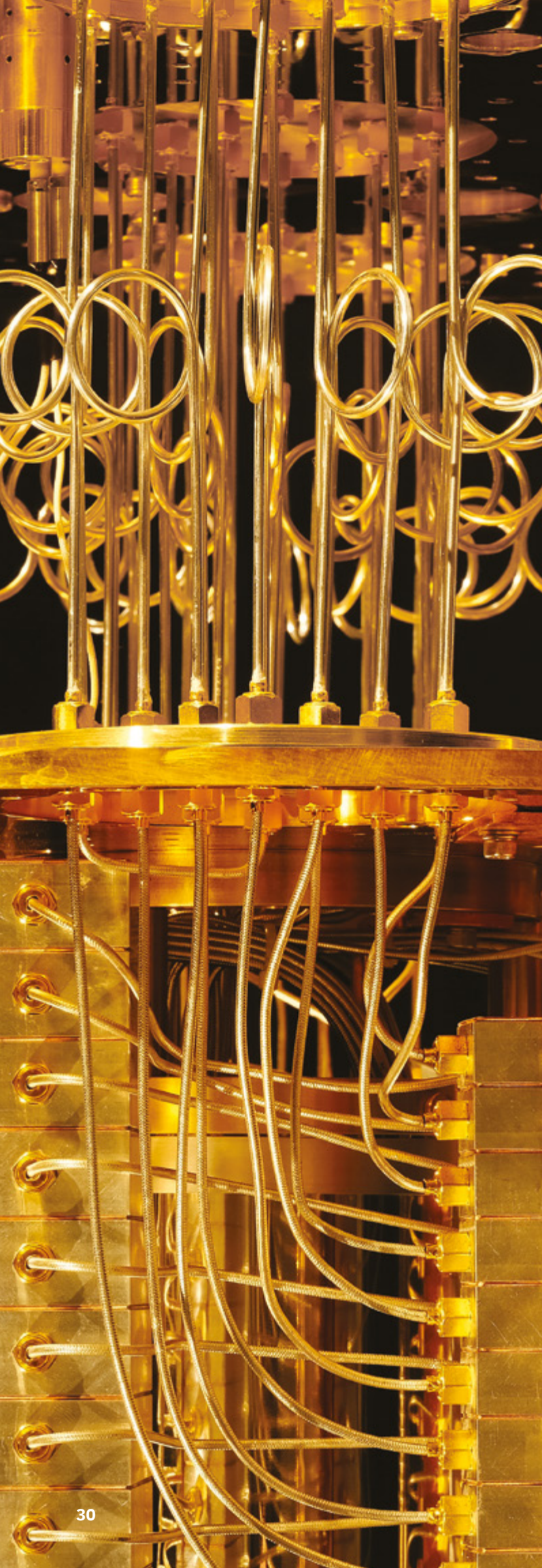
Prontidão quantum e o poder da experimentação

“Não há dúvida de que a tecnologia de quantum computing estará preparada para os negócios nesta década. Até 2030, surgirão diversas máquinas quânticas de um milhão de qubits”, diz Christian Weedbrook, CEO da Xanadu Quantum Technologies. “A questão é: você está preparado?”

A resposta curta é: “talvez, se agir agora”. A prontidão da quantum computing é um estado em contínua evolução que depende de sua abordagem geral e investimento em inovação, bem como de novos talentos e habilidades, além da maturidade digital geral. Esta prontidão inclui sua adoção de tecnologias capacitadoras, como a automação, a IA e a multicloud híbrida, além de sua disposição para analisar, experimentar e iterar com recursos computacionais em evolução, da sofisticação de seus fluxos de trabalho e de seu conjunto de habilidades organizacionais.

Seu setor e o fator da localização também são importantes. A prontidão para a quantum computing dos setores varia de acordo com a pressão competitiva e os requisitos de concentração, crescimento e inovação, além do potencial da quantum computing para resolver problemas computacionais específicos do setor. Países e regiões podem variar por contexto geográfico, principalmente com relação a investimento, educação, habilidades, regulamentação e disponibilidade do ecossistema. E os próprios ecossistemas devem alcançar a prontidão para fornecer suporte viável. Mas ainda assim, a parceria com o ecossistema ideal pode ser uma forma astuta de aliviar as flutuações de prontidão, independentemente do seu local ou setor.

Pense desta forma: obter uma vantagem inicial em uma tecnologia como a quantum computing é análogo ao poder dos juros compostos. Esperar dois anos e deixar que os primeiros a adotar saiam à frente pode resultar na liderança exponencial deles.



Experimentos como base: Aplicando o treinamento em quantum computing a problemas reais

Notícias encorajadoras: você não precisa ter um Ph.D. em quantum computing na equipe para começar. Sim, o mundo dos qubits, da sobreposição e do entrelaçamento pode ser complexo e melhor deixado nas mãos dos especialistas em quantum, e sim, ele requer proficiência no nível de Ph.D. para a criação de uma nova propriedade intelectual. Mas isso pode ser superado desenvolvendo parcerias e participando de ecossistemas para obter um conhecimento de quantum computing profundamente tecnológico. Sua equipe precisa de conhecimento sobre o potencial da quantum computing, uma fluência que pode ajudar na busca de vantagens para a sua empresa.

A parte incrível e desafiadora disso é aplicar esse conhecimento aos problemas de negócios. Quais são as atuais limitações de seu setor? Saiba mais detalhes. Quais são as limitações que estão causando essas limitações? Como a resolução desses problemas aparentemente impossíveis de resolver remodelaria seu setor? Quais são os obstáculos atuais na forma como você mobiliza os fluxos de trabalho de computação e design? Onde seu setor e sua empresa estarão daqui a 10 anos?

Problemas complexos e reais podem não ser resolvidos até que avancemos para a quantum computing tolerante a falhas, o auge da Quantum Decade. Nesta classe de quantum computing, o cliente pode executar programas quânticos de propósito geral compilados entre recursos quânticos e clássicos. Computadores tolerantes a falhas incorporam procedimentos que ajudam a evitar a multiplicação e a propagação de erros, o que permite executar circuitos quânticos de forma extremamente próxima do ideal, mesmo quando os componentes físicos são propensos a falhas.

Nós já estamos aprendendo como a quantum computing pode contribuir para o nosso entendimento dos problemas, incluindo grandes problemas. Ela está ajudando os pesquisadores a explorar o desenvolvimento de novos materiais. Ao longo do tempo, ela pode contribuir para o desenvolvimento de fertilizantes eficientes e sustentáveis para apoiar a cadeia global de suprimento de alimentos. Em um nível genuinamente cósmico, ela teria um papel fundamental na investigação dos mistérios por trás da malha que costura nosso universo.²¹

“Os executivos precisam entender o que a quantum computing pode resolver na próxima década. Eles precisam olhar para além da solução, avaliar o custo e determinar a vantagem.”

Jeff Nichols

Diretor de laboratório associado,
Laboratório Nacional de Oak Ridge

“Não é apenas sobre decompor, mas repensar e recompor problemas para os computadores quantum.”

Christopher Savoie
Fundador e CEO
do Zapata Computing

Mas, vamos pensar em um prazo mais curto. Para alcançar prontidão quantum, é necessário definir a arte do possível *agora*, por meio da definição de escopos de problemas, da experimentação e da iteração. Isto pode envolver uma abordagem ou uma combinação delas, com uso independente ou em conjunto (veja a Figura 9).

— **A abordagem de pirâmide.** Os problemas essenciais do mercado, pela sua natureza, são complexos. Esta abordagem envolve experimentação e aprendizado de forma iterativa, utilizando técnicas clássicas de decomposição e heurística para fornecer uma abundância de soluções possíveis. Depois, processos quantum identificam um subconjunto de soluções ideais que sobem, nesta analogia, ao topo da pirâmide. Em outras palavras, as abordagens clássicas podem fornecer um bom conjunto de opções de solução, que podem ser otimizadas pelos sistemas quantum. Isso permite refinar conjuntos de soluções maiores e superar as opções teóricas menores, que não têm nenhuma consequência robusta.

— **A abordagem de análise e extração.** A resolução de um problema complexo na sua totalidade pode exigir um milhão de qubits. Por enquanto, a estratégia precisa envolver a extração das partes que podem ser resolvidas com a computação clássica e a reserva dos outros segmentos para a quantum computing e seu poder computacional extremo. É como uma dissecação. O problema passa por análises em vários estágios: preparação, desconstrução e, por fim, resolução de cada parte desconstruída.

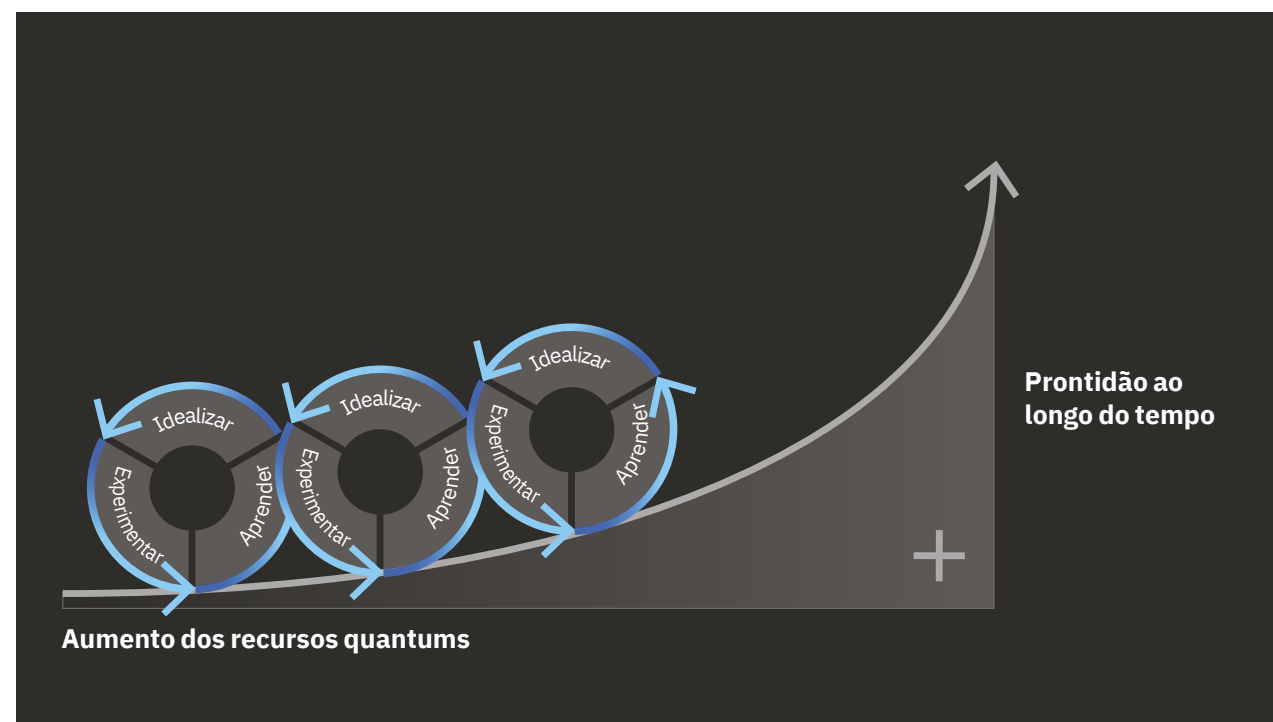
Até agora, isso geralmente ocorre com uma reestruturação que alinha a computação clássica ao entendimento dos dados, à decomposição e ao cálculo que pode ser realizado. Os recursos quantum, por sua vez, alinham-se a uma computação especializada. Além disso, este processo de desconstruir e reconstruir o problema de diferentes maneiras ajuda a *enxergá-lo* de forma diferente, oferecendo perspectivas que podem determinar um valor eventual ainda maior da quantum computing.

— **A abordagem de modelo comparativo.** Tanto a computação clássica quanto a quantum estão longe de ser estáticas. Elas estão melhorando e evoluindo constantemente, especialmente a quantum computing. Experimentos podem comparar problemas com relação aos recursos clássicos e quantum em um momento e, em seguida, executá-los novamente com relação a melhores recursos de hardware, software, algoritmos, correção de erros e assim por diante. Isolar e identificar essas melhorias específicas de quantum computing e aplicá-las estrategicamente a conjuntos de problemas mais amplos pode ajudar a aprimorar a prontidão quantum e o caminho para a Vantagem Quantum.

O potencial da quantum computing é enorme, mesmo que os conceitos em si pareçam misteriosos. No entanto, a experimentação e a iteração com a quantum computing pode demonstrar o poder da conceituação criativa (veja o estudo de caso, “IBM Services Supply Chain” na página 32). À medida que cenários são avaliados e experimentos são desenvolvidos para o setor, a criação de um roteiro tangível para a prontidão quantum pode desmistificar bastante as coisas. O importante é testar hardwares de quantum computing de nova geração, muito provavelmente por meio de um ecossistema.

Figura 9

Idealize, experimente, aprenda
*Abordagens experimentais
para aprendizado aplicado*



**IBM Services
Supply Chain²²
Uma pesquisa
impulsionada pela
quantum para uma
previsão mais precisa
da demanda**

Prever o futuro: é possível? Em todos os setores, as organizações dão o seu melhor em muitas áreas: previsão de demanda, previsão de inventário, previsão de capacidade, e muito mais.

No entanto, as técnicas computacionais clássicas de previsão podem sofrer com a baixa precisão. Como exemplo, para a previsão de demanda, o desafio de alinhar as cadeias de suprimento com a rápida mudança da demanda é enorme. Mesmo melhorias de previsão consistentes de apenas 1% podem ter um impacto financeiro significativo. Em serviços, há um componente maior de demanda independente movido por características de falha variável. Com isso em mente, os pesquisadores da IBM estão preparando uma demonstração que combina técnicas de quantum computing e clássica para tornar a previsão de demanda mais eficiente.

Para isso, pesquisadores estão trabalhando com a IBM Services Supply Chain (SSC), uma organização responsável pela manutenção de data centers através do armazenamento e do fornecimento de peças de serviço substituíveis em campo. Os milhões de dólares de inventário da IBM SSC abrangem mais de 2.000 peças diferentes armazenadas em 114 armazéns em todo o território dos EUA. Dependendo da gravidade do problema, a entrega precisa ocorrer dentro de uma das quatro janelas específicas de tempo: duas horas, quatro horas, um dia ou dois dias. Como resultado, o desafio da IBM SSC é prever quantas peças serão necessárias, além de quando e onde elas serão usadas.

Os pesquisadores usaram uma abordagem de duas etapas para o cenário. A primeira foi aplicar a classificação por padrão de demanda com padrões de exemplos que incluem:

Rápido

A demanda é contínua

Lento

A demanda é intermitente, com períodos de tempo sem demanda

Inativo

A demanda fica inativa

Raro

Poucos pedidos ou pedido único

Em seguida, os pesquisadores executaram o algoritmo apropriado de previsão para o padrão de demanda. Tanto a classificação quanto a previsão puderam ser feitas usando uma combinação de computação clássica e quantum (veja a figura abaixo). A computação clássica e a quantum trabalham juntas como uma equipe, com a quantum fazendo a parte computacional pesada do fluxo de trabalho.

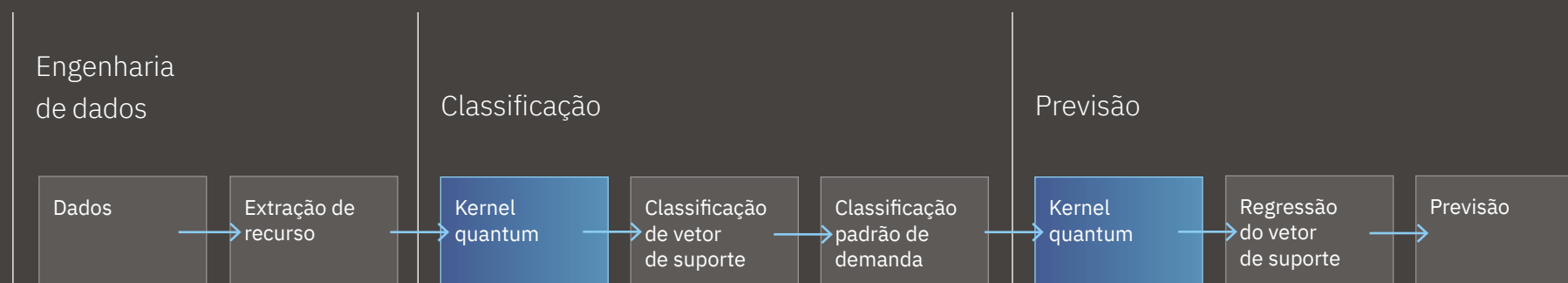
Os modelos quantum de aprendizado de máquina têm o potencial para uma maior generalização, o que significa que os algoritmos de previsão poderiam alcançar maior precisão com dados novos. Embora a computação clássica possa concluir esses fluxos de trabalho sem a quantum computing, à medida que os pesquisadores refinam suas técnicas, eles estão entendendo cada vez mais o papel que a quantum computing pode desempenhar. Isso será essencial em áreas como a manutenção preditiva, em que os sensores de IoT são cada vez mais utilizados com uma origem de dados. Para a manutenção relacionada à segurança, como peças de aeronaves, o aumento do desempenho e a precisão dos modelos quantum de aprendizado de máquina poderão se tornar uma necessidade.

Como em muitos experimentos de quantum computing, esse trabalho de classificação e de previsão é fundamental e está em evolução, fornecendo aos pesquisadores da IBM a plataforma para explorar recursos e algoritmos quantum de previsão de negócios. Ao final, os pesquisadores terão uma demonstração tangível que mapeia um problema de negócios para a quantum computing. E isso ajudará a ilustrar um ponto crítico: as computações clássica e quantum não são concorrentes. Ao contrário, elas são tecnologias complementares que, juntas, podem ser mais eficazes.

Combinando o clássico e o quantum

O fluxo de trabalho de previsão

Atividade quantum



Fluxos de trabalho de processo impulsionados pela quantum

Pensar pequeno e incrementalmente pode ser um caminho rápido de obter a Vantagem Quantum, especialmente ao integrar a quantum computing em seus fluxos de trabalho.

Um fluxo de trabalho é essencialmente um árvore de tarefas, com funcionalidades que englobam interações adaptativas com clientes e fornecedores, suporte proativo à decisão executiva, treinamento especializado para funcionários e outras aplicações de IA.²³ No entanto, os fluxos de trabalho podem ter dificuldade para calcular de forma abrangente grandes quantidades de dados complexos dentro dos prazos devidos. Como resultado, as empresas podem ser forçadas a empregar aproximações de cálculo, mesmo em face da pressão das demandas do mercado. Exemplos podem incluir fluxos de trabalho envolvendo redes complexas como distribuição, transporte, comunicações ou logística.

As aplicações da quantum computing são quase sempre para acelerar um processo ou subprocesso no âmbito de um fluxo de trabalho. Obter

mais valor da quantum computing requer o exame de fluxos de trabalho em busca de oportunidades de quantum computing e modos de interação com sistemas clássicos (veja o estudo de caso, “Telas OLED” na página 36).

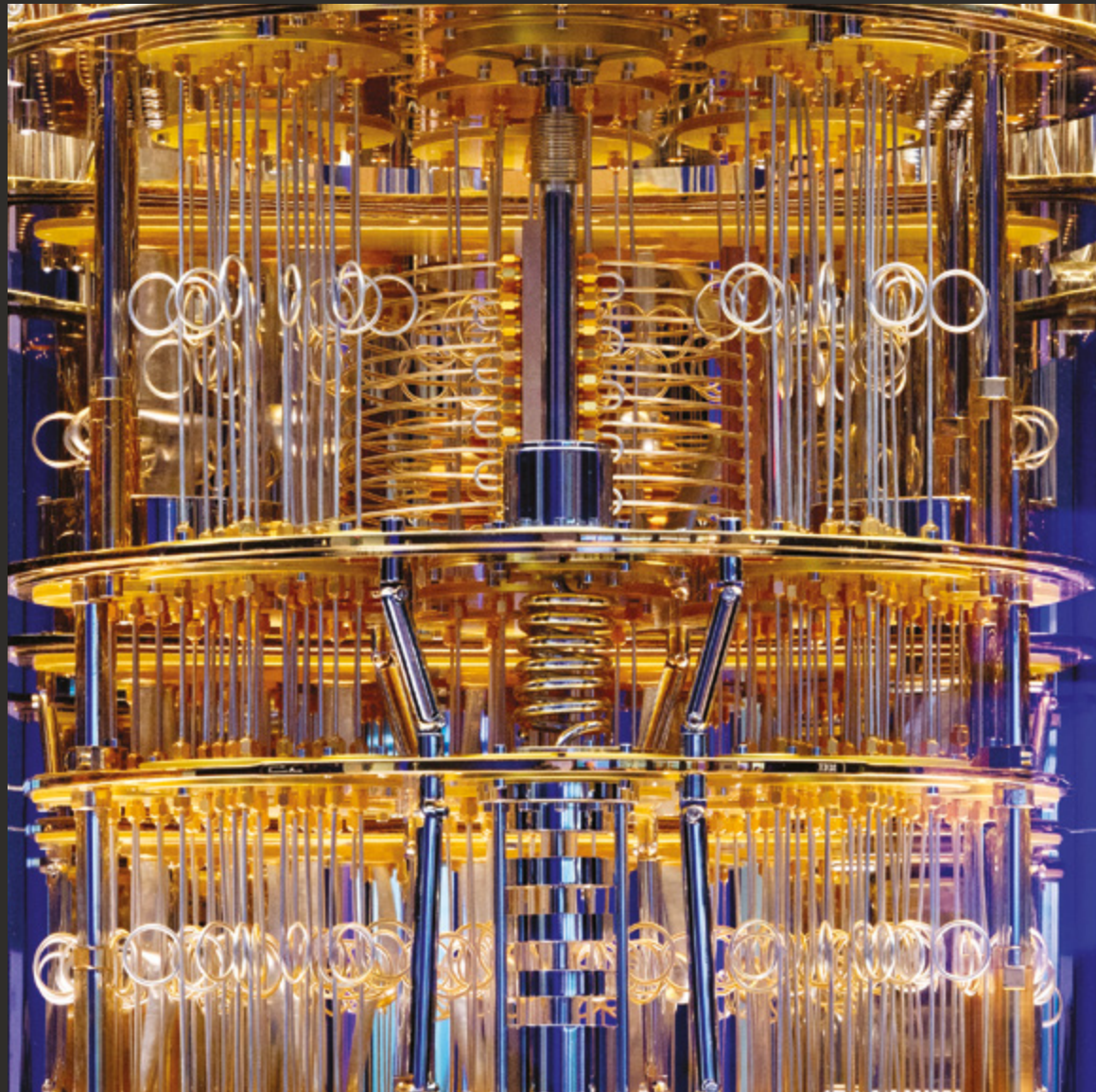
Avaliar a quantum computing desta forma requer um amplo foco na transformação do setor. Como unir a quantum computing à clássica em um contexto específico? Quais subseções de fluxo de trabalho são mais adequadas para a quantum computing? A análise intelectual necessária para avaliar fluxos de trabalho para computação clássica vs. quantum pode resultar em uma nova perspectiva sobre o próprio fluxo de trabalho, assim como sobre o grande potencial de resultados que a quantum computing fornece. A quantum computing pode ser propícia ao cálculo que gera avanços inesperados, produzindo novas eficiências, metodologias mais nítidas e modos mais relevantes de engajamento com as partes interessadas internas e externas.

“Os computadores quânticos não vão acabar com os computadores clássicos. Eles ajudarão com certas otimizações difíceis nos fluxos de trabalho. Eles serão um adicional.”

Christopher Savoie
Fundador e CEO
do Zapata Computing

“Nós precisamos dedicar mais tempo à parte do fluxo de trabalho que pode ser abordada com a quantum computing. Não à parte misteriosa da física, mas aos problemas críticos e de negócios que ela pode resolver de maneira transformadora.”

Glenn Kurowski
Vice-presidente sênior e Diretor de tecnologia
CACI



Telas OLED

Monitores mais brilhantes e eficientes por meio de uma simulação orientada por quantum²⁴

Qual é a única coisa entre as pessoas e os seus telefones? As telas, também conhecidas como monitores de tela plana. Mas, esses monitores são um dos componentes que mais consomem energia em smartphones, muitas vezes, limitando a vida útil da bateria.

Novos materiais avançados podem produzir monitores mais brilhantes que são mais eficientes e consomem menos energia. No entanto, o desenvolvimento desses novos materiais requer métodos de pesquisa laboratorial que consomem tempo e mão de obra. O processo abrange diversas etapas de desenvolvimento, incluindo identificação de materiais, desenvolvimento de processos, prototipagem de dispositivo e testes de qualificação.

Tradicionalmente, o progresso nessa área tem sido lento. No caso dos monitores orgânicos de diodo emissor de luz (OLED), foram 34 anos desde a primeira observação relatada de eletroluminescência em uma molécula orgânica (1963) até o primeiro monitor OLED disponível comercialmente no mercado (1997).²⁵

Os computadores quânticos, no entanto, podem contribuir em um ritmo mais acelerado. A quantum computing pode ajudar a comercializar novos materiais com modelagem molecular mais rápida e precisa dos materiais e de suas interações com processos de manufatura e condições de operação. Esses novos materiais podem produzir monitores mais brilhantes, com menor consumo de energia e menor custo, o que pode acelerar sua comercialização,

permitindo que empresas ofereçam produtos mais atraentes e mais competitivos mais cedo.

A simulação de materiais com computação clássica tem atualmente aplicação limitada no desenvolvimento de novos materiais. O tempo necessário para simular com precisão cenários moleculares de grande complexidade aumenta rapidamente, para além de cronogramas práticos. Como resultado, sem simulações computacionais precisas, métodos experimentais laboriosos e dispendiosos devem ser empregados.

Com a abordagem da quantum computing, as simulações quânticas podem ser usadas em todo o fluxo de trabalho para simular de forma mais realista os materiais e suas interações com a operação do dispositivo, os processos de manufatura e as condições de operação. Simulações de materiais mais complexas e mais precisas no nível molecular podem possibilitar experiências produtivas no sistema computacional, reduzindo o dispendioso e incômodo trabalho de pesquisa laboratorial e de desenvolvimento de manufatura.

Esses fluxos de trabalho de simulação de materiais orientados por quantum computing podem criar vantagens estratégicas e competitivas para o produto, como monitores mais luminosos e com menor consumo de energia. Além disso, as potenciais recompensas financeiras são consideráveis. Um aumento de apenas 1% na receita por ano poderia significar um adicional de US\$ 320 milhões para o mercado de monitores OLED.²⁶



O fluxo de trabalho inteligente: adicionando o poder da quantum

“Os fluxos de trabalho de processo, por si só, perdem a complexidade do trabalho no mundo real. A quantum computing mudará o relacionamento entre as pessoas, a tecnologia e o trabalho.”

Coronel (aposentado) Stoney Trent, Ph.D.

Fundador e Presidente
The Bulls Run Group

Na IBM, definimos fluxos de trabalho inteligentes como sistemas estendidos de ponta a ponta que, por meio da aplicação de tecnologia em escala, definem a experiência do cliente e influenciam os resultados comerciais.²⁷ Esses fluxos de trabalho são mais expansivos do que os processos simples e têm usado tradicionalmente tecnologias como automação, blockchain, IA, 5G, nuvem e computação de borda para contribuir para resultados excepcionais. A pesquisa da IBM mostra que a utilização dessas tecnologias de computação clássica em fluxos de trabalho pode triplicar os benefícios.²⁸ A incorporação do poder da quantum computing tem o potencial de melhorar isso exponencialmente (veja a Figura 10).

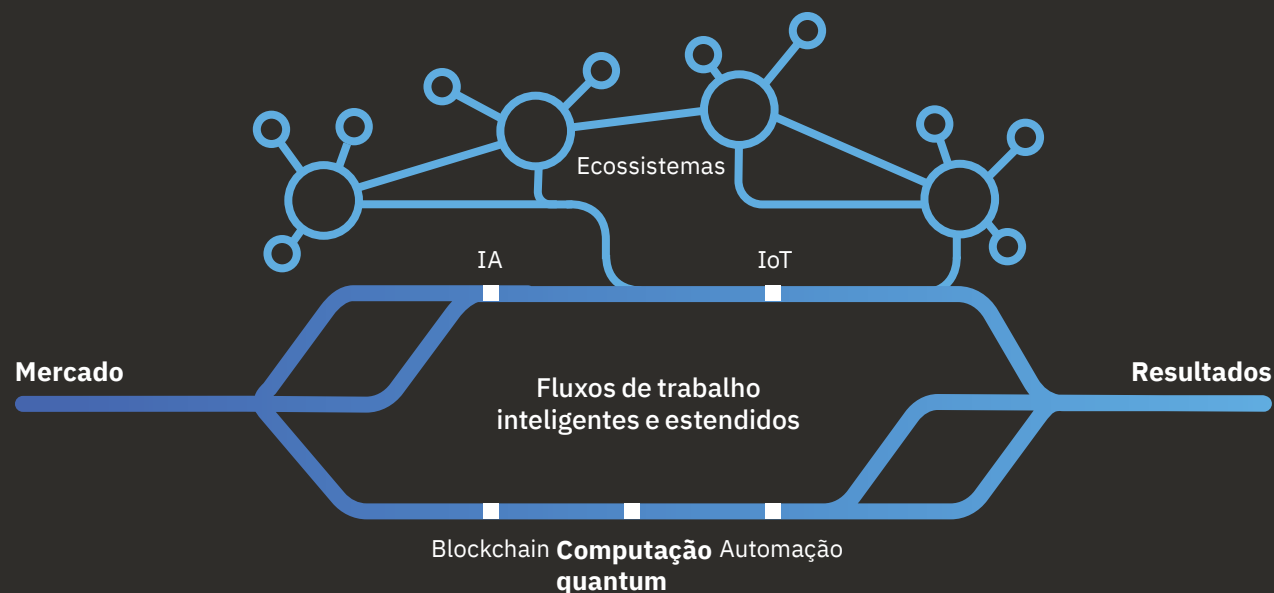
Na verdade, estamos nos aproximando de uma revolução que está levando a computação para ambientes altamente heterogêneos. Cada vez mais, a computação clássica, a IA e a quantum serão integradas em fluxos de trabalho inteligentes e gerenciados em uma multicloud híbrida.

Essa é uma boa analogia ao avaliar a quantum computing no contexto dos fluxos de trabalho inteligentes. Os processos funcionam como um backbone organizacional. No entanto, fluxos de trabalho inteligentes atuam como o sistema nervoso da organização, em suma, sendo interconectados e interdependentes. Esses fluxos de trabalho diferem dos processos simples porque extraem informações do ecossistema, pressupõem e determinam a resposta apropriada, enviando feedback para outros fluxos de trabalho.²⁹ A quantum computing, com sua capacidade de avaliar muitas opções, destaca-se nessa área.

Figura 10

O resultado do reforço

Fluxos de trabalho inteligentes desenvolvidos com quantum computing



“Será muito estranho se qualquer grande plataforma de nuvem em 2030 não tiver uma reprodução quantum. A quantum será mais impactante do que a IA ou os supercomputadores.”

Christian Weedbrook

CEO

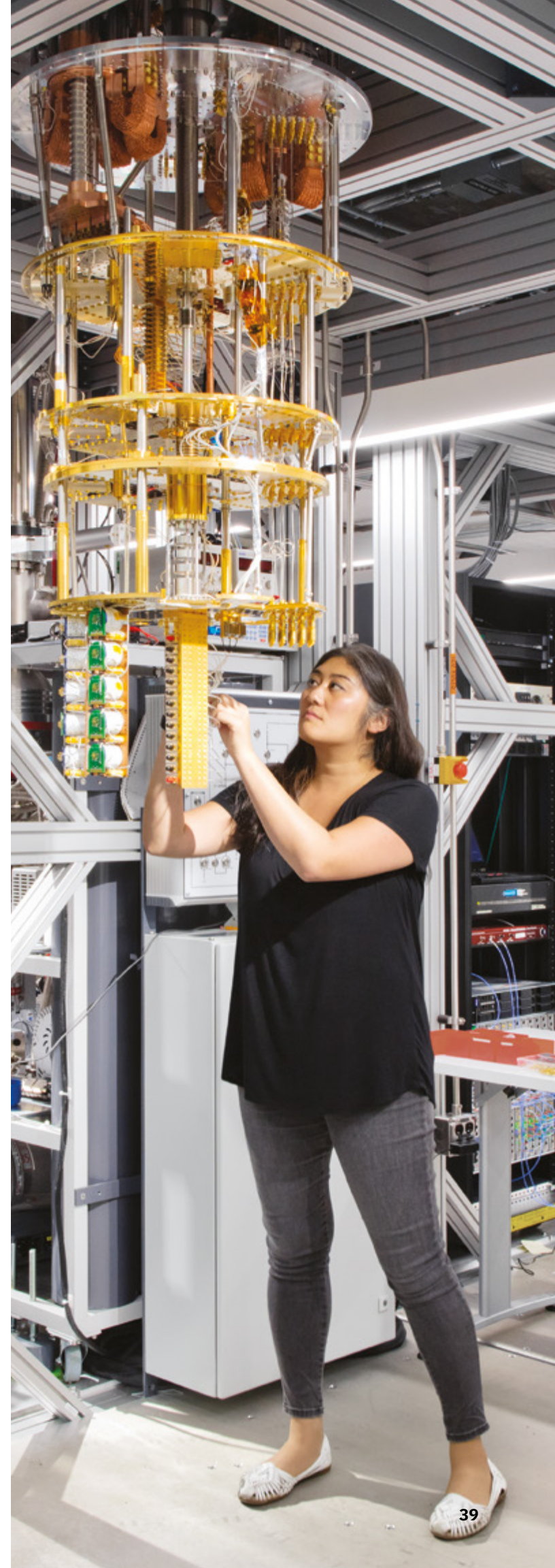
Xanadu Quantum Technologies

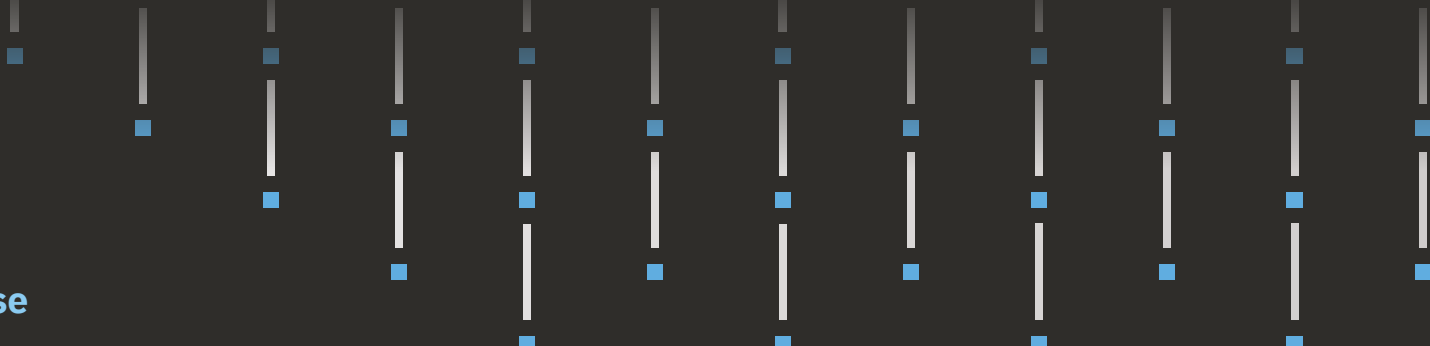
Fluxos de trabalho inteligentes são modelos elaborados de forma criativa com uma nova abordagem quanto aos dados e à tecnologia inovadora. Estabelecer esses fluxos de trabalho e aprimorar os requisitos de IA, dados e recursos de nuvem pode beneficiar seus negócios agora e, ao mesmo tempo, criar a base para a quantum de amanhã (veja a Perspectiva, “Fluxos de trabalho inteligentes” na página 40). Outras considerações incluem a realidade do rompimento da quantum computing com a criptografia de Rivest-Shamir-Adleman (RSA) e a criptografia de curva elíptica (ECC), e a necessidade de migrar para a criptografia quantum segura existente.³⁰

Pela sua própria definição, os fluxos de trabalho inteligentes são inerentemente baseados em uma combinação de tecnologias, e eles podem e devem abranger a quantum computing. Basicamente, os fluxos de trabalho inteligentes prosperam em uma arquitetura aberta e fracamente acoplada, capaz de *conectar* aplicações e abordagens técnicas. Sua capacidade de utilizar ambientes híbridos é crítica, dado que a maioria das organizações está acessando a quantum computing na nuvem, não desenvolvendo a própria infraestrutura. Mesmo que a sua empresa utilize uma abordagem mais simplificada de processos, estabelecer alguns fluxos de trabalho inteligentes como base pode ser uma excelente transição para a quantum computing.

Na estrutura de fluxo de trabalho inteligente, à princípio, a quantum computing pode ser intuitivamente pensada como um acelerador, uma tecnologia impulsionadora para suplementar a computação clássica quando é necessário ter um poder adicional. Na realidade, no entanto, a quantum computing é um *catalisador* para revoluções profundas de modelo de negócios no mercado, capaz de gerar serviços e modos de consumo inovadores.

Para que as revoluções aconteçam, as empresas precisam desenvolver uma bússola estratégica que as direcione para oportunidades ideais. Elas também precisam reforçar a capacidade de aplicar a quantum computing no âmbito de ambientes de negócios clássicos do ponto de vista da tecnologia, dos processos e das pessoas. Em resumo, as empresas precisam estabelecer uma infraestrutura receptiva à quantum computing, quando a tecnologia se concretizar plenamente, elas estarão preparadas.





Perspectiva Fluxos de trabalho inteligentes como base para a aceleração da quantum computing³¹

Desenvolver fluxos de trabalho inteligentes pode ajudar você a se preparar para a quantum computing, e suas propriedades de melhoria de negócios podem criar benefícios organizacionais agora. As quatro etapas abaixo descrevem um amplo modelo para incorporar tecnologias emergentes, administrar dados e adotar um ambiente híbrido de multicloud. Com essa infraestrutura em vigor, as organizações podem progredir na análise de subfluxos de trabalho para obter oportunidades de aceleração da quantum computing.

1.
Incorpore tecnologias emergentes, incluindo IA e aprendizado de máquina, para mudar as formas de trabalho.

Aplique outras tecnologias emergentes para construir fluxos de trabalho altamente dinâmicos e inteligentes que mudam radicalmente a forma como o trabalho é feito e novas experiências são projetadas. Em particular, reforce as capacidades de IA e aprendizado de máquina, que colaboram excepcionalmente bem com a quantum computing.

2.
Obtenha valor com seus dados

Utilize dados selecionados em fluxos de trabalho inteligentes para encontrar os conjuntos de valor mais importantes. Estabeleça um controle robusto para gerar confiança em seus dados e modelos de IA a fim de que as decisões possam ser levadas às linhas de frente da empresa. Identifique componentes de subfluxo de trabalho de complexidade excepcional que se beneficiariam com algoritmos quânticos.

3.
Implemente com a multicloud híbrida

Use a jornada para uma multicloud híbrida a fim de acessar dados e dar a eles um novo uso, além de hospedar fluxos de trabalho inteligentes e modernizar aplicações de forma aberta e sem riscos. Aproveite esta flexibilidade para buscar oportunidades de experimentar a quantum computing baseada em nuvem.

4.
Avalie os subfluxos de trabalho mais adequados à aceleração da quantum computing.

Explore opções relacionadas a emuladores quânticos, ou melhor ainda, participe de um ecossistema de quantum computing de software livre. Essa comunidade fornece acesso à quantum computing em uma escala gerenciável, fornecendo um “laboratório” de baixo comprometimento para experimentação. O uso das computações clássica e quantum deve ser coreografado para que a quantum computing aumente as funções clássicas de forma mais eficaz.

Para chegar neste ponto, são necessárias capacidades importantes (veja a Figura 11). Nenhuma delas consiste em dominar a tecnologia quantum em si. Em vez disso, trata-se de melhorar as habilidades corporativas, as capacidades técnicas e as estratégias prospectivas para criar raízes e permitir o sucesso da revolução da quantum computing.

A boa notícia: usar uma abordagem pragmática, ágil e iterativa para a quantum computing agora não se trata somente de colher recompensas futuras. Esta estratégia pode começar a fornecer benefícios significativos para os negócios hoje. Por exemplo, configurar um modelo moderno de entrega dinâmica e uma plataforma de inovação aberta por meio de uma multicloud híbrida pode produzir retornos significativos em sua empresa clássica.³² Em paralelo, eles irão aprimorar sua capacidade de integrar facilmente a quantum computing quando ela estiver pronta para a produção.

Ao aprimorar o ambiente de computação clássico agora, investindo também em experimentação e em fluxos de trabalho prontos para quantum, é possível melhorar o posicionamento para acelerar seu caminho para a Vantagem Quantum.

Figura 11

Em terra firme
Criando a base para a quantum computing



A busca de talentos do ecossistema de quantum computing

Nesta economia global complexa, nenhuma empresa pode fazer tudo sozinha. Nós contamos com parceiros, conhecimento específico e ecossistemas para utilizar o melhor do que está disponível, e para explorar e demonstrar o nosso próprio valor agregado e diferenciado.

A velocidade com a qual a quantum computing está melhorando e se expandindo torna difícil para muitas empresas acompanhar as novidades, e o custo de “fazer tudo sozinho” pode ser um impeditivo. Ser parte de um ecossistema de quantum computing pode fornecer acesso a essa tecnologia que pode não ser acessível de outra forma. E esses ecossistemas também fornecem uma janela para um melhor entendimento das implicações da quantum computing e de como elas se relacionam com os seus problemas de negócios.

Determinar exatamente quais são esses problemas de negócios e como a quantum computing pode ajudar requer conhecimento. As organizações podem ter dificuldade para criar a própria equipe interna de quantum computing, e isso é necessário até certo ponto. No entanto, os ecossistemas fornecem um auxílio valioso ou até mesmo substituem o talento interno de quantum computing necessário, especialmente com relação a conhecimentos técnicos profundos.

Devido à disponibilidade limitada, as tentativas de desenvolver ou de trazer habilidades de quantum computing para a empresa são muito desafiadoras. Os ecossistemas mais avançados, no entanto, já estão estocando talentos.

Ter as seguintes questões em mente pode ajudar a alinhar de forma efetiva os ecossistemas e as necessidades de talento.³³

Qual é o seu tipo de problema de negócios? É possível que você ainda não tenha o conhecimento necessário para explicar seu problema em termos de capacidades quânticas, mas ele tem uma perspectiva mais ampla, sem dúvidas. O seu problema é um problema de simulação baseado em química? Você está procurando por algoritmos quânticos que melhorem o aprendizado de máquina? Talvez o seu interesse primário seja segurança na era quântica? Os ecossistemas prospectivos são mais eficazes quando já estão trabalhando em casos de uso relevantes para o seu problema específico e incluem especialistas que entendem os problemas de seu setor.

Quem são as organizações e pensadores líderes do mundo com relação à quantum computing e aos seus problemas de negócios? Devido ao rápido ritmo de inovação da quantum computing, é preciso ter parceiros na vanguarda dos avanços científicos e de sua aplicação na resolução de problemas de negócios (veja a Figura 12). A diferença entre estabelecer parcerias com os principais protagonistas e com agentes secundários poderia significar a diferença entre fazer parte de um cenário competitivo no qual o vencedor ganha todas as vantagens e ser aquele que foi deixado para trás.

“No momento, estabelecer parcerias para obter habilidades quânticas faz muito mais sentido do que adquiri-las.”

Doug Kushnerick

anteriormente na Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research

“Eu estou gerenciando capital intelectual que ainda nem sequer está formado.”

Irfan Siddiqi

Diretor do departamento de aceleradores de sistemas quantum de energia (DoE) National Quantum Information Science (QIS) Research Center

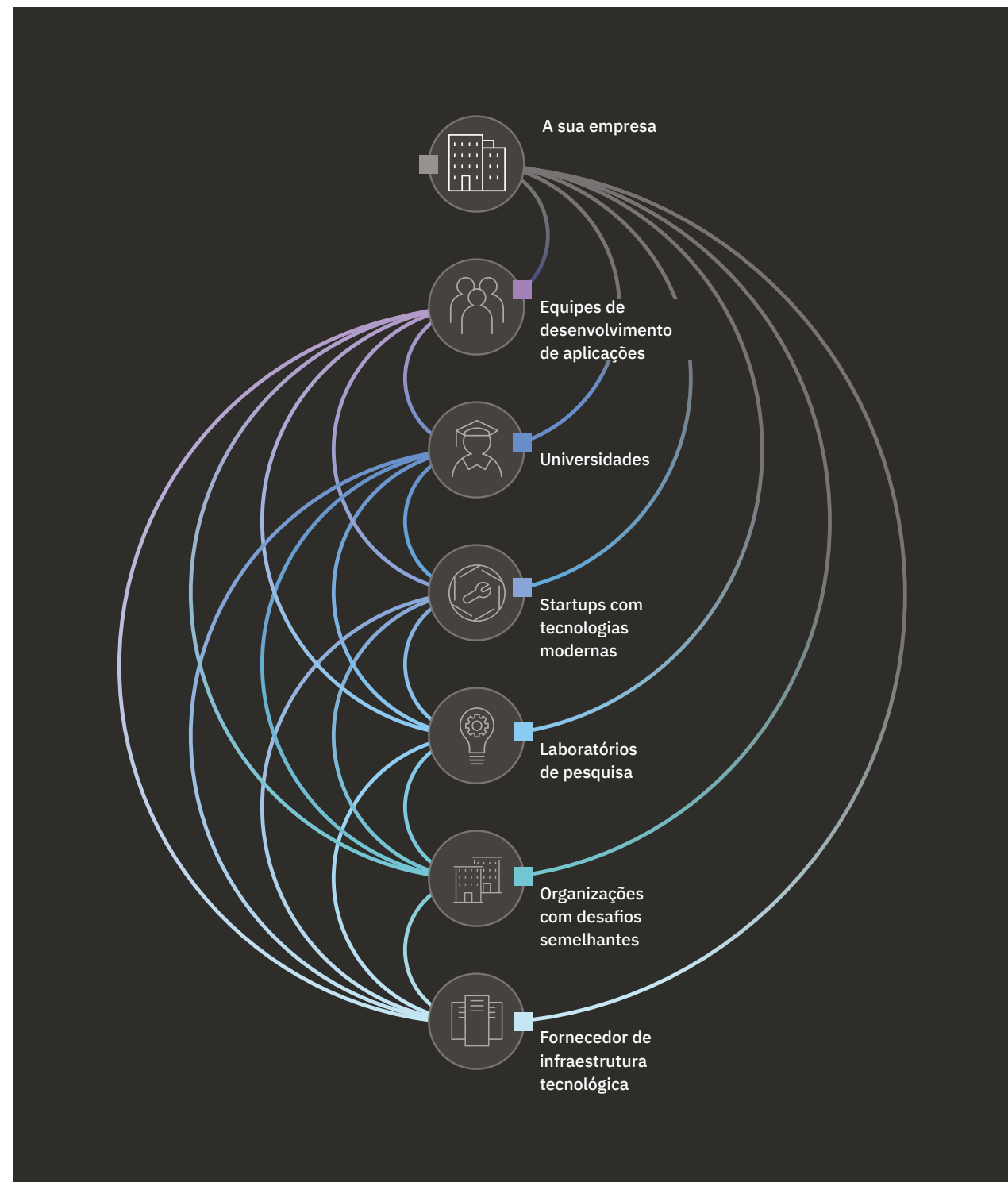
Qual é a combinação ideal de consultores e equipe interna?

O ecossistema de quantum computing ideal contém a combinação certa de participantes do ecossistema focados em seus problemas de negócios ao lado de profissionais técnicos e do seu setor, incluindo:

- **Um fornecedor de tecnologia de quantum computing** que oferece acesso fácil a sistemas de quantum computing baseados em nuvem, um modelo de programação de software livre, recursos educacionais como tutoriais e trabalhos de pesquisa, pesquisadores de quantum computing, consultores de quantum computing, suporte técnico e uma comunidade colaborativa e ativamente engajada para enfrentar os desafios da quantum computing.
- **Desenvolvedores de quantum computing** que entendem o desenvolvimento de aplicativos de quantum computing com código de software livre e acesso a bibliotecas de desenvolvimento de aplicativos e têm acesso a hardwares reais de quantum computing.
- **Parceiros acadêmicos e universidades** que conduzem pesquisas de quantum computing relevantes e desenvolvem especialistas em quantum computing no início da carreira que podem, em última instância, ser contratados para a sua equipe.

Figura 12

Onde estão seus talentos ideais?
Montando a combinação correta de constituintes do ecossistema



Componentes da solução quantum Habilidades necessárias

Serviços técnicos	Conhecimento geral de tecnologia
Aplicativos	Arquitetura e desenvolvimento de aplicativos
Bibliotecas específicas de caso uso	Conhecimento do setor/domínio
Bibliotecas de desempenho	Algoritmos de sistema de quantum computing
Compiladores, otimizadores, simuladores	Matemática avançada, conhecimento em sistema computacional quantum
Linguagem assembly e drivers	Física quantum, conhecimento em sistema computacional quantum
Hardware de quantum computing	Física quantum, química, engenharia

Se o desenvolvimento de pelo menos algum talento interno é uma prioridade, um primeiro passo pode envolver a busca de plataformas de comunidade. Esses ecossistemas “práticos” dão aos desenvolvedores acesso a ferramentas para criar e executar algoritmos de quantum computing em hardwares ou simuladores de quantum computing reais. Por exemplo, a comunidade de IBM quantum computing oferece o modelo Qiskit de software livre. Essas plataformas estão abertas para estudantes (a maioria dos participantes), e equipes de TI organizacionais.

Uma opção menos aprofundada é formar pequenas equipes para iniciar a identificação de problemas, sejam eles avanços que revolucionam o setor ou aceleradores de fluxo de trabalho, nos quais a quantum computing pode desempenhar um papel. Os membros da equipe não necessitam de conhecimentos de quantum computing de nível Ph.D., mas precisam de um treinamento em quantum computing suficiente para avaliar os recursos de quantum computing com relação às necessidades organizacionais e do setor (veja a Figura 13).

Qual é o talento ideal para ser contratado na área de quantum computing? Pesquisadores do Rochester Institute of Technology e da Universidade do Colorado em Boulder forneceram algumas ideias interessantes. Eles entrevistaram gerentes de mais de 20 empresas de tecnologia quantum baseadas nos EUA e as respostas mostraram dois caminhos comuns.

Figura 13

Preparados para o sucesso

Quais componentes e competências podem ajudar você a obter maior treinamento em quantum computing?

“O setor de semicondutores e quantum computing nos EUA enfrenta desafios para adquirir graduados de STEM, primeiro por ter de competir por engenheiros com empresas de software e mídia social reconhecidas e segundo por ter sofrido uma diminuição no número de graduados em comparação com outros países nos últimos 30 anos.”

Ajit Manocha

Presidente e CEO
SEMI

Primeiro, as organizações disseram que estavam procurando candidatos que tinham “consciência” quantum. Isso abrangia um amplo entendimento dos conceitos de quantum computing e capacidade de discutir e aplicar esses conceitos, o que chamamos de treinamento quantum. As perspectivas não apontavam necessariamente a necessidade de um conhecimento profundo das equações e da teoria.³⁴ Nossos especialistas na IBM apontam que esse treinamento quantum pode, muitas vezes, ser uma requalificação, envolvendo aprender quantum computing suficiente para aumentar o conhecimento do domínio e compreender como integrar a quantum computing nessa área.³⁵

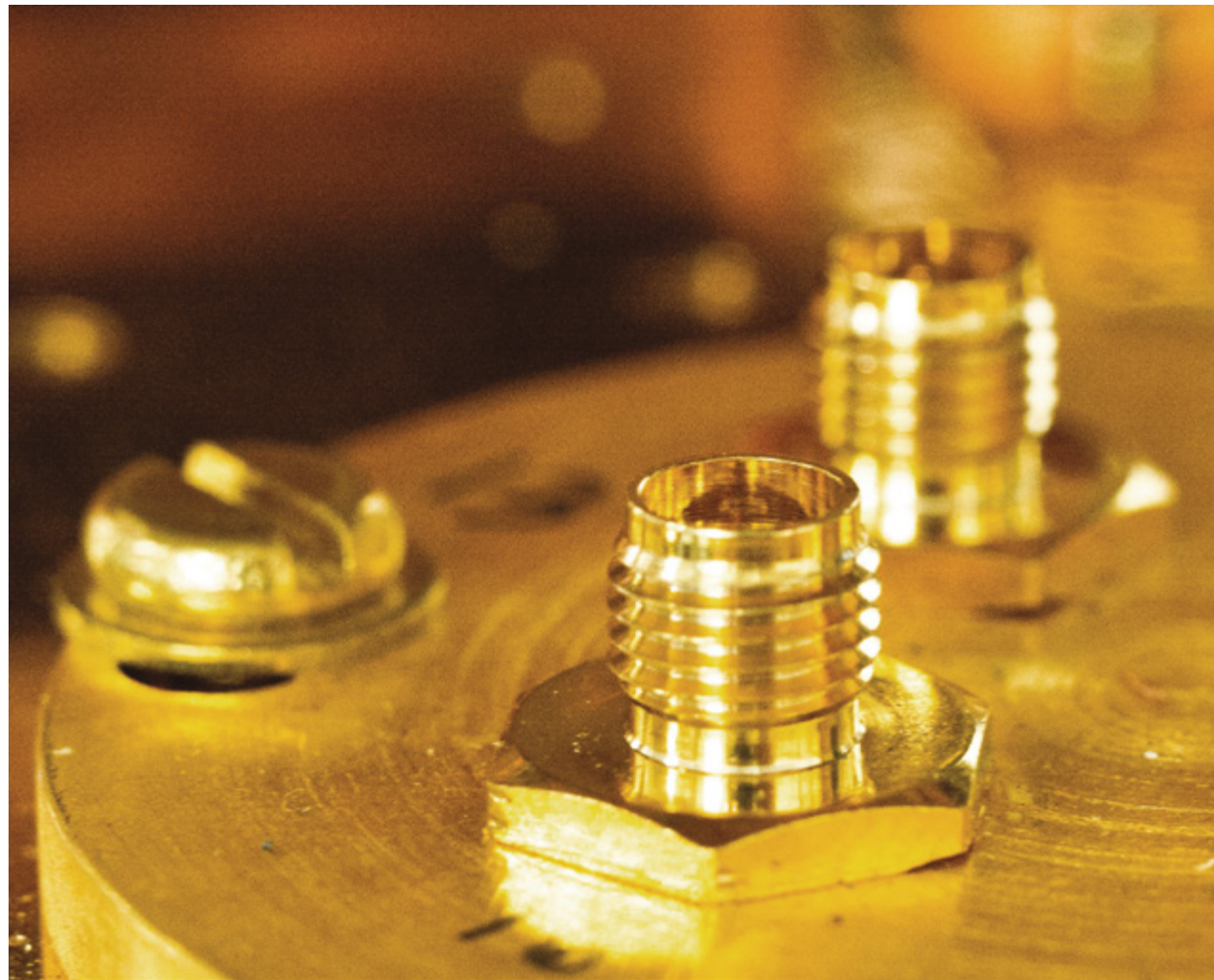
Segundo, os candidatos que tinham habilidades práticas de laboratório foram favorecidos em relação àqueles sem nenhuma.³⁶ Um especialista de mercado da IBM estima que existem hoje apenas cerca de 3.000 trabalhadores qualificados em quantum computing, e essa base precisa ser dobrada ou quadruplicada.³⁷ Ainda em outubro de 2018, o *New York Times* relatou que menos de 1.000 pessoas em todo o mundo estavam fazendo pesquisas de liderança no campo da quantum computing.³⁸

Adquirir tal nível de profunda qualificação técnica pode ser um desafio, especialmente ao competir com universidades, startups e fornecedores. Esta falta de talentos pode impulsionar o apelo por ecossistemas em operação com as próprias equipes quantum talentosas.

“Se algo atrasar a Quantum Decade, é improvável que seja a tecnologia. Será o talento. Há o acesso ao capital, muito interesse, e nós teremos a tecnologia. É das pessoas que nós precisamos.”

Prineha Narang

Professora assistente de ciência de materiais computacionais
na Universidade de Harvard





■ Perguntas que devem ser feitas

Primeira pergunta

Como a resolução desses problemas aparentemente impossíveis de resolver remodelaria seu setor?

Que tipos de experimentos de quantum computing poderiam ser realizados agora em busca desses objetivos?

Terceira pergunta

Fluxos de trabalho inteligentes que usam tecnologias como automação, blockchain, IA, 5G, nuvem e borda criam um ambiente ideal para a quantum computing se conectar.

Como o estabelecimento desta base pode beneficiar seus negócios agora?

Segunda pergunta

Como unir as computações quantum e clássica em um fluxo de trabalho específico?

Quais subseções de fluxo de trabalho são mais adequadas para a quantum computing?

Como esta avaliação altera as perspectivas e possibilidades relacionadas aos seus processos?

Quarta pergunta

Quais etapas podem ser seguidas para estimular o treinamento em quantum computing em sua empresa?

Com quais ecossistemas é possível estabelecer parceria para obter um conhecimento em quantum computing “profundamente tecnológico”?



Insights

Um processo, não um destino

Quando a quantum computing demonstra sua superioridade em relação à computação tradicional para um problema específico, isso é Vantagem Quantum. Ela é gradual, vem em ondas, mas acaba por aprimorar a tecnologia.

Três classes de problemas nos quais a quantum computing se sobressai

A quantum computing é especialmente astuta em simulações da natureza; problemas algébricos, incluindo aprendizado de máquina; equações diferenciadas e lidando com matrizes, além de resolvendo problemas de procura e de gráficos quânticos.

A “matriz de priorização” da quantum computing

Avaliar o impacto comercial potencial de aplicações de quantum computing pode ser desafiador. Nós mostramos como avaliar quais aplicações de quantum computing em potencial estão melhor posicionadas para proporcionar ótimos benefícios de negócios.

Capítulo 3

Vantagem Quantum e a busca do valor comercial

A Vantagem Quantum, conforme apresentado na página 7, ocorre quando uma tarefa de computação de interesse para os negócios ou a ciência pode ser realizada de forma mais eficiente, mais econômica ou com melhor qualidade utilizando computadores quantum. Neste caso, os computadores quantum em conjunto com os sistemas clássicos podem oferecer um desempenho significativamente melhor do que os sistemas clássicos sozinhos.

No entanto, a Vantagem Quantum não é um evento dramático, em que tudo acontece repentinamente. Ela será mais ambígua, progredindo aos poucos, mas irá aprimorar a tecnologia por fim em busca do valor comercial concreto. Cada caso de uso tem sua própria linha de tempo exclusiva para a Vantagem Quantum. O parceiro do sistema ou ecossistema de quantum computing específico com o qual você está envolvido também pode influenciar nessa linha de tempo e nessa vantagem. Felizmente, a Vantagem Quantum pode se beneficiar de um efeito dominó no qual os sucessos em um caso de uso podem ter efeito cascata em outros.

“A aceleração exponencial pode ocorrer após um caso de uso inicial. O que aprendemos com esses primeiros casos de uso pode ser aplicado a outros.”

Sabrina Maniscalco

Professora de Informação Quantum e Lógica, Universidade de Helsinqui
CEO, Algorithmiq Oy

À medida que avaliamos o tempo necessário para a Vantagem Quantum, é útil entender um pouco mais sobre os sistemas atuais e para onde estamos indo. Os qubits de hoje estão sujeitos a erros por limitações de hardware e pelo “ruído” do ambiente circundante. Se os qubits supercondutores, que vivem em uma temperatura próxima do zero absoluto, não estiverem protegidos desse ruído, no vácuo, vibrações ou fótons perdidos que atingirem o dispositivo poderão arruinar um cálculo. O mesmo vale para os efeitos de aquecimento e ambiente. Lembre-se, a quantum computing é construída sobre a física da mecânica quantum, e esse é o modelo para as interações no nível atômico, ou seja, de elétrons e fótons. O acoplamento ao ambiente pode perturbar o que está sendo feito no sistema.

Mais precisamente, os qubits no hardware quantum são chamados de *qubits físicos*. Atualmente, os casos de uso de quantum computing são ativados pelos tipos de algoritmos disponíveis para nós, mas estamos limitados a implementá-los usando qubits físicos ruidosos. Embora esperemos que seja possível alcançar os primeiros exemplos de Vantagem Quantum com qubits físicos, precisaremos migrar para qubits lógicos a fim de atingir o valor integral da quantum computing. Os qubits lógicos são criados combinando softwares e centenas de qubits físicos

para implementar a correção de erros. Com esse tipo de qubit, erros provenientes de ruídos que afetam o hardware subjacente podem ser detectados e corrigidos. Implementar a correção de erro quantum é um objetivo crucial para esta década.

Ao avançar na Quantum Decade, uma questão importante precisa ser abordada: à medida que os resultados da quantum computing realmente superam os da computação clássica, como você os avalia? Eles estão bem além da validação de técnicas e computadores tradicionais. Ao realizar a pesquisa teórica, o problema pode não ser tão consequente. No entanto, em cenários que impactam o funcionamento e a segurança no mundo real, esta é uma questão assustadora.

Nós necessariamente precisamos nos afastar da validação clássica, incapaz de acompanhar o avanço, para usar diversos tipos de quantum computing. Isso poderia significar comparar diferentes modos de computadores quantum ou, até mesmo, diferentes ecossistemas. A validação e a quantificação dos resultados poderia, em última análise, elevar alguns sistemas em relação a outros em termos de confiabilidade e precisão. Isso é mais um fator que pode influenciar ondas de Vantagem Quantum.

“Para que a quantum computing seja uma vantagem, é preciso ter confiança nos resultados. Pense assim... Se um sistema computacional quantum desenvolvesse um paraquedas, você estaria disposto a vesti-lo e pular de um avião?”

“Por exemplo, três instalações quantum diferentes obteriam as mesmas respostas, com taxas de erro e conjuntos de respostas semelhantes? É por meio do consenso que se obtém confiança.”

Peter Tsahalís

CIO de Serviços Estratégicos e Tecnologia Avançada
Wells Fargo

Na IBM, vemos essas ondas alinhadas em três fases (veja a Figura 14).

- **A primeira onda é pequena e discreta.** Pode haver burburinhos em algumas partes do setor e da pesquisa acadêmica, mas os resultados gerais não são muito divulgados. Aqueles com a perspicácia de experimentar a tecnologia podem ver valor, além de formas de melhorar as aplicações para outras áreas e novos algoritmos.
- **A segunda onda é grande.** Os avanços são mais estruturados e frequentes. Conversas sobre a quantum computing estão ganhando força. Mais organizações estão se alinhando com os ecossistemas, experimentando ambientes de serviços de quantum computing baseados em nuvem e testando a quantum computing com sucesso crescente.
- **A terceira onda? Aí vem o tsunami.** Muita coisa pode mudar, e as indústrias são transformadas. O aprendizado quantum de máquina vem à tona, e os avanços se tornam mais complexos e revolucionários. Aqui, a Quantum Decade atinge uma crescente, com um forte pico em cálculos quânticos com erros corrigidos.

Por fim, a terceira onda confere a Vantage Quantum às organizações, aos usuários finais e à sociedade em geral. Como os aviões podem ser fabricados com metais menos corrosivos e voar com mais segurança e menos manutenção? Como o setor médico pode personalizar melhor os diagnósticos, tratamentos e medicamentos (veja o estudo de caso, "IBM e Cleveland Clinic" na página 22)?

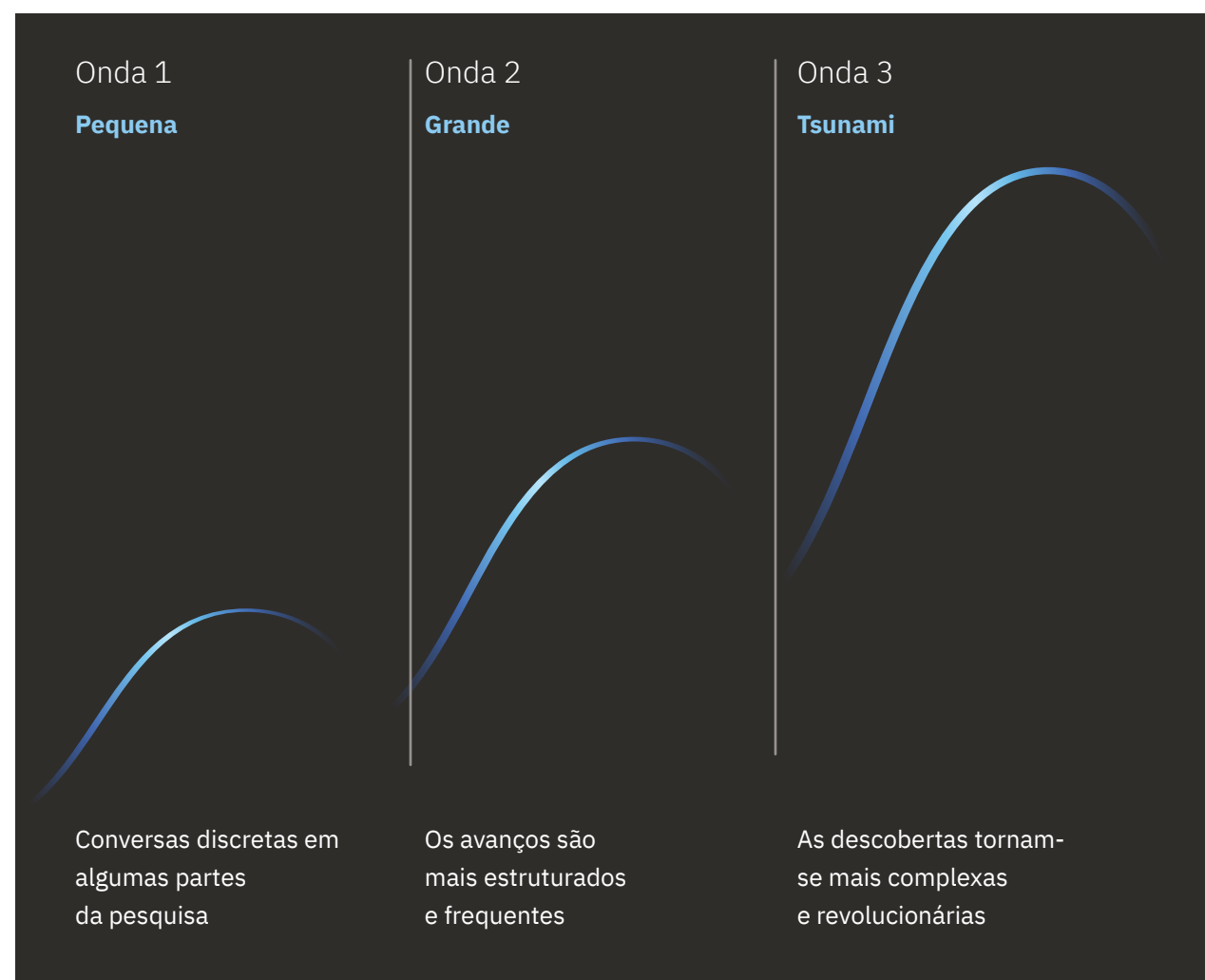
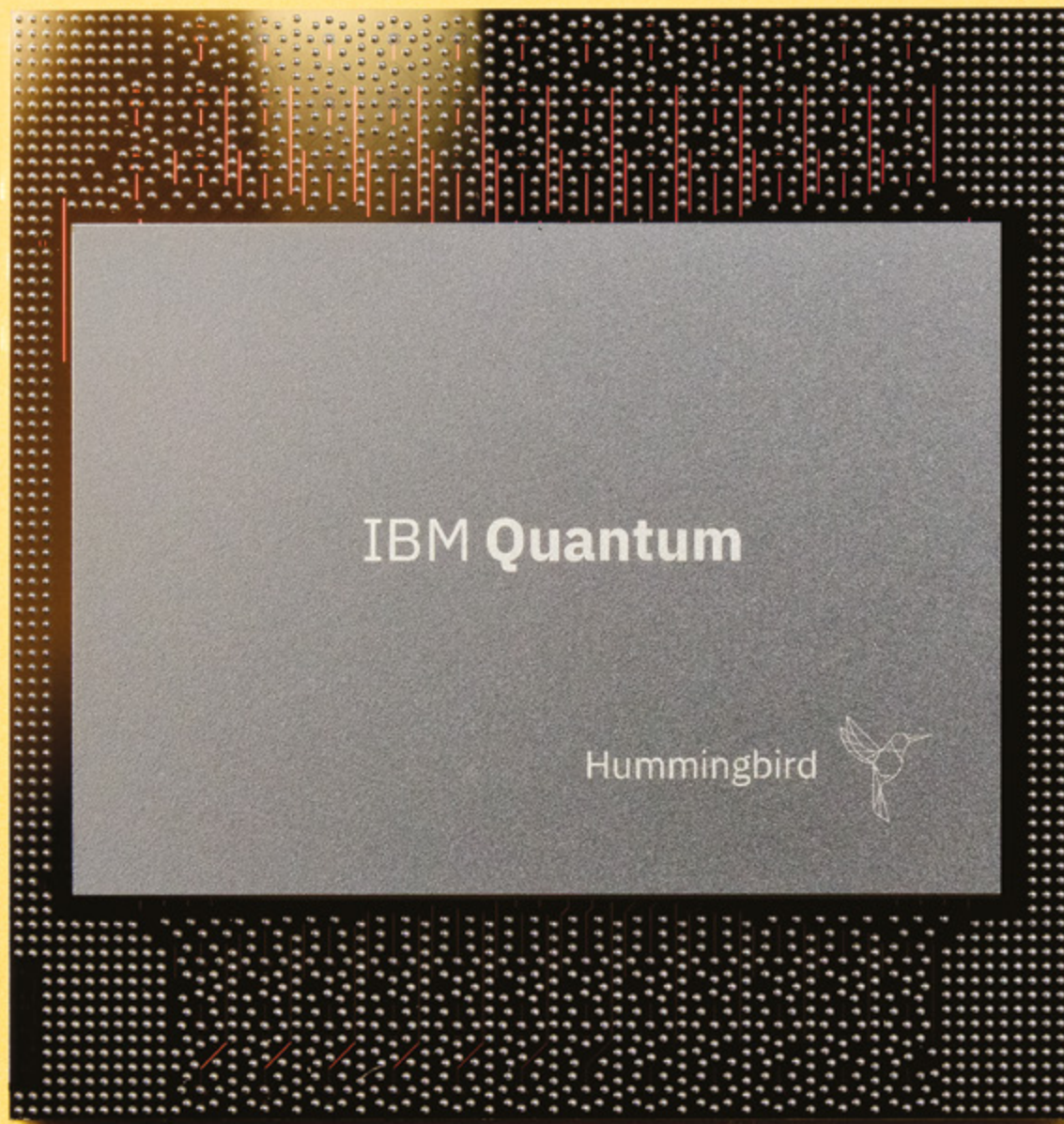


Figura 14

As três ondas

Da onda pequena ao tsunami



IBM Quantum

Hummingbird



● O processador quantum do IBM Quantum Hummingbird de 65 qubits, um pouco maior do que uma moeda de um centavo dos EUA

Para colocar em perspectiva, alguns especialistas acreditam que a quantum computing está onde a IA esteve em 2010. Em virtude da natureza exponencial da tecnologia, a quantum computing tem o potencial de decolar ainda mais rápido.

“Em 10 anos, nós teremos alcançado o que levou de 40 a 50 anos na computação clássica. Nos anos 60, 70 e 80, a ciência da computação era um nicho, quase como uma arte obscura. Mas até 2030, nós teremos descoberto como as empresas podem usar a quantum computing, sem nenhum conhecimento profundo de como ela realmente funciona.”

Ilyas Khan

Fundador e CEO
da Cambridge Quantum Computing

No entanto, isso exigirá investimentos em casos de uso cuidadosamente considerados para revelar “aplicações incríveis” de quantum computing por domínio do setor. Para se ter uma ideia da avaliação do potencial comercial da quantum computing para o setor, analisaremos como ela pode ajudar classes específicas de problemas e, em seguida, realizar uma abordagem metódica para priorizar casos de uso. Também incluímos um extenso conjunto de Guias do Setor detalhando casos de uso e cenários alinhados ao setor na página 69, consistindo em guias detalhados do que a quantum computing poderia significar para você.

Em última análise, a Vantagem Quantum resume-se a resultados.

“No final do dia, os executivos precisam de recursos. Eles se preocupam com a resposta dos negócios. Eles não se importam com a forma de chegar lá, e isso vai ser sempre assim. Você não aborda os líderes de negócios com soluções quantum propriamente ditas. Você os aborda com maneiras de melhor otimizar os negócios deles.”

Christopher Savoie

Fundador e CEO
Zapata Computing

O melhor da quantum computing:
três classes
de problemas³⁹

O que a comercialização da quantum computing poderia significar para a sua empresa? Quais tipos de problemas são os melhores candidatos para a Vantagem Quantum?

No médio prazo, a quantum computing poderia conferir benefícios de negócios em três áreas: simulação, procura e problemas algébricos (veja a Figura 15).

Simulação quantum de processos naturais

Como a mecânica quantum descreve como a natureza funciona a um nível fundamental, a quantum computing é bem adequada para modelar processos e sistemas que ocorrem na natureza (veja o estudo de caso, “Explorando a simulação molecular da água”).

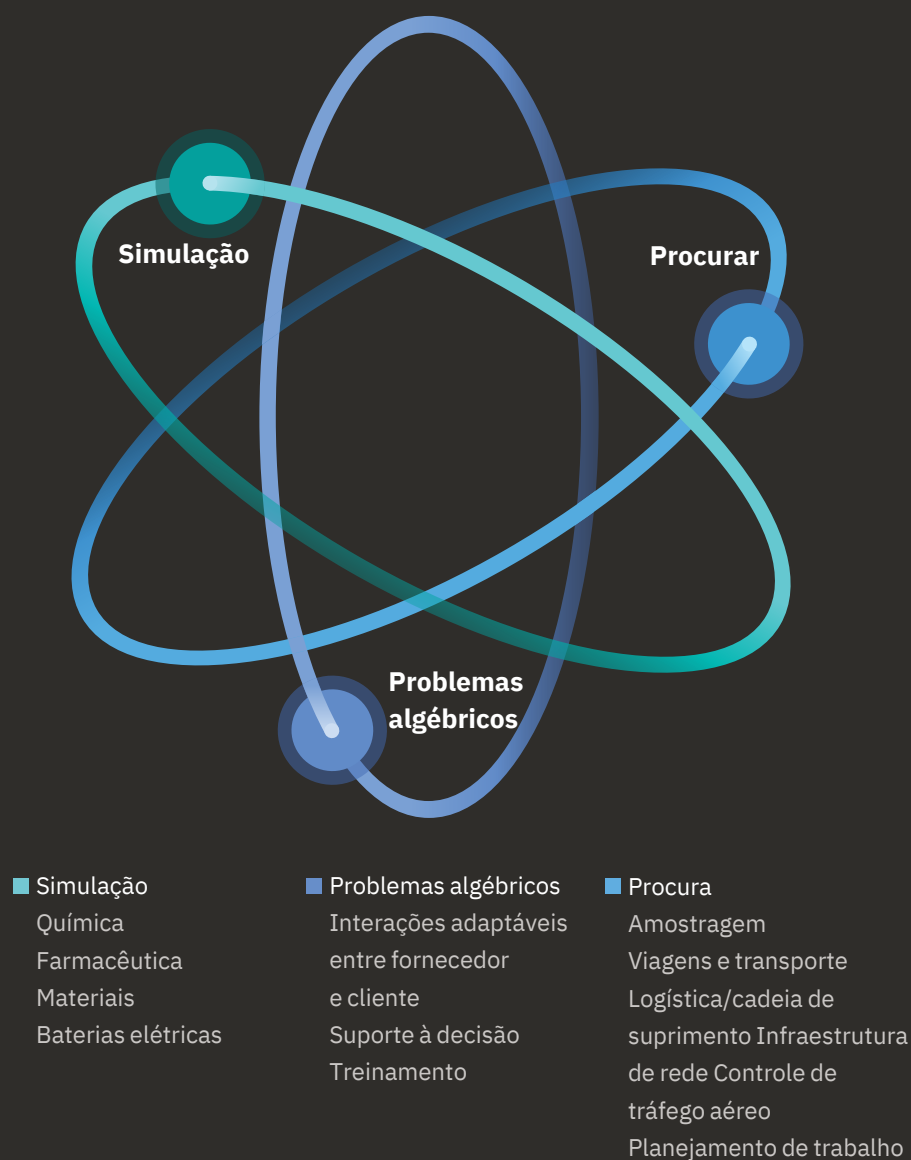


Figura 15

Onde a borracha se encontra com a estrada

Utilizações antecipadas da quantum computing

Pesquisadores da IBM
Explorando
a simulação molecular
da água⁴⁰



O futuro não é apenas quantum computing. Pelo contrário, é a convergência da quantum computing, da computação clássica e da IA para oferecer poder de transformação. Combinar cálculos clássicos e quantum em formas não triviais, trocando um pelo outro, pode melhorar os recursos de qualquer empresa por si só, além de aumentar as possibilidades dos recursos disponíveis.

Os métodos aqui descritos aproveitam recursos clássicos e quantum para capturar correlações quantum e *dobrar* o tamanho do sistema que pode ser simulado em hardwares quantum.

Explorando as simetrias do problema, os pesquisadores da IBM desenvolveram uma técnica para dividir os circuitos quantum em circuitos menores, capturando os aspectos mais desafiadores do cálculo e exigindo apenas metade do número de qubits do circuito integral. Esta estratégia permitiu não só reduzir a quantidade de qubits necessários, mas também tornar os circuitos quantum necessários menores. Cada circuito menor foi executado separadamente em um sistema computacional quantum e as saídas foram combinadas usando técnicas clássicas de pós-processamento.

Os pesquisadores testaram este método em uma simulação molecular da água. Neste caso, as partes dos problemas difíceis de simular poderiam ser reduzidas a 10 orbitais, ou funções de onda. Esses orbitais poderiam ser representados em cinco qubits de um processador IBM Quantum para calcular a energia em estado fundamental da molécula na simulação mais precisa até hoje.

Métodos como este têm potencial de ampliação, fazendo o dobro com os recursos disponíveis, equilibrando cálculos quantum e clássicos para expandir o alcance computacional dos sistemas computacionais quantum. Este método pode comprovar a produtividade em fluxos de trabalho de descoberta de materiais.

Problemas de procura e gráfico

A arte de resolver problemas de otimização envolve procurar a “melhor” solução ou a solução ideal em uma situação em que há muitas respostas possíveis. Veja o exemplo da criação de um planejamento de distribuição de pacotes. Matematicamente, há mais de 3,6 milhões de combinações possíveis para planejar 10 entregas em intervalos de tempo adjacentes.⁴¹ Mas, qual planejamento representa a solução ideal, dadas variáveis como requisitos de sincronização dos destinatários, potenciais atrasos e a vida útil das mercadorias transportadas? Mesmo aplicando técnicas de aproximação, o número de possibilidades ainda é muito grande para um sistema computacional clássico explorar (veja o estudo de caso, “ExxonMobil”).

Como resultado, os computadores clássicos tomam hoje extensos atalhos para resolver problemas de otimização de tamanho significativo. Infelizmente, as soluções frequentemente ficam abaixo do ideal. Negócios que poderiam se beneficiar da otimização de procura e gráfico quantum incluem:


- Empresas de telecomunicações que estão atualizando sua infraestrutura de rede
- Provedores de serviços de saúde que estão otimizando tratamentos de pacientes
- Governos que estão melhorando o controle de tráfego aéreo
- Organizações que desenvolvem escalas de trabalho dos empregados
- Universidades que planejam as aulas.

Embora ninguém ainda tenha fornecido uma prova matemática confirmando que a quantum computing conferirá uma velocidade exponencial para problemas de procura e gráfico, os pesquisadores estão trabalhando para demonstrar isso heurísticamente. As empresas que pensam no futuro já estão explorando a solução de problemas de otimização usando a quantum computing em sua busca para inovar antes da concorrência. A previsão delas poderá ser comprovada após as primeiras demonstrações da Vantagem Quantum na otimização se confirmarem.

Problemas algébricos

Problemas algébricos incluem sistemas lineares de equações, equações diferenciadas necessárias para problemas do setor, problemas relevantes para aprendizado de máquina e operações em matrizes. Problemas matemáticos como alguns métodos de aprendizado de máquina e opções de precificação em finanças envolvem o mapeamento e a avaliação de funções sobre um espaço de parâmetro multidimensional.

O estado dos qubits em um sistema computacional quantum é por si só um complexo espaço de alta dimensão capaz de explorar aspectos de dados inacessíveis aos computadores clássicos. De fato, uma simbiose entre a IA e a quantum computing está começando a gerar um ciclo virtuoso de avanço em ambos os campos. Por exemplo, os algoritmos quantum podem melhorar o aprendizado de máquina na área do armazenamento de dados em cluster.⁴² No entanto, o aprendizado de máquina pode ser usado para entender melhor os sistemas quantum.⁴³ Outros negócios que poderiam se beneficiar nesta área incluem empresas de bens de consumo e de varejo com ofertas de marketing customizadas (veja o estudo de caso, “IBM Quantum e Universidade da Califórnia, pesquisadores de Berkeley” na página 58).



ExxonMobil Investigando o uso da quantum computing para ajudar a otimizar jornadas globais⁴⁴

Como orquestrar dezenas de milhares de navios mercantes atravessando os oceanos para fornecer os bens de consumo que usamos em nossas vidas diárias? Cerca de 90% do comércio mundial depende do transporte marítimo. Mais de 50.000 navios, transportando até 200.000 contêineres cada, se movimentam a cada dia, transportando mercadorias no valor de US\$ 14 trilhões.

Em uma escala internacional, a otimização desta magnitude de rotas de expedição é impossível para os computadores clássicos. Equipes de pesquisa da ExxonMobil e da IBM estão usando este cenário para investigar como mapear de forma eficaz os problemas de otimização para os computadores quantum.

Em 2019, a ExxonMobil foi a primeira empresa de energia a se juntar à IBM Quantum Network, um consórcio de organizações que fornecem acesso a sistemas e ferramentas avançados de quantum computing. A ExxonMobil utilizou os recursos da rede para explorar métodos que mapeiam o roteamento de navios mercantes globalmente para computadores quantum.

A vantagem dos algoritmos quantum está em sua capacidade de reduzir as soluções incorretas e amplificar as corretas. Usando o módulo de otimização quantum Qiskit, a ExxonMobil pretendia testar diversos algoritmos quantum. Dependendo dos aspectos do problema, alguns algoritmos quantum heurísticos tiveram desempenho um pouco melhor do que outros, e a otimização baseada em Variational Quantum Eigensolver (VQE) teve melhor desempenho, dependendo da opção do ansatz (em termos físicos, isto é uma suposição).

Estas investigações podem se aplicar facilmente a outros setores e casos de uso que envolvam restrições de tempo. Cenários poderiam incluir entrega de mercadorias, serviços de compartilhamento de viagens ou gerenciamento de lixo urbano.

**Pesquisadores da IBM
Quantum e da Universidade
da Califórnia, Berkeley
Um algoritmo vencedor
para o aprendizado
quantum de máquina⁴⁵**

Imaginar o aprendizado de máquina em um ambiente de quantum computing é intrigante para os pesquisadores. Nos últimos anos, eles apresentaram algoritmos de aprendizado quantum de máquina que prometiam acelerações quantum em comparação com suas contrapartes clássicas.⁴⁶ A maioria desses algoritmos de aprendizado assumiu o acesso aos dados como estados mecânicos quantum coerentes, *embora o mundo opere com dados clássicos*.

Pesquisadores da IBM Quantum e da Universidade da Califórnia, Berkeley, exploraram a possibilidade de descobrir circuitos que são difíceis para os computadores clássicos e usá-los para fornecer uma vantagem nas tarefas de aprendizado de máquina que requerem apenas o acesso a dados clássicos.

No caso do aprendizado de máquina supervisionado, os pesquisadores neste estudo de caso mapeiam dados para espaços em dimensões, ou espaços de recurso, superiores para trabalhar com eles, e o espaço do estado de diversos qubits é por si só detalhado e de alta dimensão. Em outras palavras, um ambiente quantum leva os dados a essas altas dimensões naturalmente.

Os pesquisadores usaram circuitos quantum para mapear dados clássicos para o espaço dimensional superior de diversos qubits, e para estimar o kernel quantum, que é uma medida de similaridade entre as partes de dados. O kernel estimado foi, então, usado em uma máquina de vetor de suporte clássico para calcular os vetores de suporte que separam os dados.

No final de 2020, os pesquisadores forneceram rigorosa prova de vantagem quantum para um circuito de mapa de recurso quantum sobre todos os possíveis classificadores clássicos binários, exigindo o acesso apenas a dados clássicos. Isso pode ser útil em aplicações como previsão, predição de propriedades por meio de características em dados ou análise de risco. Pela primeira vez, temos a prova teórica formal da Vantagem Quantum no aprendizado de máquina.

Priorizando casos de uso para obter valor comercial⁴⁷

Avaliar o potencial impacto nos negócios das aplicações da quantum computing pode ser um desafio, particularmente dada a complexidade desta tecnologia emergente. Sua organização precisa de uma maneira de avaliar quais aplicações de quantum computing em potencial estão melhor posicionadas para proporcionar ótimos benefícios aos seus negócios.

Uma “matriz de priorização” de quantum computing ajuda a lidar com esse dilema. Executivos de diversas disciplinas em sua empresa, incluindo estratégia, operações, inovação, TI e risco, podem avaliar o impacto potencial da quantum computing em seus domínios, priorizar aplicações de quantum computing e, posteriormente, medir a Vantagem Quantum à medida que a sua empresa passa da adoção antecipada para ao uso corrente da quantum computing.

Nossa matriz de priorização categoriza as aplicações de quantum computing em quatro categorias distintas:

As aplicações "Early Bloomer"

são as mais possíveis de implementar hoje.

As aplicações "Late Bloomer"

prometem Vantagem Quantum significativa no futuro.

As aplicações "Wild Card"

podem ou não entregar vantagem comercial clara.

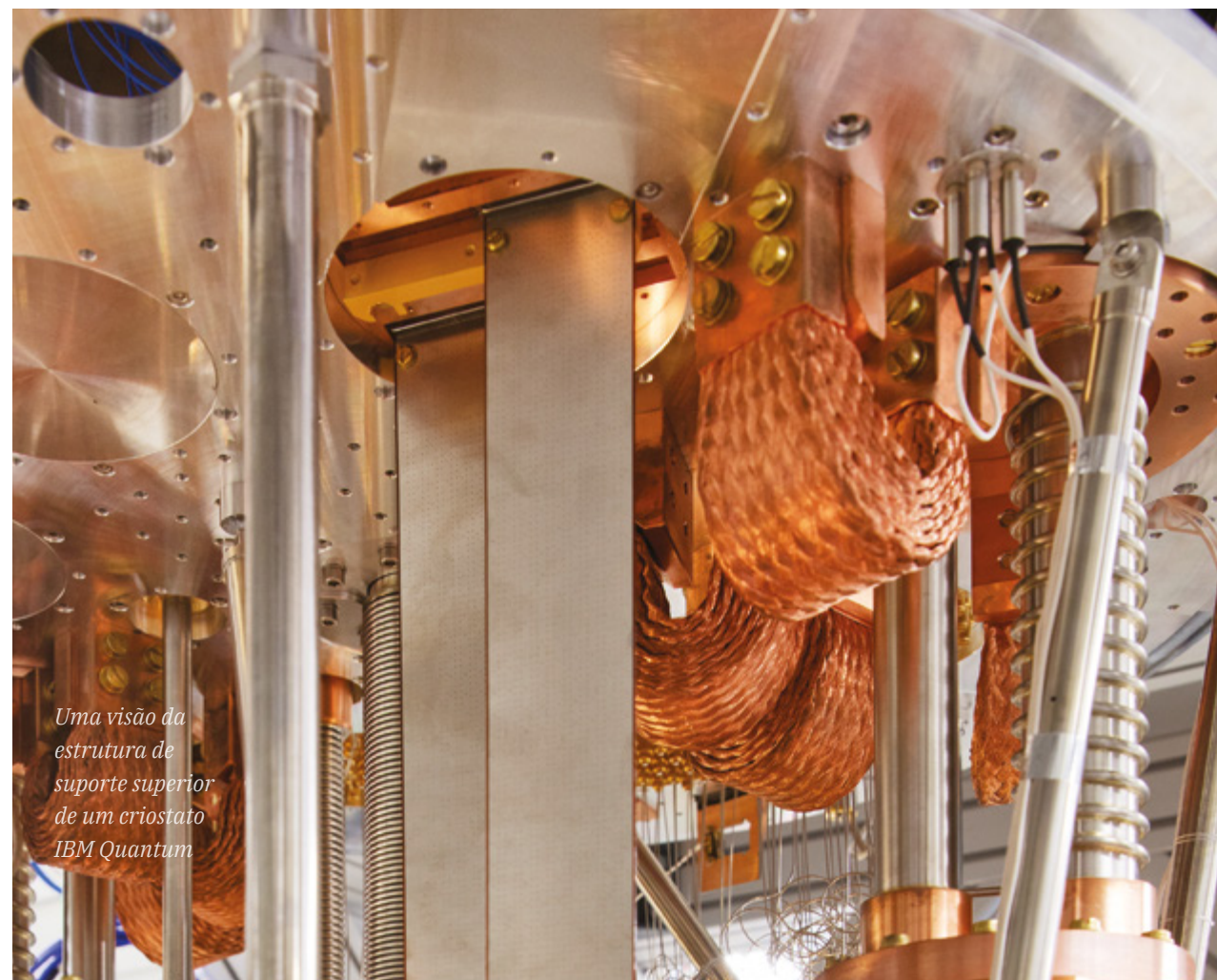
As aplicações "Mature Industry"

podem fornecer vantagem competitiva em uma escala de negócios.

“Tudo se resume a encontrar a melhor aplicação e o problema que a quantum computing pode resolver para o seu setor. Pode não ser óbvio, assim como nos primeiros tempos da Internet, mas trata-se de casos de uso realizáveis, não de problemas mirabolantes ou misteriosos.”

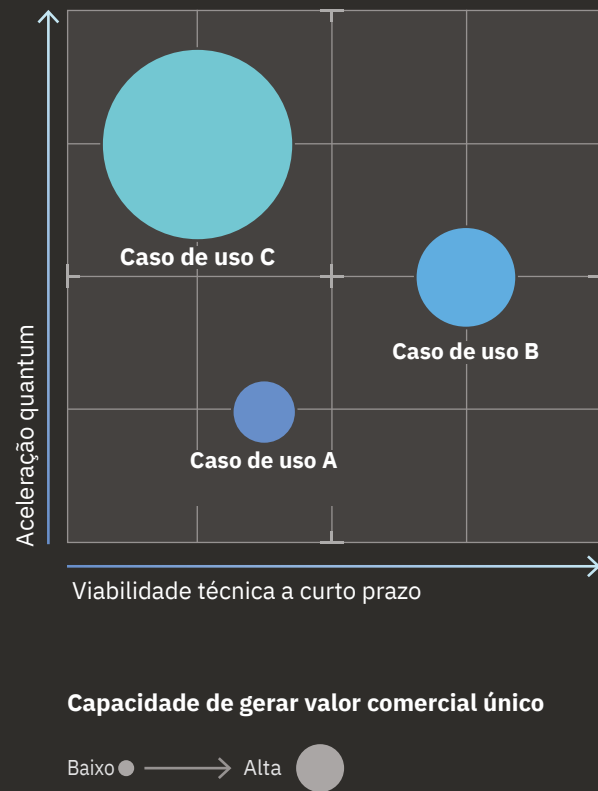
Todd Hughes

Director Técnico, Projectos Estratégicos e Iniciativas
CACI



Uma visão da estrutura de suporte superior de um criostato IBM Quantum

Um modelo de priorização testado⁴⁸



Nossa matriz de priorização da quantum computing ajuda os executivos a avaliar cada aplicação em três dimensões (veja a Figura 16):

Velocidade quantum

Capacidade teórica de fornecer vantagem tecnológica em comparação com as soluções de computação clássica (Eixo Y).

Viabilidade técnica a curto prazo

Prontidão operacional (Eixo X).

Impacto potencial relativo nos negócios por caso de uso

Capacidade de gerar valor comercial exclusivo para uma empresa específica (tamanho da bolha).

Priorizar as aplicações de quantum computing desta forma fornece uma visão geral abrangente do portfólio, criando gráficos visuais de trocas de decisão de uma organização. Como resultado, o cliente pode tomar decisões mais informadas sobre a adoção da quantum computing de sua organização com base em prioridades estratégicas, como seguir uma estratégia de “primeiro no mercado”, uma abordagem de otimização de custos ou agir como um inovador do setor.

Figura 16

O modelo de priorização quantum

Uma representação visual de trocas de decisão

O eixo Y: velocidade quantum

No geral, a promessa da Vantagem Quantum é resolver de forma eficaz problemas de negócios específicos que não podem ser resolvidos atualmente (ou são extremamente caros) devido às restrições computacionais atuais.⁴⁹ Da mesma forma, o local de um aplicativo no eixo Y da matriz de priorização da quantum computing depende da magnitude teórica da melhoria que se espera que um algoritmo de quantum computing específico forneça em comparação com uma solução clássica.

A Vantagem Quantum de um aplicativo individual pode se manifestar de diferentes maneiras. Um exemplo é um tempo de execução mais rápido para encontrar uma solução desejada ou uma melhor abordagem para resolver um problema e obter maior precisão.

O eixo X: viabilidade técnica a curto prazo

O eixo X do modelo de priorização da quantum computing retrata os requisitos técnicos de hardware e software quantum necessários para executar com sucesso cada aplicação identificada. Um aspecto importante são os requisitos esperados de qubit e desempenho.

A posição no eixo X também é impactada por considerações adicionais de hardware e software de quantum computing, como design de chip e algoritmo, interconectividade de qubit, quantidade de portas, qubits usados no código e eficiência do compilador.

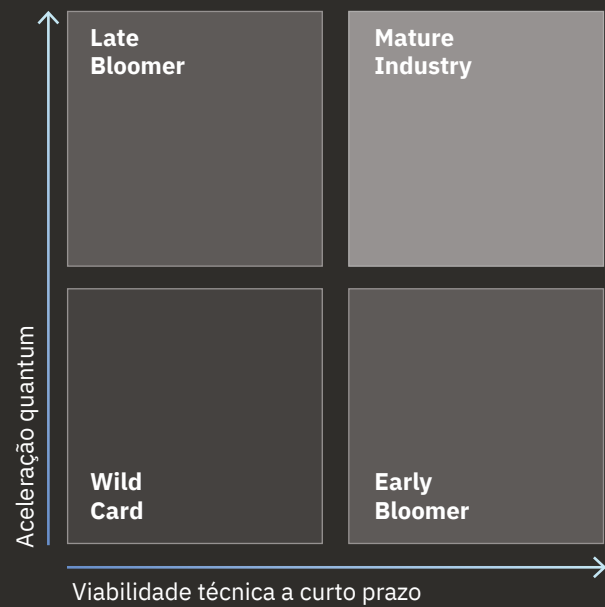
Embora as tecnologias de quantum computing estejam em um estado nascente, alguns algoritmos, como o algoritmo de otimização quantum aproximada (QAOA) ou as máquinas de vetor de suporte quantum (QSVM), mostraram potencial para melhor execução em sistemas quantum de curto prazo devido aos seus requisitos de circuito de profundidade mais curta, enquanto outros algoritmos precisarão de sistemas de quantum computing maduros para executar problemas mais sofisticados.⁵⁰

Tamanho da bolha: impacto dos negócios

A terceira dimensão da matriz de priorização da quantum computing é adaptada ao tamanho do impacto nos negócios que é previsto para cada aplicação em uma empresa específica. Essa dimensão incorpora métricas de negócios escolhidas exclusivamente por cada organização. Como parte do processo de seleção particular de cada empresa, é importante perceber que avaliar o impacto nos negócios é mais do que apenas medir os resultados econômicos.

A métrica deve ser uma combinação de resultados do mercado e consequências competitivas, bem como de impacto financeiro. Por exemplo, dependendo dos objetivos estratégicos de uma organização, esta dimensão pode incluir medidas de aprimoramento da cadeia de valor, melhoria operacional, inovação no mercado, crescimento da participação no mercado, geração de receita, redução de custo e/ou mitigação de risco.

Classificação da aplicação da quantum computing⁵¹



Como observado anteriormente, o emprego da matriz de priorização da quantum computing mostra quatro categorias de aplicação da quantum computing: Early Bloomer, Late Bloomer, Wild Card e Mature Industry (veja a Figura 17). Identificar uma combinação diferente desses tipos de aplicações prepara a sua empresa para responder rapidamente aos avanços revolucionários da tecnologia da quantum computing (veja a Perspectiva, “Aplicando a matriz de priorização da quantum computing” na página 64).

Figura 17

Categorias de aplicações de quantum computing
Respostas rápidas por meio de aplicações diversificadas

Early Bloomer

As aplicações Early Bloomer são “óbvias”. Como as suas soluções são heurísticas, as empresas podem experimentá-las e usá-las para ajudar a construir talentos. Já que as aplicações Early Bloomer operam usando a tecnologia existente, sua adoção é um passo profundo para as organizações aprenderem a usar a quantum computing. O uso dessas aplicações ajuda a esclarecer como integrar a quantum computing aos seus processos de negócios atuais e impulsionar a adoção de mais quantum computing. Adotar aplicações Early Bloomer inicialmente pode ser importante para sustentar a relevância no mercado, pois elas podem estabelecer os requisitos básicos necessários para se manter competitivo.

Late Bloomer

As aplicações Late Bloomer representam o “dilema do inovador”. Elas prometem a maior Vantagem Quantum, mas exigem tecnologia de quantum computing mais avançada para resolver problemas de negócios relevantes. As aplicações Late Bloomer podem potencialmente transformar a concorrência em setores específicos devido ao seu potencial de impactar significativamente o valor comercial no futuro. Como é menos claro quando as aplicações Late Bloomer se tornarão tecnicamente viáveis, sua empresa precisa acompanhar atentamente os avanços na quantum computing. Um novo algoritmo de quantum computing ou abordagem de hardware poderia fazer com que uma Late Bloomer desse um salto para a viabilidade técnica. Devido ao seu impacto esperado nas cadeias de valor da empresa, o sucesso competitivo pode acumular-se desproporcionalmente nas empresas que são as primeiras a reconhecer e implementar as aplicações de quantum computing Late Bloomer.

Wild Card

As aplicações Wild Card não exibem atualmente um caminho direto para fornecer a Vantagem Quantum substancial das Late Bloomers, nem são tão viáveis tecnicamente como as aplicações Early Bloomer são hoje. Embora tenham chance de dar certo ou não, avaliá-las ajuda a entender melhor como os atributos da quantum computing podem se aplicar ao sucesso futuro de sua organização. Essas apostas arriscadas não devem ser completamente descartadas. À medida que a tecnologia quantum evolui, algumas Wild Cards podem se transformar em Early ou Late Bloomers.

Mature Industry

As aplicações Mature Industry são o objetivo final para as empresas que estão utilizando a quantum computing. Embora nenhuma aplicação ainda tenha demonstrado Vantagem Quantum em escala de negócios, no futuro, se os computadores quânticos alcançarem escalabilidade suficiente e as aplicações da quantum computing demonstrarem valor competitivo, alguma delas irá conferir vantagem de negócios, transformando os modelos de operação da empresa e as cadeias de valor do setor. Algumas aplicações já em desenvolvimento podem colocar seus criadores no caminho para o sucesso significativo no mercado agora mesmo.

Perspectiva Aplicando a matriz de priorização da quantum computing⁵²

Para ilustrar como a matriz de priorização da quantum computing funciona, vamos utilizar a investigação de aplicação da quantum computing real realizada por uma organização comercial de serviços financeiros. Esta instituição financeira identificou quatro usos potenciais da quantum computing que são computacionalmente desafiadores para máquinas convencionais:

1. Análise de valor em risco

Reforço da mitigação de risco pelo desenvolvimento de modelos de simulação de risco mais precisos.

2. Precificação derivada

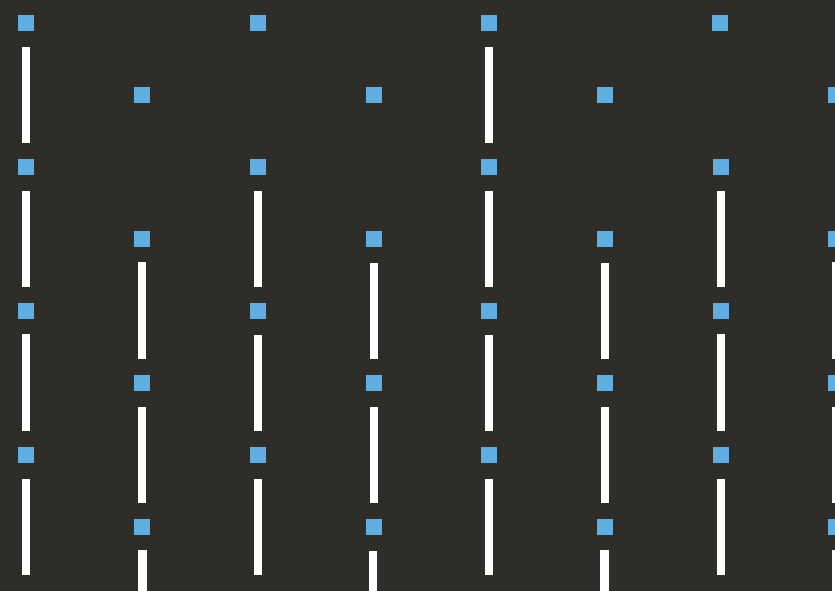
Melhoria da precificação de ativos financeiros usando simulações de cenário de mercado.

3. Detecção de fraude

Melhoria da detecção de padrões irregulares para sinalização de transações fraudulentas e impostores.

4. Pontuação de crédito/ativo

Reforço da análise estatística que segmenta a solvência financeira dos clientes e as classificações de seguro-garantia.

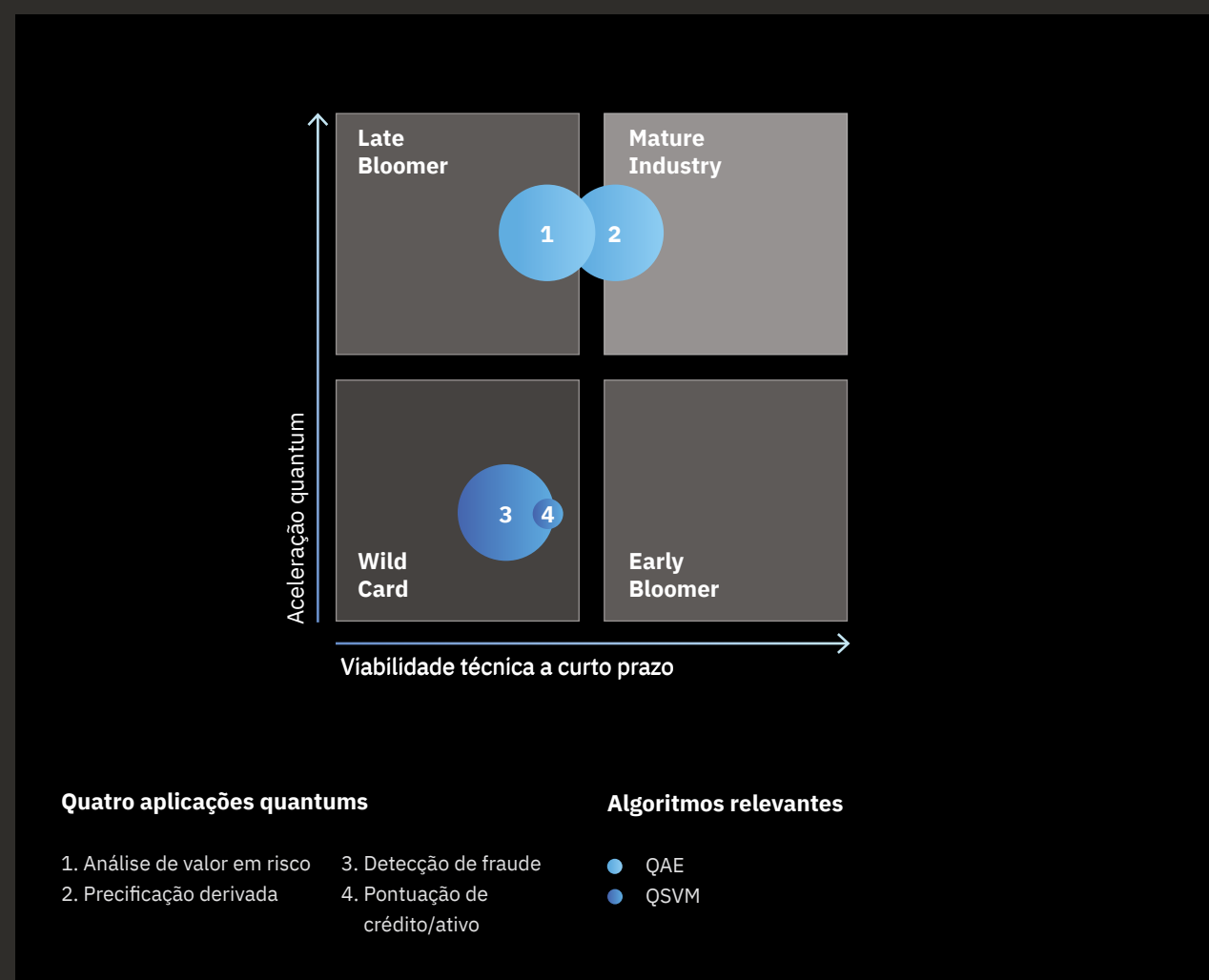


Cada uma dessas potenciais aplicações pode ser resolvida por um algoritmo específico de quantum computing que ajuda a designar seu nível de velocidade quantum e seu estágio de viabilidade técnica (veja a figura):

—A análise de valor em risco e a precificação derivada são resolvidas com um algoritmo de simulação, chamado de estimação de amplitude quantum (QAE), para estimar cenários. Este tipo de algoritmo proporciona uma aceleração quadrática e melhora a qualidade da solução, mesmo que a correção de erro quantum possa diminuir a vantagem. No entanto, ele requer sistemas de quantum computing maduros. As aplicações associadas a este algoritmo normalmente são identificadas como Late Bloomers.

—A detecção de fraude e a pontuação de crédito/ativo são resolvidas com algoritmos de aprendizado de máquina para classificação e previsão (QSVM). Este tipo de algoritmo pode ser executado em sistemas quantum de curto prazo e pode trazer maior precisão. No entanto, o benefício precisa ser comprovado à medida que a capacidade quantum do sistema aumenta, normalmente colocando aplicações associadas como Wild Cards.

O valor comercial que estas aplicações podem trazer coletivamente ao setor de serviços financeiros pode ultrapassar US\$ 10 bilhões no primeiro ano de seu lançamento.⁵³ O aprimoramento da detecção de fraude e a redução das perdas monetárias por lavagem de dinheiro poderiam fornecer mais da metade do total.



Priorização quantum na prática
Quatro aplicações financeiras

Perspectiva Traçando um caminho para o valor comercial⁵⁴

Nós definimos cinco etapas para desenvolver um portfólio de quantum computing para a sua empresa.

Primeira etapa

Identifique as capacidades de quantum computing que sua empresa precisa.

Determine se deve adquiri-las diretamente, contratar um consultor e/ou participar de um ecossistema de quantum computing existente para acessá-las.

Segunda etapa

Identifique as aplicações potenciais de quantum computing.

Selecione problemas de negócios ou oportunidades que podem se beneficiar das capacidades exclusivas da quantum computing, como aquelas restringidas por recursos ou enormes cálculos de otimização.

Terceira etapa

Posicione cada aplicação na matriz de priorização da quantum computing.

Avalie o perfil tecnológico de cada aplicação proposta, em termos de potencial aceleração quantum e viabilidade técnica de curto prazo, com base no hardware de quantum computing e em algoritmos de nova geração.

Quarta etapa

Determine o impacto esperado nos negócios.

Avalie o tamanho do impacto projetado nos negócios analisando a potencial vantagem competitiva de cada aplicação e os benefícios financeiros específicos esperados para sua empresa.

Quinta etapa

Plano para a adoção quantum.

Determine se você comprará um sistema computacional quantum ou acessará a tecnologia mais recente de quantum computing por meio de um acordo de parceria. Planeje o impacto da quantum computing em seus fluxos de trabalho internos, incluindo a remodelação potencial de processos e ajustes de alocação de recursos.

■ Perguntas que devem ser feitas

Primeira pergunta

Onde você vê sua empresa posicionada durante cada uma das “três ondas” da Vantagem Quantum?

Terceira pergunta

Teste a matriz de priorização da quantum computing.

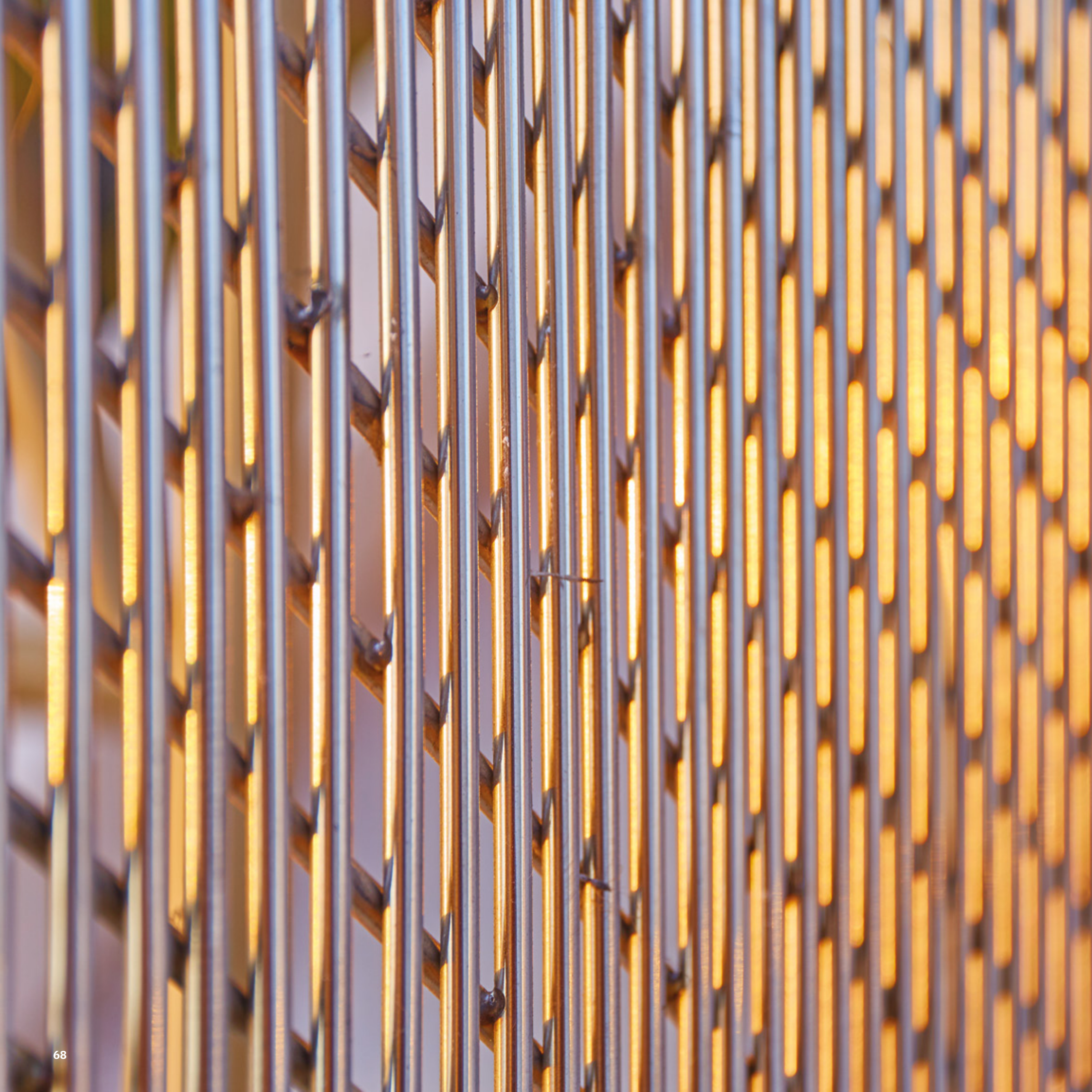
Quais foram os resultados?

Houve alguma surpresa?

Segunda pergunta

Pense nos problemas impossíveis do seu setor discutidos no Capítulo 2.

Como os casos de uso de simulação, procura e algébricos contribuem para a sua resolução?



Guias do Setor

Como já discutimos, a Vantagem Quantum ocorre quando uma tarefa de computação crítica para os negócios ou a ciência pode ser realizada de forma mais eficiente, mais econômica ou com melhor qualidade utilizando computadores quantum. Nesse caso, os computadores quantum e os sistemas clássicos podem superar o que os sistemas clássicos podem fazer sozinhos.

À medida que os avanços de hardware, software e algoritmos em quantum computing convergirem, permitindo uma melhoria significativa do desempenho em relação à computação clássica, surgirão novas oportunidades vantajosas em todos os setores.

Nesta seção, fornecemos informação sobre adoção quantum em cinco setores específicos: companhias aéreas, bancos e mercados financeiros, química e petróleo, assistência médica e ciências biológicas. Cada seção contém observações específicas do setor e casos de uso para ajudar a orientar sua jornada quantum.

Embora a conquista da Vantagem Quantum possa levar algum tempo, ela ainda pode desencadear realizações exponenciais no uso e no aprendizado que podem beneficiar seus negócios e seu setor imediatamente.



Aplicações da quantum computing

Linhas aéreas

As organizações do setor de turismo e transporte levaram alguns dos piores golpes na pandemia da COVID-19. São esperadas perdas recordes nas companhias aéreas e no setor hoteleiro, com um retorno ao crescimento não esperado até 2023 ou 2024.⁵⁵ A retomada de viagens globais e do trabalho requer a adoção de medidas financeiras, de saúde e de segurança em meio à incerteza de uma recuperação pós-pandêmica.

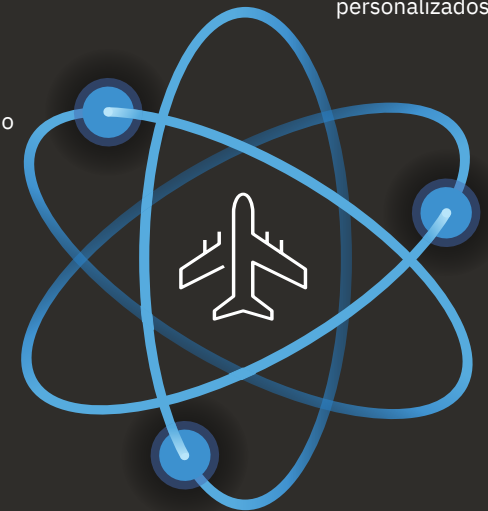
Algumas organizações veem a crise como uma oportunidade não só de sobreviver, mas de evoluir e emergir mais fortes. Uma estratégia de sucesso envolve olhar além da sobrevivência para antecipar a futura demanda reprimida e preparar-se para o crescimento, explorando novas tecnologias e soluções para aproveitar as vantagens de ser pioneiro. A quantum computing é uma dessas tecnologias.

Ela abre a porta para novas oportunidades em todos os setores, principalmente por meio de maior velocidade computacional, maior precisão de ações direcionadas por dados e a criação de novos algoritmos e capacidades de sistemas para enfrentar desafios que os sistemas clássicos não conseguem resolver. As capacidades da quantum computing poderiam desempenhar um papel crucial na resolução dos problemas de negócios complexos das companhias aéreas.

Veja a seguir três casos de uso em que a Vantagem Quantum pode transformar a forma como as companhias aéreas buscam otimizar operações e melhorar a experiência de seus clientes.

Casos de uso de quantum computing para companhias aéreas

Desvendando a inovação operacional



Melhorando serviços contextuais personalizados

Otimizando o planejamento de rede globalmente

Caso de uso

Desvendando a interrupção operacional para as companhias aéreas (IROPS)

Pandemias, tempestades, terremotos, problemas operacionais, problemas técnicos e outros desafios podem causar estragos nos horários de voos e na equipe das companhias aéreas. Recuperar-se de tais interrupções é um dos problemas que as companhias aéreas enfrentam. As soluções atuais são fragmentadas e focadas principalmente em informação operacional, com menos atenção dada ao inventário, à maximização do lucro ou até mesmo ao impacto no atendimento e na satisfação do cliente.

As companhias aéreas atualmente lidam com essas interrupções, o que é conhecido como gerenciamento de operações irregulares (IROPS), utilizando algoritmos subótimos em computadores clássicos. Devido às limitações dos computadores atuais, cada elemento específico, como equipes, slots e equipamentos, é gerenciado de forma sequencial e isolada. A recuperação de todo o sistema pode levar uma semana ou mais, ameaçando a satisfação do passageiro, e efeitos de segunda ordem em outros voos e aeroportos podem gerar custos mais elevados para uma companhia aérea.

As limitações técnicas de soluções IROPS atuais estão vinculadas principalmente a:

1. Falta de visibilidade de dados para incorporar todas as entradas relevantes na resolução das interrupções.
2. Fragmentação do desenvolvimento da solução. Diferentes partes do problema de IROPS (frota, equipe, passageiros, impacto previsto) são resolvidos separadamente em várias etapas com diferentes ferramentas, o que leva a soluções ineficientes e abaixo do ideal.

É na segunda limitação, a fragmentação do desenvolvimento da solução, que a quantum computing pode ajudar. Devido ao enorme escopo de IROPS e à complexidade resultante do problema de otimização matemática global subjacente, a resolução de uma única interrupção operacional nos computadores de hoje poderia demorar anos, ou até mesmo séculos. Com melhorias nos algoritmos quânticos e melhores esquemas de correção de erros, as companhias aéreas poderão ser capazes de:

- Melhorar a precisão e a velocidade das simulações de cenário que quantificam o impacto de soluções potenciais para voos futuros e passageiros, em tempo de responder a uma interrupção. Algoritmos de quantum computing já se provaram efetivos na escolha dos melhores cenários nas simulações de Monte Carlo utilizadas no setor bancário e financeiro.⁵⁶
- Fornecer uma ferramenta de simulação para analistas do centro de controle de operações para que eles possam testar proativamente os cenários antes que um evento importante possa interromper as operações, como paralisações do controle de tráfego aéreo ou do trabalho da tripulação ou atrasos na entrega de aeronaves. Devido à complexidade destes problemas, hoje eles só podem ser resolvidos para cada área funcional separadamente, frustrando o desenvolvimento de soluções integradas.
- Entregar ferramentas consultivas aos agentes de atendimento ao cliente e sistemas de atendimento ao cliente automatizados usando aprendizado de máquina quantum para aconselhar sobre as melhores abordagens para a resolução de IROPS. Por exemplo, um algoritmo de quantum computing poderia aconselhar os agentes sobre como compensar melhor cada cliente específico cuja viagem foi interrompida com base em preferências pessoais quanto a descontos, acomodações, upgrades ou outras amenidades. Imagine como a satisfação do cliente poderia melhorar se você pudesse fazer isso hoje.

Desta forma, as capacidades quânticas poderiam reduzir drasticamente o tempo de recuperação e reduzir o custo de operações irregulares, reduzindo também seu impacto negativo sobre os passageiros.

Caso de uso

Aprimorando serviços contextuais personalizados para clientes de companhias aéreas

Para o setor de viagens globais, uma das ações fundamentais para a sobrevivência e a recuperação é restaurar a confiança dos clientes, criando serviços personalizados que enfatizem as medidas de saúde e segurança. Para as companhias aéreas especificamente, é importante diferenciar serviços, melhorar a experiência do cliente e gerar receita incremental por meio de ofertas individualizadas. Fornecer engajamento e serviços personalizados ao cliente requer quatro etapas específicas:

1. Coletar e extrair dados, incluindo dados do cliente e dados transacionais.
2. Executar engenharia de dados para construir recursos de dados do cliente.
3. Treinar modelos de segmentação de clientes baseados em características do cliente e do contexto de jornada.
4. Pontuar e identificar as melhores ofertas em função dos contextos de viagem individuais do cliente.

Os sistemas de ofertas personalizadas atuais muitas vezes não cumprem as suas promessas, principalmente por causa das limitações na etapa de segmentação dos clientes. Os métodos atuais de segmentação muitas vezes dependem de características básicas do cliente, como dados demográficos e de vendas, mas não incluem dados contextuais, reduzindo a pertinência da oferta recomendada. Os sistemas atuais também carecem de segmentação multidimensional para a captura eficaz das diferenças contextuais de preferências, intenção e comportamento dos viajantes. Um motivo para a ausência de características contextuais é a capacidade computacional e escalabilidade insuficientes para tratar a alta quantidade de elementos de dados necessários para construir modelos complexos de segmentação.

A estratégia “segment-of-one” é uma estratégia de personalização para a qual a escalabilidade é provavelmente o maior desafio. À medida que cresce a sofisticação do marketing digital, as organizações estão propensas a um aumento da quantidade de usuários para os quais precisam criar experiências personalizadas. Uma coisa é personalizar uma página de entrada para um segmento de clientes, mas é um desafio completamente diferente quando você tem centenas de personas, diversas geografias, muitos sites e milhares de locais onde a personalização é necessária. Nesse ponto, as estratégias de personalização necessitam de escalabilidade para serem viáveis.

A quantum computing pode resolver esses problemas, aprimorando o processo de personalização ao:

- Suportar uma segmentação mais detalhada de clientes, incorporando características de cliente mais complexas para segmentação multidimensional de passageiros e permitindo maior especificidade na criação de perfil contextual para melhorar ofertas personalizadas.⁵⁷
- Melhorar a precisão dos modelos de aprendizado de máquina que fornecem insights e interpretabilidade de resultados para ajudar os profissionais de marketing ou agentes de atendimento ao cliente a entender melhor os vínculos de causalidade entre os dados do cliente e passageiros satisfeitos.
- Permitir potencialmente a identificação de uma quantidade drasticamente maior de segmentos de clientes refinados que são impossíveis de lidar com os computadores clássicos por meio de melhores capacidades de aprendizado de máquina.

Se as companhias aéreas puderem utilizar a quantum computing para cumprir a promessa de personalização contextual e dinâmica, essa personalização poderá ajudar a aumentar a receita complementar, fornecer uma melhor experiência de cliente e suportar a diferenciação de serviço.

Caso de uso

Otimizando o planejamento de rede da companhia aérea globalmente

Além do declínio abrupto na demanda de viagens globais devido à pandemia da COVID-19, as companhias aéreas também estão enfrentando mudanças significativas nas preferências dos clientes em relação a novas rotas, reservas próximas à partida e mudanças de itinerário sem tarifas. Para enfrentar esses desafios, são necessários processos de planejamento de rede dinâmicos e flexíveis, que não dependam mais de dados históricos de demanda.

A otimização da rede, do planejamento de voo e da alocação de frota ao planejamento da tripulação, é o foco das operações aéreas, impactando significativamente os custos operacionais. Mas, apesar dos esforços substanciais dedicados a otimizar esse processo, ainda há limitações importantes. Elas estão vinculadas principalmente a uma abordagem passo a passo, que leva à otimização local dos subprocessos implementados com ferramentas isoladas de suporte à decisão. Essas ferramentas geram soluções não ideais, locais e descoordenadas.

Por exemplo, o planejamento de rota da aeronave muitas vezes não incorpora o planejamento da tripulação. Da mesma forma, o planejamento da tripulação não inclui tempos de bloqueio, e o planejamento de tempo de bloqueio não fatora o planejamento de combustível, muitas vezes, com consequências prejudiciais. Além disso, o planejamento de rede normalmente não coordena a otimização da solução com o gerenciamento de receita (RM) e a precificação, resultando em dois processos importantes acontecendo diariamente com o mesmo objetivo: otimização do lucro, mas com modelos e parâmetros distintos.

Esta abordagem fora de sincronização conduz a soluções inferiores em termos de custo total, lucro e adaptação à mudança. Ela também causa confusão durante atualizações operacionais importantes, como a introdução de novos tipos de aeronave ou a abertura de novas rotas. Enquanto o RM ou a precificação está otimizando ofertas com base em planejamento, capacidade e configuração da aeronave, o planejamento de rede pode mudar inadvertidamente esses parâmetros com base na otimização do lucro. O principal motivo para as companhias aéreas tomarem este caminho de solução distribuída é a complexidade necessária para resolver um problema de otimização de rede global em uma única etapa. Ele é praticamente impossível de resolver apenas com os computadores clássicos atuais.

No futuro, os computadores quânticos, trabalhando com os computadores clássicos, deverão ativar uma rede aérea para co-otimizar frota, planejamento, bloqueio/portões, tripulação e combustível, coordenando dinamicamente com RM, precificação, metas de custo, vendas e gerenciamento de relacionamento com o cliente (CRM). Isso porque os algoritmos de otimização quântica podem procurar o universo de soluções de forma mais ampla e eficiente.⁵⁸ Para fazer o melhor uso de futuras capacidades quânticas, as empresas aéreas precisam mudar a forma de gerenciar operações de rede, com modelos de operação mais centralizados e uma integração de dados mais rigorosa. Os resultados esperados poderiam ser uma vantagem competitiva exclusiva para as companhias aéreas que aderirem à tecnologia quântica.





Aplicações da quantum computing

Setor bancário e mercados financeiros

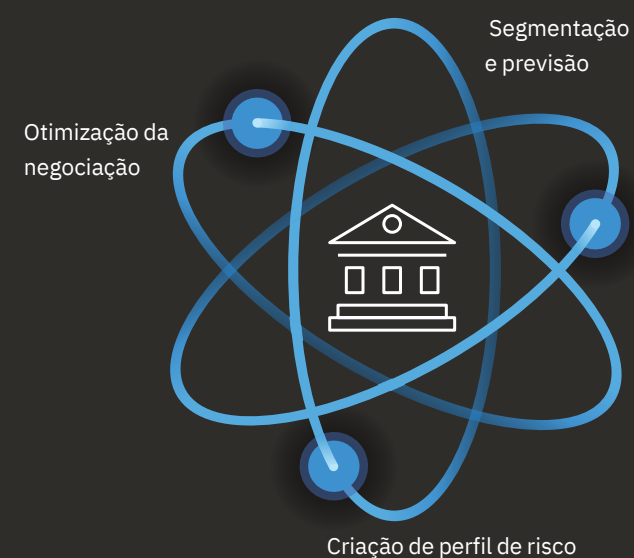
O setor de serviços financeiros tem um histórico de sucesso na aplicação da física para ajudar a resolver seus problemas mais difíceis. O modelo Black-Scholes-Merton, por exemplo, utiliza o conceito de movimento browniano para precificar instrumentos financeiros, como opções de compra europeias, ao longo do tempo.⁵⁹

Aplicar a tecnologia quantum emergente aos problemas financeiros, particularmente àqueles que lidam com incerteza e otimização restrita, também deve se provar extremamente vantajoso para as empresas pioneiras. Imagine ser capaz de fazer cálculos que revelem possibilidades de arbitragem mais rentáveis que a concorrência não consegue ver. Além disso, o emprego de dados comportamentais para melhorar o engajamento do cliente e a possibilitação de reações mais rápidas à volatilidade do mercado (por exemplo, cálculos de risco diários vs. noturnos) são alguns dos benefícios específicos que esperamos que a quantum computing forneça.

Embora as amplas aplicações comerciais possam permanecer vários anos distantes, espera-se que a quantum computing produza produtos e serviços inovadores que possam resolver problemas muito específicos de negócios dentro de três a cinco anos.⁶⁰ A quantum computing também pode permitir que organizações de serviços financeiros remodelem processos operacionais, como decisões de front-office e de funções administrativas de apoio no gerenciamento de clientes, gerenciamento de tesouraria, negociação e gerenciamento de ativos, além da otimização de negócios, incluindo gerenciamento de risco e conformidade.

Os casos de uso específicos da quantum computing para o setor bancário e mercados financeiros podem ser classificados em três categorias principais: segmentação e previsão, criação de perfil de risco e otimização de portfólio.

Casos de uso da quantum computing no setor bancário e em mercados financeiros



Caso de uso

Segmentação e previsão

Os clientes de serviços financeiros de hoje exigem produtos e serviços personalizados que antecipem rapidamente as suas necessidades e comportamentos em evolução. Das instituições financeiras de pequeno e médio porte, 25% perdem clientes devido a ofertas que não priorizam a experiência do cliente.⁶¹ Os padrões de comportamento dos clientes são complexos, e aspectos ausentes desses relacionamentos podem impedir que as instituições financeiras forneçam recomendações úteis de produtos com ótima seleção de variável. Isso pode levar à perda de oportunidades de expandir a carteira de clientes atual ou de alcançar os 1,7 bilhões de adultos no mundo inteiro que não possuem conta em banco.⁶²

Um problema semelhante existe na detecção de fraude. De acordo com algumas estimativas, as instituições financeiras estão perdendo até US\$ 10 bilhões por ano em receita devido a más práticas de gerenciamento de dados, e as perdas totais por fraude atingiram US\$ 56 bilhões em 2020.⁶³ Os sistemas de detecção de fraudes continuam altamente imprecisos, retornando aproximadamente 80% de falsos positivos, o que faz com que as instituições financeiras sejam excessivamente avessas ao risco.⁶⁴ Para ajudar a garantir pontuação adequada de crédito, o processo de integração do cliente pode durar até 12 semanas.⁶⁵ Na era digital atual, onde 70% dos serviços bancários ocorrem digitalmente, os consumidores não estão dispostos a esperar todo esse tempo.⁶⁶ Instituições financeiras muito lentas no engajamento eficaz com novos clientes os perderão para concorrentes mais ágeis.

Para a modelagem de segmentação e previsão de clientes, a quantum computing pode ser um diferencial. Espera-se que as capacidades de modelagem de dados dos computadores quânticos se provem superiores na descoberta de padrões, na realização de classificações e na geração de previsões que não são possíveis hoje por causa dos desafios de estruturas de dados complexas.

Caso de uso

Criação de perfil de risco

As instituições de serviços financeiros estão sob pressão crescente para equilibrar o risco, proteger suas posições mais efetivamente e executar uma gama mais ampla de testes de estresse para obedecer aos requisitos regulamentares. Gerenciamento de liquidez, a precificação de derivativos e a medição de risco podem ser complexos e difíceis de calcular, tornando difícil gerenciar adequadamente os custos de risco nas negociações. Hoje, as simulações de Monte Carlo, a técnica preferencial para analisar o impacto do risco e da incerteza nos modelos financeiros, são limitadas pelo ajuste de escala do erro de estimação. A simulação de todos os riscos em uma instituição financeira pode ser impossível do ponto de vista financeiro e incluir carteiras com muitas opções, exigindo inúmeras amostras e horas para ser concluída.

No futuro, esperamos ondas contínuas de emendas sobrepostas para regulamentos, diretrizes e normas, como a Basileia III e suas revisões.⁶⁷ Elas exigirão uma matriz muito maior de cenários de estresse de gerenciamento de risco. Como resultado, espera-se que os custos de conformidade sejam mais do que o dobro nos próximos anos, incluindo muitas regulamentares e correção em casos de não conformidade.⁶⁸

Em face das demandas mais avançadas de perfil de risco e dos obstáculos regulamentares crescentes, a pesquisa e os avanços nas capacidades de quantum computing podem acelerar essas simulações de cenários de risco muito longas com maior precisão, enquanto testam mais resultados.

Caso de uso

Otimização da negociação

A complexidade da atividade de negociação dos mercados financeiros está aumentando rapidamente. Por exemplo, o modelo de ajustes de avaliação para derivativos, o abrangente modelo de Ajuste de Valor X (XVA), aumentou muito em complexidade, agora incluindo crédito (CVA), débito (DVA), fundos (FVA), capital (KVA) e margem (MVA).⁶⁹

Devido a maiores exigências de transparência dos regulamentos, processos de validação mais rigorosos são aplicados à negociação, impactando os cálculos de gerenciamento de risco que precisam alinhar exposições de crédito de contraparte com a utilização de carteiras de derivativos de limite de crédito.⁷⁰ Além disso, quadros e veículos de investimento significativos foram alterados. Por exemplo, fundos de investimento negociados (ETFs) de seguro-garantia estão projetados para alcançar US\$ 2 trilhões até 2024, e investimentos ambientais, sociais e governamentais (ESG) estão ganhando força, com US\$ 35 trilhões investidos nesta taxonomia de ativos em 2019.⁷¹

Neste complicado cenário de negociação, os gestores de investimentos lutam para incorporar restrições da vida real, como a volatilidade do mercado e os acontecimentos que mudam a vida dos clientes, na otimização do portfólio. O ideal seria que os gestores de dinheiro simulassem um grande número de cenários potenciais e opções de investimento para validar susceptibilidades ao estimar os retornos esperados. Atualmente, a descoberta da melhor estratégia de reequilíbrio que acompanha os movimentos do mercado é significativamente restringida por limitações computacionais e custos de transação.

A tecnologia quantum pode ajudar a reduzir a complexidade dos ambientes comerciais de hoje. As capacidades de otimização combinatória da quantum computing podem permitir que os gestores de investimentos melhorem a diversificação da carteira, reequilibrem os investimentos para responder com mais precisão às condições de mercado e metas do investidor e aperfeiçoem de forma mais rentável os processos de quitação de negociação para grandes carteiras.





Aplicações da quantum computing

Química e Petróleo

O setor de produtos químicos tem participação em cerca de 7%, ou US\$ 5,7 trilhões, do produto interno global, gerando aproximadamente 120 milhões de empregos.⁷² Desenvolver novos produtos químicos requer um trabalho de laboratório caro e demorado. Atualmente, as simulações clássicas de química podem ajudar a orientar os testes de laboratório, mas a precisão dos cálculos diminui à medida que aumenta a complexidade das interações moleculares.

Ao tentar cálculos de energia em um sistema mecânico quantum como moléculas grandes, o cálculo de todos os diferentes parâmetros, incluindo o movimento dos elétrons, torna-se intratável em computadores convencionais. Como resultado, a modelagem de muitas moléculas importantes industrialmente torna-se cada vez mais imprecisa ou excessivamente demorado para esperar por uma solução exata.

Determinar a estrutura eletrônica das moléculas é imperativo para entender a reatividade da molécula. À medida que as moléculas aumentam de tamanho além do hidrogênio (H_2), as descrições matemáticas de moléculas que capturam com precisão interações entre elétrons, efeitos nucleares etc., tornam-se cada vez mais complexas. Na verdade, quando um cálculo completo de interação de configuração é realizado classicamente, os algoritmos têm ajuste de escala exponencial. No entanto, devido à natureza dos algoritmos quantum, os cálculos químicos têm sido previstos para escalar polinomialmente, um passo promissor rumo à capacidade de executar cálculos exatos em moléculas que estão atualmente fora de alcance.

Por exemplo, o hidrocarboneto naftaleno simples ($C_{10}H_8$) poderia ser modelado com ~116 qubits, mas exigiria um sistema computacional clássico com 10^{34} bits para fazer o mesmo.⁷³ Para a perspectiva, 10^{34} bits é 7,1 bilhões de vezes o volume total de dados previstos para serem armazenados eletronicamente até 2025, talvez 175 zettabytes.⁷⁴

A quantum computing pode mudar a forma como os produtos químicos são desenvolvidos, os hidrocarbonetos são refinados e os reservatórios de petróleo são localizados e produzidos. Nos próximos anos, ela poderá acelerar o ciclo de desenvolvimento de novos produtos químicos, refinar estratégias de investimento em virtude da maior restritividade dos regulamentos ambientais e otimizar sistemas complexos que impactam diretamente os lucros, como transporte, refinaria e processos de fabricação de produtos químicos.

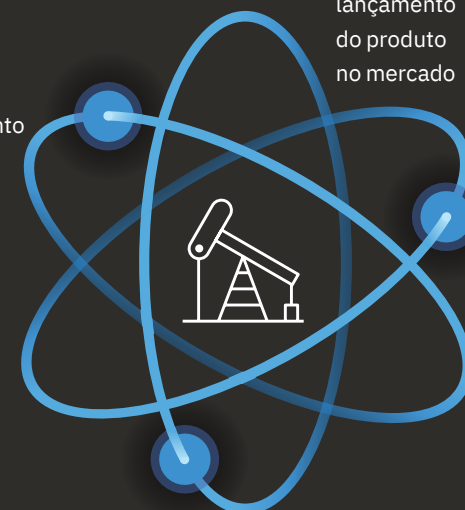
Eventualmente, os computadores quantum podem ser capazes de lidar com simulação de reservatório e imagiologia sísmica. Consequentemente, espera-se que a quantum computing transforme fundamentalmente a paisagem do setor químico e petrolífero. Identificamos três poderosos casos de uso de quantum computing já sendo explorados por empresas químicas e de petróleo:

- Desenvolvimento de produtos químicos, incluindo catalisadores e surfactantes
- Otimização do roteamento de matéria-prima, do refino e do lançamento do produto no mercado
- Expansão da produção de reservatório.

Casos de uso de quantum computing em produtos químicos e petróleo

Otimização do roteamento de matéria-prima, do refino e do lançamento do produto no mercado

Desenvolvimento de produtos químicos, incluindo catalisadores e surfactantes



Expansão da produção de reservatório

Caso de uso

Desenvolvimento de produtos químicos, incluindo catalisadores e surfactantes

Neste cenário de caso de uso, as empresas químicas e petrolíferas usam computadores quantum para acelerar a descoberta e o desenvolvimento de novos métodos e materiais de produto químico. Protótipos de computadores quantum, suportados por computadores clássicos, já estão realizando simulações de química quantum.

Em 2017, uma matéria de capa na *Nature* mostrou representações dos pequenos sais inorgânicos de hidreto de lítio (LiH) e de hidreto de berílio (BeH₂) modelados em computadores quantum da IBM disponíveis publicamente.⁷⁵ A aplicação desses mesmos métodos variacionais aos desafios da indústria química e petrolífera poderá em breve ser possível, como aplicar insights aos novos catalisadores para redução de emissões ou surfactantes para melhorar a recuperação subsuperficial. Estas possibilidades, entre outras, levaram alguns a considerar a química o “aplicativo matador” para a quantum computing.⁷⁶

Caso de uso

Otimização do roteamento de matéria-prima, do refino e do lançamento do produto no mercado

Talvez surpreendentemente, abordagens similares (usando Hamiltonianos) empregadas na modelagem molecular podem ser reaproveitadas para tratar um amplo intervalo de problemas de otimização, desde logísticas de transporte e de cadeia de suprimento até a otimização de carteiras de investimento.⁷⁷

Neste cenário de caso de uso, a quantum computing poderia melhorar as margens de lucro dos negócios químicos e de petróleo, determinando combinações ideais de roteamento de matéria-prima, refino e lançamento do produto no mercado. O impacto em uma refinaria pode ser visto como a perda anual estimada de negócio devido à oferta de octanagem. As ofertas de octanagem e pressão de vapor resultam em uma perda anual de mais de US\$ 4,9 bilhões nos EUA e mais de US\$ 4,2 bilhões na União Europeia.⁷⁸

Caso de uso

Expansão da produção de reservatório

Em 1856, Henri Darcy, um engenheiro francês que tentava projetar sistemas de filtragem de água para a cidade de Paris, criou uma experiência simples ao fazer fluir a água através de um tubo cheio de areia. Suas observações levaram à lei de Darcy, que formou a base de todo o campo de simulação de reservatório e de engenharia de produção.⁷⁹

No entanto, os modernos desenvolvimentos em reservatórios nanoporosos não convencionais estão derrubando a lei de Darcy. Um resultado é que a hierarquia global do petróleo foi reordenada, com os EUA se tornando o maior produtor mundial de energia. A quantum computing pode inaugurar uma nova geração de entendimento de subsuperfície e simulação de reservatório, permitindo a exploração da física em escala molecular em reservatórios apertados.

Em reservatórios não convencionais, o óleo líquido flui como se tivesse uma alta permeabilidade, semelhante a um gás, com produção preferencial de hidrocarbonetos de cadeia curta e deixando as cadeias longas para trás. A física é inconsistente com o entendimento convencional da dinâmica do fluxo subsuperficial.

O uso de computadores quânticos para realizar a modelagem em escala molecular das interações entre óleo, água e moléculas de gás com a superfície de rochas poderia ajudar a explicar a física por trás da desconexão entre fluxo Darcy e não-Darcy. Se assim fosse, os benefícios seriam substanciais.

Por exemplo, se a quantidade de poços pudesse ser reduzida em apenas 10%, o fluxo de caixa líquido dos 32 principais produtores de petróleo norte-americanos não convencionais se deslocaria de uma perda líquida de US\$ 1 bilhão (janeiro a setembro de 2018) para um fluxo de caixa positivo de US\$ 8 bilhões (baseado em uma estimativa de US\$ 6 milhões por poço).⁸⁰





Aplicações da quantum computing

Assistência médica

Dados de saúde- como informações de ensaios clínicos, registros de doenças, registros eletrônicos de saúde (EHRs) e dispositivos médicos, estão crescendo a uma taxa de crescimento anual composta de 36%.⁸¹ Cada vez mais, estes dados ajudam a enfrentar os desafios associados ao “objetivo quadruplo” da assistência médica: melhor funcionamento, custos inferiores, melhores experiências dos pacientes e melhores condições de trabalho dos profissionais da saúde.⁸² Ao mesmo tempo, os consumidores de assistência médica estão tomando mais decisões e precisam navegar em um sistema cada vez mais complexo.

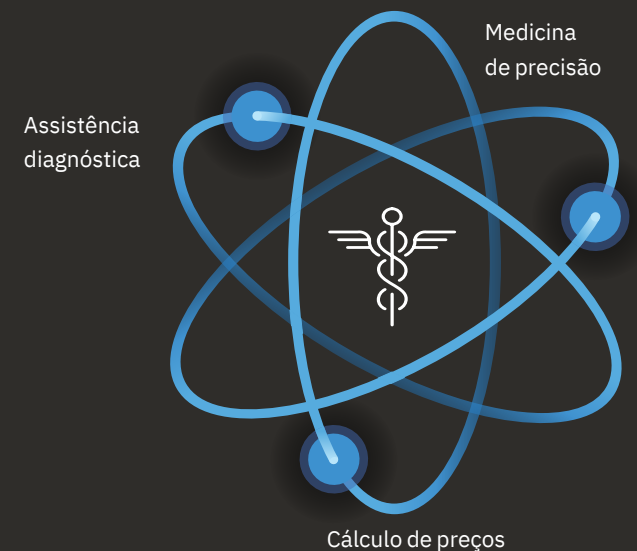
Estão sendo feitos investimentos significativos para fornecer os dados corretos e insights poderosos no local de atendimento. Os operadores do setor, assim como novos concorrentes, estão tentando criar experiências digitais que reforcem comportamentos saudáveis e preventivos. Apesar disso, a contabilização das possibilidades exponenciais desta diversidade de novos dados está forçando as capacidades dos sistemas de computação clássicos.

A quantum computing tem o potencial de fornecer mais capacidade de computação e velocidade. No entanto, é necessária uma forma diferente de pensar, um novo e muito procurado conjunto de habilidades, arquiteturas de TI distintas e novas estratégias corporativas. A tecnologia também tem implicações imediatas para a segurança.⁸³ A segurança é uma área de particular relevância para a assistência médica, dadas as responsabilidades e os desafios de privacidade de dados do setor.

Na assistência médica, como em outros setores, o uso de computadores quantum com computadores clássicos é propenso a oferecer vantagens substanciais que a computação clássica por si só não pode fornecer. Como resultado, agora há uma corrida em direção às aplicações quantum.

Três potenciais casos de uso de quantum computing são centrais para a transformação contínua do setor de assistência médica: assistência diagnóstica, prêmios e precificação de seguros e medicina de precisão.

Casos de uso de quantum computing para assistência médica



Caso de uso

Assistência diagnóstica

Diagnósticos precoces, precisos e eficientes geralmente geram melhores resultados e custos inferiores de tratamento. Por exemplo, as taxas de sobrevivência aumentam por um fator de 9 e os custos de tratamento diminuem por um fator de 4 quando o câncer de cólon é diagnosticado precocemente.⁸⁴ Ao mesmo tempo, para uma ampla variedade de condições, os diagnósticos atuais são complexos e caros.⁸⁵ Mesmo uma vez estabelecido um diagnóstico, as estimativas sugerem que ele está errado em 5 a 20% dos casos.⁸⁶

Técnicas de imagiologia médica, como CT, MRI e exames de raio-X, tornaram-se uma ferramenta de diagnóstico crucial para profissionais ao longo do século passado. Os métodos de detecção e diagnóstico por imagens médicas assistidos por computador têm se desenvolvido rapidamente. Ao mesmo tempo, muitas dessas imagens são impactadas por ruído, má resolução e baixa replicabilidade.

Uma das razões para estes desafios é a necessidade de aderir a protocolos de segurança rigorosos. A quantum computing tem o potencial de melhorar a análise de imagens médicas, incluindo etapas de processamento, como detecção de borda e correspondência de imagem. Essas melhorias permitiriam melhorar consideravelmente o diagnóstico assistido por imagem.

Além disso, os procedimentos de diagnóstico modernos podem incluir métodos unicelulares.⁸⁷ Em particular, os dados de citometria de fluxo e de sequenciamento de célula única geralmente requerem métodos analíticos avançados, especialmente quando se considera a combinação de conjuntos de dados das diferentes técnicas.⁸⁸

Um desafio é a classificação das células com base nas suas muitas características físicas e bioquímicas. Elas fazem com que o espaço de recurso, ou seja, o espaço abstrato no qual as variáveis preditoras vivem, seja grande (alta dimensão). Esta classificação é importante, por exemplo, para distinguir as células cancerosas das normais. As abordagens de aprendizado de máquina aprimoradas pela quantum, como as máquinas de vetor de suporte quantum, podem melhorar a classificação e poderiam impulsionar métodos de diagnóstico de célula única.

Além disso, a descoberta e a caracterização de biomarcadores podem exigir a análise de conjuntos de dados “ômicos” complexos, como genômica, transcriptômica, proteômica e metabolômica.⁸⁹ Elas podem acarretar um grande espaço de recurso, bem como a interação de muitos recursos, levando a interdependências, correlações e padrões que são desafiantes de encontrar com métodos computacionais tradicionais.⁹⁰ Ampliar ainda mais o conhecimento dos biomarcadores até o nível do indivíduo requer naturalmente modelagem ainda mais avançada. Essas características sugerem que a quantum computing poderia ajudar a descobrir biomarcadores, talvez até mesmo para indivíduos.

Por meio da quantum computing, clínicas, hospitais, planos de saúde e médicos podem melhorar os diagnósticos, eliminando simultaneamente a necessidade de testes de diagnóstico invasivos repetitivos. Eles podem monitorar e analisar continuamente a saúde dos indivíduos. Além de ajudar os pacientes, tais melhorias também poderiam beneficiar os planos e os provedores de saúde em razão da redução dos custos de tratamento, como resultado de diagnósticos precoces. Pode até tornar-se possível realizar meta-análises para procedimentos de diagnóstico mais elaborados para determinar qual procedimento deve ser realizado e quando. Isso poderia ajudar a cortar os custos e viabilizar decisões mais direcionadas por dados por planos de saúde e governos para provedores e indivíduos.

Caso de uso

Prêmios de seguros e precificação

A determinação dos prêmios de seguro de saúde é um processo complexo. Diversos fatores precisam ser levados em conta por um plano de saúde no processo de desenvolvimento de uma estratégia geral de precificação (reconhecendo que os regulamentos em alguns países, como os EUA, podem limitar a quantidade de fatores utilizados para calcular os prêmios).⁹¹ Eles incluem interdependências complexas, como níveis de saúde da população e riscos de doença, adequação e custos de tratamento e a exposição ao risco que um plano de saúde está disposto e apto a aceitar baseado na estratégia corporativa e nos regulamentos. Embora os planos de saúde já tenham progredido consideravelmente nesta área por meio da aplicação dos métodos clássicos da ciência de dados, a obtenção de modelos mais granulares com menos incertezas permanece difícil.

Uma área chave na qual a quantum computing pode ajudar a otimizar a precificação é a análise de risco. Alavancar o conhecimento sobre o risco de doenças no nível da população e combiná-lo com modelos de risco quantum que possam computar o risco financeiro de forma mais eficiente poderia permitir que planos de saúde alcançassem melhores modelos de risco e precificação.⁹²

Outra importante alavanca por meio da qual a quantum computing pode dar suporte a decisões de precificação é a detecção de fraude aprimorada. Atualmente, a fraude de assistência médica custa centenas de bilhões de dólares só nos EUA.⁹³ Técnicas clássicas de mineração de dados já ajudam a detectar e reduzir a fraude de assistência médica, no entanto, são necessários métodos computacionais mais eficientes.⁹⁴ Algoritmos quantum poderiam permitir a classificação e a detecção de padrão superior e, assim, ajudar a descobrir comportamento anômalo e eliminar reivindicações médicas fraudulentas.⁹⁵ Espera-se que isto permita aos planos de saúde otimizar ainda mais as estratégias de precificação e oferecer prêmios reduzidos, como resultado de ter custos inferiores associados a esquemas de prevenção e perda de fraude.

Cálculos de precificação aprimorados possibilitariam prêmios de média inferior, bem como opções premium mais adequadas. A complexidade da assistência médica reflete-se nos desafios associados à elaboração de estratégias de precificação de fácil compreensão. Novos regulamentos que requerem transparência e custos médios inferiores de assistência médica tornam ainda mais importante otimizar os modelos de precificação.⁹⁶

Caso de uso

Medicina de precisão

A medicina de precisão tem como objetivo personalizar as abordagens de prevenção e tratamento para o indivíduo.⁹⁷ Devido à complexidade da biologia humana, a medicina individualizada exige a consideração de aspectos que vão bem além da assistência médica padrão. De fato, a assistência médica tem uma contribuição relativa de apenas 10 a 20% para os resultados, fatores relacionados à saúde, comportamentais e socioeconômicos e aspectos ambientais contam para os outros 80 a 90%.⁹⁸ Computacionalmente, as interdependências e correlações entre esses diferentes contribuidores criam desafios formidáveis no que diz respeito à otimização da eficácia do tratamento.

Como resultado, muitas terapias existentes falham em alcançar os seus efeitos desejados devido à variabilidade individual. Por exemplo, apenas um terço dos pacientes respondem a terapias de câncer baseadas em medicamentos. Em alguns casos, as consequências das terapias medicamentosas podem ser desastrosas, só na Europa, até 200.000 pessoas morrem a cada ano devido a reações adversas a medicamentos.⁹⁹

Um aspecto chave da personalização das abordagens médicas é a proatividade. Como mencionado, tratamentos precoces e intervenções preventivas tendem a melhorar drasticamente os resultados e otimizar os custos. O aprendizado clássico de máquina já mostrou alguma promessa ao prever o risco de doenças futuras para um grupo de destino de pacientes baseado em EHRs.¹⁰⁰ No entanto, os desafios permanecem devido às características dos EHRs e de outros dados relevantes para a saúde, incluindo o nível de ruído, o tamanho do espaço de recurso relevante e a complexidade das interações entre os recursos. Isto sugere que técnicas de aprendizado de máquina aprimoradas pela quantum supervisionadas e não supervisionadas poderiam permitir previsões de risco mais precoces, precisas e granulares.¹⁰¹ Eventualmente, os médicos podem até mesmo ter as ferramentas para entender como o risco de um indivíduo para qualquer condição específica muda ao longo do tempo, possibilitado por diagnósticos virtuais contínuos baseados em fluxos de dados contínuos de indivíduos.

No entanto, conhecer o risco de doença de um indivíduo não é suficiente. Igualmente importante é saber como intervir medicamente de forma eficaz com relação qualquer indivíduo. Um caminho neste esforço é o estudo da sensibilidade medicamentosa no nível celular. Por exemplo, ao levar em conta as características genômicas das células cancerígenas e as propriedades químicas dos medicamentos, modelos que podem prever a eficácia dos medicamentos contra o câncer a um nível granular já estão sendo investigados.¹⁰² O aprendizado de máquina aprimorado pela quantum pode dar suporte a novos avanços nessa área e, em última instância, ativar modelos de inferência causal para medicamentos.

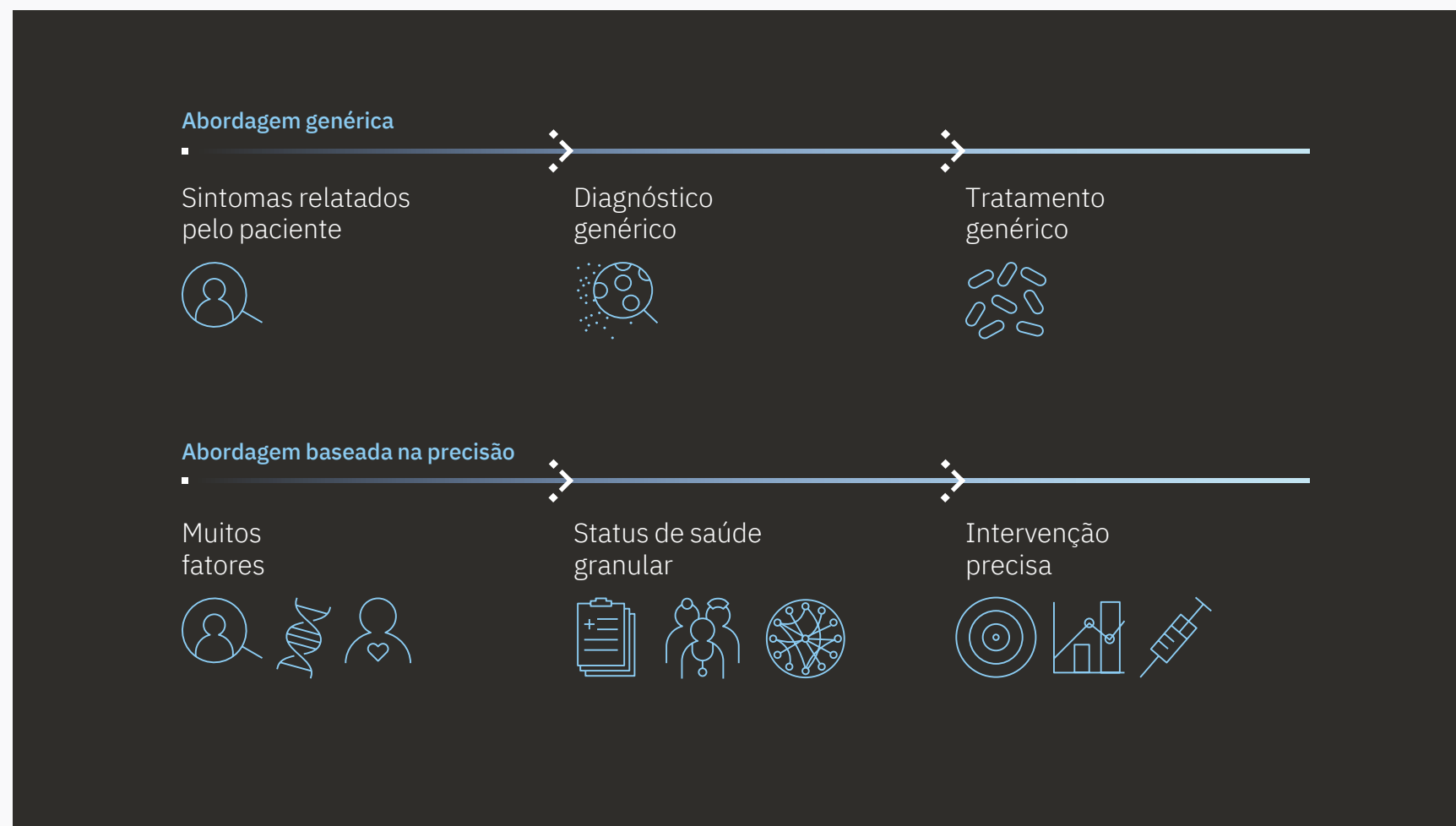
O objetivo da medicina de precisão é alto: identificar e explicar relacionamentos entre intervenções e tratamentos por um lado e resultados por outro para fornecer a próxima melhor ação médica no nível do indivíduo. Tradicionalmente, o diagnóstico da condição de um paciente tem sido fortemente baseado nos sintomas relatados pelo paciente, o que consome tempo e resulta em um diagnóstico genérico e tratamento associado que frequentemente falham. Nós estamos caminhando agora para uma configuração onde as

percepções de dados adicionais relevantes para a saúde podem ser obtidas para chegar eficientemente a um status de saúde contínuo e preciso, com intervenções personalizadas (ver Figura 18). Embora ainda estejamos longe de perceber isso, a quantum computing pode ser capaz de acelerar nosso progresso em direção a um modelo tão novo.

Este modelo permitiria às organizações de assistência médica otimizar e personalizar seus serviços ao longo de todo o cuidado contínuo. Além disso, adesão e engajamento do paciente também são considerações importantes nas decisões sobre a próxima melhor ação médica para um determinado indivíduo. A modelagem computacional avançada também pode abordar esta área.¹⁰³ Por exemplo, a adesão à análise de dados permite que a sincronização das intervenções seja otimizada para os indivíduos.¹⁰⁴ Eventualmente, o gerenciamento de saúde populacional neste nível de granularidade poderá tornar-se possível.¹⁰⁵

Figura 18

A quantum computing tem o potencial de acelerar a transição do diagnóstico e tratamento genéricos para a intervenção de status de saúde de precisão.





Aplicações da quantum computing

Ciências biológicas

Em ciências biológicas, os principais desafios incluem o entendimento dos relacionamentos entre sequência, estrutura e função e como os biopolímeros interagem entre si, bem como com pequenas moléculas orgânicas que são nativas do corpo ou desenvolvidas como medicamentos. Esses problemas são computacionalmente complexos e estão no cerne da análise genômica, do desenvolvimento de medicamentos e das previsões de enovelamento de proteínas.

Como resultado, agora há uma corrida interdisciplinar em direção às aplicações quantum. Dentro de cinco anos, é possível que a quantum computing seja usada extensivamente por novas categorias de profissionais e desenvolvedores para resolver problemas antes considerados insolúveis.¹⁰⁶

Tendências como a dispersão de sequenciamento eficiente de baixo custo e o advento da era "ômica" resultou nas empresas de biociências explorando formas de aproveitar a diversidade de novas fontes de dados. Além disso, o setor de ciências biológicas está entre aqueles em que as pessoas poderiam experimentar mais diretamente futuros benefícios da quantum computing.

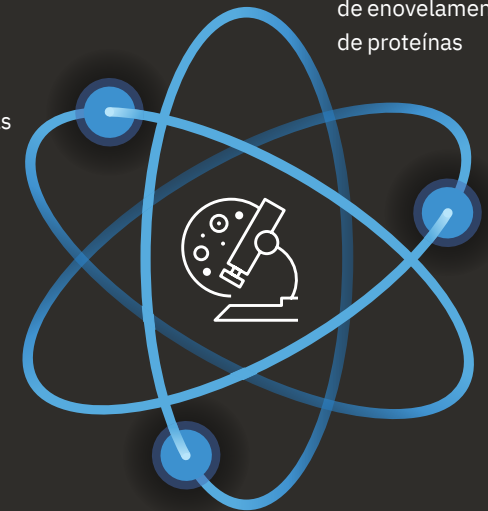
A exploração e a implementação de casos de uso de quantum computing, com mais avanços científicos em hardware e algoritmos de quantum computing, devem permitir a transição do potencial para a realidade nos próximos anos. A quantum computing tem o potencial de ativar uma gama de casos de uso disruptivos em ciências biológicas. Eles incluem:

- Criar terapias de medicina de precisão, vinculando genomas e resultados
- Melhorar os resultados dos pacientes por meio do aumento da eficiência da descoberta de medicamentos em pequenas moléculas
- Desenvolver novos produtos biológicos baseados em previsões de enovelamento de proteínas.

Casos de uso de quantum computing para ciências biológicas

Desenvolver novos produtos biológicos baseados em previsões de enovelamento de proteínas

Criar terapias de medicina de precisão vinculando genomas e resultados



Melhorar os resultados dos pacientes por meio do aumento da eficiência da descoberta de medicamentos em pequenas moléculas

Caso de uso

Criar terapias de medicina de precisão vinculando genomas e resultados

O investimento de US\$ 2,7 bilhões em 15 anos para o sequenciamento preciso do genoma humano e posteriores reduções nos custos de sequenciamento, ajudou a lançar a era "ômica".¹⁰⁷ Assim, o entendimento das sequências primárias não é mais uma limitação importante para os cientistas. Em vez disso, o foco da pesquisa mudou para tirar vantagem de novas ferramentas computacionais para aprofundar nosso entendimento de como sequências genômicas se traduzem em função. No entanto, esta tarefa é extremamente difícil com os métodos tradicionais devido ao tamanho do genoma humano (cerca de 3 bilhões de pares de bases de DNA), a variação que existe entre as populações e a ampla variedade de resultados de saúde.¹⁰⁸

Potenciais oportunidades na interseção do genoma e da quantum computing incluem:¹⁰⁹

- Descobrimto e previsão de motivo:¹¹⁰ DNA, RNA e sequências de aminoácidos foram todos moldados por meio de pressões evolutivas. Um desafio bioinformático é identificar motivos nestas sequências, como padrões que ativam ou inibem a expressão gênica e, assim, nos ajudam a entender melhor os mecanismos de regulação gênica. Algoritmos clássicos para identificar motivos são computacionalmente caros porque requerem a procura exaustiva de todos os arranjos possíveis para um determinado comprimento.

A aplicação de algoritmos de otimização quantum poderia promover nosso entendimento do fator de transcrição e conjunto de genomas de novo.

- Estudos de associação em todo o genoma (GWAS):¹¹¹ o objetivo do GWAS é encontrar associações entre um traço selecionado ou doença e mutações únicas no DNA. Os métodos atuais são inerentemente de alta dimensão e computacionalmente desafiadores. Isso destaca o potencial da quantum computing para limitar significativamente as listas de genes candidatos que precisam ser validados experimentalmente. A quantum computing também pode permitir o progresso em redes de genes e modelos gráficos.

- A previsão de estrutura de novo:¹¹² com o crescimento explosivo das informações e da tecnologia de sequenciamento, existe uma diferença crescente no entendimento de como a sequência se traduz em estrutura e, em última instância, função (veja a Figura 19). Apesar dos métodos avançados, como os modelos de homologia, as abordagens clássicas de previsão de estrutura de novo muitas vezes escalam de maneira ineficiente.¹¹³ Por exemplo, o espaço de procura de configurações de proteínas potenciais aumenta exponencialmente com o tamanho de uma proteína, inviabilizando as abordagens da força bruta. A quantum computing tem o potencial de melhorar drasticamente as previsões estruturantes para moléculas de RNA, proteínas, complexos de DNA-proteína e outras construções.

Tais avanços poderiam eventualmente ajudar a realizar a visão de poderosos modelos digitais gêmeos.¹¹⁴ Gêmeos digitais orgânicos podem ser usados em testes farmacogenômicos para prever a resposta de um indivíduo a medicamentos específicos ao longo do tempo, auxiliando no desenvolvimento de terapias de medicina de precisão. Gêmeos digitais inorgânicos adicionais poderiam ser criados para otimizar a pesquisa ou instalações de assistência por meio dos aspectos de testes de estresse comparativos, como procedimentos, níveis de equipe, layout da instalação e equipamento. Chegará o dia em que uma equipe médica poder dizer a um paciente: "com base no seu genoma, temos confiança de que este será o resultado específico de seu tratamento", não será mais um objetivo puramente utópico.

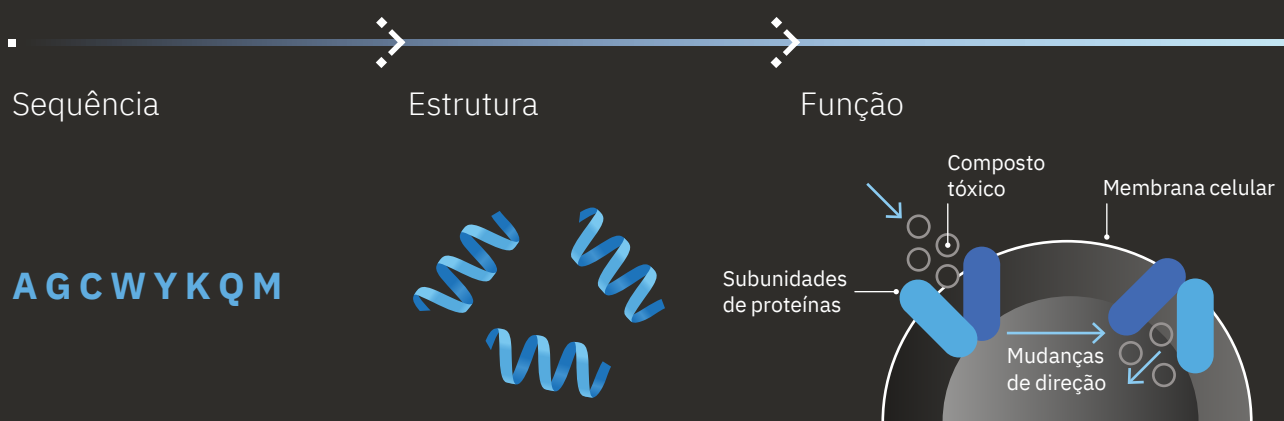


Figura 19

Dogma sequência-estrutura-função
no cerne da pesquisa biológica

Caso de uso

Melhorar os resultados dos pacientes por meio do aumentada eficiência da descoberta de medicamentos em pequenas moléculas

O desenvolvimento e a descoberta de medicamentos em pequenas moléculas sempre foi um complexo processo de otimização. Seu objetivo: melhorar os resultados dos pacientes, projetando um novo ativo molecular com relação ao alvo relacionado à doença e, simultaneamente, reduzir a atividade com relação aos milhares de outros alvos no corpo para evitar efeitos colaterais e toxicidades perigosas. Em busca deste objetivo, normalmente 200.000 a $>10^6$ compostos são triados em fluxos de trabalho experimentais e computacionais, e alguns milhares são produzidos e testados na necessária bateria de ensaios.¹¹⁵ Aqui, a computação tem há muito desempenhado seu papel, em grande parte por meio de abordagens de similaridade e classificação para dar suporte à triagem e à estrutura 3D detalhada, bem como cálculos de energia para dar suporte ao design baseado em destino mais preciso.

A quantum computing tem uma diversidade de aplicações potenciais na descoberta de medicamentos.¹¹⁶ A tecnologia poderia ajudar a avaliar uma maior quantidade de moléculas candidatas e avaliá-las com mais precisão usando, por exemplo, métodos de classificação como os empregados na triagem preliminar e fora do destino. E ela pode impactar a classificação associada à descoberta preliminar e à modelagem/modelação de desvios de alvo na otimização preliminar, bem como com a modelagem baseada em física realizada na otimização preliminar quando uma estrutura de proteína 3D ou um bom modelo está disponível.

É importante a capacidade de estudar moléculas mais potencialmente e farmacologicamente ativas, para além das cerca de 10^7 substâncias orgânicas e inorgânicas que foram relatadas na literatura científica até hoje. Na realidade, o número total de possíveis compostos à base de carbono cujas massas moleculares são semelhantes às dos sistemas vivos é de cerca de 10^{60} .¹¹⁷ Existem, assim, muitas ordens de magnitude de espaço químico desconhecido a explorar, claramente uma área de grande potencial. Isto abre a porta, por exemplo, para avaliar melhor bibliotecas ultra-grandes de pequenas moléculas orgânicas agora disponíveis para compra com síntese "sob demanda".¹¹⁸

A escoragem particularmente precisa é possível por meio de simulações moleculares dinâmicas de complexos de proteínas-ligantes. Aqui, a quantum computing poderia oferecer vantagens significativas para a realização de abordagens de mecânica quantum/molecular híbrida, bem como o desenvolvimento dos parâmetros subjacentes do campo clássico de força. Tais avanços se aplicariam à otimização preliminar e ao crescente campo da química do processo computacional, como na modelagem de reatividade enzimática e estereosseletividade para dar suporte à biocatálise na fabricação de medicamentos.¹¹⁹

Caso de uso

Desenvolver novos produtos biológicos baseados em previsões de enovelamento de proteínas

Em contraste com os medicamentos de moléculas pequenas, no caso da biologia, uma proteína ou outra macromolécula é o medicamento. Drogas biológicas, como anticorpos, insulina e muitas vacinas, têm sido empregadas há décadas.¹²⁰ Nos últimos anos, as empresas farmacêuticas estão cada vez mais focadas na área de biologia para tratar inúmeras doenças. Desenhar a estrutura 3D da biologia é importante para a função, a especificidade e a estabilidade.¹²¹

Casos de modelagem de proteínas do mundo real envolvem a exploração da enorme quantidade de padrões de dobras possíveis, como ilustrado no paradoxo de Levinthal (veja a Figura 20).¹²² O crescimento exponencial das conformações potenciais com o comprimento da cadeia torna o problema um desafio para os computadores clássicos. Por exemplo, em um modelo, uma cadeia de 20 aminoácidos tem 109 conformações potenciais e cadeias com 60 e 100 aminoácidos têm 10^{28} e 10^{47} conformações, respectivamente.¹²³ Além disso, como parte da definição de produto biológico da Food and Drug Administration dos EUA, uma proteína deve conter mais de 40 aminoácidos.¹²⁴

Embora muitas proteínas possam ser modeladas adequadamente por analogia às estruturas conhecidas, um destino importante e desafiador do projeto é o loop H3 hipervariável na região dos anticorpos que determinam a complementaridade. Este ciclo normalmente contém 3 a 20 resíduos mas, às vezes, é muito mais longo, e a representação precisa tem sido o objeto de muito estudo.¹²⁵

A quantum computing tem o potencial para superar muitos destes desafios computacionais, por exemplo, acompanhando a grande quantidade de possíveis estruturas e identificando as mais parecidas. Uma recente publicação demonstrou que a quantum computing poderia acompanhar um peptídeo em duas conformações comuns representadas em um reticulado, alfa-hélice e folha-beta, e alavancou um algoritmo quantum para a procura.¹²⁶ Também foi demonstrado que a quantum computing pode melhorar drasticamente o cálculo dos campos de força da proteína.¹²⁷ À medida que o volume quantum aumentar, a capacidade da quantum computing para acompanhar as conformações adicionais aumentará adequadamente.¹²⁸ O progresso recente na previsão da estrutura de proteínas com redes clássicas de deep-learning sugere que algoritmos quantum podem ser particularmente valiosos quando polipeptídeos com aminoácidos não naturais são estudados, onde os dados de treinamento de aprendizado de máquina adequados são bastante limitados.¹²⁹

Finalmente, como com todas as aplicações quantum potenciais discutidas anteriormente, a quantum computing poderia ativar mais casos de uso em áreas tangenciais. Por exemplo, a biologia tende a ser muito menos estável do que os medicamentos em pequenas moléculas. A otimização da própria cadeia de suprimento biológico, desde a formulação até a remessa e, em última instância, o transporte para farmácias, hospitais e até mesmo casas, é um processo complicado que também pode ser melhorado pela quantum computing.¹³⁰

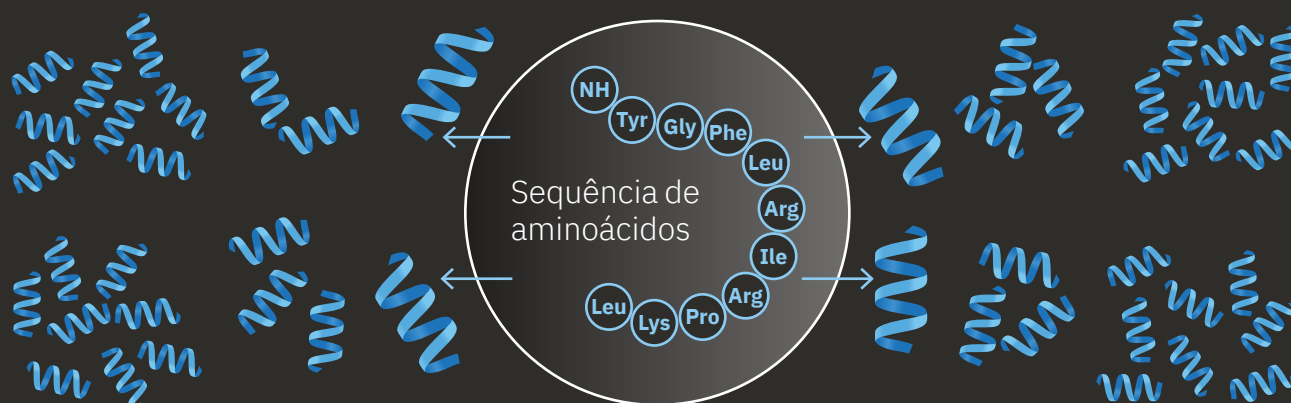
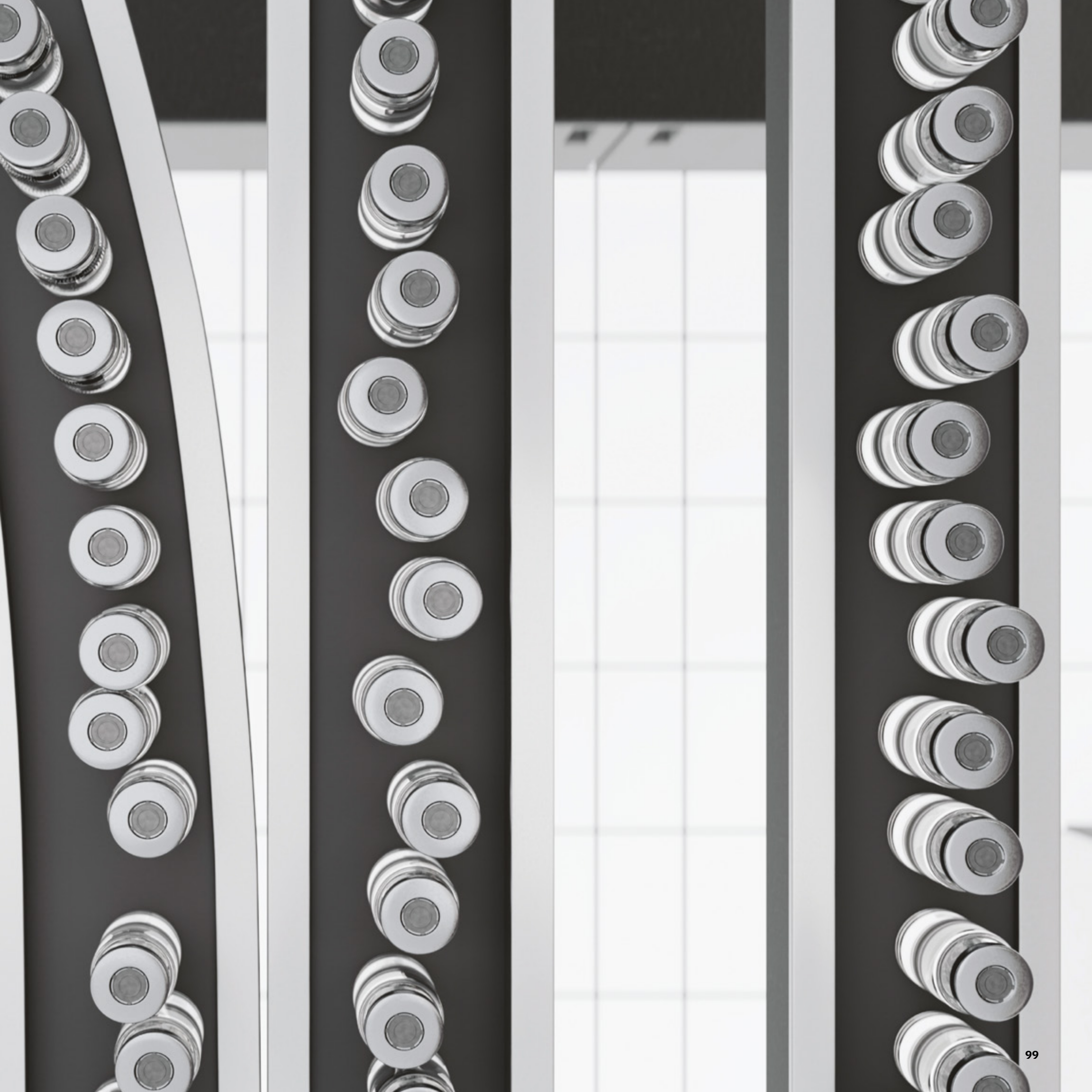


Figura 20

Paradoxo de Levinthal

Mesmo uma proteína com apenas 100 aminoácidos tem cerca de 10^{47} conformações potenciais. Mas na realidade muitas proteínas dobram em sua estrutura nativa dentro de segundos.



Notas e fontes

Introdução

A Quantum Decade

- 1 “Moore’s Law.” Computer History Museum. Acessado em 19 de março de 2021. <https://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/267>
- 2 “Quantum computing.” IBM Institute for Business Value. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/technology/quantum-computing>
- 3 “2021 CEO study: Find your essential.” IBM Institute for Business Value. Fevereiro de 2021. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/c-suite-study/ceo>
- 4 Baseado em informação interna da IBM.
- 5 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall e Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. Novembro de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration>

Capítulo 1

Compreensão quantum e a era da descoberta

- 6 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. Janeiro de 2021. https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMRResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf
- 7 Benioff, Paul. “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines.” *Journal of Statistical Physics*. Maio de 1980. https://www.researchgate.net/publication/226754042_The_computer_as_a_physical_system_A_microscopic_quantum_mechanical_Hamiltonian_model_of_computers_as_represented_by_Turing_machines; Chow, Jerry e Jay Gambetta. “The Quantum Experience: Feynman’s vision comes into focus.” ITPortal. 9 de maio de 2016. <https://www.itportal.com/2016/05/09/the-quantum-experience-feynmans-vision-comes-into-focus/>.
- 8 Gambetta, Jay. “IBM’s Roadmap For Scaling Quantum Technology.” IBM Research Blog. 15 de setembro de 2020. <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/>
- 9 Bernhardt, Chris. *Quantum Computing for Everyone*. The MIT Press. 2019.

- 10 Baseado em informação interna da IBM.
- 11 Bell, Lee. “What is Moore’s Law? WIRED explains the theory that defined the tech industry.” *WIRED*. 28 de agosto de 2016. <https://www.wired.co.uk/article/wired-explains-moores-law>; “Moore’s Law.” Britannica.com. Acessado em 19 de março de 2021. <https://www.britannica.com/technology/Moores-law>
- 12 Rotman, David. “We’re not prepared for the end of Moore’s Law.” *MIT Technology Review*. 24 de fevereiro de 2020. <https://www.technologyreview.com/2020/02/24/905789/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/>
- 13 Baseado em informação interna da IBM.
- 14 “What’s next: The future of quantum computing.” Vídeo do IBM Research. 8 de maio de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=zOGNoD07mcU>
- 15 Baseado em informação interna da IBM.
- 16 “Cleveland Clinic and IBM Unveil Landmark 10-Year Partnership to Accelerate Discovery in Healthcare and Life Sciences.” IBM News Room. 30 de março de 2021. <https://newsroom.ibm.com/2021-03-30-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-Landmark-10-Year-Partnership-to-Accelerate-Discovery-in-Healthcare-and-Life-Sciences>
- 17 “Messenger RNA (mRNA).” National Human Genome Research Institute. Acessado em 19 de março de 2021. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/messenger-rna>
- 18 Wright, Lawrence. “The Plague Year.” *The New Yorker*. 28 de dezembro de 2020. <https://www.newyorker.com/magazine/2021/01/04/the-plague-year>
- 19 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. Janeiro de 2021. https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMRResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf
- 20 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall e Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. Novembro de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration>

Capítulo 2

Quantum readiness and the power of experimentation

- 21 “What problems could quantum computers solve?” Vídeo. IBM Digital Nordic. 20 de fevereiro de 2020. <https://www.ibm.com/blogs/nordic-mps/problems-quantum-computers-solve/>
- 22 Baseado em informação interna da IBM.
- 23 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. Setembro de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 24 Gao, Qi, Gavin O. Jones, Mario Motta, Michihiko Sugawara, Hiroshi C. Watanabe, Takao Kobayashi, Eriko Watanabe, Yu-ya Ohnishi, Hajime Nakamura e Naoki Yamamoto. “Applications of Quantum Computing for Investigations of Electronic Transitions in Phenylsulfonyl-carbazole TADF Emitters.” arXiv.org. 31 de julho de 2020. <https://arxiv.org/abs/2007.15795>
- 25 Hong, Gloria, Xuemin Gan, Céline Leonhardt, Zhen Zhang, Jasmin Seibert, Jasmin M. Busch e Stefan Bräse. “A Brief History of OLEDs—Emitter Development and Industry Milestones.” *Advanced Materials*. 4 de março de 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202005630>

- 26 Divyanshi, Tewari. “Organic LED Market.” Allied Market Research. Abril de 2020. <https://www.alliedmarketresearch.com/organic-oled-market>
- 27 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Core Concepts.” IBM Institute for Business Value. Maio de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 28 Ibid.
- 29 Ibid.
- 30 “Post-Quantum Cryptography: Post-Quantum Cryptography Standardization.” National Institute of Standards and Technology. 06 de abril de 2021. <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>
- 31 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. Setembro de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise>
- 32 Joshi, Shai, Varun Bijlani, Sreejit Roy e Sunanda Saxena. “Reimagining service delivery: Emerging stronger with the new Dynamic Delivery model.” IBM Institute for Business Value. Agosto de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/service-delivery>; Comfort, Jim, Blaine Dolph, Steve Robinson, Lynn Kesterson-Townes e Anthony Marshall. “The hybrid cloud platform advantage: A guiding star to enterprise transformation.” IBM Institute for Business Value. Junho de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/hybrid-cloud-platform>
- 33 Sutor, Robert, Scott Crowder e Frederik Flöther. “Building your quantum capability: The case for joining an 'ecosystem.'” IBM Institute for Business Value. Janeiro de 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco>
- 34 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. 18 de novembro de 2020. <https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/>
- 35 Entrevista interna da IBM.
- 36 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. 18 de novembro de 2020. <https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/>
- 37 Entrevista interna da IBM.
- 38 Metz, Cade. “The Next Tech Talent Shortage: Quantum Computing Researchers.” *The New York Times*. 21 de outubro de 2018. <https://www.nytimes.com/2018/10/21/technology/quantum-computing-jobs-immigration-visas.html>
- 41 Baseado em informação interna da IBM.
- 42 Marr, Bernard. “How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data.” *Forbes*. 5 de setembro de 2017. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/?sh=72ab8ea05609>; Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe e Seth Lloyd. “Quantum machine learning.” *Nature*. 13 de setembro de 2017. <https://www.nature.com/articles/nature23474>
- 43 Torlai, Giacomo, Guglielmo Mazzola, Juan Carrasquilla, Matthias Troyer, Roger Melko e Giuseppe Carleo. “Neural-network quantum state tomography.” *Nature*. 26 de fevereiro de 2018. <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0048-5>
- 44 Leprince-Ringuet, Daphne. “IBM and ExxonMobil are building quantum algorithms to solve this giant computing problem.” ZDNet. 11 de fevereiro de 2021. <https://www.zdnet.com/article/ibm-and-exxonmobil-are-building-quantum-algorithms-to-solve-this-giant-optimization-problem/>
- 45 Liu, Yunchao, Srinivasan Arunachalam e Kristan Temme. “A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning.” arXiv.org. 1º de dezembro de 2020. <https://arxiv.org/pdf/2010.02174.pdf>
- 46 Baseado em entrevistas internas da IBM.
- 47 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. Junho de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. A nomenclatura e alguns detalhes mudaram desde a publicação.
- 48 Ibid.
- 49 Sutor, Bob. “Scientists Prove a Quantum Computing Advantage over Classical.” IBM Research Blog. 18 de outubro de 2018. <https://www.ibm.com/blogs/research/2018/10/quantum-advantage-2/>; Sutor, Robert S. *Dancing with Qubits*. Packt Publishing. 2019. <https://www.packtpub.com/data/dancing-with-qubits>
- 50 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer, Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli e Kristan Temme. “Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.” *Quantum and Science Technology*. Junho de 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822>; Havlicek, Vojtech, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Jerry M. Chow e Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces.” *Nature*. 2019. <https://arxiv.org/pdf/1804.11326.pdf>
- 51 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. Junho de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. A nomenclatura e alguns detalhes mudaram desde a publicação.
- 52 Ibid.
- 53 “Exploring quantum computing use cases for financial services.” IBM Institute for Business Value. Setembro de 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/exploring-quantum-financial>
- 54 Yndurain, Dr. Elena e Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. Junho de 2020. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantum-apps>. A nomenclatura e alguns detalhes mudaram desde a publicação.
- 39 Gil, Dr. Darío, Jesus Mantas, Dr. Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Dr. Frederik Flöther e Chris Schnabel. “Coming soon to your business—Quantum computing: Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology.” IBM Institute for Business Value. Novembro de 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy#..>
A nomenclatura e alguns detalhes mudaram desde a publicação.
- 40 Eddins, Andrew, Mario Motta, Tanvi P. Gujarati, Sergey Bravyi, Antonio Mezzacapo, Charles Hadfield e Sarah Sheldon. “Doubling the size of quantum simulators by entanglement forging.” arXiv.org. 23 de abril de 2021. <https://arxiv.org/pdf/2104.10220.pdf>

Capítulo 3

Quantum Advantage and the quest for business value

Guia do setor

Linhas aéreas

- 55 Kwok, Linchi. “Will the Hospitality and Travel Industry Recover in 2021?” Hospitality Net. 18 de fevereiro de 2021. <https://www.hospitalitynet.org/opinion/4103064.html>; “Deep Losses Continue Into 2021.” International Air Transport Association. Comunicado à imprensa da IATA. 24 de novembro de 2020. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-11-24-01/>
- 56 Woerner, Stefan e Daniel J. Egger. “Quantum risk analysis.” *Nature*. 8 de fevereiro de 2019. <https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6>
- 57 Havlíček, Vojtěch, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow e Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces.” *Nature*. 13 de março de 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2>
- 58 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer, Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli e Kristan Temme. “Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.” *Quantum Science and Technology*. 19 de junho de 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822>

Guia do setor

Setor bancário e mercados financeiros

- 59 Rutkowski, Marek. “The Black-Scholes Model.” University of Sydney. 2016. http://www.maths.usyd.edu.au/u/UG/SM/MATH3075/r/Slides_8_Black_Scholes_Model.pdf
- 60 Flother, Frederik, Darío Gil, Lynn Kesterson-Townes, Jesus Mantas, Chris Schnabel e Bob Sutor. “Coming soon to your business—Quantum Computing.” IBM Institute for Business Value. Novembro de 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy>; Lacan, Francis, Stefan Woerner e Elena Yndurain. “Getting your financial institution ready for the quantum computing revolution.” IBM Institute for Business Value. Abril de 2019. <https://www.ibm.com/downloads/cas/MBZYGRKY>
- 61 Kaemingk, Diana. “Reducing customer churn for banks and financial institutions.” Qualtrics. 29 de agosto de 2018. <https://www.qualtrics.com/blog/customer-churn-banking/>
- 62 “Relatório Global Findex Database 2017. Capítulo 2: The Unbanked”. Banco Mundial. 2017. https://globalfindex.worldbank.org/sites/globalfindex/files/chapters/2017%20Findex%20full%20report_chapter2.pdf
- 63 Watson, Greg. “The Future of Client Onboarding for Financial Institutions.” CLM Industry Trends Report Series. Fevereiro de 2019. <https://www.fenargo.com/blog/the-future-of-client-onboarding-for-financial-institutions/>; Help Net Security. 4 de março de 2021. <https://www.helpnetsecurity.com/2021/03/24/total-combined-fraud-losses/>
- 64 Culp, Steve. “Banks Need New Approaches In Complying With Financial Crimes Regulations.” *Forbes*. 5 de março de 2018. <https://www.forbes.com/sites/steveculp/2018/03/05/banks-need-new-approaches-in-complying-with-financial-crimes-regulations/?sh=7e5f18aa4147>
- 65 Agrawal, Amit. “The future of client onboarding.” FinTech Futures. 24 de setembro de 2018. <https://www.fintechfutures.com/2018/09/the-future-of-client-onboarding/>

- 66 Havlicek, Vojtech, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow e Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum enhanced feature spaces.” *Nature*, volume 567. 13 de março de 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2>
- 67 “Basel III: international regulatory framework for banks.” Bank for International Settlements. <https://www.bis.org/bcbs/basel3.htm>
- 68 “Regulatory costs expected to more than double for financial services firms, according to survey from Duff & Phelps.” *Global Banking & Finance Review*. 28 de abril de 2017. <https://www.globalbankingandfinance.com/regulatory-costs-expected-to-more-than-double-for-financial-services-firms-according-to-survey-from-duff-phelps/>; “The outlook for financial services regulation.” *KPMG Horizons*. Janeiro de 2019. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/01/horizons-magazine.pdf>
- 69 Chirikhin, Andrey. “Overview of Credit Valuation Adjustments.” 29 de junho de 2017. <https://www.linkedin.com/pulse/overview-credit-valuation-adjustments-buy-side-andrey-chirikhin/>
- 70 “The Evolution of XVA Desk Management. Key findings from practitioners at 37 global financial institutions.” Making the Most of XVA Practitioner Perspectives Report. Fintegral e IACEMP. Maio de 2018. <http://iacpm.org/wp-content/uploads/2018/06/IACPM-Fintegral-Making-the-Most-of-XVA-2018-White-Paper.pdf>; Stafford, Philip. “What is Mifid II and how will it affect EU’s financial industry?” *Financial Times*. 15 de setembro de 2017. <https://www.ft.com/content/ae935520-96ff-11e7-b83c-9588e51488a0>
- 71 Geddes, George. “Bond ETF assets to hit \$2trn by 2024, predicts BlackRock.” ETF Stream. 26 de junho de 2019. <https://www.etfstream.com/news/bond-etf-assets-to-hit-2trn-by-2024-predicts-blackrock/>; White, Amanda. “Investors buoyed by ESG frameworks.” top1000funds. 25 de junho de 2019. <https://www.top1000funds.com/2019/06/investors-buoyed-by-esg-frameworks/>

Guia do setor

Química e Petróleo

- 72 “Chemical Industry Contributes \$5.7 Trillion To Global GDP And Supports 120 Million Jobs, New Report Shows.” O Conselho Europeu da Indústria Química. 11 de março de 2019. <https://cefic.org/media-corner/newsroom/chemical-industry-contributes-5-7-trillion-to-global-gdp-and-supports-120-million-jobs-new-report-shows/>
- 73 Baseado em cálculos da IBM.
- 74 Coughlin, Tom. “175 Zettabytes By 2025.” *Forbes*. 27 de novembro de 2018. <https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025/?sh=7483bab9b6d8>
- 75 Kandala, Abhinav, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow e Jay M. Gambetta. “Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets.” *Nature*. 13 de setembro de 2017. <https://www.nature.com/articles/nature23879>
- 76 Bourzac, Katherine. “Chemistry is quantum computing’s killer app.” *Chemical & Engineering News*. 30 de outubro de 2017. <https://cen.acs.org/articles/95/i43/Chemistry-quantum-computings-killer-app.html>
- 77 Stamatopoulos, Nikitas, Daniel J. Egger, Yue Sun, Christa Zoufal, Raban Iten, Ning Shen e Stefan Woerner. “Option Pricing using Quantum Computers.” *ArXiv*. 5 de julho de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1905.02666.pdf>
- 78 Cahill, Jay. “Minimizing Valuable Octane Giveaway.” Emerson. 2016. <https://www.emersonautomationexperts.com/2016/industry/refining/minimizing-valuable-octane-giveaway/>; “Oil Refineries Market Report 2018-2028.” MarketWatch. 23 de agosto de 2018.

- 79 “Darcy’s law.” Encyclopaedia Britannica. 28 de maio de 2009. <https://www.britannica.com/science/Darcys-Law>
- 80 Mikulka, Justin. “Fracking in 2018: Another Year of Pretending to Make Money.” Resilience. 17 de janeiro de 2019. <https://www.resilience.org/stories/2019-01-17/fracking-in-2018-another-year-of-pretending-to-make-money/>; Merva, John. “Oil Economics - How Much Does An Oil And Gas Well Cost?” Seeking Alpha. 3 de janeiro de 2017. <https://seekingalpha.com/article/4034075-oil-economics-how-much-oil-and-gas-well-cost>
-
- Guia do setor**
Assistência médica
- 81 Kent, Jessica. “Big Data to See Explosive Growth, Challenging Healthcare Organizations.” *Health IT Analytics*. 3 de dezembro de 2018. <https://healthitanalytics.com/news/big-data-to-see-explosive-growth-challenging-healthcare-organizations>
- 82 Bodenheimer, MD, Thomas e Christine Sinsky, MD. “From Triple to Quadruple Aim: Care of the Patient Requires Care of the Provider.” *Annals of Family Medicine*. Novembro/Dezembro de 2014. <http://www.annfam.org/content/12/6/573.full.pdf>
- 83 Rjaibi, Walid, Sridhar Muppidi e Mary O’Brien. “Wielding a double-edged sword: Preparing cybersecurity now for a quantum world.” IBM Institute for Business Value. Julho de 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumsecurity>
- 84 Birtwistle, Mike. “Saving lives and averting costs? The case for earlier diagnosis just got stronger.” *Cancer Research UK*. 22 de setembro de 2014. <https://scienceblog.cancerresearchuk.org/2014/09/22/saving-lives-and-averting-costs-the-case-for-earlier-diagnosis-just-got-stronger/>
- 85 Jack, Andrew. “Affordable diagnostics is the missing link in medicine.” *Financial Times*. 15 de dezembro de 2015. <https://www.ft.com/content/46c4e51a-9451-11e5-bd82-c1fb87bef7af>
- 86 Singh, Hardeep, Ashley N. D. Meyer e Eric J. Thomas. “The frequency of diagnostic errors in outpatient care: estimations from three large observational studies involving US adult populations.” *BMJ Quality and Safety*. 17 de abril de 2014. <https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/23/9/727.full.pdf>; Graber, Mark L. “The incidence of diagnostic error in medicine.” *BMJ Quality and Safety*. 15 de junho de 2013. https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/22/Suppl_2/ii21.full.pdf
- 87 Wang, Daojing e Steven Bodovitz. “Single cell analysis: the new frontier in ‘Omics.’” Departamento de Energia dos EUA Gabinete de Informação Científica e Técnica. 14 de janeiro de 2010. <https://www.osti.gov/servlets/purl/983315>
- 88 Andreyev, Dmitry S. e Boris L. Zybilov. “Integration of Flow Cytometry and Single Cell Sequencing.” *Tendências na área de Biotecnologia*. 1 de fevereiro de 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.09.002>
- 89 McDermott, Jason E, Jing Wang, Hugh Mitchell, Bobbie-Jo Webb-Robertson, Ryan Hafen, John Ramey e Karin D Rodland. “Challenges in biomarker discovery: combining expert insights with statistical analysis of complex omics data.” *Expert Opinion on Medical Diagnostics*. 27 de agosto 2012. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1517/17530059.2012.718329>
- 90 Shahrjooihighighi, Aliasghar, Hichem Frigui, Xiang Zhang, Xiaoli Wei, Biyun Shi e Ameni Trabelsi. “An Ensemble Feature Selection Method for Biomarker Discovery.” *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*. 2017. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6420823/pdf/nihms-1016736.pdf>
- 91 “How insurance companies set health premiums.” HealthCare.gov. Acessado em 8 de maio de 2020. <https://www.healthcare.gov/how-plans-set-your-premiums/>
- 92 Woerner, Stefan e Daniel J. Egger. “Quantum risk analysis.” *npj Quantum Information*. 8 de fevereiro de 2019. <https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6.pdf>
- 93 “The Challenge of Health Care Fraud.” National Health Care Anti-Fraud Association. Acessado em 8 de maio de 2020. <https://www.nhcaa.org/tools-insights/about-health-care-fraud/the-challenge-of-health-care-fraud/>
- 94 Obodoekwe, Nnaemeka e Dustin Terence van der Haar. “A Critical Analysis of the Application of Data Mining Methods to Detect Healthcare Claim Fraud in the Medical Billing Process.” *Ubiquitous Networking*. 3 de novembro de 2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02849-7_3
- 95 Yndurain, Elena, Stefan Woerner e Daniel J. Egger. “Exploring quantum computing use cases for financial services.” IBM Institute for Business Value. Setembro de 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/exploring-quantum-financial>
- 96 “Trump Administration Announces Historic Price Transparency Requirements to Increase Competition and Lower Healthcare Costs for All Americans.” Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA. 15 de novembro de 2019. <https://www.hhs.gov/about/news/2019/11/15/trump-administration-announces-historic-price-transparency-and-lower-healthcare-costs-for-all-americans.html>
- 97 Nilesh, Jain. “How precision medicine will change the future of healthcare.” Fórum Econômico Mundial. 1º de janeiro de 2019. <https://www.weforum.org/agenda/2019/01/why-precision-medicine-is-the-future-of-healthcare/>
- 98 Hood, Carlyn M., Keith P. Gennuso, Geoffrey R. Swain e Bridget B. Catlin. “County Health Rankings: Relationships Between Determinant Factors and Health Outcomes.” *American Journal of Preventive Medicine*. 1º de fevereiro de 2016. [https://www.ajpmonline.org/article/S0749-3797\(15\)00514-0/abstract](https://www.ajpmonline.org/article/S0749-3797(15)00514-0/abstract)
- 99 Spilker, Isabell. “A crash test dummy for medicine.” Melhor prática. Março de 2018. <https://www.t-systems.com/de/en/newsroom/best-practice/03-2018-digital-twin/digital-twin-and-healthcare-a-crash-test-dummy-for-medicine>
- 100 Ravizza, Stefan, Tony Huschto, Anja Adamov, Lars Böhm, Alexander Büsser, Frederik F. Flöther, Rolf Hinzmann, Helena König, Scott M. McAhren, Daniel H. Robertson, Titus Schleyer, Bernd Schneidinger e Wolfgang Petrich. “Predicting the early risk of chronic kidney disease in patients with diabetes using real-world data.” *Nature Medicine*. 7 de janeiro de 2019. <https://rdcu.be/bfKPU>
- 101 Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe e Seth Lloyd. “Quantum Machine Learning.” 14 de Maio de 2018. <https://arxiv.org/pdf/1611.09347.pdf>
- 102 Menden, Michael P., Francesco Iorio, Mathew Garnett, Ultan McDermott, Cyril H. Benes, Pedro J. Ballester e Julio Saez-Rodriguez. “Machine Learning Prediction of Cancer Cell Sensitivity to Drugs Based on Genomic and Chemical Properties.” *PLOS One*. Abril de 2013. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0061318&type=printable>
- 103 Fogel, Alexander L. e Joseph C. Kvedar. “Artificial intelligence powers digital medicine.” *npj Digital Medicine*. 14 de março de 2018. <https://www.nature.com/articles/s41746-017-0012-2.pdf>
- 104 Killian, Jackson A., Bryan Wilder, Amit Sharma, Daksha Shah, Vinod Choudhary, Bistra Dilkina e Milind Tambe. “Learning to Prescribe Interventions for Tuberculosis Patients Using Digital Adherence Data.” *Anais da 25ª Conferência Internacional ACM SIGKDD sobre descoberta de conhecimento e mineração de dados*. 24 de junho de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1902.01506.pdf>
- 105 Coleman, Jr, Charles A., Angus McCann e Heather Fraser. “Precision health and wellness: The next step for population health management.” IBM Institute for Business Value. Dezembro de 2016. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/phm>

Guia do setor

Ciências biológicas

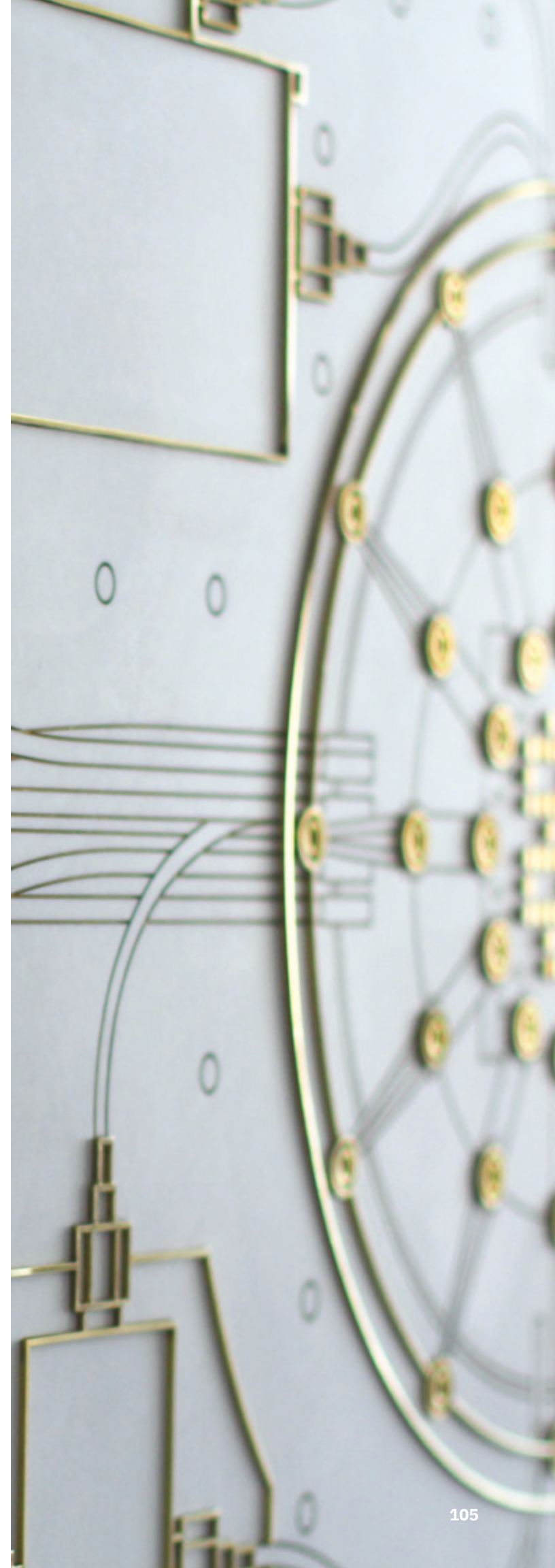
- 106 “5in5: Five innovations that will change our lives within five years.” IBM. 2019. <https://www.research.ibm.com/5-in-5/quantum-computing>
- 107 Tirrell, Meg. “Unlocking my genome: Was it worth it?” CNBC. 14 de dezembro de 2015. <https://www.cnbc.com/2015/12/10/unlocking-my-genome-was-it-worth-it.html>; Kandpal, Raj P., Beatrice Saviola e Jeffrey Felton. “The era of ‘omics unlimited.” *Future Science*. 25 de abril de 2018. <https://www.future-science.com/doi/full/10.2144/000113137>
- 108 Copeland, Libby. “You Can Learn a Lot About Yourself From a DNA Test. Here’s What Your Genes Cannot Tell You.” *Time*. 2 de março de 2020. <https://time.com/5783784/dna-testing-genetics>
- 109 Emani, Prashant S., Jonathan Warrell, Alan Anticevic, Stefan Bekiranov, Michael Gandal, Michael J. McConnell, Guillermo Sapiro, Alán Aspuru-Guzik, Justin Baker, Matteo Bastiani, Patrick McClure, John Murray, Stamatios N. Sotiropoulos, Jacob Taylor, Geetha Senthil, Thomas Lehner, Mark B. Gerstein e Aram W. Harrow. “Quantum Computing at the Frontiers of Biological Sciences.” 2019. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1911/1911.07127.pdf>
- 110 Zambelli, Federico, Graziano Pesole e Giulio Pavesi. “Motif discovery and transcription factor binding sites before and after the next-generation sequencing era.” *Briefings in Bioinformatics*. 19 de abril de 2012. <https://academic.oup.com/bib/article/14/2/225/208333>
- 111 “Genome-Wide Association Studies Fact Sheet.” National Human Genome Research Institute. 27 de agosto de 2015. <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Genome-Wide-Association-Studies-Fact-Sheet>
- 112 Das, Rhiju e David Baker. “Automated de novo prediction of native-like RNA tertiary structures.” PNAS. 11 de setembro de 2017. <https://www.pnas.org/content/pnas/104/37/14664.full.pdf>
- 113 Muhammed, Muhammed Tilahun e Esin Aki-Yalcin. “Homology modeling in drug discovery: Overview, current applications, and future perspectives.” *Chemical Biology & Drug Design*. 6 de setembro de 2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cbdd.13388>
- 114 Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day e Chris Barlow. “Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research.” Deep AI. 29 de outubro de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1911.01276.pdf>
- 115 Hughes, JP, S Rees, SB Kalindjian e KL Philpott. “Principles of early drug discovery.” *British Journal of Pharmacology*. 22 de novembro de 2010. <https://bpspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1476-5381.2010.01127.x>
- 116 Cao, Yudong, Jhonathan Romero e Alán Aspuru-Guzik. “Potential of quantum computing for drug discovery.” *IBM Journal of Research and Development*. 1º de novembro-dezembro de 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8585034>
- 117 Dobson, Christopher M., “Chemical space and biology.” *Nature*. 15 de dezembro de 2004. <https://www.nature.com/articles/nature03192>
- 118 Lyu, Jiankun, Sheng Wang, Trent E. Balius, Isha Singh, Anat Levit, Yurii S. Moroz, Matthew J. O’Meara, Tao Che, Enkhjargal Algaa, Kateryna Tolmacheva, Andrey A. Tolmachev, Brian K. Shoichet, Bryan L. Roth e John J. Irwin. “Ultra-large library docking for discovering new chemotypes.” *Nature*. 6 de fevereiro de 2019. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0917-9>
- 119 Cao, Yudong, Jonathan Romero, Jonathan P. Olson, Matthias Degroote, Peter D. Johnson, Maria Kieferova, Ian D. Kivlichan, Tim Menke, Borja Peropadre, Nicolas P. D. Sawaya, Sukin Sim, Libor Veis, e Alan Aspuru-Guzik. “Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing.” *Chemical Reviews*. 30 de agosto de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1812.09976.pdf>
- 120 Middaugh, C.R. e R. Pearlman. “Proteins as Drugs: Analysis, Formulation and Delivery.” *Novel Therapeutics from Modern Biotechnology. Handbook of Experimental Pharmacology*, vol 137. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59990-3_3
- 121 Johnston, Sarah L. “Biologic therapies: what and when?” *Journal of Clinical Pathology*. Março de 2007. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1860592>
- 122 Levinthal, Cyrus, “How to fold graciously.” *Mössbaun Spectroscopy in Biological Systems Proceedings*. 1969. https://www.cc.gatech.edu/~turk/bio_sim/articles/proteins_levinthal_1969.pdf
- 123 Zanzig, Robert, Attila Szabo e Biman Bagchi. “Levinthal’s paradox.” *Proceedings of the National Academy of Science*. 7 de outubro de 1991. <https://www.pnas.org/content/pnas/89/1/20.full.pdf>
- 124 Mezher, Michael. “FDA Finalizes ‘Biological Product’ Definition Ahead of BPCIA Transition.” *Regulatory Focus*. 20 de fevereiro de 2020. <https://www.raps.org/news-and-articles/news-articles/2020/2/fda-finalizes-biological-product-definition-ahaea>
- 125 Marks, C. e C.M. Deane. “Antibody H3 Structure Prediction.” *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 24 de janeiro de 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2001037016301118>
- 126 Robert, Anton, Panagiotis Kl. Barkoutsos, Stefan Woerner e Ivano Tavernelli. “Resource-Efficient Quantum Algorithm for Protein Folding.” 7 de agosto de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1908.02163.pdf>
- 127 Mishra, Anurag e Alireza Shabani. “High-Quality Protein Force Fields with Noisy Quantum Processors.” 29 de outubro de 2019. <https://arxiv.org/pdf/1907.07128.pdf>
- 128 Chow, Jerry e Jay Gambetta. “Quantum Takes Flight: Moving from Laboratory Demonstrations to Building Systems.” IBM. 8 de janeiro de 2020. <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/01/quantum-volume-32>
- 129 Callaway, Ewen. “‘It will change everything’: DeepMind’s AI makes gigantic leap in solving protein structures.” 30 de novembro de 2020. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03348-4>
- 130 Harwood, Stuart, Claudio Gambella, Dimitar Trenev, Andrea Simonetto, David Bernal e Donny Greenberg. “Formulating and Solving Routing Problems on Quantum Computers.” 6 de janeiro de 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9314905>

Relatórios relacionados

Gil, Darío, Jesus Mantas, Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Frederik Flöther e Chris Schnabel. “Coming soon to your business— Quantum computing: Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology.” IBM Institute for Business Value. Novembro de 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy>

Sutor, Robert, Terry Hickey e Lori Feller. “Taking the quantum leap: Why now?” IBM Institute for Business Value. Fevereiro de 2018. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumleap>

Sutor, Robert, Scott Crowder e Frederik Flöther. “Building your quantum capability: The case for joining an ‘ecosystem.’” IBM Institute for Business Value. Janeiro de 2019. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco>





A Quantum Decade

Um playbook para alcançar conscientização,
prontidão e vantagem

Patrocinadores executivos

Cindy Anderson
Anthony Marshall
David Zaharchuk

Líder da pesquisa

Veena Pureswaran

Editor-chefe e autor principal

Lucy Sieger

Diretor de arte e designer líder

Anne Marie Lowin Weber

Editora-chefe-Guias do setor

Kathy Cloyd

Gerenciamento de projeto

Mandy Drouin, Rachel Larkin, Joni McDonald, Carrie Ritchie
e Samantha Russell

Editorial e suporte de comunicação

Scott Brooks, Amanda Carl, Hugh Collins, Ryan Mandelbaum,
Katia Moskvitch, Chris Nay, Novid Parsi, Karsten Strauss
e Steven Tomasco

Suporte de design

Kristin Biron, Angela Finley, Bruce Jarvis, Sean Keith,
Michael Kriegshauser, Stewart Lacey, Nancy Pendleton,
Daritza Perez, Nate Saenz, Jill Sherman, Lauren Smith,
David Steinert e Andrew Womack

Implementação e promoção

Wendy Allan, Samantha Davis, Chelsea Dubner,
Talita Cristina Paro Fabene, Jordan Hand, Tegan Jones,
Maya Kulycky, Kirsten Main, Stephen Ollice,
Leah Simon e Mya Singleton

© Copyright IBM Corporation 2021

IBM Brasil Ltda
Rua Tutóia, 1157
CEP 04007-900
São Paulo – SP
Brasil

Produzido nos Estados Unidos da América
Julho de 2021, Segunda Edição

IBM, o logotipo IBM, ibm.com são marcas comerciais da International Business Machines Corp., registradas em diversos países no mundo todo. Outros nomes de produtos e serviços podem ser marcas comerciais da IBM ou de outras empresas. Uma lista atual de marcas comerciais da IBM está disponível na web em “Copyright and trademark information” em: ibm.com/legal/copytrade.shtml.

Este documento está atualizado a partir da data de publicação inicial e pode ser alterado pela IBM a qualquer momento. Nem todas as ofertas estão disponíveis em todos os países onde a IBM opera.

AS INFORMAÇÕES NESTE DOCUMENTO SÃO OFERECIDAS NO ESTADO EM QUE SE ENCONTRAM (“AS IS”) SEM QUALQUER GARANTIA, EXPLÍCITA OU IMPLÍCITA, INCLUINDO SEM QUAISQUER GARANTIAS DE COMERCIALIZABILIDADE, ADEQUAÇÃO A UM PROPÓSITO ESPECIAL E QUALQUER GARANTIA OU CONDIÇÃO DE NÃO VIOLAÇÃO. Os produtos IBM possuem garantia de acordo com os termos e condições dos contratos sob os quais eles são fornecidos.

Esse relatório tem a intenção de oferecer apenas orientação geral. Ele não é recomendado como substituto de uma pesquisa detalhada ou da avaliação profissional. A IBM não será responsável por qualquer perda sofrida por qualquer organização ou pessoa que se baseie nesta publicação.

Os dados usados neste relatório podem ser derivados de fontes de terceiros e a IBM não realiza a verificação, a validação ou a auditoria de tais dados de maneira independente. Os resultados do uso de tais dados são fornecidos “no estado em que se encontram” e a IBM não faz representações ou garantias, expressas ou implícitas.

**IBM Institute for
Business Value**



ISBN: 978-1-7374011-5-5