

Computação quântica:

Conceitos, negócios, disrupções e transformação digital

Rodrigo Ramos Arruda

Mestre em Gestão para Competitividade pela FGV EAESP
E-mail: rorarruda@gmail.com

Rosana Cerosino

Mestre em Gestão para Competitividade pela FGV EAESP
E-mail: cerosino@gmail.com

Gustavo Mirapalheta

Doutor em Administração de Empresas pela FGV EAESP
E-mail: gustavo.mirapalheta@fgv.br

Eduardo de Rezende Francisco

Doutor em Administração de Empresas pela FGV EAESP
E-mail: eduardo.francisco@fgv.br

Recebido: 01 fev. 2024

Aprovado: 28 mai. 2024

Resumo: Esta pesquisa explora os conceitos da Computação Quântica (CQ) e seu novo paradigma, comparando algoritmos quânticos com tradicionais da Computação Clássica e discute o impacto para negócios em tecnologia. Propõe-se um posicionamento da CQ no *framework* de *Big Data Analytics Capacities* e sua contribuição para a transformação digital como tecnologia disruptiva e potencializadora de *Big Data*, IA e Transformação Digital.

Palavras-chave: Computação Quântica. Capacidade Analítica em *Big Data*. Transformação Digital.

Abstract: This research explores the concepts of Quantum Computing (QC) and its new paradigm, comparing quantum algorithms with traditional ones from Classical Computing and discusses the impact on technology business. It proposes a positioning of QC in the Big Data Analytics Capacities framework and its contribution to digital transformation as a disruptive and empowering technology for Big Data, AI, and Digital Transformation.

Keywords: Quantum Computing. Big Data Analytics Capacities. Digital Transformation.

Resumen: Esta investigación explora los conceptos de la Computación Cuántica (CQ) y su nuevo paradigma, comparando algoritmos cuánticos con los tradicionales de la Computación Clásica, y discute el impacto para los negocios en tecnología, Propone un posicionamiento de la CQ en el *framework* de Capacidades de Análisis de Big Data y su contribución a la transformación digital como tecnología disruptiva y potenciadora de Big Data, IA y Transformación Digital.

Palabras clave: Computação Quântica. Capacidade Analítica em *Big Data*. Transformación Digital.

Introdução

No final do século XIX, passados 200 anos desde a publicação do livro *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, por Sir Isaac Newton, a aplicação dos conceitos de posição e tempo absolutos, bem como das leis do movimento e da gravitação universal, tinham levado à Física a realizações quase inacreditáveis. Esses conhecimentos levaram diretamente a duas Revoluções Industriais e alteraram em definitivo a forma com a qual a humanidade entendia o mundo e a si mesma. Era natural, portanto, supor que a física estivesse se encaminhando para um futuro no qual a função dos físicos seria obter a próxima casa decimal nos experimentos.

Nas primeiras décadas do século XX em um mundo conturbado por guerras e pandemias, um grupo de físicos teve uma tarefa similar àquela desempenhada pelos pais da filosofia 2500 anos antes e da ciência 400 anos antes. A partir das fraturas produzidas no edifício da Física, estenderam o entendimento da humanidade para o terreno do mais rápido que se pode atingir a Relatividade Restrita, do infinitamente grande (a Relatividade Geral) e do infinitamente pequeno (a Mecânica Quântica) (Paty, 2009). Apesar de incrível, a Relatividade Geral tem poucas aplicações práticas no cotidiano das pessoas, em especial se compararmos ela com sua “irmã” Relatividade Restrita e sua “prima” Mecânica Quântica. Pode-se dizer que dos aparentes “paradoxos clássicos” necessários para explicar os fenômenos no mundo do infinitamente pequeno saíram as tecnologias que moldaram o século XX. Dentre elas destacam-se a energia nuclear e a tecnologia dos transistores. Esta última levou a criação dos computadores atuais.

O físico Richard Feynman (2001) declarou uma vez que é impossível entender a mecânica quântica (Ball, 2013). Anos depois, outro físico, N. David Mermin, fez eco às palavras de Feynman tendo criado a famosa frase *shut-up and calculate* (Mermin, 2004), repetida à exaustão para inúmeros grupos de estudantes que se iniciam neste incrível mundo do infinitamente pequeno. No contexto da Mecânica Quântica, aquelas que se tornaram a “bola da vez” são as do fenômeno da superposição de estados e do entrelaçamento de partículas.

Esses dois fenômenos agora se tornaram foco de inúmeras pesquisas, desenvolvimento de startups e destino de milhões (talvez bilhões) de dólares em investimentos, para o que chamamos de Computação Quântica. Este artigo discute o

porquê de somente agora essas oportunidades terem surgido, os impactos dessas tendências para o mercado corporativo e sua contribuição para a transformação digital como tecnologia disruptiva e potencializadora de *Big Data Analytics Capacities* (BDAC) e Inteligência Artificial.

1. Revisão de literatura

O conhecimento chave de física que revolucionou a tecnologia, a economia e a sociedade no século XX foi a física dos semicondutores. Um semicondutor, como o próprio nome diz, é um material que nem é plenamente condutor de energia elétrica, nem plenamente isolante à mesma. Incompreensível do ponto de vista dos modelos de física clássica, os semicondutores permitiram a implementação em escala cada vez menor de transistores, as quais são a base dos computadores atuais, e equipamentos que ocupavam prédios inteiros e consumiam energia elétrica em volume proporcional ao seu tamanho, passaram a caber no bolso de nossas roupas.

No início da década de 1960, Gordon Moore, um dos fundadores da Intel, percebeu que os fabricantes eram capazes de dobrar a quantidade de transistores em uma mesma pastilha de silício aproximadamente a cada 18 meses (Moore, 1965). Esta observação empírica passou a ser chamada de Lei de Moore. Como consequência, a segunda metade do século XX caracterizou-se por uma evolução tecnológica consistente a cada dois anos aproximadamente. Com o passar do tempo, as pessoas passaram a achar normal que equipamentos eletrônicos se tornassem obsoletos em quatro a cinco anos.

No entanto, a Lei de Moore tem seus limites ditados pela própria física. Mesmo do ponto de vista da física clássica, a matéria que nos constitui é composta de partes indivisíveis chamadas átomos. Ao espremer mais e mais transistores em uma mesma pastilha de silício a área disponível para cada um deles torna-se cada vez menor. A consequência disto é que cada transistor é composto de uma quantidade cada vez menor de átomos. No entanto, hoje em dia os fabricantes atingiram a escala nanométrica (um bilionésimo de metro), sendo a tecnologia atual capaz de criar um transistor em um quadrado com mais ou menos cem (isso mesmo cem) átomos de lado. Continuando neste ritmo em breve chegaríamos na situação de um transistor por átomo e aí, mesmo na física clássica, a Lei de Moore iria acabar.

Contudo, existe também o princípio de Landauer, que determina que a evolução computacional implica em um consumo cada vez maior de energia elétrica (Feynman, 2001) e gerando mais calor, até chegar a um ponto onde não é possível fornecer mais energia elétrica e/ou dissipar o calor gerado, tornando-se um limitador para a evolução da computação clássica (Bennett, 2003).

Muito antes de chegarmos ao ponto de fabricar um transistor com um único átomo, as leis que regem o infinitamente pequeno se tornarão relevantes. Em outras palavras, em breve, nossas técnicas de fabricação terão chegado em uma dimensão na qual qualquer vestígio da física clássica terá sido deixado para trás e as regras mais profundas e incompreensíveis da Mecânica Quântica se tornarão presentes.

A mais importante neste momento será o Princípio da Incerteza, o qual afirma ser impossível determinar com absoluta precisão a velocidade (o momento) e a posição de uma partícula. Por conta disso, a corrente elétrica nos transistores vai literalmente ignorar o fechamento de uma chave eletrônica e circular pela mesma como se ela estivesse fechada. Em resumo, se tentarmos fabricar transistores com uma quantidade menor de átomos que aproximadamente 20 a 25 átomos de lado, a matéria passará a não poder ser manuseada utilizando técnicas derivadas de conceitos da Física Clássica, tornando os computadores inúteis. Este é o chamado Fim da Lei de Moore (The Economist, 2016).

As consequências em termos econômicos e sociais são imprevisíveis. De uma hora para outra, a lógica econômica que empurrou a economia no século XX e XXI para níveis cada vez maiores de produtividade iria acabar. As máquinas passariam a ter um crescimento de seu desempenho não exponencial, mas linear. A Quarta Revolução Industrial, a Revolução das Máquinas Inteligentes, iria morrer antes mesmo de ter sido capaz de nascer. Este é o desafio científico, tecnológico, econômico e social da próxima década: como exercer o benefício desta Revolução, endereçando as restrições técnicas da computação clássica? Ou em outras palavras: como manter a Lei de Moore em funcionamento?

As regras da Mecânica Quântica tornaram obsoleta a Lei de Moore em sua forma “clássica”, mas proporcionam uma alternativa, que poderia ser chamada de Nova Lei de Moore, envolvendo o fenômeno da sobreposição de estados (Hartnett, 2019).

Imagine uma moeda clássica. Se for jogada sobre uma mesa ela vai cair com a face cara ou a face coroa virada para cima. Uma moeda representa uma forma de armazenar um *bit* de informação – está no estado “cara” ou no estado “coroa”. Você até pode não saber em qual estado a moeda efetivamente está, mas sabe que está com uma

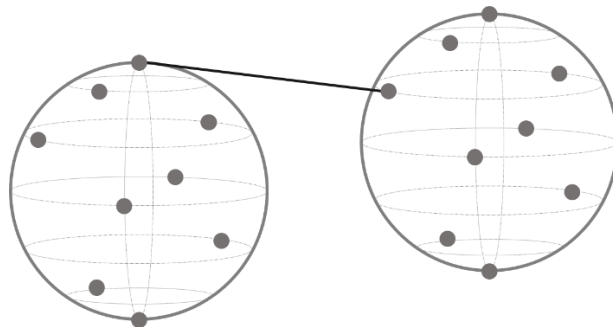
face virada para cima ou com a outra. Basta abrir a mão e olhar e descobrirá qual face caiu. Mais importante ainda, ao olhar a moeda e ver que está com a face cara virada para cima, pode inferir que, depois que caiu em sua mão, estava com esta face para cima o tempo todo, mesmo antes de a observar.

Agora vamos jogar uma moeda “quântica”. Esta moeda na prática pode ser um elétron e as “faces” desta moeda “quântica” seriam os possíveis estados para o *spin* do elétron. O *spin* de um elétron é uma característica do mesmo que pode ser medida em laboratório e sempre fornece as medidas “1” e “0”. Até aqui, o elétron é similar a uma moeda. Jogamos a mesma sobre a mesa e olhamos. Observamos “cara” e a partir daí se não perturbamos a moeda ela sempre vai fornecer como resultado “cara”. O problema ocorre quando perturbamos o elétron e não ficamos sabendo para qual *spin* se foi. Vai dizer: foi para o estado “1” ou “0”, só que ainda não sabe, pois não olhou. O novo paradigma passa a ser, para explicar uma miríade de fenômenos que podem ser reproduzidos em laboratório regularmente, enquanto não olharmos o elétron, estará parcialmente em “1” e parcialmente em “0” ao mesmo tempo. Essa é a sobreposição de estados. Pense como se a moeda ainda estivesse girando no ar. Só que o elétron não está. Está na sobreposição de estados. Pior! Se tentar observar, responde “1” ou “0” sempre. Este é o fenômeno chave que distingue a Mecânica Quântica da Mecânica Clássica e chave para o poder computacional proporcionado pelos Computadores Quânticos – o pedaço de informação, tipicamente denominado *bit*, passa a ser chamado de bit quântico, ou *qubit*.

O próximo fenômeno é o entrelaçamento (The Quantum Atlas, 2021). Duas partículas ao interagirem uma com a outra, “compartilham” seus estados. Este “compartilhamento” de estados chamado de “entrelaçamento de estados quânticos” permanece enquanto o par não for perturbado, isto é, enquanto nenhuma outra partícula interferir no par. Em condições normais de temperatura e pressão, isto ocorre a todo momento. A própria agitação térmica das moléculas do ambiente se encarrega de interferir no par, destruindo o entrelaçamento e ao mesmo tempo, criando outros entrelaçamentos, os quais duram períodos infinitesimais de tempo. No entanto, se o par for deixado em paz, entra em entrelaçamento e sobreposição dos seus estados. Como cada partícula do par tem dois estados possíveis de sobreposição, duas partículas terão quatro estados, três partículas terão oito, e n partículas terão 2^n estados. Observe que o número de estados possíveis que o grupo de partículas poderá estar em sobreposição cresce exponencialmente em relação ao número n de partículas. Se for possível aproveitar estes

estados para executar operações matemáticas, um conjunto com $n=100$ partículas em sobreposição teria mais estados possíveis do que o número de átomos no universo conhecido. A chave para obter tal poder computacional está na capacidade de entrelaçar mais e mais átomos. Cada vez que um átomo a mais for posto no conjunto, a quantidade de estados finais possíveis irá dobrar. E junto dobra-se nossa capacidade computacional, o que configura a chamada Nova Lei de Moore. A Figura 1 ilustra os dois fenômenos essenciais da Mecânica Quântica.

Figura 1. Sobreposição e Entrelaçamento dos *Qubits*



Fonte: Adaptado de Moore (1965).

Ao longo dos anos 1990 foram desenvolvidos os primeiros algoritmos baseados em *qubits* (Shor, 1994). As implicações práticas destes conceitos foram estendidas de maneira formal para a Ciência da Computação; vários esforços de pesquisa para a criação do primeiro *qubit* real foram empregados (Nielsen; Chuang, 2010). Com os primeiros protótipos de *qubits* bem-sucedidos, que conseguiram executar operações aritméticas elementares na primeira década do século XXI (Kjaergaard et al., 2020) teve início a corrida para o desenvolvimento do primeiro computador comercial baseado em *qubits*. A computação quântica (CQ) deixava de ser algo próximo da ficção científica e dava os primeiros passos em direção ao cotidiano das pessoas. Apesar disso, ainda hoje, quase 40 anos depois de Feynman propor o conceito e mais de 10 anos depois dela começar a aparecer de maneira mais proeminente na mídia especializada, ela continua parecendo algo distante do cotidiano das pessoas. No entanto, segundo o Gartner (2020), até 2025 cerca de 40% das grandes corporações trabalharão na formação de profissionais com conhecimento de CQ. Apesar de a CQ não estar listada entre as 10 principais tendências tecnológicas estratégicas para 2024, é reconhecida por requerer um conjunto totalmente novo de habilidades, e as empresas interessadas nesta tecnologia precisam priorizar o

aprendizado e o desenvolvimento ao lado da busca pelo caso de uso correto (Gartner, 2023).

A partir de uma breve análise, constata-se que a CQ está em sua iminência de uso de larga escala. Um computador quântico pode oferecer aplicações práticas para a indústria a partir de apenas 50 *qubits* (Cusumano, 2018).

A quarta revolução industrial gerou uma ruptura no modelo produtivo anterior, a partir da fusão de tecnologias como máquinas inteligentes conectadas, nanotecnologia e energias renováveis. Além disso, permitiu a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos (Schwab, 2016 *apud* Mendonça; Andrade, 2019).

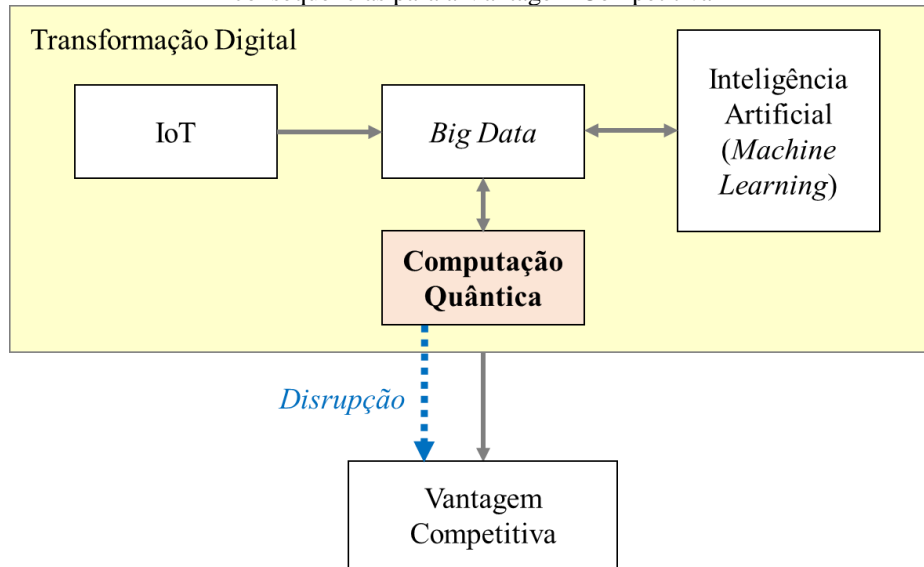
Os cientistas estão explorando novas abordagens para reduzir esses conjuntos de dados a tamanhos gerenciáveis, incorporando novo aprendizado do setor privado sobre a computação baseada em nuvem e, em alguns casos, explorando as possibilidades de estruturas emergentes como a computação quântica (Philip Chen; Zhang, 2014). Segundo Yaqoob et al (2016), a computação quântica é uma tecnologia emergente com potencial de resolução de problemas relacionados a química e física. Da mesma forma, Dash, Shakyawar, Sharma e Kaushik (2019) destacam a computação quântica como meio de execução eficiente de projetos de *Big Data* que não podem ser realizados através da computação clássica, capacidade esta decorrente da altíssima velocidade proporcionada pela superposição dos qubits, permitindo análises também em conjuntos menores de dados com maior sensibilidade. Isto abre oportunidades em diversas áreas da ciência e da indústria, como no setor de saúde.

Yaqoob et al (2016) defendem, ainda, a criptografia quântica com foco na realização de tarefas de segurança da informação através de computação quântica e com chaves de complexidade maior que a possível na computação clássica. Dash, Shakyawar, Sharma e Kaushik (2019) reforçam a questão de segurança mencionando que criptografias como DES e RSA, que atualmente são inquebráveis através da computação clássica, podem ser quebradas na computação quântica em instantes, através do novo paradigma discutido no início deste artigo.

Além da possibilidade da resolução de novos problemas impossíveis de serem realizados na computação clássica, estudos abordam ainda a possibilidade da exploração dos conjuntos de dados de *Big Data* de diferentes formas, através de novas opções através da computação quântica associada ao Machine Learning (ML) (Brown et al., 2020; Dash et al., 2019). A expectativa é que os computadores quânticos permitirão uma rápida análise e integração de nossos enormes conjuntos de dados que promoverão melhorias e

transformação das capacidades de aprendizado de máquina e inteligência artificial. A Figura 2 esquematiza de forma sumária a contribuição, ora incipiente, que a CQ traz para o contexto da Transformação Digital.

Figura 2. Inter-relação entre CQ, *Big Data*, IA, IoT no contexto da Transformação Digital e suas consequências para a Vantagem Competitiva



Fonte: Os autores

O crescimento e o tamanho dos dados criam problemas a serem tratados e desafiam o poder de computação existente das redes neurais artificiais (RNA). Uma RNA pode aprender relacionamentos complexos a partir dos dados de entrada usando os parâmetros entre as camadas da rede. Problemas complexos de aprendizado de máquina podem ser resolvidos com eficiência usando um computador quântico. A abordagem usando um computador quântico no treinamento de uma rede neural profunda é considerada eficiente e suficiente em termos de espaço computacional, pois exigimos apenas k qubits para representar $2k$ valores de entrada de dados clássicos (Chalumuri et al., 2020).

Integração de técnicas de ML e CQ tem o potencial de abordar atualmente insustentáveis problemas. Foi demonstrado recentemente que circuitos quânticos supercondutores podem ser usados para realizar aprendizado adversarial quântico generativo. Neste contexto, o papel da nanociência é de duas naturezas: (i) o desempenho do ML será impulsionado além dos limites atuais através da implementação do quantum algoritmos; e (ii) a nanociência vai desempenhar um papel crucial no desenvolvimento de componentes de *hardware* que podem ser usados para construir computadores

quânticos capazes de implementação de tais algoritmos de aprendizado de máquina quântica (Brown et al., 2020).

2. Método

A pesquisa se estruturou em formato de digressão histórica e pensata, consistindo em *history informed strategy research* (Argyres et al., 2020), a partir de revisão contemporânea sobre a evolução da CQ e consistiu na implementação de um algoritmo-base – busca reversa de informações em banco de dados – comparando as visões clássica e quântica e apresentando suas diferenças fundamentais e a potencial abertura de novas fronteiras na pesquisa acadêmica e no mercado corporativo.

Shaw, Bansal e Gruber (2017) destacam que a pesquisa baseada em dados qualitativos oferece *insights* que desafiam teorias tidas como certas e expõem novas direções teóricas. Enquanto a lógica hipotético-dedutiva busca leis ou mecanismos universais, a análise histórica reconhece o enraizamento histórico temporal e espacial dos fenômenos organizacionais. Tal análise requer acesso ou capacidade de reunir dados apropriados (Godfrey et al., 2016; Kipping; Üsdiken, 2014; Rowlinson et al., 2014).

Analisar o momento em que a indústria se depara com a potencial disrupção que a CQ trará necessita discutir fundamentos técnicos, estratégia e competências (Argyres et al., 2020; Maclean et al., 2016) que os profissionais de tecnologia precisam ter para a estruturação dessa oportunidade como negócio. A análise histórica realista pode revelar a dinâmica do processo e ajudar a elucidar a agência historicamente incorporada de tomadores de decisão ou gerentes, implicando na necessidade de se concentrar em uma reconstrução mais precisa de eventos históricos e trajetórias quanto possível. Mais ainda, podem iluminar o papel de eventos e práticas específicas, e como exemplificam características típicas de um determinado período de tempo da perspectiva dos principais atores envolvidos (Greckhamer et al., 2018).

Por essas razões, a comparação dos algoritmos materializa e objetiva as diferenças conceituais e históricas entre os paradigmas, trazendo um artefato fundamental para essa articulação, e permite que se discuta as tendências potenciais de utilização e o impacto da CQ na indústria e na sociedade de maneira ampla.

3. Descrição do algoritmo quântico e análises

O *qubit* – equivalente a bit na computação tradicional – possibilita a realização de múltiplas operações aritméticas em paralelo, isto é, no tempo de execução de uma única operação em um computador baseado em bits clássicos.

A seguir apresenta-se um exemplo de como obter tal vantagem através do uso de qubits para execução de uma busca com chave reversa em uma tabela.

A Figura 3 exemplifica o uso de 4 *qubits* de 2 estados cada um, entrelaçados formando um *qubit* de $2^4 = 16$ estados possíveis. Através dela pode-se entender a forma pela qual um *qubit* é utilizado para implementar o algoritmo de Grover (1996). Este algoritmo permite a procura de uma chave não indexada em uma tabela.

Figura 3. Planilha Excel para Implementação do Algoritmo de Grover

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1				Procura com Qubits				2a: $f(\text{Est}) = (-1)^{(\text{Est}=\text{Proc})}$	Prob α Amp^2	N	Fator= $\text{raiz}(N)$	
2	Procura com Bits			1a: Sobreposição			3a: $f(\text{Est}) = (\text{Amp}<0) * 2^{\text{Fator}}$			16	4	
3	Nome	Número		Número	Amplitude	Amplitude	Amplitude	Amplitude	Prob.do Estado	Prob.Ac.	Nome	
4	André	7.039		7.039	1	1	1	1	0,4%	0%	André	
5	Bernardo	4.151		4.151	1	1	1	1	0,4%	0,4%	Bernardo	
6	Carlos	8.457		8.457	1	1	1	1	0,4%	0,7%	Carlos	
7	Eduardo	4.019		4.019	1	1	1	1	0,4%	1,1%	Eduardo	
8	Fernando	8.415		8.415	1	1	1	1	0,4%	1,5%	Fernando	
9	Gustavo	5.560		5.560	1	1	1	1	0,4%	1,8%	Gustavo	
10	Hector	4.955		4.955	1	1	1	1	0,4%	2,2%	Hector	
11	Irma	9.141		9.141	1	1	1	1	0,4%	2,6%	Irma	
12	Juvenal	1.694		1.694	1	1	1	1	0,4%	3,0%	Juvenal	
13	Kelly	5.775		5.775	1	1	1	1	0,4%	3,3%	Kelly	
14	Luiza	5.307		5.307	1	1	1	1	0,4%	3,7%	Luiza	
15	Maria	8.159		8.159	1	1	1	1	0,4%	4,1%	Maria	
16	Nadir	3.296		3.296	1	1	1	1	0,4%	4,4%	Nadir	
17	Oswaldo	3.553		3.553	1	-1	-16	256	94,5%	4,8%	Oswaldo	
18	Paula	2.007		2.007	1	1	1	1	0,4%	99,3%	Paula	
19	Quênia	8.302		8.302	1	1	1	1	0,4%	99,6%	Quênia	
20	Procurado:	3.553		Procurado =			3.553			100,0%		
21	Nome:	Oswaldo										
22	Medida:	3.553		Medida (Resultado):	Oswaldo	<-Esta medida é feita de forma autônoma através da função =PROCV(ALEATÓRIO();H6:I21;2) na célula D24						
23	Correto:	Sim										

Fonte: Os autores

O problema a ser resolvido neste exemplo (Figura 3) é encontrar o valor na coluna “Nome” que corresponde a “3.553” na coluna “Número”. Observe, porém, que os dados estão indexados por Nome. Se a resolução for feita através de bits “clássicos” teremos de procurar para cada valor na coluna “Nome” o valor correspondente na coluna “Número”, até que o valor encontrado seja aquele que procuramos. Uma vez que existem 16 pares [Nome, Número], em média teríamos de executar 8 operações de procura.

Analisando este problema na perspectiva dos *qubits*, conforme planilha da Figura 3, um (único) *qubit* é representado pela região que vai da célula E3 até a L19. Este *qubit*

terá seus estados definidos pelos pares Número–Nome. A primeira operação que executamos é colocar o *qubit* em uma sobreposição dos 16 estados possíveis. Neste momento cada estado tem amplitude igual a 1. Em um *qubit*, a única operação “externa” ao mesmo que podemos realizar é uma medida. O resultado desta medida é o valor correspondente ao “Nome” do estado em que o *qubit* se encontra após ser medido. Como todas as amplitudes dos estados são “1” e temos 16 estados, cada vez que for feita uma medida, o *qubit* nos dará um “Nome” ao acaso, com $1/16 = 6,25\%$ de probabilidade para cada valor de “Nome”. Observe que até o momento não existe nenhuma ligação entre o valor que obtemos como resultado da medida (um Nome) e o valor que efetivamente queremos buscar.

Podemos, no entanto, executar operações com o *qubit* de forma a modificar as amplitudes correspondentes a cada estado. A primeira operação já foi executada conforme acima e colocou o *qubit* em sobreposição (amplitudes correspondentes estão na coluna F da planilha na Figura 3).

A próxima operação fará o seguinte: caso o valor do “Número” correspondente ao estado seja o número para o qual desejamos obter o “Nome”, o *qubit* multiplicará a amplitude do estado por (-1). Caso não seja, a amplitude será multiplicada por (+1). A função matemática que executa tal operação será: $\text{Amplitude} = (-1)^{(\text{Número} = \text{Número de Procura})}$. Devemos lembrar que em lógica uma condição verdadeira é equivalente a 1 e a 0 se a mesma for falsa. A grande diferença no caso de um *qubit* é que esta operação que envolve 16 números é executada sobre as 16 Amplitudes dos estados em sobreposição do *qubit* de uma única vez (coluna G na Figura 3).

Fazemos agora de forma repetida 4 operações de multiplicar por 2 a amplitude do estado se a mesma for negativa, deixando a amplitude inalterada (em 1) se a mesma for positiva. Isto leva a amplitude do estado procurado para -256 enquanto as amplitudes dos demais estados permanecem inalteradas em 1. Por que 4 operações de multiplicar por 2? Temos 16 estados e por questões de probabilidade e de mecânica quântica se executarmos a operação de dobrar a amplitude do estado com amplitude negativa, a raiz quadrada de n (n é o número de estados possíveis) vezes, ela será amplificada o suficiente para dominar as demais.

Por fim, executa-se a medida final, que irá destruir a sobreposição de estados e obteremos uma medida - o nome correspondente ao estado em que o *qubit* se encontra. Porém, por regras da mecânica quântica, a probabilidade de obter como resultado o valor do Nome correspondente a um estado será proporcional ao módulo da amplitude deste

estado. Em termos matemáticos, se a amplitude for um número real, o módulo é o mesmo que elevar o valor da amplitude ao quadrado.

Observe, no entanto, que a soma das probabilidades para todos os estados do *qubit* tem de somar sempre 100%. Com isto a probabilidade do estado correspondente ao número que procuramos subiu para 94,5%. Sendo assim, ao executar a medida, na ampla maioria das vezes, o *qubit* responderá com o Nome correspondente ao estado de maior probabilidade, o qual foi preparado, através das operações de *qubit* descritas acima para corresponder ao número procurado, isto é 3.553. Nesse caso, o nome do estado procurado é “Osvaldo”. Obtemos assim o resultado da procura reversa.

Se contarmos as operações de *qubit*, executamos 6 operações. 2 obrigatórias, a sobreposição e a inversão do sinal da amplitude do estado desejado e 4 operações de dobrar a amplitude do estado com amplitude negativa. Com isso obtivemos a resposta correta com 94,5% de probabilidade. No caso clássico, teríamos de executar 8 operações de bit para obter o resultado correto com 50% de probabilidade, 16 operações no pior caso, com 100% de probabilidade. À medida que o número possível de estados cresce por conta do número de *qubits* individuais que sejam entrelaçados, o número de operações de bit cresce de forma exponencial para que seja obtido o resultado correto com 50% de probabilidade. No entanto, no caso do *qubit* teremos sempre $2 + \text{Raiz}(n)$ operações para tornar a probabilidade de se obter o estado correto dominante (95%, 99% ou até mesmo maior). Como \sqrt{n} é um número de uma ordem de grandeza menor do que $1/2$, obteremos para buscas reversas em grandes bases de dados um resultado com um desempenho bastante superior, com uma quantidade muito inferior de operações. Se n for igual a 1 milhão de registros, um sistema baseado em bits precisaria de 500 mil operações de leitura para obter o resultado correto. Um sistema em *qubit* obteria o resultado correto com mais de 99% de probabilidade em $\sqrt{10^6} = 1000$ operações, ou seja, 500 vezes mais rápido. Isto configura um exemplo da chamada Supremacia Quântica.

Estes conceitos são implementados do ponto de vista físico através do *hardware* de computadores quânticos. O controle deste *hardware* para se obter resultados de interesse para o programador é obtido através de interfaces com ferramentas de desenvolvimento específicas que abstraem os detalhes de física e permitem ao programador se concentrar nos detalhes lógicos, os quais exploram as diferentes formas de realizar tarefas utilizadas pelos computadores quânticos. São estes algoritmos que tornam realidade o aumento exponencial de eficiência esperado dos computadores quânticos. E os desdobramentos desses conceitos disruptivos apresentam-se sem

precedentes para apoiar diversas tendências da transformação digital no contexto das *Big Data Analytics Capabilities*.

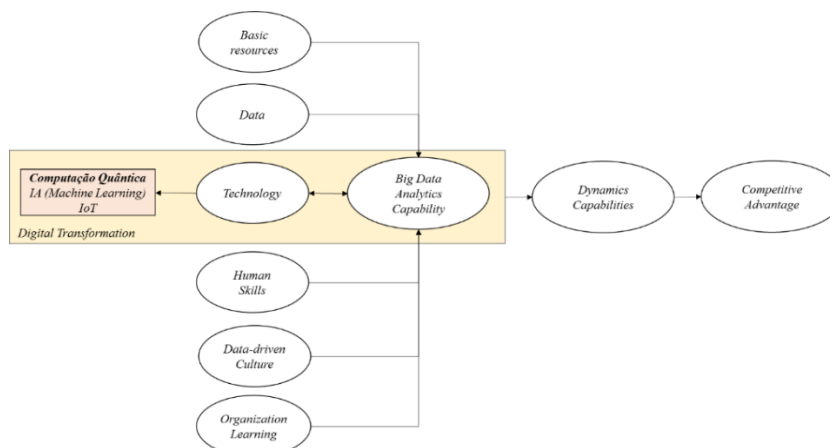
Considerações finais

A habilidade de processamento com desempenho e paradigmas disruptivos da CQ começa a transformar a maneira como se processam as informações, e impactar de forma significativa diversas áreas como a engenharia química, ciência dos materiais, descoberta de medicamentos, otimização de portfólio financeiro, desenvolvimento da criptografia e amplas aplicações baseadas em *machine learning*. A combinação de recursos inovadores à IA apontam para o domínio da complexidade e descobertas de novos recursos, e grandes oportunidades de novos negócios para as empresas.

Esse cenário se caracteriza como uma inovação disruptiva (Christensen, 2015), uma mudança que afeta a forma como as empresas conduzem seus “negócios normalmente”. E estar em ambos os lados da ruptura do mercado pode abrir caminhos diferentes para as empresas em geral.

Em suma, a CQ viabiliza um conjunto de tecnologias, maximizadas de forma integrada com Inteligência Artificial e IoT, que se aderem às Capacidades de *Big Data Analytics* (Mikalef et al., 2020), no contexto da Transformação Digital. A Figura 4 adapta o *framework* de Mikalef, Krogstie, Pappas e Pavlou (2020) destacando sua potencial contribuição através da ruptura de modelos tecnológicos e das novas competências que deverão ser desenvolvidas.

Figura 4. *Framework* da Contribuição da CQ a BDAC e Capacidades Dinâmicas



Fonte: Adaptado de Mikalef, Krogstie, Pappas e Pavlou (2020).

Nesse contexto, uma nova geração de algoritmos vai lidar e resolver simulações de cenários notadamente complexos, com dramáticas vantagens para modelagem financeira e tomada de decisão. O potencial da CQ aponta para soluções otimizadas para descoberta de recursos, logística de entrega e o eventual desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis. No mercado há um investimento gigantesco no desenvolvimento desses sistemas, e com tantas empresas, universidades e pesquisadores trabalhando para desenvolvimento da tecnologia quântica, o futuro aponta para uma revolução em vários setores, e traz a esperança de acelerar a criação e os testes para novos medicamentos, desenvolvimento de Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT).

O paradigma tradicional do desenvolvimento de BDAC passará a conviver com as disrupções advindas da CQ. A IA expandirá seu escopo e demandará novas competências, o que expandirá o contexto da transformação digital nas organizações e na sociedade em geral.

Referências

ARGYRES, N. S.; DE MASSIS, A.; FOSS, N. J. *et al.* History-informed strategy research: The promise of history and historical research methods in advancing strategy scholarship. **Strategic Management Journal**, v. 41, n. 3, p. 343–368, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/smj.3118>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

BALL, P. Will we ever... understand quantum theory? **BBC**, 2013. Disponível em: <<https://www.bbc.com/future/article/20130124-will-we-ever-get-quantum-theory>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

BENNETT, C. H. Notes on Landauer's principle, reversible computation, and Maxwell's Demon. **Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 34, n. 3, p. 501–510, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135521980300039X>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

BROWN, K. A.; BRITTMAN, S.; MACCAFERRI, N.; *et al.* Machine Learning in Nanoscience: Big Data at Small Scales. **Nano Letters**, v. 20, n. 1, p. 2–10, 2020. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.9b04090>>. Acesso em: 19 fev 2024.

CHALUMURI, A.; KUNE, R.; MANOJ, B.S. Training an Artificial Neural Network Using Qubits as Artificial Neurons: A Quantum Computing Approach. **Procedia Computer Science**, v. 171, p. 568–575, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050920310280>>. Acesso em: 19 fev 2024.

- CHRISTENSEN, C. M.; RAYNOR, M. E.; MCDONALD, R. What Is Disruptive Innovation? **Harvard Business Review**, 2015. Disponível em: <<https://hbr.org/2015/12/what-is-disruptive-innovation>>. Acesso em: 19 fev 2024.
- CUSUMANO, M. A. The business of quantum computing. **Communications of the ACM**, v. 61, n. 10, p. 20–22, 2018. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3267352>>. Acesso em: 19 fev 2024.
- DASH, S.; SHAKYAWAR, S. K.; SHARMA, M.; *et al.* Big data in healthcare: management, analysis and future prospects. **Journal of Big Data**, v. 6, n. 1, p. 54, 2019. Disponível em: <<https://journalofbigdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40537-019-0217-0>>. Acesso em: 19 fev 2024.
- FEYNMAN, R. P. **Feynman lectures on computation**. [s.l.]: CRC Press, 2001.
- GARTNER. **Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2024**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/articles/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2024>>. Acesso em: 25 fev. 2024.
- GARTNER. **Top Strategic Technology Trends for 2021**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/doc/3991906>>. Acesso em: 15 maio 2021.
- GODFREY, P. C.; HASSARD, J.; O’CONNOR, E. S. *et al.* What Is Organizational History? Toward a Creative Synthesis of History and Organization Studies. **Academy of Management Review**, v. 41, n. 4, p. 590–608, 2016. Disponível em: <<http://journals.aom.org/doi/10.5465/amr.2016.0040>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- GRECKHAMER, T.; FURNARI, S.; FISS, P. C. *et al.* Studying configurations with qualitative comparative analysis: Best practices in strategy and organization research. **Strategic Organization**, v. 16, n. 4, p. 482–495, 2018. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1476127018786487>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- GROVER, Lov K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. In: **Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing – STOC’96**. Philadelphia, Pennsylvania, United States: ACM Press, 1996, p. 212–219. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237814.237866>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- HARTNETT, K. **A New Law to Describe Quantum Computing’s Rise?** Quanta Magazine. Disponível em: <<https://www.quantamagazine.org/does-nevens-law-describe-quantum-computings-rise-20190618/>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- KIPPING, M.; ÜSDIKEN, B. History in Organization and Management Theory: More Than Meets the Eye. **Academy of Management Annals**, v. 8, n. 1, p. 535–588, 2014. Disponível em: <<http://journals.aom.org/doi/10.5465/19416520.2014.911579>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- KJAERGAARD, M.; SCHWARTZ, M. E.; BRAUMÜLLER, J. *et al.* Superconducting Qubits: Current State of Play. **Annual Review of Condensed Matter Physics**, v. 11, n. 1, p. 369–395, 2020. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

- MACLEAN, M.; HARVEY, C.; CLEGG, S. R. Conceptualizing Historical Organization Studies. **Academy of Management Review**, v. 41, n. 4, p. 609–632, 2016. Disponível em: <<http://journals.aom.org/doi/10.5465/amr.2014.0133>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- MENDONÇA, C. M. C. De; ANDRADE, A. M. V. De. Uso da IoT, Big Data e Inteligência Artificial nas capacidades dinâmicas: um estudo comparativo entre cidades do Brasil e de Portugal. **Informação & Sociedade: Estudos**, v. 29, n. 4, p. 37–60, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufpb.br/index.php/ies/article/view/47755>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- MERMIN, N. D. Could Feynman Have Said This? **Physics Today**, v. 57, n. 5, p. 10–11, 2004. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/physicstoday/article/57/5/10/412592/Could-Feynman-Have-Said-This>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- MIKALEF, P.; KROGSTIE, J.; PAPPAS, I. O.; *et al.* Exploring the relationship between big data analytics capability and competitive performance: The mediating roles of dynamic and operational capabilities. **Information & Management**, v. 57, n. 2, p. 103169, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378720618301022>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- MOORE, G. Cramming More Components Onto Integrated Circuits. **Electronics**, v. 38, n. 8, p. 82–85, 1965.
- NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. **Quantum computation and quantum information**. 10th anniversary ed. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2010.
- PATY, M. **A Física Do Século Xx**. [s.l.]: Ideias e Letras, 2008.
- PHILIP CHEN, C.L.; ZHANG, Chun-Yang. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. **Information Sciences**, v. 275, p. 314–347, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020025514000346>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- ROWLINSON, M.; HASSARD, J.; DECKER, S. Research strategies for organizational history: a dialogue between historical theory and organization theory. **Academy of Management Review**, v. 39, n. 3, p. 250–274, 2014. Disponível em: <<http://journals.aom.org/doi/10.5465/amr.2012.0203>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- SHAW, J. D.; BANSAL, P.; GRUBER, M. New ways of seeing: elaboration on a theme. **Academy of Management Journal**, v. 60, n. 2, p. 397–401, 2017. Disponível em: <<http://journals.aom.org/doi/10.5465/amj.2017.4002>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- SHOR, P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. In: **Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science**. Santa Fe, NM, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1994, p. 124–134. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/365700/>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

THE ECONOMIST. After Moore's law | Technology Quarterly. **The Economist**, 2016. Disponível em: <<https://www.economist.com/technology-quarterly/2016-03-12/after-moores-law>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

THE QUANTUM ATLAS. **Quantum Entanglement**. Disponível em: <<https://quantumatlas.umd.edu/entry/entanglement/>>. Acesso em: 19 fev. 2024.

YAQOOB, I.; HASHEM, I. A. T.; GANI, A. *et al.* Big data: from beginning to future. **International Journal of Information Management**, v. 36, n. 6, p. 1231–1247, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268401216304753>>. Acesso em: 19 fev. 2024.