

Políticas e estratégias nacionais de tecnologias quânticas – documento ostensivo

Representações diplomáticas brasileiras em 16 localidades: Alemanha, Austrália, Canadá, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, Índia, Israel, Japão, França, Países Baixos, Reino Unido, Rússia, Singapura, Taiwan e União Europeia realizaram pesquisa sobre o desenvolvimento de tecnologias quânticas nas áreas de suas jurisdições. As informações tratam de estratégias e políticas nacionais sobre o tema, bem como relacionam os principais atores públicos e privados com atuação no setor.

A compilação constitui fonte de ‘benchmarking’ internacional sobre o tema, que oferece subsídios para a construção de políticas públicas brasileiras de estímulo ao setor.

Brasília, 11 de agosto de 2011.

Sumário

1. ALEMANHA	6
1.1 Estratégias/políticas nacionais, investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	6
1.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	6
1.3 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto, incluindo simuladores quânticos	7
1.4 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	9
1.5 Linhas de pesquisa aplicada em comunicação e criptografia	10
1.6 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos	11
2. AUSTRÁLIA	11
2.1 Estratégias/políticas nacionais	11
2.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	11
2.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	12
2.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	13
2.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	13
2.6 Existência de startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas as tema	14
2.7 Simuladores quânticos	14
2.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto	14
2.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos	14
3. CANADÁ	15
3.1 Estratégias/políticas nacionais	15

3.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento de computação quântica	15
3.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	16
3.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	16
3.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos cinco anos.....	16
3.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	17
3.7 Simuladores quânticos.....	17
3.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores.....	17
4. CHINA	17
4.1 Estratégicas/políticas nacionais	17
4.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	19
4.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	20
4.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	21
4.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	22
4.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	22
4.7 Simuladores quânticos.....	24
4.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto	24
5. COREIA DO SUL	26
5.1 Estratégias e políticas nacionais	26
5.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento de computação quântica	27
5.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	27
5.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	27
5.5 Investimentos realizados e previstos	28
5.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	28
5.7 Simuladores quânticos.....	28
5.8 Principais centros, institutos de pesquisa e redes de pesquisadores dedicados ao assunto	29
5.9 Políticas relacionadas a insumos empregados na fabricação de circuitos quânticos	30
6. ESTADOS UNIDOS	30
6.1 Estratégias/políticas nacionais.....	30
6.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	32
6.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	33
6.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	33

6.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	34
6.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	34
6.7 Simuladores quânticos	35
6.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto	35
6.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	39
7. FRANÇA.....	40
7.1 Estratégias/políticas nacionais.....	40
7.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	41
7.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	42
7.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	42
7.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	43
7.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	43
7.7 Simuladores quânticos.....	44
7.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto	45
7.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	45
8. ÍNDIA.....	46
8.1 Breve histórico.....	46
8.2 Estratégias/políticas nacionais.....	46
8.3 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	47
8.4 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	47
8.5 Iniciativas específicas em comunicação quântica	48
8.6 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	48
8.7 Startups/empresas de base tecnológica consolidada dedicadas ao tema	48
8.8 Simuladores quânticos.....	50
8.9 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto	50
8.10 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	51
9. ISRAEL	51
9.1 Estratégias/políticas nacionais:.....	52
9.2 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	52
9.3 Iniciativas específicas em comunicação quântica	52
9.4 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos:	52

9.5 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas as tema	53
9.6 Simuladores quânticos	53
9.7 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicados ao assunto	53
9.8 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos	54
10. JAPÃO	54
10.1 Estratégias/políticas públicas nacionais	55
10.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	56
10.3 Principais linhas de pesquisa aplicada	57
10.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	58
10.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	58
10.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema	58
10.7 Simuladores quânticos	60
10.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto	60
10.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos	61
11. PAÍSES BAIXOS	61
12. REINO UNIDO	65
12.1 Estratégias/políticas nacionais para tecnologias quânticas	65
12.2 Programa Nacional para Tecnologias Quânticas	66
12.3 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	68
12.4 Principais linhas de pesquisa aplicada	69
12.5 Iniciativas específicas em comunicação quântica	69
12.6 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	70
12.7 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema	71
12.8 Simuladores quânticos	74
12.9 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto	74
12.10 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos	77
13. RÚSSIA	78
14. SINGAPURA	85
14.1 Estratégias/políticas nacionais	86

14.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	86
14.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	86
14.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	86
14.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	86
14.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema.....	87
14.7 Simuladores quânticos	88
14.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto	88
14.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	88
15. TAIWAN	88
15.1 Estratégias/políticas nacionais	88
15.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	88
15.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	89
15.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	89
15.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos	89
15.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas as tema	89
15.7 Simuladores quânticos.....	90
15.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto	90
15.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	90
16. UNIÃO EUROPEIA	91
16.1 Estratégias/políticas	91
16.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica	92
16.3 Principais linhas de pesquisa aplicada.....	93
16.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica	94
16.5 Simuladores quânticos.....	94
16.6 Principais centros/ institutos de pesquisa/ redes de pesquisadores dedicados ao tema	95
16.7 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.....	95

1. ALEMANHA

1.1 Estratégias/políticas nacionais, investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

A estratégia alemã para computação quântica está descrita no documento `Roadmap Quantencomputing` (apenas disponível no idioma alemão: <https://www.quantentechnologien.de/roadmap-quantencomputing>), que foi elaborado por um grupo de 16 especialistas dos setores acadêmico e privado. Entregue oficialmente ao governo federal em 15 de janeiro último, o documento apresenta sugestões concretas para o domínio de tecnologias chave, assim como para a formação de ecossistemas regionais especializados na área. Orienta-se, para tanto, por três metas gerais, de curto, médio e longo prazo. Nos próximos cinco anos, almeja-se a construção de computadores quânticos com capacidade de 100 `qubits`, que possam ser expandidos para até 500 `qubits`. Em até 10 anos, busca-se atingir a chamada `supremacia quântica` (situação em que o processamento de um computador quântico supera o de um supercomputador binário tradicional) em áreas específicas de aplicação. Finalmente, no horizonte de 15 anos, planeja-se o lançamento de um computador quântico alemão de propósito geral ("Quantencomputer made in Germany"), que seja competitivo no mercado internacional.

Para alcançar tais objetivos, o `roadmap` prevê o estabelecimento de `associações` regionais e redes de competência, que possam integrar capacidades atualmente dispersas e assim favorecer o desenvolvimento de sistemas computacionais quânticos completos. Esses arranjos devem reunir indústria, academia e agências governamentais estaduais e federais de maneira ágil, com o propósito de criar um ambiente favorável para o desenvolvimento, a integração e o financiamento de novas tecnologias na área. Além disso, o documento sugere a criação de uma Sociedade Alemã de Tecnologia Quântica ("Deutsche Quantengemeinschaft"), que teria a incumbência de orquestrar as diferentes iniciativas de fomento na área, acompanhar o progresso de implementação e, eventualmente, atualizar o cronograma contido no `roadmap`.

A execução do `roadmap` pelos próximos cinco anos será facultada por aporte de 2 bilhões de euros, que o governo federal alemão destinou no âmbito do pacote de estímulo para superação da crise causada pela pandemia da Covid-19. De acordo com determinação de maio último, o novo montante será distribuído entre ações do Ministério Federal de Educação e Pesquisa - BMBF (1,1 bilhão) e do Ministério Federal de Economia e Energia - BMWi (860 milhões). O investimento soma-se a valor de 950 milhões de euros que haviam sido comprometidos desde 2018 pelo BMBF.

1.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

O citado `roadmap` de computação fará uso dos resultados do programa quadro de fomento "Tecnologias quânticas - dos fundamentos ao mercado" (<https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Federal-Government-Framework-Programme-Quantum-technologies-2018-bf-C1.pdf>), lançado pelo BMBF em setembro de 2018. Por meio do programa, têm-se executado múltiplas chamadas de projetos de pesquisa e de inovação, em subáreas como processadores quânticos, algoritmos e aplicações de `software` para "informática quântica", metrologia e sensores quânticos e fomento ao empreendedorismo com

tecnologias quânticas. Merecem destaque, entre os projetos contemplados, o QUASAR, dedicado ao desenvolvimento de uma microarquitetura quântica escalável baseada em silício; e o GEQCOS, que tem o propósito de desenvolver um computador quântico de `qubits` supercondutores.

Com o aporte recentemente obtido de 1,1 bilhão de euros, o BMBF pretende dar continuidade e ampliar o escopo das chamadas de projeto. A principal chamada, lançada em maio último, prevê a construção de um computador quântico de demonstração do tipo NISQ (`Noisy Intermediate Scale Quantum`) de primeira geração. Os projetos devem ser submetidos por associações de instituições de pesquisa e precisam, também, prever mecanismos de geração de propriedade intelectual, de transferência tecnológica para empresas, de formação de `startups` (`spin-off`) e de cooperação com potenciais usuários.

O BMBF prevê, igualmente, linhas de fomento para projetos de sensores quânticos e de integração de elementos de comunicação quântica em sistemas informáticos, bem como a construção de uma Fábrica de Pesquisa (`Forschungsfabrik`), que permitirá que instituições de pesquisa e empresas tenham acesso à infraestrutura especializada para a realização de projetos de integração e testes de sistemas quânticos. O sítio eletrônico `www.quantentechnologien.de` reúne todas as informações sobre projetos, atores e tecnologias apoiadas pelo BMBF desde 2018.

1.3 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto, incluindo simuladores quânticos

De acordo com dados do Centro de Tecnologia VDI (espécie de `think tank` que assessora o governo federal alemão em temas de inovação e educação, entre outros), há, na Alemanha, cerca de 85 institutos ou grupos de pesquisas dedicados a tecnologias quânticas, incluindo computação e simulação, criptografia e simulação, e metrologia e sensores.

Uma das instituições mais tradicionais na área de computação quântica é o Instituto para Simulação Avançada - IAS (`https://www.fz-juelich.de/portal/EN/institutes/InstituteAdvancedSimulation/ias.html;jsessionid=DCDCBB996E0252BF73043AB087AE23BB`) do Centro de Pesquisas de Jülich, localizado na Renânia do Norte-Vestfália, que, desde 2018, coordena o projeto "OpenSuperQ" com outros 9 centros europeus para a construção de uma infraestrutura computacional quântica aberta e multiusuário, com capacidade de 100 `qubits`. Em outubro de 2019, o centro também firmou parceria com a empresa canadense D-Wave para a construção de uma infraestrutura quântica em nuvem, chamada Plataforma Unificada para Usuários de Computação Quântica do Centro de Jülich ("Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing" - JUNIQ), que possibilitará a cientistas europeus realizar simulações com rede de computadores quânticos. Cabe mencionar, ainda, programa de cooperação entre o centro Jülich e a empresa norte-americana Google, estabelecido em julho de 2018, para a formação de pesquisadores e o uso recíproco das plataformas quânticas em operação nas duas entidades. O diretor do IAS é o Dr Stefan Blügel, que pode ser contatado por meio do endereço `s.bluegel@fz-juelich.de` ou do telefone `+49 2461 61-4249`.

Também pertencente ao Centro de Pesquisas de Jülich, o Instituto Peter Grünberg - PGI (`https://www.fz-juelich.de/pgi/EN/Home/home_node.html`) dedica-se à pesquisa

básica com materiais e estruturas quânticas, com vistas a identificar potenciais aplicações de longo prazo nos campos da tecnologia da informação. Entre os grupos de trabalho do PGI, estão os voltados a estudar e aprofundar a teoria quântica de materiais, a nanociência quântica e o controle quântico. Cabe recordar, por oportuno, que o líder do grupo de trabalho sobre controle quântico, Dr. Tommaso Calarco, tem mantido contatos informais com acadêmico do estado do Rio Grande do Norte e com o professor Luiz Davidovich, pesquisador do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro e presidente da Academia Brasileira de Ciências, com vistas a explorar possibilidades de cooperação em análises de matérias-primas. O diretor do PGI é o Dr Rainer Waser, cujo endereço eletrônico e telefone são, respectivamente, `r.waser@fz-juelich.de` e `+49 2461 61-5811`. Os dados de contato do Dr Calarco são: `t.calarco@fz-juelich.de` e `+49 2461 61-9365`.

O Instituto Fraunhofer para Física de Estado Sólido Aplicada - IAF (<https://www.iaf.fraunhofer.de/en.html>) é outra instituição alemã de destaque. Em 2020, firmou parceria com a norte-americana IBM que resultou na instalação de um exemplar do computador "Q System One", inaugurado em junho último na sede do IAF na cidade de Ehningen, no estado da Baden-Wuerttemberg. Com capacidade de 27 qubits, é o computador quântico de maior desempenho na Europa e estará à disposição para que empresas e instituições, tanto alemãs como dos demais países europeus, realizem pesquisas e simulações. Avalia-se que a nova infraestrutura terá especial impacto nas áreas de transporte, logística, energia, química e farmacêutica. De acordo com o coordenador do projeto, o professor Oliver Ambacher, mediante o uso intensivo da nova infraestrutura em estudos e simulações realizadas pela sua rede de institutos, o IAF pretende desenvolver as competências necessárias que permitam a construção das novas gerações de computadores quânticos. O referido instituto pode ser contatado por meio do endereço `info@iaf.fraunhofer.de` e do telefone `+49 761 5159-0`.

No âmbito mais geral da Sociedade Fraunhofer, cumpre chamar atenção para a rede de institutos relacionados a tecnologias quânticas. Além do citado IAF, também integram o grupo o Instituto para Ótica Aplicada e Mecânica de Precisão (IOF), o Instituto para Sistemas Abertos de Comunicação (FOKUS) e o Instituto de Tecnologias de Comunicação Heinrich Hertz (IHH). Os quatro institutos atuam conjuntamente em diversos projetos transversais, financiados tanto pelo governo alemão como pela Comissão Europeia.

O Instituto de Tecnologias Quânticas do Centro Aeroespacial Alemão - DLR (https://www.dlr.de/qt/desktopdefault.aspx/tabid-1349_8/23503_read-54020/), inaugurado em maio último, na cidade de Ulm, é a instituição que tem recebido, recentemente, maior destaque na Alemanha. O centro contará com aportes de 740 milhões de euros do valor do pacote de estímulo de 2020 destinado ao BMWi, para construir, nos próximos quatro anos, um computador quântico híbrido e desenvolver aplicações de `software` para a infraestrutura. Cerca de 80% do referido valor deve, segundo determinação do ministério, ser destinado a corporações e `start-ups` parceiras do projeto, que estariam reunidas por meio de consórcios. O instituto, que já conta com 40 pesquisadores e deverá atingir um quadro de 200 nos próximos anos, deve ainda atuar em estreita cooperação com a Universidade de Ulm. Os projetos de `hardware` e de `software` devem ser voltados, em particular, para aplicações concretas na área espacial, comunicação quântica e transmissão criptografada de dados. O Dr Wolfgang Schleich, diretor comissionado do Instituto de Tecnologias Quânticas, pode ser contatado pelo

telefone `+49 731 50-23080` ou por mensagem encaminhada pelo sítio `<https://www.dlr.de/qt/desktopdefault.aspx/tabid-13516/mailcontact-38621/>`.

Citam-se, ainda, na região de Munique, os institutos Max-Planck para Ótica Quântica e a Cátedra para a Teoria de Sistemas Quânticos Complexos da Universidade Técnica de Munique. Conjuntamente com outras instituições, integram o "Munich Center for Quantum Science and Technology" - MCQST (<https://www.mcqst.de/>), espécie de agrupamento multidisciplinar dedicado a promover pesquisas básica e aplicada nas áreas de computação, metrologia e ciência dos materiais, entre outras. Com base no ecossistema existente, o governo da Baviera pretende promover o que vem chamando de "Munich Quantum Valley". Para consolidar tal capacidade, planeja inaugurar, proximamente, o Centro para Computação e Tecnologias Quânticas ("Zentrum für Quantencomputing & Quantentechnologien" - ZQQ), que terá como propósito desenvolver, fabricar e operar computadores. A futura instituição conta com indicação de investimentos, pelo governo bávaro, de 300 milhões de euros, dos quais 120 milhões já seriam investidos em 2021 e 2022. Junto com o ZQQ, pretende-se estabelecer um parque tecnológico dedicado a tecnologias quânticas, que estaria equipado com salas limpas e infraestrutura de produção de compostos em escala nanométrica, para o benefício de `startups` e grandes empresas do setor. Os dados do MCQST, por meio do qual pode-se contatar todos os atores relevantes da Baviera, são: `gst.mcqst@physik.uni-muenchen.de` e `+49 89 2180 6202`.

Outra região que pretende se estabelecer no cenário da computação quântica alemã é o estado da Baixa Saxônia. Em outubro último, foi formalizado o consórcio de pesquisa "Quantum Valley Lower Saxony" - QVLS (<https://www.qvls-q1.de/>), conformado por universidades locais (Universidade Leibniz de Hannover, Universidade Técnica de Braunschweig), a sociedade Max-Planck, a DLR, o Instituto Federal Físico-Técnico (PTB) e a empresa de equipamentos médicos Sartorius AG. A iniciativa tem o propósito de desenvolver sistemas quânticos a partir de 2025 e destaca-se ao optar pela tecnologia de "armadilha de íons", alternativa à modalidade de "loops supercondutores" adotada pela IBM, Google e Intel, e que é objeto de todas as demais instituições alemãs dedicadas à computação. O consórcio pode ser contactado pelo correio eletrônico `info@qvls.de`.

1.4 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Como mencionado, um dos principais objetivos apontados pelo citado `roadmap` de computação quântica da Alemanha é a geração de ecossistemas de inovação, em que o setor privado, a academia e as agências governamentais devem contribuir significativamente para a evolução tecnológica do segmento. Reconhece-se, atualmente, que a Alemanha detém um sistema robusto de pesquisa básica e aplicada na área, mas é deficiente em atores e mecanismos capazes de introduzir novas tecnologias no mercado. A inexistência de uma grande companhia local que esteja à frente de um projeto de computador quântico é citada, de modo recorrente, como exemplo do "atraso" alemão. Por esse motivo, tanto os programas apoiados pelo BMBF como o novo instituto financiado pelo BMWi impõem como requisitos o envolvimento de atores privados e a geração de propriedade intelectual. Busca-se, desse modo, fomentar o "transbordamento" de conhecimentos e tecnologias concebidas em laboratório para o mercado, por meio de licenciamento de patentes ou a fundação de novas empresas.

Os projetos apoiados pelo BMBF desde o lançamento do programa "Tecnologias quânticas - dos fundamentos ao mercado" têm induzido o surgimento ou consolidação de `startups` no setor. O mencionado sítio eletrônico "Quantentechnologien" lista 15 empresas com menos de 20 funcionários e 9 empresas que empregam entre 21 e 250 indivíduos que receberam financiamento do ministério. Entre essas, merecem destaque a `startup` Q.ant (<https://qant.de/>), de Stuttgart, dedicada ao desenvolvimento de lasers para sensores quânticos e de componentes para controle quântico; e a HQS Quantum Simulations (<https://quantumsimulations.de/>), voltada à produção de `software` que modela o comportamento de moléculas em nível quântico, para ser usado na indústria química e de materiais.

Entre as grandes companhias alemãs, cumpre citar a Infineon - tradicional no segmento de circuitos integrados -, que têm atuado nos citados projetos GEQCOS e QUASAR. Cabe, ainda, mencionar a Carl Zeiss, do segmento ótico, que têm atuado em projetos de sensores e sistemas de imagem quânticos; e a Robert Bosch, tradicional fornecedora de componentes automotivos e industriais, que também tem se envolvido em projetos de subsistemas quânticos.

Ainda com relação ao empenho do governo em introduzir, no mercado, tecnologias quânticas concebidas localmente, há expectativa de que grandes multinacionais alemãs exerçam, na qualidade de usuárias, importante papel. Nesse sentido, motivadas pela evolução das políticas para o setor, dez grandes empresas (BASF, Boehringer Ingelheim, Bosch, BMW, Infineon, Merck, Munich Re, SAP, Siemens e Volkswagen) estabeleceram, no início de junho corrente, a aliança QUTAC (Quantum Technology and Application Consortium), que tem como propósito "apoiar o caminho da pesquisa de base até a aplicação de tecnologias quânticas". Na ocasião do lançamento da iniciativa, foi divulgado relatório (https://www.qutac.de/wp-content/uploads/2021/06/QUTA_C_Paper.pdf) que lista 23 problemas concretos, para os quais o setor produtivo procura soluções por meio de tecnologias quânticas.

1.5 Linhas de pesquisa aplicada em comunicação e criptografia

Na área de comunicação quântica, três grandes projetos de pesquisa têm sido apoiados pelo BMBF desde 2018. No âmbito específico da criptografia, o projeto QuPAD tem por objetivo desenvolver componentes que permitam a distribuição eficiente de chaves usando o protocolo QKD (`Quantum Key Distribution`). O trabalho, que recebeu investimentos da ordem de 2,2 milhões de euros, tem sido conduzido por consórcio integrado pela Universidade de Münster e pelas empresas PicoQuant (Berlim) e Entropy (Munique). O coordenador do projeto é o Dr Andreas Bültner, que pode ser contatado pelo endereço `buelter@picoquant.com` e pelo telefone `+4930120882089`.

O projeto MARQUAND, que já recebeu aportes de 1,1 milhão de euros e tem término previsto em abril de 2022, está voltado ao desenvolvimento de detectores de fótons com nanofios supercondutores (`Superconducting Nanowire Single Photon Detectors`), que reduzem a incidência de erros de transmissão de chaves criptográficas. É conduzido pela Universidade Técnica de Munique e a empresa Kiutra, também da capital bávara. O coordenador do MARQUAND, Dr Jonathan Finley, pode ser contatado pelo endereço `finley@mytum.de` e pelo telefone `+498928912770`.

Por fim, o projeto QSource, que conta com repasses de 3,1 milhões de euros e tem duração prevista até novembro próximo, propõe-se a pesquisar e a desenvolver tecnologias que confirmam maior estabilidade optomecânica e optoeletrônica para fontes e detectores de fótons, de modo a ampliar a quantidade de informação distribuída em técnicas de distribuição de chaves criptográficas. O projeto vem sendo conduzido pelo Instituto Fraunhofer para Ótica Aplicada e Mecânica Fina (Fraunhofer IOF), em parceria com as empresas TOPTICA Photonics (Gräfelfing), Qioptiq Photonics (Göttingen) e Jena-Optronik (Jena). Os dados de contato do coordenador do projeto, Dr Erik Beckert, são: 'erik.beckert@iof.fraunhofer.de' e '+493641807338'.

1.6 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Embora não tenha sido identificada política dedicada ao uso de insumos, cumpre salientar que o governo alemão vem financiando pesquisas com computadores quânticos pautados tanto em materiais supercondutores como em semicondutores, em particular o silício. Apesar do importante desempenho registrado por sistemas supercondutores, evidenciou-se grande consumo de energia, em decorrência da necessidade de operação a temperaturas extremamente reduzidas, próximas de 0 Kelvin. A viabilidade de sistemas quânticos feitos de silício permitiria fazer uso de material abundante e muito conhecido, que pode operar a temperaturas próximas da ambiente.

2. AUSTRÁLIA

2.1 Estratégias/políticas nacionais

Não há estratégias nacionais voltadas para a computação quântica. Não obstante, várias instituições acadêmicas australianas envolvidas com pesquisa quântica têm alertado para a necessidade de uma política nacional para o setor. A prestigiosa Agência de Pesquisa Científica australiana ("Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation" - CSRIO) no documento (2020) "O crescimento da tecnologia quântica na Austrália", traz as seguintes recomendações para a promoção da tecnologia no país: (i) estabelecimento de estratégia nacional sobre o tema; (ii) construção de mecanismos de financiamento; (iii) atração e manutenção de profissionais qualificados; (iv) avaliação da capacidade industrial e de infraestrutura. Importante notar que, apesar da inexistência de uma política nacional específica sobre o tema, o CSRIO financia e trabalha em conjunto com universidades e empresas privadas para o desenvolvimento do setor.

Na mesma linha, o Instituto Australiano de Políticas Estratégicas ("Australian Strategic Policy Institute" -ASPI) também chama a atenção para os riscos associados à inexistência de estratégia nacional integrada para o setor. No documento "Uma estratégia australiana para a revolução quântica", o instituto reconhece o bom posicionamento do país na corrida pelo controle e desenvolvimento de tecnologias quânticas. Pondera, contudo, que essa situação privilegiada não será suficiente para maximizar todo o potencial do setor, que necessita de políticas claras e investimentos públicos integrados.

2.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

Entre as principais iniciativas, destaca-se o Centro de Computação Quântica e Tecnologia da Comunicação (CQC2T), fundado em 2019, que desenvolve pesquisas em computação quântica, comunicação quântica e processamento e distribuição de informação. Os programas de pesquisa são parcialmente financiados pelo ARC. O CQC2T planeja avançar em pesquisas sobre informações quânticas em silício, ótica quântica, plataformas de rede e sistemas quânticos de grande escala. O centro enfatiza a expertise dos pesquisadores australianos no desenvolvimento de tecnologias relativas à manipulação de matéria e luz, em nível de átomos individuais e fótons, de demonstrações sobre fidelidade e coerência/tempo de qubits em estado sólido; além da capacidade de rodar algoritmos de pequena escala sobre qubits fotônicos.

No mesmo ano, foi fundada a "Sydney Quantum Academy" (SQA), projeto colaborativo entre a Universidade de Sydney, a Universidade de Nova Gales do Sul, a Macquarie University e a Universidade de Tecnologia de Sydney. A academia foi fundada com a participação de oitenta pesquisadores das quatro universidades, além de consultores externos de empresas privadas. O governo de Nova Gales do Sul financiou, parcialmente, a iniciativa, aportando AUD 15,4 milhões. Além de representantes das universidades e do governo (CSRIO, governo de Nova Gales e governo Federal), participam do conselho da SQA representantes do setor privado (Google, Amazon, IBM, Microsoft, Main Sequence, PsiQuantum, Quintessence Labs).

Por sua vez, quanto à mecânica quântica aplicada, o "Centre of Excellence for Engineered Quantum Systems" (EQUS), desde 2011, concentra-se na aplicação da teoria quântica e desenvolvimento de máquinas e equipamentos, desenvolvendo interfaces entre mecânica quântica e engenharia. Dentre as principais linhas de atuação do EQUS, destacam-se: (i) design de materiais quânticos; (ii) diagnóstico e imagem (superfluidos, mecânica ótica, dentre outros); (iii) motores e máquinas quânticas complexas.

No âmbito do governo federal, o "Defense Science and Technology Group", vinculado ao Ministério da Defesa, administra o fundo "Next Generation Technologies", que prevê gastos de até AUD 1,2 bilhão, durante os próximos dez anos, para o desenvolvimento de tecnologias disruptivas aplicadas ao setor de defesa. O setor de tecnologias quânticas está incluindo entre as potenciais áreas receptoras de financiamento do fundo. Paralelamente, em 2020, o CSIRO desenvolveu programa de apoio a três empresas do setor: (i) Nomad Atomics (plataforma de sensores de gravimetria e acelerômetro para monitoramento de recursos naturais no subsolo); (ii) Quantum Brilliance (plataforma de computação quântica de diamante); (iii) Redback Systems (espectrógrafo de alta resolução). Além das instituições mencionadas, também merecem destaque, no cenário australiano, ainda que não concentradas exclusivamente em tecnologia quântica, os seguintes centros de pesquisa: (i) Exciton Science; (ii) FLEET; (iii) Nanoscale BioPhotonics; e (iv) OzGrav. As instituições são vinculadas ao Conselho de Pesquisas Australiano (ARC) e a universidades locais.

2.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

De acordo com o CSRIO, existem vinte e dois centros de pesquisa de tecnologias quânticas na Austrália. Entre as principais linhas de pesquisa, destacam-se: (i) plataformas de hardware em computação quântica; (ii) aplicação de qubits de silício em computação quântica; (iii) simulação de algoritmos; (iv) componentes críticos para

sensores quânticos, (v) simulações de molécula e (iv) processadores fotônicos de silício, (vi) teletransporte quântico.

2.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

O CQC2T desenvolve, em conjunto com a Universidade de Queensland, o "Quantum Communication Theory Program" que analisa diversos temas relacionados à comunicação quântica, informação quântica e metrologia. Um dos objetos de análise do programa é o aumento do alcance de comunicação por meio do desenvolvimento de repetidores quânticos. Entre as linhas de pesquisa do CQC2T, destacam-se: (i) análise da presença de horizonte de eventos e seus efeitos na comunicação quântica, por meio de detecção homódina; (ii) destilação de entrelaçamento (protocolos de purificação de emaranhamento); (iii) amplificação linear; (iv) performance de códigos de superfície; (v) emissores de fótons a partir de diamantes de alto desempenho; (vi) descoerência e fidelidade em operações de qubit.

A Universidade Nacional da Austrália (ANU), por sua vez, administra o "Quantum Communication Laboratory". O laboratório contém cinco mesas óticas, sistemas de laser de diodo e Nd YAG lasers de dupla frequência, dentre outros equipamentos. A instalação é utilizada para teste de protocolos de comunicação quântica, emprego de amplificadores paramétricos óticos para produção de luz não clássica, dentre outras funções. O laboratório abriga o gerador quântico de números randômicos da universidade (QRNG-ANU). Além disso, a ANU gerencia a iniciativa "InSpace Laser Communications" para o desenvolvimento de redes óticas de comunicação quântica. O programa prevê a construção da "Quantum Optical Ground Station" para pesquisas de comunicação quântica e espacial e desenvolvimento de tecnologias espaço livre de chaves quânticas, sob protocolo de variável contínua.

No setor privado, a QuintessenceLabs, start-up formada por pesquisadores da ANU, desenvolveu e comercializa soluções de segurança cibernética a partir de tecnologias quânticas. Esses processos incluem geradores quânticos de números randômicos entrópicos e sistemas e chaves cripto-ágeis.

2.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

Não há dados consolidados sobre o tema. A título exemplificativo, o orçamento do ARC no período 2020-2021 foi de AUD 856 milhões e o do CSIRO de AUD 1,4 bilhão. ASPI estima que o total de financiamento (setor privado e público, incluindo a ACR) atingiu AUD 350 milhões em 2020. O "Sydney Nanoscience Hub", vinculado à rede de laboratórios quânticos da Microsoft e à Universidade de Sydney, recebeu investimentos de AUD 150 milhões.

Há grande interação entre empresas privadas, algumas não vinculadas diretamente ao setor de alta tecnologia, e o setor de pesquisa. Em novembro de 2020, a petroleira Woodside anunciou com a IBM Q Network para desenvolvimento de tecnologias quânticas e soluções de inteligência artificial. A companhia também ingressou como membro do MIT-IBM Watson AI Lab. O Commonwealth Bank of Australia e pesquisadores da Rigetti Computing (empresa de sistemas integrados e computação quântica) trabalham no desenvolvimento computador quântico para otimização de portfólio de investimentos. A Archer, única empresa de tecnologia quântica com ações

negociadas na bolsa de valores de Sydney (ASX), apresenta alta consistente no último ano. A firma concluiu processo de capitalização no montante de AUD 176 milhões e anunciou investimentos de AUD 150 milhões no desenvolvimento de processador quântico (12CQ). O CSIRO estima que em 2040, o setor de tecnologia quântica na Austrália poderá gerar receita de AUD 4 bilhões e dezesseis mil postos de trabalho.

2.6 Existência de startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

No setor de computação quântica, destacam-se: (i) Microsoft; (ii) Silicon Quantum Computing; (iii) Quantum Brilliance; e (iv) IBM; no setor de sensores quânticos: (i) Redback Systems; (ii) Lucigem; (iii) Nomad Atomics; no setor de comunicação quântica: (i) QuintessenceLabs; em serviços de consultoria: (i) Max Kelsen e (ii) H-Barconsultants; em pesquisa e desenvolvimento: (i) Q-CTRL; (ii) Liquid Instruments; (iii) MOGLabs e Cryolock.

2.7 Simuladores quânticos

O Instituto de Nanotecnologia da Universidade de Sydney, a Universidade de Melbourne, a Universidade de Nova Gales do Sul, a ANU, entre outros centros de pesquisa, desenvolvem pesquisas a partir de simulação quântica.

2.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto

CQC2T, Escola de Física, Universidade de Nova Gales do Sul, contato: Professor Michelle Simmons (diretora), email: admin-cqc2t@unsw.edu.au, telefone: (+ 61 2) 9385 9584; SQA, contato: Rebecca Halligan, diretora operacional; email: rebecca.halligan@sydney.edu.au, telefone: (+61 2) 8011 3812; EQUUS, contato: Katrina Tune, diretora operacional, email: coo@equus.org.

2.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Não há política específica. O governo australiano, por meio da Austrade (agência de promoção do comércio e de investimentos) e da Agência de Geologia Australiana ("Australian Geoscience revisa anualmente a lista de "minerais críticos", considerados fundamentais para o desenvolvimento tecnológico do país. O Austrade e o Ministério da Indústria desenvolvem programas para atração de investimentos externos na exploração desses recursos.

A lista de 2020 inclui: antimônio, berílio, bismuto, cromo, cobalto, gálio, germânio, grafite, háfnio, hélio, índio, lítio, magnésio, manganês, nióbio, PGMs, REEs, rênio, escândio, tântalo, titânio, tungstênio, vanádio, minerais do grupo platina, terras raras e zircônio.

3. CANADÁ

3.1 Estratégias/políticas nacionais

Apesar de o Canadá já ter investimentos federais e provinciais em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias quânticas, o país ainda não conta com estratégia civil nacional para o tema. Desde 2016, o Governo federal realiza consultas e simpósios junto a partes interessas, com vistas a formular a estratégia canadense para quântica.

Na mais recente lei orçamentária, aprovada no fim de junho, o Governo destinou CAD 360 milhões (USD 288 milhões) para o investimento, nos próximos sete anos, no desenvolvimento de estratégia nacional de tecnologias quânticas. Segundo o Governo, o objetivo é de apoiar o desenvolvimento do segmento que já é consolidado no país, ao promover a cooperação e a pesquisa entre indústria e universidades, com foco na comercialização de inovações e na capacitação e retenção de talentos.

Em paralelo, o Departamento de Defesa Nacional (DND) e as Forças Armadas Canadenses publicaram a sua estratégia de tecnologias quânticas sob perspectiva de defesa. O documento ressalta os diferentes usos militares de novas tecnologias, em especial nas áreas de detecção (incluindo posicionamento, navegação e coordenação), comunicações, computação e desenvolvimento de novos materiais. A estratégia pretende apoiar e acelerar o desenvolvimento de tecnologias das referidas áreas e disponibilizar as inovações para uso pelas Forças Armadas.

Para atingir esse objetivo, o Departamento de Defesa Nacional pretende: a) concentrar esforços iniciais no desenvolvimento de aplicações de sensoriamento quântico de ponta; b) avaliar novas ameaças e vulnerabilidades que podem ser introduzidas por tecnologias quânticas; c) acelerar a transição das tecnologias quânticas do laboratório para protótipos funcionais; d) estabelecer parcerias estratégicas com outros departamentos do Governo federal para aproveitar o conhecimento de ponta em quântica e impulsionar a inovação quântica em capacidades de defesa; e) fortalecer os setores responsáveis por quântica no Departamento para melhor assessorar políticas sobre o tema, bem como - ressalta-se - contribuir e beneficiar-se de cooperação com aliados internacionais. A referida estratégia está disponível em: https://www.canada.ca/content/dam/dnd-mdn/documents/reports/DGM-61120-DD8_DNDCAF_QuantumSTStrategy_EN_v3.pdf

3.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento de computação quântica

Sobre computação quântica, o projeto mais antigo e estabelecido no país é o Instituto para Computação Quântica (ICQ) da Universidade de Waterloo. A organização foi fundada em 2002 com financiamento filantrópico e, desde então, já recebeu aportes dos Governos federal e provincial de Ontário. Na Colúmbia Britânica, o Governo provincial estabeleceu, em dezembro de 2019, o Instituto de Algoritmos Quânticos, na Universidade Simon Fraser, que congrega diversas entidades acadêmicas e empresariais para o desenvolvimento de software de computação quântica em diversos segmentos.

No setor privado, há o projeto da empresa "Anyon Systems", em parceria com o Departamento de Defesa Nacional, para desenvolvimento do primeiro computador

quântico baseado em porta lógica ("logic gate-based"). A empresa "IQBit", sediada em Vancouver, é especializada em geração de algoritmos para computação quântica, em especial nos setores de ciências da saúde, química, materiais e finanças. Já a empresa "Zapata Computing", com escritório em Toronto, também é especializada em desenvolver algoritmos para computação quântica. A empresa "Quantum Benchmark", sediada em Waterloo, oferece software para computadores quânticos. A empresa "D-Wave Systems", com escritório na Colúmbia Britânica, fornece, por sua vez, equipamentos de computação quântica. A empresa "Xanadu", com escritório em Toronto, também oferece equipamentos e serviços de nuvem para computação quântica.

3.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Além dos projetos mencionados de computação quântica, há diversas iniciativas em comunicação, objeto do item seguinte, e em sensoriamento. Sobre o último, há parceria entre o Conselho Nacional de Pesquisa (NRC) e o Centro de Pesquisas de Tecnologias Inovadoras e de Segurança para o desenvolvimento de sensores quânticos para as áreas de meio ambiente, recursos naturais, saúde e defesa.

3.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Desde 2017, a Agência Espacial Canadense (CSA) tem parceria com o IQC e com a multinacional de origem norte-americana "Honeywell" para o desenvolvimento de satélite para criptografia quântica. Maiores informações estão em: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/qeyssat.asp>. Outro projeto é realizado pelo NRC, DND e a Agência Nacional de Criptografia (CSE) para coordenar políticas governamentais sobre quântica, inclusive criptografia. Há, ainda, a empresa "ISARA", com sede em Waterloo, Ontário, que desenvolve pesquisas e oferta serviços de criptografia quântica.

3.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos cinco anos

Em 2015-2016, o Fundo Canadense de Excelência em Pesquisas (CFREF) alocou CAD 138 milhões em três institutos de pesquisa quântica; em 2018, o Governo federal investiu USD 11,7 milhões no IQC; em 2019, a Agência Espacial Canadense fechou contrato de USD 23,5 milhões com a "Honeywell"; no mesmo ano, o Fundo de Desenvolvimento Econômico para o Sul de Ontário (FedDev Ontario) investiu USD 26,5 milhões em startups na região de Waterloo; em dezembro de 2019, o Governo de Colúmbia Britânica anunciou financiamento de USD 13,3 milhões, para os cinco anos seguintes, no Instituto de Algoritmos Quânticos; em junho de 2020, o Governo de Quebec investiu USD 3,5 milhões no "Institute Quantique" da Universidade de Sherbrooke para estabelecer o centro de pesquisa "IBM Q Hub". Em outubro de 2020, o Governo de Alberta alocou USD 2,3 milhões para a rede de pesquisas quânticas na Universidade de Calgary; em 2020, o Conselho de Pesquisas em Ciências Naturais e Engenharia (NSERC) financiou USD 1,29 milhão no programa de especialização em quântica na Universidade de Colúmbia Britânica e USD 3,4 milhões em chamada conjunta sobre tecnologias quânticas com o Reino Unido. Ademais, como mencionado, o Governo federal reservou USD 288 milhões no orçamento público para o desenvolvimento de estratégia nacional, para os próximos sete anos.

3.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Algumas das empresas mais consolidadas no segmento são as já citadas "IQBit", "Anyon Systems", "D-Wave Systems", "ISARA", "Quantum Benchmark", "Xanadu" e "Zapata Computing".

3.7 Simuladores quânticos

Não foram encontradas informações ostensivas sobre o tema, mesmo em consulta direta com representante do Conselho Nacional de Pesquisa. Há, entretanto, notícia sobre a construção de simulador quântico para sistemas cíclicos na Universidade de Ottawa.

3.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores

Como mencionado, a estratégia nacional em elaboração pretende criar rede de pesquisadores sobre tecnologia quântica. O Conselho Nacional de Pesquisa é importante interlocutor na área de tecnologia quântica. A responsável por cooperação com Brasil é a senhora Lorena Maciel, e-mail: lorena.maciel@nrc-cnrc.gc.ca.

São a seguir relacionadas informações adicionais sobre diversas instituições acadêmicas do Canadá envolvidas no tema: - Universidade de Calgary (Institute for Quantum Science and Technology), telefone: + 1 403 220-4403, e-mail: iqstinfo@ucalgary.ca; - Universidade de Colúmbia Britânica (Stewart Blusson Quantum Matter Institute), telefone: +1 604 827-3206, e-mail: kassandra.darbel@ubc.ca; - Universidade de Dalhousie (Department of Physics and Atmospheric Science) telephone: +1 902 494-7109, e-mail: Kimberley.hall@dal.ca; - Universidade de Montreal (Laboratoire d'informatique théorique et quantique), telefone: 514-343-6111, e-mail: salvail@iro.umontreal.ca; - Universidade de Ottawa (Max Planck - uOttawa Centre for extreme Quantum Photonics), telefone: +1 613 562-5270, e-mail: innovation@uottawa.ca; - Universidade de Sherbrooke (Institut quantique), telefone: +1 819 821-8000, contato eletrônico: <https://www.usherbrooke.ca/iq/institut/nous-joindre/> - Universidade Simon Fraser (Silicon Quantum Technology Labs), telefone: +1 778 782-3673, e-mail: s.simmons@sfu.ca; - Universidade de Toronto (Centre for Quantum Information and Quantum Control), e-mail: iyer@physics.utoronto.ca; - Universidade de Waterloo (Institute for Quantum Computing), telefone: + 1 519 888-4021, e-mail: laflamme@uwaterloo.ca;

Cabe mencionar que o Instituto Canadense para Pesquisas Avançadas (CIFAR) publicou estudo, em abril de 2021, com compilação de políticas internacionais de tecnologia quântica. O estudo, além de detalhar iniciativas no Canadá, apresenta políticas de mais 45 países e da União Europeia. O referido estudo está disponível em: <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>

4. CHINA

4.1 Estratégicas/políticas nacionais

Atualmente, o instrumento legal chinês de maior importância quanto a estratégia e objetivos na área de tecnologias quânticas é o 14º Plano Quinquenal (14PQ). Aprovado em março de 2021, durante as sessões anuais dos órgãos legislativos (Assembleia

Nacional Popular e Conferência Consultiva Política do Povo Chinês), o 14PQ terá vigência para o período entre 2021 e 2025.

O plano pode ser entendido, resumidamente, como um conjunto indicativo de metas de médio prazo para estimular o desenvolvimento social e econômico da China. A inclusão de metas e objetivos no 14PQ, sobre temas específicos, tem influência direta sobre outros planos, em diferente escala e foco, como é o caso de províncias, universidades e setores industriais.

O 14PQ trata das tecnologias quânticas (muitas vezes citadas sob a forma genérica de "informação quântica") nas seguintes seções:

Artigo 1º (relativo ao "Ambiente para Desenvolvimento"): reconhecimento dos avanços recentes da China em informação quântica ao lado de supercomputação, exploração espacial, viagens espaciais tripuladas e exploração de águas profundas;

Artigo 4º (relativo ao "Fortalecimento do poder científico e tecnológico nacional"): na seção I, sobre processos para otimizar a alocação de recursos, o Plano estabelece que serão criados diversos laboratórios sobre informação quântica, ao lado de fotônica, micro e nano-eletrônica, inteligência artificial, biotecnologia, entre outras áreas. A mesma seção estabelece que os laboratórios estatais nessas áreas deverão ser reorganizados em rede, de modo a formar sistema com funcionamento mais eficiente e estruturado.

Ainda no artigo 4º, sob a seção II, que trata do fortalecimento e liderança da pesquisa nacional em ciência e tecnologia, o Plano inclui a "informação quântica" no conjunto de campos básicos relacionados à segurança nacional e desenvolvimento, com previsão de formulação e implementação de estratégia e projetos científicos específicos.

As tecnologias quânticas são destacadas em quadro com sete setores de ciência e tecnologia de ponta, sob a mesma seção, com previsão específica de "pesquisa e desenvolvimento nos planos urbano, interurbano e espacial de tecnologias de comunicação quântica, desenvolvimento de protótipo geral de computação quântica, assim como de simulador, juntamente com avanços em tecnologia de mensuração quântica precisa".

Artigo 9º (relativo à expansão de indústrias estratégicas): determina a organização e implementação de planos de incubação e aceleração industrial; Artigo 15 (relativo à construção de vantagens na economia digital): inclusão da computação e comunicação quânticas no conjunto de setores que devem ser objeto de ações de fortalecimento do uso inovador de tecnologias digitais essenciais.

Artigo 57 (relativo à promoção simultânea dos poderes econômico e de defesa nacional): prevê o aprofundamento da colaboração civil e militar em ciência, tecnologia e inovação, incluindo as tecnologias quânticas entre diversos outros setores.

Além do 14PQ, convém destacar as seguintes referências adicionais a tecnologias quânticas:

I. Em 2020, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MOST), o Ministério da Educação (MoE), a Academia Chinesa de Ciências (CAS) e a Comissão Nacional de Reforma e Desenvolvimento (NDRC) publicaram a diretriz conjunta que estabeleceu o Programa de Trabalho para o Fortalecimento da Pesquisa Básica "De Zero para Um" ("Strengthen "from 0 to 1" Basic Research Work Programme"), que na terceira seção coloca a "ciência quântica" entre os setores a serem apoiados por meio de financiamento e programas-chave de apoio (vide:

II. O Plano Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, publicado em 2016, estabeleceu diretrizes para seis áreas específicas de pesquisa com destaque para sistemas quânticos de pequena escala, comunicação quântica, computação e simulação quânticas e mensuração quântica de precisão;

III. O documento de estratégia "Made in China 2025", publicado em 2015, contém previsão para "promover a computação quântica e redes neurais" no conjunto de ações de apoio à competitividade industrial;

IV. A cidade de Jinan, capital da província de Shandong, em 2019, publicou diretriz sobre o estabelecimento de centro de informação de ciência quântica, com previsões para a criação de um parque tecnológico específico ("Quantum Valley"), políticas de atração de empresários e pesquisadores, cadeia de fornecedores e outros elementos necessários à inovação nesse setor (vide:

V. A Municipalidade Autônoma de Chongqing emitiu o Plano de Ação 2020-2022 para Construção e Projetos de Nova Infraestrutura, que contempla fortalecimento da pesquisa em tecnologias quânticas e investimentos (vide:

VI. A província de Guangdong, de maior concentração industrial da China (PIB de aproximadamente US\$ 1,6 trilhão, em 2020), emitiu o "Plano de Ação 2021-2025 para a Indústria e os Clusters Estratégicos de Blockchain e Informação Quântica" que permitirá o investimento em pesquisas, estímulo a novas empresas e outras ações nesses setores (vide:

VII. Ressalte-se, por fim, que as principais lideranças políticas da China, em diversas ocasiões, demonstraram interesse direto na concessão de prioridade às tecnologias quânticas para o desenvolvimento do país. O presidente Xi Jinping, em 2013, visitou o principal centro de pesquisas da área na província de Anhui. O tema das tecnologias quânticas foi objeto de "sessões de estudo" por meio da apresentação, por cientistas, do estado da tecnologia às principais lideranças do país.

4.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

1998 - 2006: projetos iniciais de pequena escala (principalmente a cargo da National Natural Science Foundation of China - NSFC);

2006-2010 (11º Plano Quinquenal): projetos de controle quântico, comunicação de longa distância e de escala espacial, entre outros. Financiamento a cargo, principalmente, da NSFC, Ministério da Ciência e Tecnologia (MOST) e Academia Chinesa de Ciências (CAS);

2011-2015 (12º Plano Quinquenal): projetos de tecnologias quânticas relacionados a metrologia, controle, desenvolvimento de instrumentos e equipamentos e relativos ao espaço, entre outros. Financiamento, principalmente, a cargo de MOST, NSFC e CAS;

2016-2020 (13º Plano Quinquenal): continuidade de projetos anteriores, principalmente, nas áreas de controle e informação quântica. Financiamento a cargo, principalmente, da Comissão Nacional de Reforma e Desenvolvimento (NDRC), CAS, MOST e NSFC;

2021-2025 (14º Plano Quinquenal): especial atenção aos investimentos no desenvolvimento de computadores quânticos, incremento do uso comercial e fortalecimento das capacidades de defesa, assim como aumento da participação do setor privado.

4.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

A China situa-se no grupo de países que lideram o desenvolvimento de tecnologias quânticas e, em consequência, podem ser encontrados nas universidades e centros de pesquisa projetos de desenvolvimento em, praticamente, todas as áreas de investigação.

Analistas apontam três áreas de especial interesse para o desenvolvimento da China em tecnologias quânticas: segurança da informação, economia e defesa.

Sob a segurança da informação, tal como assinalado no 14PQ, pesquisas em comunicação quântica, voltadas à criptografia e transmissão de dados ocupam lugar destacado. Cabe observar que diversos especialistas, chineses e estrangeiros, coincidem na avaliação de que as preocupações da China com a segurança da informação foram intensificadas após a divulgação, por Edward Snowden, das atividades de monitoramento e interceptação de dados por parte de agências de inteligência dos Estados Unidos.

Sob a dimensão econômica, as vantagens econômicas do domínio de tecnologias quânticas são consideradas, segundo diversos analistas, como equivalentes às possibilidades de negócios geradas pelos microprocessadores, ou "chips", desenvolvidos nas últimas décadas.

Ainda que as mesmas análises antevejam ser necessário período de 15 a 20 anos para que seja alcançado o uso comercial de computadores quânticos em grande escala, o desenvolvimento tecnológico na área quântica concederia à China maior grau de auto-suficiência. O tema tem sido destacado, sobretudo, em vista de sanções e bloqueios para acesso à tecnologia de semicondutores, por parte de outros países em relação à China, nos últimos anos.

Na área de defesa, especialistas consideram que as tecnologias quânticas vêm sendo objeto do desenvolvimento de projetos como em aplicações de sensoriamento de navegação inercial, simulações complexas, robótica avançada, radares, monitoramento e reconhecimento espaciais de alta resolução, detecção submarina e de outros tipos, criptografia e comunicação, entre outros.

Vale destacar, ainda, que a cidade de Hefei, na província de Anhui, sedia o principal ecossistema de tecnologias quânticas na China. O principal cientista chinês na área de tecnologias quânticas, Pan Jianwei, desenvolve em Hefei algumas das mais relevantes pesquisas no campus da Universidade de Ciência e Tecnologia da China (USTC).

4.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Rede de Comunicação Quântica entre Pequim e Xangai (comunicação em rede com criptografia quântica)

Desde 2016, iniciou-se na China a implantação da chamada "internet quântica", que permite comunicação a partir do uso da tecnologia de distribuição de chaves quânticas (QKD - Quantum Key Distribution), como elemento de base para a criptografia.

A rede encontra-se em funcionamento e usa criptografia quântica para proteger dados que transitam, sob protocolo denominado BB84, em infraestrutura terrestre de fibra ótica entre Pequim e Xangai. A rede de fibra ótica está instalada, fisicamente, de modo paralelo aos trilhos do trem de alta velocidade entre Xangai e Pequim e conta com pontos de conexão ("nós") seguros em cada estação ferroviária.

QUESS (Quantum Experiments at Space Scale)

Em desenvolvimento articulado com a rede de comunicação entre Pequim e Xangai, a China lançou o satélite quântico Mozi (também conhecido pelo nome latinizado de "Micius"), em agosto de 2016, que estabeleceu comunicação com dois telescópios no solo separados por 2.500 km. As duas estações terrestres demonstraram comunicação entre elas em segurança, considerada por técnicos como "absoluta", usando chaves quânticas fornecidas pelo satélite.

Posteriormente, em novo experimento, foi estendido o alcance para 7.500 km entre uma estação terrestre na China e uma segunda estação terrestre na Áustria, com resultados exitosos que demonstraram a aplicação prática do uso das chaves QKD entre continentes. Vale observar, a respeito que, em janeiro de 2021, cientistas chineses anunciaram o uso de rede quântica integrada que combina 700 fibras e duas ligações terra-satélite para novos experimentos.

Por meio da rede, foi realizada distribuição de chaves quânticas entre mais de 150 usuários em uma distância combinada de 4.600 km. Liderada pelo principal cientista de tecnologias quânticas na China, Pan Jianwei, da Universidade de Ciência e Tecnologia, a pesquisa foi publicada na revista Nature.

A rede consiste em quatro redes quânticas de áreas metropolitanas (QMAN), incluindo Pequim, Jinan, Hefei e Xangai, em extensão superior a 2.000 km, além de duas

ligações de satélite terrestre que ligam a estação terrestre de Xinglong, em Pequim, e a estação terrestre de Nanshan, na Região Autônoma de Xinjiang Uygur, na China, localizada a 2.600 km de distância.

4.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

1998 - 2006: US\$ 10 milhões;
 2006-2010 (11º Plano Quinquenal): US\$ 150 milhões;
 2011-2015 (12º Plano Quinquenal): US\$ 490 milhões;
 2016-2020 (13º Plano Quinquenal): US\$ 1 bilhão;
 2021-2025 (14º Plano Quinquenal): estima-se crescimento dos recursos investidos pela China que, em conjunto com o setor privado, devem passar dos US\$ 10 bilhões, com especial atenção ao desenvolvimento de computadores quânticos.

4.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

a) BAIDU RESEARCH http://research.baidu.com/Research_Areas/index-view?id=75: A ala de pesquisa da Baidu, Inc., uma das maiores empresas de base tecnológica da China e especializada em serviços e produtos relacionados à Internet e inteligência artificial, com sede no distrito de Haidian em Pequim. A Baidu também mantém o Baidu Quantum Institute, entidade que faz parte de iniciativas integradas em IA e tecnologias quânticas. Um dos principais produtos atuais é a plataforma "Quantum Leaf" de processamento em nuvem. As ações da Baidu na área quântica têm como objetivo desenvolver um centro de pesquisa de Inteligência Artificial Quântica (QAI), de classe mundial. O centro visa a integrar tecnologias quânticas ao negócio principal do Baidu por meio de desenvolvimento de ativos de propriedade intelectual (padrões, patentes, etc), assim como aquisições e projetos de pesquisa em IA quântica, algoritmos e arquitetura quântica;

b) CIQTEK <https://www.ciqtek.com>: Fundada em 2016, na Zona Nacional de Desenvolvimento da Indústria de Alta Tecnologia de Hefei, a CIQTEK fabrica sensores quânticos de última geração, instrumentos e equipamentos avançados, entre outros produtos. Conta com base de clientes de empresas privadas, governos e instituições de pesquisa. A "startup" captou, recentemente, mais de 100 milhões de RMB (US\$ 15,45 milhões) em uma rodada de arrecadação de fundos liderada por empresa de investimentos ("venture capital");

c) HUAWEI CLOUD <https://cloud.huawei.com>: Consiste na plataforma "HiQ Quantum Computing Cloud", voltada à pesquisa em computação quântica e desenvolvimento de software. Fornece serviços para simulação de circuitos quânticos em grande escala e alto desempenho, ainda opera em modo preliminar, mas com anunciada expansão futura;

d) ORIGIN QUANTUM <http://www.originqc.com.cn>: Sediada na cidade de Hefei, província de Anhui, a "Origin Quantum" (oficialmente HeFei Origin Quantum Computing Technology co., LTD) foi criada em 2017 como um "spinoff" do Laboratório de Informação Quântica da Academia Chinesa de Ciências (CAS) e é liderada pelos cientistas de computação quântica, Guo Guangcan e Guo Guoping. A "startup" trabalha software quântico, chips quânticos, dispositivos de medição quântica, sistemas de controle quântico e serviço de nuvem quântica. Especial atenção é dada a modelos inteligência artificial quântica. Em janeiro de 2021, a "startup" arrecadou mais de 100

milhões de RMB (aproximadamente US\$ 15 milhões) em uma rodada de financiamento liderada pelo fundo estatal China Internet Investment Fund e outras empresas;

e) QASKY <http://www.qasky.com>: A Qasky, ou "Anhui Qasky Quantum Technology Co. Ltd", foi fundada em 2016 pelos pesquisadores Cai Jiren, Guo Guangcan e Han Zhengfu com o apoio do investimento conjunto da "Wuhu Construction and Investment Ltd." e da Universidade de Ciência e Tecnologia da China com capital registrado de 50 milhões de RMB (US\$ 7,6 milhões, ao câmbio da época). Com sede na cidade de Wuhu, província de Anhui, a Qasky traz para o plano comercial os resultados das pesquisas de criptografia quântica realizadas na Academia Chinesa de Ciências, como terminais de comunicação de criptografia quântica, equipamentos de comutação/roteamento de rede, módulos, centrais e aplicativo para fornecer soluções integradas para sistemas quânticos de segurança da informação. A Qasky mantém um centro de pesquisa de tecnologia de segurança quântica;

f) QUANTUM CTEK <http://www.quantum-info.com/English/>: A QuantumCTek Co., projeta e fabrica produtos de segurança de comunicação baseados em tecnologia de informação quântica (QIT), assim como serviços e soluções em infraestrutura de telecomunicações, redes corporativas, computação em nuvem e tecnologia de Big Data. A empresa fornece para os setores governamental, financeiro e de energia da China. Com sede em Hefei, província de Anhui, foi fundada em 2009 e foi a primeira empresa de tecnologia quântica a abrir o capital no mercado chinês;

g) QUDOOR www.qudoor.cn: A "Guokaike Quantum Technology (Beijing) Co., Ltd.", mais comumente conhecida como Qike Quantum, detentora da marca registrada QuDoor, projeta dispositivos de comunicação quântica e o desenvolvimento de computadores quânticos para clientes nas áreas militar, governamental, financeira e telecomunicações. Com 32 patentes relacionadas à tecnologia de processamento de informação quântica e uma série de tecnologias superiores em desenvolvimento, a empresa captou aproximadamente US\$ 7,8 milhões dos investidores Zhongguancun Development Frontier Fund, Zhongguancun Gold Seed Fund, entre outros;

h) TENCENT QUANTUM LAB <https://quantum.tencent.com/en-us/about>: O "Tencent Quantum Lab", pertence ao grupo Tencent, um dos maiores conglomerados de tecnologia do mundo, fundado em 1998. Sediada na cidade de Shenzhen, província de Guangdong, o "Tencent Quantum Lab" pesquisa aplicações práticas em tecnologia da informação quântica. Trabalhando em estreita colaboração com universidades, centros de pesquisa e empresas comerciais em vários países, o "Tencent Quantum Lab" busca projetar e fabricar novos algoritmos quânticos, sistemas, software e serviços em nuvem para áreas como IA e química quântica;

i) ZTE www.zte.com.cn: Fundada em 1985, a ZTE Corporation é empresa parcialmente estatal na área de telecomunicações e tecnologia da informação, com presença em diversos países. Está listada nas bolsas de valores de Hong Kong e Shenzhen. Em 2016, a ZTE lançou a primeira solução de transporte de criptografia quântica do setor com base em uma rede de transporte óptico (OTN);

j) KUNFENG QUANTUM TECHNOLOGY <https://kfquantum.com/#/index>: A "Kunfeng Quantum Technology" dedica-se ao desenvolvimento e aplicação de tecnologia quântica. A equipe da empresa inclui profissionais veteranos da indústria de tecnologia e

negócios para explorar o potencial comercial de aplicações da tecnologia quântica, combinando engenharia profissional e recursos de pesquisa científica. A empresa está localizada em Xangai e foi fundada em 2018;

k) BOSE QUANTUM (sem página de internet disponível): empresa que desenvolve soluções quânticas baseadas na tecnologia "Coherent Ising Machine" (CIM). A equipe de fundadores reúne egressos das universidades de Stanford, Tsinghua, Academia Chinesa de Ciências e outras instituições. A empresa foi fundada em novembro de 2020, encontra-se em fase inicial de operações, e está localizada em Pequim;

l) ALIBABA QUANTUM LABORATORY <https://damo.alibaba.com/labs/quantum>: Iniciativa de uma das maiores empresas de tecnologia da China, a Alibaba, por meio da subsidiária Alibaba Cloud, e em conjunto com a Academia Chinesa de Ciência (CAS), nasceu de investimento conjunto em pesquisa tecnológica quântica com o estabelecimento do Alibaba Quantum Laboratory (AQL). As áreas de pesquisa incluem o desenvolvimento de sistemas quânticos, algoritmos quânticos e processadores quânticos. A empresa também mantém a DAMO Academy, entidade integrada em pesquisas quânticas. Em 2020, a Alibaba Cloud e a CAS lançaram conjuntamente um sistema de computação baseado em nuvem de 11 qubits. Além disso, foram testadas simulações quânticas e publicados artigos no portal especializado arXiv (1805.01450, arXiv:1907.11217 e arXiv:1909.02559).

4.7 Simuladores quânticos

Em dezembro de 2020, o computador fotônico "Jiuzhang", desenvolvido pela equipe de Pan Jianwei, da USTC, executou cálculo de amostragem de bóson gaussiano ("Gaussian boson sampling") em 200 segundos. Segundo a equipe, o mesmo cálculo levaria 2,5 bilhões de anos para ser realizado no supercomputador "Sunway TaiHu Light".

Em anúncio publicado em 30/06/2021, um grupo de pesquisadores da USTC, QuantumCTek e da Academia Chinesa de Ciência apresentou resultados de máquina baseada em supercondutores de 66 qubits chamada "Zuchongzhi". O equipamento executou os algoritmos que o Google descreveu em seu experimento de supremacia quântica, realizado em 2019.

O experimento da USTC empregou um chip de 66 qubits, com uso de 56 qubits para a realização de cálculos. Segundo a equipe chinesa, foi atingido desempenho superior aos 54 qubits usados pela Google no equipamento chamado Sycamore, que usou 53 qubits para os mesmos cálculos.

4.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto

O desenvolvimento de materiais quânticos na China tem sido objeto de programas conjuntos de pesquisa com outros países. Destacam-se, a respeito, as pesquisas do Prof. Zhou Soucheng nas universidades Stanford e Tsinghua, sobre isolantes topológicos e uso de inteligência artificial para predição de novos materiais (vide: http://staff.ustc.edu.cn/~zq_zhou/), assim como pesquisas sobre "materiais de interesse" (vide: http://info.phys.tsinghua.edu.cn/zhou/ZhouLab_Research_Materials%20of%20interest.html).

Destacam-se, ainda, as pesquisas empreendidas pela Universidade de Pequim, por meio do Centro Internacional para Materiais Quânticos (ICQM).

Apresenta-se, a seguir, lista de algumas das principais instituições de pesquisa e dados para contato:

1. USTC - University of Science and Technology of China (sede das pesquisas do Prof. Pan Jianwei, o principal cientista chinês na área de tecnologias quânticas): Página oficial CN: <https://www.ustc.edu.cn/> Página oficial EN: <http://en.ustc.edu.cn/> Prof. Pan Jianwei: pan@ustc.edu.cn Office of International Cooperation: E-mail: oiic@ustc.edu.cn FAX: +86-551-63632579

2. China Academy of Information and Communications Technology (CAICT): Página oficial CN: <http://www.caict.ac.cn/> Página oficial EN: <http://www.caict.ac.cn/english/> Contato: Departamento Internacional E-mail: intdept@caict.ac.cn; FAX :86-10-62304735

3. Beijing Academy of Quantum Information Sciences: Página oficial CN: <http://www.baqis.ac.cn/> Página oficial EN: <http://en.baqis.ac.cn/> Contato: International Collaboration Department, Sra. Ann Zhu TEL: (86)10-83057522; E-mail: zhuql@baqis.ac.cn

4. Hefei National Laboratory for Physical Sciences: Página oficial CN: <http://www.hfnl.ustc.edu.cn/> Página oficial EN: <http://en.hfnl.ustc.edu.cn/> Contato (Cooperação Internacional) Sra. Yang Shuhong; TEL:+86 0551-63600455; E-mail: shyang1@ustc.edu.cn Sra. An Ying; TEL:+86 0551-63600455; E-mail: any@ustc.edu.cn

5. Chinese Academy of Sciences Holdings Co. (setor privado): Página oficial CN: <http://www.holdings.cas.cn/> Página oficial EN: <http://english.holdings.cas.cn/cp/> Contato (geral): TEL: +86-010-62800118; FAX: +86-010-62800120 E-mail: casholdings@rose.cashq.ac.cn

6. Wilczek Quantum Center, Jiao Tong University Página principal: <https://wqc.sjtu.edu.cn/> Contato: Prof. Frank Wilczek (na Arizona State University) FWteam@asu.edu Tel: (+86) 021 - 54744442; Email: zexinhu@sjtu.edu.cn

7. Research Center for Quantum Computing at Peng Cheng Lab: Página oficial: www.szpclab.com, Telefone+86-755-86975800; Email: pclab@pcl.ac.cn; hr-rcrt@pcl.ac.cn

8. Institute of Fundamental and Frontier Science, University of Electronic Science and Technology at Chengdu: Página oficial: <https://physqit.com> Contato: Professor Abolfazl Bayat Email: abolfazl.bayat@uestc.edu.cn

9. China Academy of Sciences, Shanghai Research Center for Quantum Sciences Página oficial: <https://english.cas.cn/> Contato: Email: cas_en@cas.cn

10. International Center for Quantum Materials (ICQM), Peking University Página oficial: <https://icqm.pku.edu.cn/yw/index.htm> Contato: Telefone:+86-10-62758967; Fax: +86-10-62758967; Email: [icqm\(at\)pku.edu.cn](mailto:icqm(at)pku.edu.cn)

5. COREIA DO SUL

5.1 Estratégias e políticas nacionais

No ano de 2019, o governo sul-coreano lançou o primeiro projeto em escala nacional de desenvolvimento de tecnologia quântica: o "Quantum Computing Technology Development Project". O projeto tem por finalidade assegurar o domínio das principais tecnologias de computação quântica e, por conseguinte, permitir que a indústria coreana se tornasse competitiva nessa área. As metas originalmente anunciadas eram a de desenvolver sistema computacional de 5 qubits, com mais de 90% de confiabilidade, até 2023, bem como a de criar novas arquiteturas e algoritmos necessários aos computadores quânticos. Os objetivos traçados em 2019 foram atualizados, em abril de 2021, e a meta de desenvolver computador quântico de 5 qubits até 2023 tornou-se mais ambiciosa. A denominada "Korea Quantum Innovation Platform" (KQIP) prevê atualmente o desenvolvimento de computador quântico de 50 qubits entre 2022 e 2024. Até 2030, a meta é a de atingir capacidade de processamento de 100 qubits.

Em fevereiro de 2021, o então Ministro da Ciência e Tecnologias da Informação e Comunicações coreano, Choi Kiyoung, presidiu a décima-terceira edição da reunião do Comitê Estratégico em Tecnologia da Informação e Comunicações. Nessa ocasião, foi aprovada a "K-Cybersecurity Promotion Strategy" e o "Implementation Roadmap for the Digital New Deal", iniciativas que fazem referência direta ao desenvolvimento de tecnologias quânticas.

A "K-Cybersecurity Promotion Strategy" prevê, entre outros pontos, o desenvolvimento de sistemas robustos de cibersegurança para a criptografia pós-quântica, qualificada como tecnologia-chave de convergência digital. A iniciativa insere-se em um dos pilares da estratégia, denominado de "fortalecimento da solução para a mudança do paradigma de segurança". Prevê-se, igualmente, o lançamento de serviço de comunicações coreano protegido por criptografia quântica, até 2025.

No âmbito do "Digital New Deal" - estratégia nacional coreana de transição para modelo de economia digital lançada no contexto do enfrentamento aos efeitos econômicos deletérios provocados pela pandemia de COVID-19 - foi anunciado pelo governo coreano, em janeiro de 2021, um dos projetos para acelerar a "grande transformação digital" do país, que consiste em desenvolver tecnologia de comunicação de informação quântica. Em seguida, em abril de 2021, o MSIT anunciou estratégia nacional de pesquisa e desenvolvimento de médio e longo prazo, intitulada "Do digital para o quântico". A estratégia é subdividida em três fases: a primeira fase (2021-2024) consiste em reunir e formar especialistas, assim como desenvolver tecnologia básica; a segunda fase (2025-2030) prevê a testagem de projetos pilotos em três áreas (computação quântica, comunicação quântica e sensores quânticos); a terceira fase (2031-2035) abrange a comercialização das tecnologias desenvolvidas.

Cabe ressaltar que, com o objetivo de formar mil profissionais em tecnologia quântica até 2030, o governo planeja fomentar a criação de vínculos entre institutos de

pesquisa e programas para que jovens pesquisadores possam trabalhar com instituições e empresas com tecnologias de ponta na área. Já em 2019, o Ministério da Ciência e Tecnologias da Informação e Comunicações coreano (MSIT) passou a apoiar a Korean association of Quantum Information Science and Technology (QUIST), rede de pesquisadores e cientistas que desenvolve pesquisa conjunta na área de tecnologias quânticas.

Cabe, igualmente, apontar para a cooperação internacional bilateral mantida pela Coreia do Sul com Rússia e Israel em matéria de tecnologia quântica. Por ocasião de reunião do Comitê Conjunto de Cooperação em Ciência e Tecnologia entre Coreia do Sul e Rússia, realizado em 2019, acordou-se expandir a cooperação no desenvolvimento e comercialização de tecnologias de comunicação quântica. No mesmo ano, no âmbito de reunião do Comitê Conjunto de Cooperação em Ciência e Tecnologia entre Coreia do Sul e Israel, ambos os países se comprometeram a cooperar, por meio da atuação do Korean Institute of Science and Technology (KIST) e do Weizmann Institute of Science, no desenvolvimento de chips de criptografia quântica de comunicações.

5.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento de computação quântica

Como anteriormente mencionado, no contexto da "Korea Quantum Innovation Platform" (KQIP), o MSIT espera desenvolver computador quântico de 50 qubits nos próximos três anos e duplicar essa capacidade de processamento até o fim da década. Ademais, no âmbito da estratégia nacional "Do digital para o quântico", que pretende testar projetos pilotos na área de computação quântica entre 2025 e 2030, os esforços e investimentos são dirigidos para o desenvolvimento de processadores quânticos, de algoritmos quânticos, de correção de erros quânticos e de softwares quânticos.

5.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Sob o nome de "Q-Flagship Project" prevê-se o estabelecimento de parcerias público-privadas para desenvolver soluções para problemas que poderiam ser resolvidos por meio do emprego de tecnologias quânticas, como processos de otimização de semicondutores, design de microestruturas de semicondutores, desenvolvimento de novos fármacos pela análise da estrutura do DNA, diagnóstico de câncer pelo emprego de imagem de ressonância magnética de alta precisão, cyber ataques, criptografia quântica em áreas táticas pelo emprego de drones, otimização de transporte e logística e condução quântica para veículos autônomos.

5.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

No âmbito da já mencionada estratégia nacional "Do digital para o quântico", foram delineadas duas estratégias diferentes na área de comunicação quântica, a depender do tipo de ligação da rede. Empresas coreanas de telecomunicações, como a SK Telecom Co. (SKT), a Korea Telecom Corp. (KT) e a LG Uplus Corp. (LG Uplus), desenvolveram tecnologias de criptografia quântica que garantem a transmissão segura de dados através de redes ligadas com fios, já tendo sido realizados testes, com êxito, em distâncias de até 640 Km. O governo coreano, inclusive, já se encontra engajado, junto com o setor privado, na defesa da adoção da tecnologia coreana de criptografia como padrão global e na promoção da distribuição da tecnologia no mercado global.

Por sua vez, no que toca à segurança de rede sem fios, atualmente, desenvolve-se um "drone quântico", que servirá de ponto aerotransportado para pequena rede quântica. Caso o projeto seja exitoso, planeja-se escalar o projeto para rede de comunicação quântica, por meio de satélite, até o ano de 2035.

5.5 Investimentos realizados e previstos

O investimento público em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias quânticas, especificamente, atingiu, segundo informações obtidas junto ao MSIT, a soma de KRW 23,5 bilhões (USD 21,6 milhões), em 2020. O investimento previsto para o ano em curso é de KRW 32,6 bilhões, cerca de USD 29 milhões, em 2021. Para o ano de 2022, a previsão do MSIT é de quase dobrar esse valor para KRW 60 bilhões (USD 54 milhões).

Contudo, calcula-se que o volume de investimentos em projetos envolvendo, direta ou indiretamente, o desenvolvimento de tecnologias quânticas atinja patamares ainda mais elevados. No contexto do "Digital New Deal", por exemplo, apenas na rubrica afeta ao "avanço da segurança cibernética", prevê-se investimentos de KRW 400 bilhões (USD 360 milhões), até 2022, e de KRW 1 trilhão (USD 900 milhões), até 2025, parte dos quais, estima-se, deverão envolver tecnologia quântica.

5.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Na Coreia, grandes empresas privadas têm participação na realização de pesquisa relacionada ao desenvolvimento de tecnologia quântica, principalmente no campo da criptografia. O Quantum Tech.Lab, da SKT, desenvolve pesquisa relacionada à criptografia quântica, no âmbito da qual produziu protótipo de chip gerador quântico de números aleatórios ("QRNG") de 5x5 milímetros, ainda no ano de 2017. Em 2019, em parceria com a Samsung Electronics, a SKT anunciou o primeiro aparelho celular 5G dotado de tecnologia de criptografia quântica.

A concorrente da SKT, a LG Uplus, que possui parcerias com a ICTK Holdings e com a startup EYL, desenvolveu QRNG de 3x3 milímetros, em 2020, além de ter enviado comunicação com criptografia quântica, em fase de testes, através de sua rede comercial. A KT anunciou, em 2017, a criação do Quantum Communication Application Research Center, em parceria com o KIST e o Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). Por sua vez, a Hanwha Systems anunciou, em setembro de 2020, que participaria de projeto piloto de operação e construção de infraestrutura para comunicação com criptografia quântica.

Entre as startups que exploram o mercado das tecnologias quânticas destacam-se a EYL (<https://www.eylpartners.com/>), que atua no desenvolvimento e comercialização de geradores quânticos de números aleatórios (QRNG), e a PharmCADD (<http://pharmacadd.com/company/>), que desenvolveu plataforma de inteligência artificial de desenvolvimento de fármacos, com base em redes neurais profundas, simulação de dinâmica molecular, cálculo quântico e teoria das redes.

5.7 Simuladores quânticos

Apesar de a Coreia do Sul não contar, atualmente, com simuladores quânticos em funcionamento, o laboratório intitulado "Quantum Foundry", em construção no "Korea Advanced Nano Fab Center" (KANC) e na "Sungkyunkwan University", tem conclusão prevista para 2024 e deverá contar com simuladores quânticos, entre outros equipamentos.

5.8 Principais centros, institutos de pesquisa e redes de pesquisadores dedicados ao assunto

Alguns dos principais centros, institutos de pesquisa e redes de pesquisadores dedicados ao assunto são:

a) o Quantum Information Research Support Center (Q Center) da Sungkyunkwan University (<http://www.qcenter.kr/>), que foi constituído na esteira de projeto de criação de ecossistema de pesquisa em ciência da informação quântica do MSIT. Em 2019, o Q Center formalizou parceria com a IonQ, empresa norte-americana na área de computação quântica, que conta com investimentos da Samsung Electronics, para permitir a pesquisadores, cientistas e estudantes coreanos a utilização do computador quântico da IonQ;

b) o Center for Quantum Nanoscience (QNS) do Institute for Basic Science (IBS) (<https://qns.science/>), que foi fundado em 2019 e possui grupos de pesquisa nas áreas de propriedades quânticas de sistemas de spin individual em superfícies; de medições conjuntas de spins em superfícies; de desenvolvimento de magnetometria de escaneamento em baixas temperaturas baseado em centros de vacância de nitrogênio (NV); combinação de ótica e microscopia de varredura por sonda; e teoria dos sistemas quânticos em superfície;

c) o Center for Quantum Information (CQI) do Korean Institute of Science and Technology (KIST) (<http://quantum.kist.re.kr/>), que foca sua pesquisa no desenvolvimento de aplicações com fundamento em pesquisa básica na área de tecnologia de informação quântica, no estudo de pontos quânticos em estado sólido, de interfaces quânticas entre átomos e fótons e de comunicação quântica segura;

d) o Quantum Information and Quantum Computing Lab (QUIQCL) da Seoul National University (SNU) (<https://sites.google.com/view/quantumcomputingatsnu>), que desenvolve pesquisas na área de desenvolvimento de computadores quânticos baseados em armadilhas de íons, de algoritmos quânticos e de criptografia quântica;

e) o Trapped Ion Quantum Computing Lab (TIQCL) da Ewha Womans University (<https://tiqcl.wordpress.com/>), grupo de física experimental que desenvolve computador quântico baseado em armadilhas de íons. Os principais projetos do grupo consistem na construção de computador quântico de 5 qubit programável; na área de varredura por sonda baseada em armadilha de íons; magnetometria baseada em centros NV em diamante.

f) o Quantum Information Science and Technology (QuIST) (<https://quist.or.kr/>), que é constituído por grupo de especialistas em tecnologia e ciência da informação quântica de diferentes áreas do conhecimento. Além de preparar "white paper" sobre tecnologia

quântica, o grupo tem por objetivo assessorar programas acadêmicos e educacionais e operar programa de intercâmbio de especialistas e de treinamento de mão-de-obra;

g) o Quantum Technology Institute do Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) (https://www.kriss.re.kr/eng/rnd/rnd01_5.html), que desenvolve projetos de pesquisa na área de novos padrões de medida para computação quântica, comunicação quântica e sensores quânticos; e

h) o Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), que reúne quatro centros dedicados à pesquisa de tecnologias quânticas: o Center for Quantum Coherence in Condensed Matter; o Quantum Materials Research Center; o Quantum Information Research Center; e o AI Quantum Computing IT Research Center. O Kaist anunciou a adesão ao IBM Q Network, em setembro de 2020.

5.9 Políticas relacionadas a insumos empregados na fabricação de circuitos quânticos

A Coreia não possui política especialmente relacionada a insumos empregados na fabricação de circuitos quânticos, contudo, possui empresa estatal, a Korea Resources Corporation (KORES), cuja missão é garantir o fornecimento de recursos minerais estratégicos para a indústria coreana, tanto por meio de investimentos no exterior quanto pela manutenção de estoques de metais raros.

6. ESTADOS UNIDOS

Cabe registrar, inicialmente, que a geração de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nos EUA opera-se tradicionalmente de modo descentralizado, com participação tanto de instituições governamentais quanto de centros de pesquisa privados. Os laboratórios públicos funcionam nos distintos níveis federativos - nacionais, estaduais ou locais. A atividade de P&D tem fontes múltiplas de financiamento, por meio de agências oficiais, do empresariado e de parcerias público-privadas.

No campo da ciência da informação quântica, a produção de conhecimento e a origem de recursos são igualmente diversificadas nos meios público e privado, mas com proeminência da geração de P&D quântico nos órgãos federais. A estratégia do governo norte-americano, nas últimas décadas, tem sido concentrar investimentos em projetos de pesquisa básica, com a finalidade de propiciar massa crítica de conhecimento suficiente para incentivar a criação em escala de novas tecnologias pelo setor privado. Essa ação é conhecida como "estratégia científica" de geração de competências quânticas.

6.1 Estratégias/políticas nacionais

A "estratégia científica" norte-americana é um dos elementos centrais do processo de P&D quântico. Consiste no conjunto de políticas públicas destinadas a impulsionar a geração de ciência básica em quatro nichos tecnológicos principais: computação quântica; sensoriamento e medição quântica; comunicações quânticas; e redes quânticas.

O Congresso norte-americano ratificou a "estratégia científica" ao aprovar, em 2018, a Lei de Iniciativa Quântica Nacional ("National Quantum Initiative Act - NQIA),

a qual reservou investimentos superiores a US\$ 1,2 bilhão, no período de 2019 a 2024, para P&D nessa área. A lei criou também o Escritório de Coordenação Quântica Nacional, vinculado ao OSTP, ao qual compete a coordenação de projetos de ciência básica e aplicada entre agências e laboratórios federais, além de aprovar e fiscalizar parcerias público-privadas.

Tais projetos engajam, em larga medida, o governo, o setor privado e a academia, cuja atuação coordenada em rede constitui o modelo de geração inovadora conhecido como a "tríplice hélice" do ecossistema quântico norte-americano. Outra incumbência do Escritório de Coordenação Quântica Nacional é propiciar o acesso de empresas e universidades à infraestrutura necessária para P&D, além de criar e disseminar programas de capacitação de mão de obra qualificada em ciência quântica. O texto da Lei de Iniciativa Quântica Nacional pode ser acessado em "www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text".

O Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia é instância adicional do ecossistema de ciência quântica norte-americano. Trata-se de órgão de nível ministerial criado em 1993 e encarregado de planejar e supervisionar as atividades das instâncias federais, inclusive as iniciativas de cooperação internacional. Chefiado pelo presidente dos EUA, o Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia é integrado pela vice-presidente, pelo diretor do OSTP e por membros do gabinete, inclusive o secretário de Estado.

No contexto da cooperação internacional, o Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia tem mantido entendimentos recentes com vários países. Iniciou, por exemplo, projetos em tecnologias quânticas com o governo do Japão, por meio do programa "Tokyo Statement on Quantum Cooperation". Criou com o governo australiano a Comissão Mista EUA-Austrália sobre Ciência e Tecnologia. Já com o Reino Unido, estabeleceu o Grupo de Trabalho EUA-Reino Unido sobre Ciência Quântica.

As iniciativas de colaboração internacional promovidas pelo Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia estão detalhadas em "https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/20_18_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf".

O Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia criou igualmente a Subcomissão de Ciência da Informação Quântica, responsável por articular os trabalhos do governo federal em ciência básica e aplicada. As principais agências produtoras de P&D quântico são o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia - NIST; a NSF; o Departamento de Energia; a DARPA; o Laboratório de Ciências Físicas da Agência de Segurança Nacional; e a Atividade de Inteligência sobre Projetos de Pesquisa Avançada (IARPA) do Escritório de Inteligência Nacional. A Subcomissão de Ciência da Informação Quântica divulgou, em 2018, o documento "Visão Geral Estratégica Nacional para a Ciência da Informação Quântica dos EUA", que prioriza políticas públicas de apoio à "estratégia científica" de pesquisa básica; capacitação laboral de engenheiros e tecnólogos em inteligência quântica; mecanismos de financiamento de projetos no modelo da tríplice hélice de geração de P&D; e criação da infraestrutura crítica em ciência quântica.

Os principais segmentos em ciência quântica determinados pela Visão Geral Estratégica Nacional são sensores quânticos precisos; aplicativos para redes e computadores quânticos; e padrões de criptografia resistentes a ataques quânticos.

Informações adicionais sobre as iniciativas da Subcomissão de Ciência da Informação Quântica estão em "www.quantum.gov".

6.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

A Subcomissão de Ciência da Informação Quântica do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia é instância que coordena programas de P&D, no âmbito federal. Seu objetivo é "manter e ampliar o predomínio dos EUA em tecnologias quânticas e suas aplicações na próxima década".

O Departamento de Energia, por exemplo, possui, atualmente, cinco programas em competências quânticas:

Q-NEXT: Next Generation Quantum Science and Engineering (www.q-next.org);
 C2QA: Co-design Center for Quantum Advantage (www.bnl.gov/quantumcenter);
 SQMS: Superconducting Quantum Materials and Systems Center (www.sqms.fnal.gov);
 QSA: Quantum Systems Accelerator (www.quantumsystemsaccelerator.org); e
 QSC: The Quantum Science Center (www.qscience.org).

A NSF, por sua vez, desenvolve três programas principais quânticos:
 Q-SEnSE: Quantum Systems through Entangled Science and Engineering (www.colorado.edu/research/qsense/);
 HQAN: Hybrid Quantum Architectures and Networks (<https://hqan.illinois.edu>); e
 CIQC: Challenge Institute for Quantum Computation (<https://ciqc.berkeley.edu/>).

A NSF e o OSTP promovem, na esfera educacional, o programa "Q-12 Education", que envolve governo federal, indústria e comunidade acadêmica na criação de projetos de treinamento em tecnologia quântica no âmbito do ensino fundamental, médio e superior, inclusive mediante ensino à distância e estágios profissionalizantes.

A NSF e o Departamento de Energia inauguraram, nos últimos quatro anos, oito centros de estudos multidisciplinares para apoiar a pesquisa aplicada quântica. Os centros priorizam o desenvolvimento de sensores, algoritmos e novos materiais quânticos. A NSF e o Departamento de Energia desenvolvem, ainda, os programas "Quantum Leap Challenges Institutes", "Quantum Foundry", "Center for Quantum Networks" e "Quantum Information Science Centers". Os projetos do NSF estão em "https://www.nsf.gov/news/special_reports/". As iniciativas do Departamento de Energia encontram-se em "<https://science.osti.gov/Initiatives/>".

O NIST, também em coordenação com a NSF, está implementando projeto inédito, que prevê protótipo de rede internacional de computadores com algoritmos e comunicações quânticas. Alguns dos principais projetos público-privados no plano quântico incluem iniciativas da IBM Quantum Network ("www.ibm.com/quantum-computing/researchers/"); da Microsoft Quantum Research, com ênfase no desenvolvimento de softwares, aplicativos e dispositivos de controle ("https://www.microsoft.com/en-us/research/research-area/quantum-computing/?facet%5Btax%5D%5Bmsr-research-area%5D%5B0%5D=243138&sort_by=most-recent").

6.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Agências federais e institutos de tecnologia têm focado em variadas linhas de pesquisa aplicada. No setor de comunicação quântica, a NASA e o Instituto de Tecnologia da Califórnia - Caltech desenvolvem aplicações de sensoriamento remoto e comunicação espacial. A produção de chaves quânticas fornece canais de comunicação criptográficos seguros, com baixíssima latência e capacidade instantânea de transmissão de elevados volumes de informação. Tal sistema tem sido comumente chamado de sexta geração de comunicação (6G). A tecnologia emprega satélites de comunicação para estabelecer canais de criptografia espaço-espaço, solo-solo ou espaço-solo, a fim de garantir segurança e confiabilidade do controle de espaçonaves.

No que tange ao sensoriamento remoto, a NASA e o Caltech têm atuado no aprimoramento de imagens e capacidades de detecção com o uso de técnicas de medição interferométrica, baseadas em ondas de luz e radiação eletromagnética controladas por cálculos quânticos. Trata-se de competências espaciais que deverão modernizar a tecnologia de sensoriamento por radar, utilizada por países industrializados. O Laboratório de Microdispositivos da NASA e o Caltech desenvolvem tecnologias para detecção e medição de radiação eletromagnética em ondas milimétricas. Tais competências tecnológicas permitirão maior amplitude no uso de faixas de rádio-frequência, sensibilidade, dimensão e velocidade de transmissão de dados. Informações adicionais estão em "microdevices.jpl.nasa.gov".

No campo criptográfico, o NIST desenvolve o projeto "Post-Quantum Cryptography - PQC", que avalia e padroniza algoritmos resistentes à capacidade atual de intrusão criptográfica. Informações sobre o projeto estão disponíveis em: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>.

Linha de pesquisa aplicada importante do setor privado é o "Tangle Lake", projeto da Intel para desenvolvimento de terceira geração de processadores e supercondutores quânticos. O Tangle Lake incorpora 49 "qubits" (unidade de medida de informações quânticas), em contraste com os 17 "qubits" dos atuais processadores computacionais de segunda geração. Os novos supercondutores incrementarão de modo relevante setores da economia, como medicina, biogenética e meio ambiente.

No campo da verificação de software e segurança de sistemas, a empresa Lockheed Martin, uma das principais fornecedoras de equipamentos para o Departamento de Defesa dos EUA, tem usado o computador quântico "D-Wave Two", desenvolvido em conjunto com a empresa canadense D-Wave. O objetivo do computador é avaliar a segurança dos sistemas críticos de armamentos. O avião de caça norte-americano F-35, por exemplo, utiliza cerca de oito milhões de linhas de códigos comunicacionais. O D-Wave Two pretende, por meio de recursos quânticos, prevenir completamente erros em sistemas de produtos bélicos, como mísseis e armamentos de aeronaves e espaçonaves.

6.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

A iniciativa "Quantum Communication and Networks Project" do NIST é talvez a mais significativa em matéria de dispositivos para comunicações quânticas e aplicações de rede. Detalhes do projeto estão em "[www.nist.gov/programs-projects/quantum-](https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-communication-and-networks-project)

communications -and-networks". Outra ação, também do NIST, é a "Optical Networking of Superconducting Quantum Nodes with Transduction Devices", destinada a criar tecnologia de redes de computadores quânticos supercondutores para a primeira Internet de padrões quânticos.

Segundo o Departamento de Estado, as duas iniciativas do NIST correspondem aos programas científicos mais complexos supervisionados e reservados no âmbito da Subcomissão de Ciência da Informação Quântica. Informações adicionais estão disponíveis em "www.nist.gov/programs-projects/optical-networking-superconducting-quantum-nodes-transduction-devices".

6.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

O OSTP indicou que investimentos públicos e privados em projetos relacionados com ciência quântica, na última década, superaram US\$ 10 bilhões. Uma das principais fontes de novos investimentos, a Lei de Iniciativa Quântica Nacional destinou mais de US\$ 1,2 bilhão para projetos quânticos, no período de 2019 a 2024.

Em junho passado, o Senado norte-americano aprovou, com apoio de parlamentares democratas e republicanos, outro projeto de lei que prevê investimentos federais de US\$ 250 bilhões para ampla gama de atividades em ciência e tecnologia. Frise-se que dispositivo do projeto de lei cria departamento específico no organograma da NSF, encarregado de promover P&D em inteligência artificial e ciência quântica. Cerca de US\$ 52 bilhões daquele valor total deverão financiar projetos em inteligência artificial e ciência quântica, sob os auspícios da NSF, ao longo do próximo quinquênio. O projeto deverá ainda ser apreciado pela Câmara dos Deputados, cujos líderes dos dois partidos já manifestaram respaldo ao texto aprovado pelo Senado.

6.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

As principais "startups" americanas dedicadas ao desenvolvimento de equipamentos tecnológicos quânticos são:

PsiQ, fundada em 2016 e com sede em Palo Alto, no estado da Califórnia. Possui recursos próprios de US\$ 458 milhões;

Rigetti Computing, fundada em 2013 em Berkeley, também na Califórnia, com recursos da ordem de US\$ 198 milhões;

IonQ, fundada em 2015 em College Park, no estado de Maryland, com recursos de US\$ 84 milhões; e

Quantum Circuits, Inc., fundada em 2015 em New Haven, no estado de Connecticut, com recursos equivalentes a US\$ 18 milhões.

Algumas das "startups" relevantes que atuam no desenvolvimento de "software" para aplicação quântica são:

QC Ware, fundada em 2014 em Palo Alto, com recursos de cerca de US\$ 6,5 milhões;

Zapata Computing, fundada em 2017 em Cambridge, no estado de Massachusetts, com carteira de investimentos de US\$ 5,4 milhões; e

Strangeworks, fundada em Austin, no estado de Texas, em 2017, com recursos de US\$ 4 milhões.

Vale, ainda, mencionar outras "startups" que atuam no segmento de equipamentos quânticos, a saber: Atom Computing, BardeenQ Labs, Bleximo, BraneCell, ColdQuanta, EeroQ, High Precision Devices - HPD, Janis Research, Quantum Microwave, QuEra Computing, Seeqc e Turing, Inc. "Startups" também de relevo que atuam na geração de "software" são: Aliro Technologies, ApexQubit, Dark Star Quantum Computing Laboratories, Inception Q, Labber Quantum, ODE L3C, Polaris Quantum Biotech, QbitLogic, qBraid, Qrithm, QuanyCat, Qubit Engineering, QuDot, Semicyber, Super.tech e Xofia. Em matéria de desenvolvimento de comunicações quânticas, vale citar a Anametric, Magiq, Qbacus, Qrypt, Qbitekk, Qubit Reset LLC, Qunnect e QuSecure.

A maioria dessas "startups" possui menos de cinco anos de existência e tem sede, em geral, nos estados da Califórnia, Nova York, Texas, Flórida e Washington.

São as seguintes as principais empresas com programa de computação quântica já consolidado: IBM, Intel, Microsoft, Google, Apple, Amazon WS, Accenture, AT&T, Booz Allen Hamilton, Lockheed Martin e Northrop Grumman.

6.7 Simuladores quânticos

Há vários simuladores quânticos em funcionamento nos EUA. Alguns dos mais relevantes são:

Intel Quantum Simulator (Intel);
 staq (Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT);
 Scaffold/ScaffCC (Universidade de Princeton);
 QCSim (NIST)
 LIQUiD (Microsoft);
 Azure (Microsoft);
 Microsoft Quantum Development Kit (Microsoft)
 Bloch Sphere Simulator of Quantum-Mechanical Gates and Spintronics (Universidade de Cincinnati);
 jaQuzzi (Universidade de Buffalo);
 Virtual Quantum Mechanics (Universidade de Johns Hopkins);
 QDENSITY (Universidade de Pittsburgh);
 QCTOOLS (Universidade de Berkeley).

6.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto

Encontram-se listados abaixo os principais centros de P&D, com seus respectivos pontos de contato, tanto governamentais como acadêmicos.

- Setor público

Departamento de Energia (DoE)
 Office of Science
 U.S. Department of Energy
 1000 Independence Ave., SW
 Washington, DC 20585
 the.secretary@hq.doe.gov

(202) 586-5430

National Institute of Standards and Technology (NIST), Communications Technology Laboratory
100 Bureau Drive
Gaithersburg, MD 20899
Telefone: +1 301-975-2000
www.nist.gov/ctl
Fundação Nacional de Ciência - NSF
2415 Eisenhower Avenue
Alexandria, VA 22314
+1 (703) 292-5111
E-mail: splimpto@nsf.gov
www.nsf.gov

Office of the Director of National Intelligence, Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA)
Intelligence Community Campus - Bethesda
4600 Sangamore Road
Bethesda, MD 20816
Telefone: +1 (301) 243-1995
E-mail: dni-iarpa-info@iarpa.gov
www.iarpa.gov/index.php/research-programs

- Academia

Auburn University Quantum Systems
23 Samford Hall
Auburn, Alabama 36849
Telefone: +1 (334) 844-9999
wrihc1@auburn.edu
quantum.auburn.edu

University of Berkeley - Quantum Information and Computation Center
671 Soda Hall
vazirani@cs.berkeley.edu
Telefone: +1 510-642-0572
www.bqic.berkeley.edu

Boston College - Department of Physics
Higgins Hall 335
Telefone: +1 617-552-3575
physics@bc.edu
www.bc.edu/content/bc-web/schools/mcas/departments/physics/research/quantum-information.html

California Institute of Technology - CALTECH. Institute for Quantum Information and Matter (IQIM)
1200 E. California Blvd.
Pasadena, CA 91125

marciab@caltech.edu
 Telefone: +1 626-395-4013
www.iqim.caltech.edu

Observação: note-se que o integrante da diáspora científica brasileira, Fernando Brandão, é professor de Física na CALTECH, pesquisador do IQIM e chefe de algoritmos de computação quântica da Amazon Web Services. E-mails: fbrandao@caltech.edu; fbrandao@amazon.com.

Duke University - Department of Computer Science
 Duke University
 Department of Computer Science
 LSRC Building D101
 308 Research Drive
 Duke Box 90129
 Durham, NC 27708-0129
 Telefone: +1 919-660-6519
www.cs.duke.edu/research/systems

George Washington University - Center for Quantum Computing, Information, Logic, and Topology
 Washington, DC 20052
 Phone: 202-994-6235
www.qubits.columbian.gwu.edu

Harvard Quantum Initiative
 Telefone: +1 617-495-3388
HQIDirectors@harvard.edu
www.quantum.harvard.edu/about

Johns Hopkins University - Institute for Quantum Matter
 Department of Physics & Astronomy
 Bloomberg Center
 Johns Hopkins University
 3400 North Charles Street
 Baltimore, MD 21218
 +1 410-516-7840
iqm.jhu.edu

Massachusetts Institute of Technology (MIT) - Center for Theoretical Physics
 MIT Department of Physics
 77 Massachusetts Avenue
 Building 4, Room 304
 Cambridge, MA 02139
 Telefone: +1 617-253-4800
 Telefone: +1 (617) 253-4827
jib@mit.edu
www.physics.mit.edu/research/labs-centers/center-for-theoretical-physics/research-efforts-in-the-center-for-theoretical-physics

Ohio State University - Institute for Optical Science
4178 Physics Research Building
191 West Woodruff Ave
Columbus, OH 43210
E-Mail: spectroscopy@osu.edu
Telefone: +1 614-688-5726
www.opticalscience.osu.edu/directory/research-features

Pittsburgh Quantum Institute
B4 Thaw Hall, 4061 O'Hara St. Pittsburgh PA 15260
E-mail: communication@pqi.org
Telefone: +1 (412)-624-8107
www.pqi.org

Stanford Institute for Theoretical Physics
Varian Physics Lab
Stanford, CA 94305-4060
382 Via Pueblo Mall
sitpadmin@lists.stanford.edu
Telefone: +1 650-723-2300
www.sitp.stanford.edu

University of Chicago - Chicago Quantum Exchange (CQE)
The University of Chicago
Edward H. Levi Hall
5801 South Ellis Avenue
Chicago, Illinois 60637
Telefone: +1 773.702.1234
infocenter@uchicago.edu
www.quantum.uchicago.edu

University of Maryland - Department of Computer Science
Brendan Iribe Center for Computer Science and Engineering
University of Maryland
8125 Paint Branch Drive
College Park, MD 20742
main phone: (301) 405-2662
www.cs.umd.edu/research-area/quantum-computing

University of Maryland - Joint Quantum Institute
(Iniciativa conjunta da Universidade de Maryland e do NIST)
Room 2207 Atlantic Bldg.
University of Maryland
College Park, MD 20742
Phone: (301) 314-1908
Fax: (301) 314-0207
jqi-info@umd.edu
www.jqi.umd.edu

Virginia Tech - Quantum Collaboratory

Virginia Tech Holtzman Alumni Center
901 Prices Fork Road
Blacksburg, VA 24061
Telefone: +1 540-231-1782
www.vt.edu/link/link/big-ideas/quantum.html

6.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Há dois projetos de lei em tramitação no Congresso norte-americano relacionados a políticas públicas de incentivo à fabricação de insumos para uso em aplicações e circuitos quânticos. Um deles é o projeto "Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors for America Act", conhecida como "Chips for America Act", apresentado pelo deputado Michael McCaul (R-TX), em junho de 2020. A proposta, que aguarda avaliação das Comissões de Ciência, Espaço e Tecnologia, de Orçamento, de Serviços Armados e de Relações Exteriores, prevê investimentos do Tesouro norte-americano de US\$ 15 bilhões para P&D em semicondutores, capacitação de engenheiros e tecnólogos e isenções tributárias para investimentos na fabricação de semicondutores. O teor do projeto de lei encontra-se disponível em "www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/7178".

Outra proposta legislativa é o projeto apresentado pelo Senador Tom Cotton (R-AR), em julho de 2020, denominado "American Foundries Act of 2020", sujeito à avaliação da Comissão de Comércio, Ciência e Transportes do Senado. O projeto prevê pacote de investimentos federais de US\$ 25 bilhões para P&D de semicondutores e microprocessadores, além da fabricação de novas plantas de microeletrônicos. O texto integral do projeto está em "www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/4130/text".

Parcela significativa dos investimentos previstos nos projetos de lei "Chips for America Act" e "American Foundries Act of 2020" já foi incorporada à lei orçamentária de 2021, via "National Defense Authorization Act - NDAA", o que significa que o governo norte-americano está apto a aplicar os recursos no desenvolvimento de insumos para demanda do segmento quântico.

Políticas específicas, nas últimas duas décadas, lograram dinamizar o mercado de semicondutores norte-americano, o que permitiu, por exemplo, o avanço do processo de miniaturização dos semicondutores, até a escala atômica. Uma dessas políticas, cujo teor encontra-se, em boa medida, consagrado na Iniciativa Quântica Nacional, foi a Iniciativa de Estratégia Nacional em Computação, adotada pelo governo do então presidente Barack Obama, em 2015, que estabeleceu a meta para os EUA dominarem, até 2045, "futuros sistemas de computação de alto desempenho, mesmo depois que os limites da tecnologia atual de semicondutores sejam alcançados". O governo do ex-presidente Donald Trump deu continuidade a essa ação ao criar, em 2019, no âmbito do OSTP, o Comitê de Ação Rápida para Estratégias de Computação ("Fast Track Action Committee on Strategic Computing"). O novo comitê atualizou a Iniciativa Quântica Nacional, que prioriza investimentos em projetos de última geração em sistemas experimentais e de protótipos, ciência de materiais, engenharia de micro-ondas e semicondutores.

Um desses projetos, no valor de US\$ 1,5 bilhão, foi iniciado pela DARPA, em 2017, com o propósito de miniaturizar, de forma continuada, semicondutores, cujos detalhes não foram, ainda, divulgados pela agência norte-americana. A DARPA também financia, desde 2018, programa de parcerias público-privadas, no valor de US\$ 150 milhões anuais, intitulado "Joint University Microelectronics Program - JUMP"), destinado à concepção e fabricação de desenhos de semicondutores e de tecnologias com óxido de metal complementar (CMOS, na sigla em inglês), usadas para circuitos integrados para microprocessadores e baterias abastecidas por terras raras.

Outro projeto é o "Next Generation Power Electronics Manufacturing Innovation Institute", desenvolvido pela "Manufacturing USA", agência de apoio à indústria equivalente à EMBRAPA brasileira. O projeto, iniciado em 2015, destina anualmente US\$ 70 milhões para P&D em semicondutores. O NIST, por fim, coordena vinte centros de pesquisa públicos e privados, no âmbito do programa federal "Nanoelectronics for 2020 and Beyond", com o objetivo de incentivar a fabricação de novos materiais em nanoescala para processamento de informações quânticas.

7. FRANÇA

7.1 Estratégias/políticas nacionais

O governo lançou, em 21 de janeiro último, a Estratégia Nacional sobre Tecnologias Quânticas, que tem como objetivo fazer deste país ator de destaque internacional no setor.

O documento estabelece orçamento de 1.8 bilhão de euros nos próximos cinco anos, dos quais 1 bilhão provenientes de recursos estatais, 200 milhões de financiamento europeu e 550 milhões do setor privado. Com a estratégia, prevê-se a criação de 16 mil empregos diretos até 2030, 5 mil novos talentos formados em tecnologias quânticas e 200 novas teses e 200 pós-doutorandos por ano até 2025. O montante de 120 milhões de euros deverá ser destinado ao apoio ao empreendedorismo, com fundos específicos para "startups". Além disso, 150 milhões de euros deverão ser dedicados a pesquisas e 350 milhões de euros à promoção da indústria e da inovação.

A estratégia divide-se em sete eixos principais, que visam a desenvolver: Simuladores e aceleradores "Noisy Intermediate-Scale Quantum" (NISQ) (352 milhões de euros); - Computador quântico, passando à escala "Large Scale Quantum" (LSQ) (432 milhões de euros); - Tecnologias e aplicações de sensores quânticos (258 milhões de euros); - Criptografia pós-quântica (156 milhões de euros); - Sistemas de comunicações quânticas (325 milhões de euros); - Tecnologias essenciais ao setor quântico (292 milhões de euros); e - Estrutura do ecossistema local de forma transversal.

O engenheiro e doutor em matemática aplicada Neil Abroug foi nomeado coordenador nacional da Estratégia. Vinculado ao gabinete do primeiro-ministro, o cargo deverá promover a coordenação entre as pastas responsáveis pela implementação da Estratégia, como os ministérios das Forças Armadas e de Ensino Superior, Pesquisa e Inovação.

A Estratégia está disponível em https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/content/piece-jointe/2021/01/dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf

7.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

O "Programa e Equipamentos Prioritários de Pesquisa" (PEPR, na sigla em francês) conta com orçamento de 150 milhões de euros para financiar pesquisas em quatro áreas principais: qubits robustos de estado sólido, átomos frios, algoritmos quânticos, bem como fronteiras de calculabilidade e segurança. A gestão científica do programa cabe ao Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS), à Comissão de Energia Atômica e Energias Alternativas (CEA) e ao Instituto Nacional de Pesquisa em Ciência da Computação e Automação (INRIA). O PEPR apoiará a implementação da Estratégia Nacional sobre Tecnologias Quânticas.

A Agência Nacional de Pesquisa (ANR, na sigla em francês), principal órgão para o financiamento de pesquisas neste país, apoia projetos no setor. Em 2020, a ANR lançou, em parceria com a Agência de Inovação em Defesa (AID), o programa "ASTRID Technologies Quantiques" (<https://anr.fr/fr/actualites-de-lanr/details/news/technologies-quantiques-les-projets-selectionnes-dans-le-cadre-de-lappel-astrid-thematique-lance/>). Essa ação teve por objetivo identificar potenciais tecnologias quânticas "de ruptura" nos campos de defesa, pesquisa civil e indústria. A seleção de projetos privilegiou pesquisas de caráter dual com baixo nível de maturidade tecnológica, com base em três eixos: sensores; algoritmia; e criptografia e comunicação.

Outra iniciativa que conta com financiamento da ANR é a lançada pelo consórcio europeu de promoção de pesquisa em tecnologias quânticas "ERA-NET QuantERA" (<https://anr.fr/fr/detail/call/technologies-quantiques-3eme-appel-a-projets-de-lera-net-quantera/>). O programa visa a selecionar projetos de países europeus em duas áreas principais: fenômenos e recursos quânticos e ciência quântica aplicada. Com orçamento previsto de 40 milhões de euros, os projetos selecionados deverão tratar de ao menos um dos tópicos a seguir: comunicação quântica, simulação quântica, computação quântica, ciências quânticas da informação, detecção e imagem de metrologia quântica.

Importantes universidades francesas desenvolvem programas voltados à computação quântica. As duas instituições de maior destaque nessa área são as universidades Paris-Saclay (a mais bem avaliada da França no ranking de Xangai) e a Grenoble Alpes. A primeira conta com equipe de pesquisadores atuando em diversas áreas das tecnologias quânticas, em parceria com institutos públicos de pesquisa (CNRS, CEA e INRIA) e atores industriais como Atos, Air Liquide, EDF, IBM, Thales e Total. As principais áreas de pesquisa são: comunicações quânticas e criptografia pós-quântica; sensores quânticos e metrologia; fotônica quântica; circuitos elétricos quânticos; spintrônica; simulação quântica; matéria quântica e topológica; algoritmos quânticos; e nanotecnologias. Informações adicionais estão disponíveis em: <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/thematiques-et-structures/axes-et-grands-projets/quantum-centre-en-sciences-et-technologies-quantiques/recherches-en-quantique>.

O programa "Quantum Engineering Grenoble" é desenvolvido pela Universidade Grenoble Alpes, com apoio de CNRS, INRIA e CEA, e recebe recursos europeus e

nacionais para financiar bolsas de pesquisas e a instalação de cátedras de excelência em projetos interdisciplinares. A iniciativa divide-se em seis setores: processadores e simuladores quânticos; arquitetura quântica e software; interfaces qubit/photon; detecção quântica; propriedades energéticas da computação quântica; e desafios filosóficos e sociais das tecnologias quânticas. Mais informações estão disponíveis em <https://quantum.univ-grenoble-alpes.fr/the-quantum-engineering-project-708808.htm?RH=11575541497816837>.

O setor privado também conta com iniciativas para desenvolver o setor em apreço. A EDF e a Total lançaram programas dedicados à computação quântica e desenvolvem colaboração com a "startup" Pasqal. A Airbus, por sua vez, lançou competição internacional na área de computação quântica em 2019, convidando especialistas a propor e desenvolver soluções complexas de modelagem e otimização ao longo do ciclo de vida de aeronaves.

Dedicado à pesquisa e ao desenvolvimento em computação quântica, o IBM Quantum Hub em Montpellier anunciou, no início de 2021, programa de formação de programadores quânticos, em parceria com a Universidade de Montpellier, com vista a suprir a demanda do mercado nessa área.

7.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

A Estratégia Nacional sobre Tecnologias Quânticas visa a desenvolver a indústria francesa nos principais campos de aplicação das tecnologias quânticas, com benefícios em áreas como saúde, energia, clima, defesa e dissuasão e inteligência. Busca, também, estimular projetos conjuntos envolvendo institutos públicos de pesquisa, grandes empresas, "startups" e universidades.

Entre as principais linhas de pesquisa figuram sensores quânticos, criptografia pós-quântica e comunicações seguras.

Em relação ao primeiro item, deverão ser alocados 258 milhões de euros para o desenvolvimento de sensores, em áreas como a aeronáutica civil e militar e submarinos.

A criptografia pós-quântica deverá receber 156 milhões de euros em investimentos no contexto da Estratégia. Com vistas à migração gradual para a criptografia pós-quântica, a iniciativa terá como foco o desenvolvimento de materiais e de algoritmos, bem como a validação experimental.

Também serão destinados 325 milhões de euros às comunicações quânticas, para desenvolver componentes e equipamentos que permitam transmissão segura de informação quântica em temperatura ambiente.

7.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

A Estratégia Nacional prevê o desenvolvimento de componentes fotônicos quânticos que possam ser integrados em infraestruturas de comunicações existentes. Busca, também, desenvolver novos protocolos de comunicação relacionados a cálculos quânticos, como "Blind Quantum Computing", e de interferometria de longa distância

para a observação da terra e do espaço. Dedicada, ainda, recursos à identificação e à correção de vulnerabilidades em sistemas de comunicação quântica.

Diversas empresas francesas desenvolvem atividades relacionadas à comunicação quântica. O consórcio "EuroQCI", por exemplo, é integrado pelas empresas Airbus, Orange, PwC France and Maghreb, Thales, além da Agência Espacial Europeia (ESA). O objetivo do projeto é desenvolver tecnologia de comunicação segura para infraestruturas críticas e instituições governamentais na União Europeia. No longo prazo, espera-se que o "EuroQCI" se torne a base da internet quântica na Europa, conectando computadores quânticos, simuladores e sensores por meio de redes para distribuir informações e recursos com métodos de segurança de última geração.

O grupo Thales, que desenvolve sistemas de informação e para as indústrias aeroespacial, de defesa e de segurança, também promove pesquisa sobre comunicação quântica. A empresa possui laboratório de física quântica em seu centro de pesquisa tecnológica no campus da "École Polytechnique" em Saclay, bem como laboratório conjunto com o CNRS. Entre as tecnologias desenvolvidas pela empresa, destacam-se antenas multifrequenciais em miniatura, sistemas de navegação inercial mais precisos e redes de comunicação seguras. Um dos projetos da companhia busca aprimorar substancialmente a precisão dos sistemas inerciais usados em pouso de aeronaves em caso de falha do GPS, fazendo uso de sensores quânticos.

7.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

Nos últimos anos, a França vem alocando, em média, cerca de 60 milhões de euros por ano (somando recursos públicos e privados) ao desenvolvimento de tecnologias quânticas. À luz da avaliação que este país estaria dedicando recursos inferiores àqueles verificados em outros atores de peso, como China, Estados Unidos e Alemanha, a Estratégia Nacional sobre Tecnologias Quânticas prevê elevar os investimentos anuais para 200 milhões de euros, nos próximos cinco anos, sendo que a maior parte desse montante proviria de recursos públicos.

Algumas regiões anunciaram também investimentos no setor, como é o caso da região metropolitana de Paris (Île-de-France), que prevê 2,5 milhões de euros entre 2020 e 2022.

7.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Atos: criada na França em 1997, a companhia de transformação digital tem hoje atuação em 73 países, com rendimento anual de 12 bilhões de euros. Nos últimos anos, a Atos vem conferindo atenção às tecnologias quânticas. Em 2016, a empresa lançou o programa Atos Quantum, que buscava antecipar o futuro da computação quântica. Nesse contexto, desenvolveu o "Atos Quantum Learning Machine", utilizado atualmente em países como Alemanha, Áustria, Estados Unidos, Países Baixos e Reino Unido, além da França. Em maio último, o SENAI CIMATEC e a Atos, anunciaram o lançamento do "Latin America Quantum Computer Center" (LAQCC), em Salvador, que será equipado com o primeiro simulador "Atos Quantum Learning Machine" do Brasil. Em abril de 2021, a Atos inaugurou novo laboratório de pesquisa e desenvolvimento na região metropolitana de Paris (Clayes-sous-Bois), que reúne 350 engenheiros e é dedicado a pesquisas nas áreas

de computação quântica, computação de alto desempenho, computação de ponta, inteligência artificial e segurança cibernética.

Pasqal: Lançada em 2019, essa "startup" francesa, especializada em processadores quânticos baseados em átomos resfriados a laser, pretende desenvolver, até o final do ano corrente, simulador quântico com capacidade de processamento de até 100 qubits. Em junho último, a companhia recebeu investimentos de 25 milhões de euros. Esses recursos vieram do fundo de investimentos em tecnologias quânticas "Quantonation" e do Fundo de Inovação em Defesa, do Ministério das Forças Armadas francês.

Quandela: criada em 2017, desenvolve tecnologia para a fabricação de fontes de luz quântica, com aplicações em áreas como computadores quânticos óticos e comunicações quânticas.

Alice & Bob: fundada em fevereiro de 2020, a "startup" busca desenvolver computador quântico universal menos sensível a erros. Recentemente a companhia recebeu investimentos de três milhões de euros para desenvolver seu projeto.

C12 Quantum Electronics: com foco em máquinas do tipo NISQ, a "startup" busca desenvolver computador quântico utilizando nanotubos de carbono suspensos, material cuja interface mínima com o ambiente externo reduziria drasticamente a taxa de erro.

My Cryo Firm: empresa especializada em criogenia que desenvolve dispositivos que permitem atingir temperaturas muito baixas, tecnologia essencial para observação de fenômenos quânticos.

CryoConcept: Fundada há 17 anos, a Cryoconcept projeta e fabrica refrigeradores de diluição de temperatura ultrabaixa, destinados à pesquisa fundamental. Em 2019, a empresa recebeu o pedido dos dois primeiros refrigeradores HEXADRY 200 para o projeto QuCube desenvolvido pela CEA e pelo CNRS.

7.7 Simuladores quânticos

A França conta com produção nacional de simuladores quânticos, que são exportados para vários países. A principal companhia do setor é a Atos, que conta com dois modelos, o "Atos Quantum Learning Machine" (QLM), de 2017, e a versão "QLM E[nhanced]". Esta última foi lançada em 2020, com nova arquitetura de hardware, podendo chegar a 30 qubits - 12 vezes mais potente do que seu antecessor. Segundo a própria companhia, o "QLM E[nhanced]" seria o "simulador quântico mais potente do mundo disponível comercialmente". No segundo semestre de 2020, a companhia anunciou o desenvolvimento do "Quantum Annealing Simulator", empregando tecnologia distinta da adotada nos outros simuladores da empresa. Os simuladores quânticos desenvolvidos pela Atos são utilizados na França por atores como a Total, a universidade de Reims Champagne-Ardenne e o Centro de Cálculo, Pesquisa e Tecnologia da CEA, que reúne grupos industriais como EDF e Safran.

A "startup" Pasqal pretende desenvolver, até o final do ano corrente, simulador quântico com capacidade de processamento de até 100 qubits. A empresa tem como meta alcançar a capacidade de 200 a 300 qubits em 2022 e 1.000 qubits até o final de 2023.

Em novembro último, a Pasqal anunciou ter firmado parceria com a Atos para desenvolver acelerador quântico baseado em sua tecnologia de átomo frio.

7.8 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto

Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS) Antonia Alcaraz Responsável pela cooperação internacional Departamento de Pesquisa Europeia e Cooperação Internacional Telefone: +33 (0)1 44 96 46 79 Antonia.ALCARAZ@cns-dir.fr

Comissão de Energia Atômica e Energias Alternativas (CEA) Departamento de Pesquisa Fundamental <https://newsletters.cea.fr/contact/> Telefone: +33 01 69 08 60 00

Instituto Nacional de Pesquisa em Ciência da Computação e Automação (INRIA) Centro Inria Saclay - Île-de-France Telefone: +33 1 72 92 59 00 contact-saclay@inria.fr

Universidade Paris-Saclay conventions.internationales@universite-paris-saclay.fr
<https://www.universite-paris-saclay.fr/contact>

Universidade Grenoble Alpes Telefone: +33 (0)4 57 42 21 42 uga-accueil@univ-grenoble-alpes.fr
<https://quantum.univ-grenoble-alpes.fr/contact-us/>

7.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

A França não conta com política consolidada dirigida especificamente à fabricação de circuitos quânticos. A Estratégia Nacional do setor tem seção sucinta sobre o fortalecimento da infraestrutura tecnológica francesa e ressalta a necessidade de aprimorar os meios de elaboração de insumos, de modo a evitar dependência de terceiros países. Nesse sentido, registra a ambição de desenvolver ações com foco em nanomateriais funcionais, mas não são dados detalhes sobre essa iniciativa.

Um dos relatórios que inspirou a Estratégia francesa, intitulado "Quantique: le virage technologique que la France ne ratera", de janeiro de 2020, aponta que, com raras exceções, os atores franceses do setor de tecnologias quânticas dependem da importação de insumos do exterior. Nesse sentido recomenda que a França busque autonomia no setor de tecnologias essenciais à computação quântica, em particular criogenia, lasers e eletrônica de baixo ruído. Essa recomendação foi incorporada à Estratégia, que ressalta o objetivo de alcançar a curto prazo autonomia nessa área, garantindo o abastecimento nacional. No longo prazo, a França ambicionaria tornar-se fornecedor mundial das referidas tecnologias.

Exemplo de projeto que visaria à autonomia francesa em insumos usados relacionados às tecnologias quânticas é o e-DIAMANT, desenvolvido na Escola Normal Superior de Paris-Saclay em parceria com o instituto Chimie ParisTech, com financiamento do Ministério de Ensino Superior, Pesquisa e Inovação. A iniciativa tem por objetivo a fabricação de diamantes para sensores quânticos.

8. ÍNDIA

8.1 Breve histórico

Em 2017, pesquisadores indianos iniciaram o primeiro experimento nacional de comunicação quântica baseada em satélite: o projeto QuEST - que, atualmente, constrói o seu segundo computador avançado. Três anos depois, em 2020, o desenvolvimento de tecnologias quânticas na Índia ganhou novo impulso quando o governo lançou a Missão Nacional sobre Tecnologias Quânticas e suas Aplicações (NM-QTA), à qual alocou mais de US\$ 1 bilhão, a serem desembolsados entre 2020 e 2025.

Desde então, as pesquisas na área começam a avolumar-se e apresentar seus primeiros resultados. Num momento em que a "comunidade quântica" estaria se unindo em torno das novas oportunidades para pesquisa e inovação na área, avalia-se que esse investimento poderá obter um impacto global.

Nesse contexto, referências às tecnologias quânticas têm sido cada vez mais comuns nos discursos e documentos oficiais da Índia sobre novas tecnologias. A essas tecnologias é atribuída, especialmente, a abertura de novas fronteiras para a computação, as comunicações e a segurança cibernética, com grande diversidade de aplicações. Por meio das tecnologias quânticas, o governo indiano buscava soluções inovadoras para desafios persistentes em áreas como saúde, educação, agricultura e outras consideradas prioritárias para o desenvolvimento nacional. Tal como anunciadas pelo governo, as iniciativas indianas em tecnologias quânticas manteriam foco na criação de empregos altamente qualificados, desenvolvimento de recursos humanos e apoio ao empreendedorismo ("startups"), com vista ao crescimento econômico com liderança tecnológica.

Em março de 2021, a Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO) anunciou que conseguiu demonstrar a comunicação quântica no espaço livre ("free-space") a uma distância de 300 metros. Segundo a ISRO, esse é um marco importante para a comunicação de dados de satélite usando tecnologias quânticas. Com o recente avanço, a Índia ingressa no seleto grupo de países - como EUA, Reino Unido, Canadá, China e Japão - que já fizeram contribuições significativas no campo da comunicação quântica.

8.2 Estratégias/políticas nacionais

- Missão Nacional sobre Tecnologias Quânticas e suas Aplicações (NM-QTA)

A estratégia "mestra" indiana para essa nova fronteira do conhecimento consiste na já mencionada Missão Nacional sobre Tecnologias Quânticas e suas Aplicações ("National Mission on Quantum Technologies and Applications" - NM-QTA). Lançada em 2020 pelo Departamento de Ciência e Tecnologia (DST/MST), esse programa busca coordenar as partes interessadas na indústria, nas instituições de pesquisa e no próprio governo, com vista a promover o desenvolvimento e uso de tecnologias quânticas na computação, criptografia, comunicações, e ciência dos materiais.

Ao apoiar projetos interdisciplinares de tecnologia quântica aplicada a setores-chave para a Índia, a NM-QTA visaria impulsionar, sobretudo, pesquisas que possam

resultar em aplicações (usos, produtos e serviços) de interesse comercial e fins "relevantes". Entre suas metas concretas está a de desenvolver um supercomputador de 50 bits quânticos codificados ("qubits") nos próximos 4-5 anos. Espera-se também que a estratégia possa fazer avançar o projeto de mapeamento genético nacional "Genome India" - esforço colaborativo de 20 instituições para permitir maior eficiência em ciências da vida, agricultura e medicina.

- Missão Nacional sobre Sistemas Cibernéticos Físicos Interdisciplinares (NM-ICPS)

Voltada especificamente às tecnologias quânticas, a NM-QTA complementa outra estratégia nacional indiana importante nessa área: a Missão Nacional sobre Sistemas Cibernéticos Físicos Interdisciplinares, lançada em 2017 com o propósito de tornar a Índia um dos países líderes em CPS ("cyber physical systems").

A "National Mission on Interdisciplinary Cyber Physical Systems" (NM-ICPS) coordena e integra esforços nacionais ligados à geração de conhecimento; desenvolvimento de recursos humanos; pesquisa, tecnologia e desenvolvimento de produtos; inovação e comercialização em CPS. A implementação da NM-ICPS, também sob responsabilidade do DST, ocorre por meio de uma rede de 15 centros de inovação tecnológica, 6 centros de aplicações setoriais e 4 parques de pesquisa tecnológica, abrangendo todas as fases do ciclo de vida tecnológico. Desse modo, buscaria criar um ecossistema robusto para as tecnologias CPS no território indiano.

8.3 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

Programa de Ciência e Tecnologia no Domínio do Quantum (QuEST), 2019:

Em 2019, o Departamento de Ciência e Tecnologia (DST) lançou o programa de pesquisa "Quantum-Enabled Science & Technology" (QuEST), com investimento de Rs 800 milhões (US\$ 10,75 milhões) em três anos. Na primeira reunião do QuEST, no Instituto Internacional de Tecnologia da Informação (IIIT) de Hyderabad, em janeiro daquele ano, foi discutida estratégia para adquirir os recursos humanos necessários à construção de computadores quânticos na Índia. O projeto envolve também pesquisadores dedicados a construir portas lógicas, sensores e outros dispositivos que podem ser integrados aos computadores quânticos.

Uma vez concluído o trabalho básico, possivelmente até 2022, a Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO), a Organização de Pesquisa e Desenvolvimento da Defesa (DRDO) e o Departamento de Energia Atômica (DAE) deverão reunir uma soma de Rs 3 bilhões (US\$ 40,3 milhões) para levar o QuEST a sua segunda fase. Essa nova etapa deverá garantir que o programa de computação quântica da Índia corresponda aos padrões internacionais.

Registro, ainda, o lançamento, em setembro de 2020, da "Quantum Technology Initiative" (IQTI), pelo Instituto Indiano de Ciência (Indian Institute of Science - IISc). Aberta à colaboração internacional, a IQTI buscaria envolver ativamente a indústria e outros parceiros estratégicos para desenvolver tecnologias com benefícios econômicos e impacto social.

8.4 Principais linhas de pesquisa aplicada

A NM-QTA prevê apoio a tecnologias transformadoras, de próxima geração, para o desenvolvimento de supercomputadores, sistemas de comunicação, distribuição de chaves, criptografia, criptanálise, novos dispositivos, sensoriamento, bem como relógio e materiais quânticos diversos.

As áreas de enfoque da NM-QTA incluem ciência fundamental, tradução e desenvolvimento de tecnologia, formação de recursos humanos e infraestruturas, bem como apoio à inovação (por meio de "start-ups", principalmente) para tratar de questões relativas às prioridades nacionais. Entre os setores que deverão receber forte impulso com as aplicações de tecnologias quânticas estão: engenharia aeroespacial, previsão numérica do tempo, simulações, segurança das comunicações e transações financeiras, segurança cibernética, manufatura avançada, saúde, agricultura e educação.

8.5 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Uma iniciativa de destaque no campo da comunicação quântica tem sido conduzida pela Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO). Como assinalado acima, em março passado, a ISRO foi bem-sucedida em seus testes de comunicação quântica no espaço livre ("free-space") a uma distância de 300 metros. O evento demonstrou a viabilidade da comunicação "altamente segura" de dados de satélite por meio de tecnologias quânticas.

8.6 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

A Missão Nacional sobre Sistemas Cibernéticos Físicos Interdisciplinares (NM-ICPS), lançada em 2017, conta com um orçamento total de Rs. 36,6 bilhões (US\$ 492 milhões), a ser integralmente desembolsado até 2023. Para implementar a NM-ICPS e coordenar seu ecossistema de P&D (com formação de recursos humanos, incubadoras etc.), o DST criou a divisão "Frontier and Futuristic Technologies" (FFT). A rede de centros de inovação e parques tecnológicos formada com os recursos da NM-ICPS servirá de base ao desenvolvimento de tecnologias quânticas, no âmbito da NM-QTA.

Em seu orçamento de 2020-2021, o governo indiano dedicou à NM-QTA um orçamento total de Rs 80 bilhões (US\$ 1,07 bilhão) pelo período 2020-2025 - mais que o dobro, portanto, do que foi reservado para a NM-ICPS em 2017. No entanto, não há clareza sobre quanto de financiamento o governo efetivamente transferiu à NM-QTA neste seu primeiro ano - especialmente turbulento em razão da pandemia da COVID-19.

8.7 Startups/empresas de base tecnológica consolidada dedicadas ao tema

Como resultado do robusto apoio governamental, em termos de financiamento e infraestrutura, para impulsionar o crescimento da computação quântica na Índia, muitos atores privados estão explorando essa nova fronteira do conhecimento.

BosonQ - desenvolve soluções de "software" de computação quântica com padrão internacional (domina por exemplo, dinâmicas de fluidos e estruturas computacionais, transferência de calor, otimização multidisciplinar e aeroacústica computacional). Essa nova "startup" (fundada no início de 2021) estaria construindo infraestrutura técnica com vista a criar "software" de simulação multifísica de primeira linha para computação quântica. Endereço eletrônico: <https://www.bosonqpsi.com/>;

Qulabs.ai - fundada em 2017 e constituída por um grupo multidisciplinar de cientistas e engenheiros indianos, a Qulabs.ai figura entre as primeiras e mais renomadas "startups" de computação quântica do país. Presta serviços de aprendizagem de máquina ("machine learning" - ML), comunicação, computação, algoritmos e simulações, entre outros. Pela sua plataforma QuAcademy, fornece treinamento, desenvolvimento e tradução de novas tecnologias quânticas. Endereço eletrônico: <http://qulabs.ai/index.html>;

QpiAI Tech - baseada em Bangalore, a QpiAI Tech criou uma plataforma de geração de modelos quânticos como serviço (PaaS), habilitada para inteligência artificial e que avança nos esforços de pesquisa em computação e modelagem (bits, qubits etc.). Essa ferramenta tecnológica estaria impulsionando inovações em setores como ciências biológicas, serviços financeiros, transporte, indústria 4.0 e espaço. A "startup" também está desenvolvendo computadores híbridos clássicos-quânticos e pretenderia inserir 1 milhão de qubits em um chip para resolver problemas de geração de modelos de inteligência artificial (AI) e aprendizagem de máquina (ML). Endereço eletrônico: <https://qpi.ai.tech/>;

QNu Labs - baseada em Bangalore, a QNu Labs é líder em produtos e soluções de criptografia e segura quântica, com distribuição de chaves quânticas (QKD). A tecnologia permite a troca de chave criptográfica entre duas pessoas com qubits. A "startup" também oferece soluções de atualização da infraestrutura de criptografia legada para a criptografia segura quântica, sem interrupção nos negócios. Endereço eletrônico: <https://www.qnulabs.com/>;

Automatski - com escritórios em Bangalore e Los Angeles, a Automatski realiza pesquisas em várias áreas, incluindo computação quântica. Trabalha no desenvolvimento e fabricação de computadores quânticos de circuito, adiabáticos e de recozimento. Realiza pesquisas em várias áreas de software para simular configurações de computação quântica. Permite simular configurações com grandes contagens de qubit. Em 2018, lançou o computador quântico adiabático mais poderoso do mundo (com mais de 100.000 qubits) e iniciou simulações em escala unificada, elevando a outro patamar suas capacidades nessa área. Endereço eletrônico: <http://automatski.com/quantum-computing.html>;

Quantica Computacao - trabalha com desenvolvimento de ferramentas criptográficas, aprendizagem de máquina (ML) e inteligência artificial (AI), além de algoritmos e componentes para computadores quânticos. Com o programa Alchemy, a empresa está desenvolvendo um simulador virtual quântico de última geração para compilar e executar diferentes ferramentas de "software" com capacidade quântica. Endereço eletrônico: <http://www.quantiacomputacao.com/index.html>;

QRDLab - baseada em Calcutá, essa "startup" é uma iniciativa do setor industrial e tecnológico indiano para promover a pesquisa, educação e consultoria em várias áreas da computação quântica. Com o objetivo principal de fomentar pesquisas de ponta, a QRDLab colabora com pesquisadores independentes e instituições acadêmicas na busca por soluções para "problemas da vida real". Seus planos incluem desenvolver uma solução criptográfica híbrida e de base quântica, bem como um algoritmo de aprendizado de máquina quântica voltado à descoberta de novos medicamentos. Endereço eletrônico: <https://www.qrdlab.com/>;

Taqbit Labs - fundada em 2018, é uma das "startups" líderes em tecnologia quântica na Índia, oferecendo soluções de ponta na distribuição de chaves quânticas (QKD). A Taqbit tem a proposta de aumentar a segurança na comunicação de dados, integrando a tecnologia quântica moderna a infraestruturas preexistentes. Suas áreas de aplicação incluem os setores aeroespacial, defesa, manufatura, finanças e saúde. Endereço eletrônico: <https://taqbit.com/index.html>.

8.8 Simuladores quânticos

Há simuladores em desenvolvimento ou já instalados em diversas instituições científicas, institutos de tecnologia (IITs) e outras entidades públicas e privadas indianas. O Instituto Indiano de Ciência (Indian Institute of Science - IISc), em Bangalore, por exemplo, vem testando em seu Centro de Excelência em Tecnologia Quântica um simulador de alto desempenho. No Raman Research Institute (RRI), também em Bangalore, foi instalado recentemente um simulador de distribuição de chaves quânticas chamado qkdSim. Há ainda um rastreador de partículas quânticas no Instituto Indiano de Educação e Pesquisa em Ciências, em Pune, além de um simulador Qulabs em teste no laboratório de pesquisas quânticas da IIT Roorkee. Além disso, os Centros de Desenvolvimento de Computação Avançada (C-DAC) em cidades como Hyderabad, Bangalore e Pune contam, igualmente, com seus primeiros simuladores quânticos em operação.

Destaco ainda que o Laboratório de Aplicações de Computação Quântica, do Ministério de Eletrônica e Tecnologia da Informação, fornecerá a candidatos selecionados acesso a "hardware" de computação quântica, simuladores e ferramentas de programação, sob demanda e sem custo, via "Amazon Braket" habilitando cientistas e desenvolvedores a construir algoritmos, conduzir simulações avançadas e executar experimentos.

Com seu projeto "Alchemy", a "startup" Quantica Computacao está desenvolvendo um simulador virtual quântico de última geração para compilar e executar diferentes ferramentas de "software" com capacidade quântica. A "startup" criou uma versão de teste alfa de qubit único e está atualizando o seu simulador para quatro qubits.

8.9 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto

Entre os principais institutos de pesquisa voltados ao estudo e desenvolvimento de tecnologias quânticas, destaco o Raman Research Institute e o Indian Institute of Science, ambos em Bangalore, e o International Institute of Information Technology, em Hyderabad. Além destes, registro os trabalhos do Laboratório de Medição e Controle Quântico (QuMaC), do Instituto Tata de Pesquisa Fundamental, em Mumbai.

a) Raman Research Institute, Bangalore (RRI)

Uma equipe de pesquisadores do Raman Research Institute (RRI) demonstrou a transferência de uma chave de distribuição quântica entre dois edifícios usando um canal atmosférico. Essa é a primeira instância onde técnica subjacente (distribuição de chave quântica baseada em emaranhamento) foi demonstrada entre estações terrestres

(edifícios) separados por 50 metros. Isso foi visto como um avanço com o potencial de revolucionar a segurança cibernética em setores críticos, como bancos e defesa.

Contato - Dr. V G Subramanian, Executive Assistant to the Director, Raman Research Institute, Bengaluru Tel: +91 9481 375 236 Email: subramanian@rri.res.in

b) Indian Institute of Science (IISc)

Beneficiando-se das instalações de nanofabricação do Instituto Indiano de Ciência (IISc), o Centro de Excelência em Tecnologia Quântica do IISc realiza programa experimental concentrado em dispositivos supercondutores de qubit, fontes e detectores de fóton único para comunicações quânticas, redes quânticas fotônicas integradas e sensores quânticos. Uma equipe multidisciplinar, das áreas de física, engenharia e ciência da computação, trabalha nesse projeto.

Contato: Dr. Apoorva Patel, Professor, Quantum algorithms, Quantum simulations Tel: +91 80 2293 2560 (International Relations) Email: adpatel@iisc.ac.in; info.iqti@iisc.ac.in

c) International Institute of Information Technology, Hyderabad (host of QuEST Program)

O Instituto Internacional de Tecnologia da Informação (IIIT), sediado em Hyderabad, abriga o programa "Quantum-Enabled Science & Technology" (QuEST), implementado pelo Departamento de Ciência e Tecnologia (DST), Governo da Índia (vide item II, acima).

Contatos no DST sobre o QuEST Dr. Milind Kulkarni, Head, Technology Missions Division (Nano Mission & Supercomputing Mission), Department of Science & Technology (DST), New Delhi Tel : +91 11 2651 2217 Email: milind@nic.in

Dr. Rajeev Sharma, Scientist F, Frontier and Futuristic Technologies (FFT) Division, Department of Science & Technology (DST), New Delhi Tel: +91 11 2659 0310 Email: rajeevsharma@nic.in

d) Quantum Measurement and Control Laboratory (QuMaC), Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai

O Laboratório de Medição e Controle Quântico (QuMaC), do Instituto Tata de Pesquisa Fundamental, localizado em Mumbai, investiga principalmente fenômenos quânticos em circuitos supercondutores. Esses circuitos elétricos nanofabricados são projetados para se comportarem como "átomos artificiais", com níveis de energia quantizados. Ao formar um qubit, eles podem ser usados para armazenar e processar informações.

Contato - Dr. Rajamani Vijayaraghavan, Head, Quantum Measurement and Control Laboratory (QuMaC), Associate Professor, Dept. of Condensed Matter Physics, Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), Mumbai E-mail: r.vijay@tifr.res.in Tel. +91 22 782 576 / 477

8.10 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Não foram identificadas políticas específicas para os insumos usados na fabricação de circuitos quânticos, mas o governo indiano poderia, indiretamente, contemplá-los no âmbito da Missão Nacional sobre Tecnologias Quânticas e Suas Aplicações (NM-QTA).

9. ISRAEL

9.1 Estratégias/políticas nacionais:

Israel vem procurando consolidar posição como ator de relevo em computação quântica. Mesmo em cenário de pandemia, o governo vem aumentando os investimentos na área, especialmente em projetos com impactos em segurança e defesa. Registra-se, igualmente, no âmbito privado aumento do número de "startups" voltadas ao setor.

- Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica:

O rápido avanço dos trabalhos na área conduzidos pelos EUA - e, especialmente, pela China - motivou Jerusalém a dar maior atenção ao tema, muito em razão de suas repercussões em termos de segurança e de defesa.

Apesar das restrições impostas pela pandemia de Covid-19 e pela crise política que engessou o orçamento dos dois últimos anos, o governo aprovou, em meados de 2020, liberação do equivalente a cerca de US\$ 360 milhões para ações de pesquisa e desenvolvimento em computação quântica (2020-2025), muitas delas sob a liderança do Ministério da Defesa. Trata-se de salto considerável dos US\$ 31 milhões anunciados em 2018.

9.2 Principais linhas de pesquisa aplicada

Israel desenvolve ampla gama de pesquisa aplicada. Na área de defesa, além das técnicas de criptografia utilizadas nas comunicações reservadas, as pesquisas interessam-se por rastreamento de aeronaves `stealth`, invisíveis a radares, bem como em guerra anti-submarina.

9.3 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Israel Institute of Technology (TECHNION):

O Helen Diller Quantum Center da Technion abriga as seguintes áreas de pesquisa em ciência e tecnologia quântica, entre as quais, comunicação quântica:

Distribuição da chave quântica (Pesquisadores: Mor Tal, Orenstein Meir, Nazarathy Moshe);

Óptica quântica (Pesquisadores: Segev Mordechai (Moti), Cohen Oren, Steinhauer Jeff, Akkermans Eric, Eisenstein Gadi, Kaminer Ido, Hasman Erez, Moiseyev Nimrod);

Independência de dispositivo;

Detectores de fótons supercondutores (Pesquisadores: Buks Eyal, Ivry Yachin, Hayat Alex);

Fontes de luz não clássicas (Pesquisadores: Gershoni David, Orenstein Meir, Hayat Alex); e

Amplificadores quânticos para radar quântico (Pesquisador: Blank Aharon).

9.4 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos:

A Autoridade de Inovação do Ministério da Defesa está conduzindo licitação para contratar empresas e universidades para projeto de NIS 198 milhões (cerca de US\$ 60

milhões) para construir um computador com 30 a 40 qubits. Espera-se que o vencedor da licitação inaugure os trabalhos antes do final do ano corrente.

9.5 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas as tema

Tem-se verificado aumento no número de "startups" israelenses com atividades focadas em algum aspecto da cadeia da computação quântica. Algumas das companhias locais fizeram levantamento de capital recentemente:

Quantum Machines: criada em 2018, é a primeira empresa de computação quântica israelense financiada por capitais de risco. Desenvolve plataformas de `hardware` e de `software` para a operação e o controle de computadores quânticos;

Classiq: criada em 2019, se propõe a trazer soluções para a concepção de algoritmos para computadores quânticos;

Lightsolver: criada em janeiro de 2020, desenvolve processadores ópticos inspirados na abordagem quântica;

Qedma: também criada em 2020, se propõe a criar sistemas operacionais para computadores quânticos.

9.6 Simuladores quânticos

A pesquisa realizada não identificou simuladores quânticos.

9.7 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicados ao assunto

As principais universidades e centros de pesquisa de Israel têm departamentos dedicados à computação quântica.

Universidade Hebraica de Jerusalém

O Centro de Ciência da Informação Quântica (QISC) da Universidade Hebraica investiga a ciência fundamental e aplicada da informação quântica. Os pesquisadores do mencionado instituto buscam entender como os sistemas quânticos podem ser controlados e isolados para atingir objetivos de comunicação, sensoriamento, simulação e computação. Reunindo diversas disciplinas e metodologias, o Centro tem revolucionado áreas como limiar de computação quântica e teoremas de segurança, controle quântico e termodinâmica, com aplicações nos campos óptico, lacunas de diamante e supercondutores. Mais informações podem ser encontradas na página: <http://qcent.huji.ac.il/>. Os contatos dos pesquisadores podem ser encontrados na página <https://qcent.huji.ac.il/members>.

TECHNION

O Technion oferece grupos de pesquisa nas seguintes áreas da Ciência e Tecnologia Quântica: (i) computação quântica; (ii) informação e comunicação quântica; (iii) simulação de Sistemas Quânticos e Fotônica; (iv) "Quantum Sensing"; (v) materiais quânticos. Os departamentos de química e física oferecem programas de mestrado com certificado de especialização em Ciência e Tecnologia Quântica. O departamento de Ciência da Computação oferece especialização em Computação Quântica para o curso de graduação. Mais informações podem ser encontradas na página: <https://quantum.technion.ac.il/>

Instituto Weizman de Ciências

O Centro de Ciência e Tecnologia Quântica promove pesquisas em mecânica quântica e sua aplicação nas áreas de física, química, óptica e engenharia. Com base em descobertas anteriores sobre como a matéria se comporta em nanoescala, os cientistas associados ao Centro investigam como propriedades quânticas complexas, como superposição e emaranhamento, podem tornar possível construir tecnologias mais eficientes. Adi Stern é o professor responsável pelo Centro. Mais informações podem ser obtidas na página: <https://www.weizmann.ac.il/pages/center-quantum-science-and-technology>.

Universidade de Tel Aviv (TAU)

O Centro de Ciência e Tecnologia Quântica, que reúne vinte laboratórios de pesquisa de diferentes faculdades em todo o campus, combina três objetivos principais: programas acadêmicos (como computação quântica e comunicação quântica); atividades de pesquisa baseadas na natureza multidisciplinar do TAU (colaborações entre pesquisadores de computação, materiais, sensores, química, física e matemática); e ligação internacional com centros de pesquisa e empresas, como Google, IBM e Microsoft, que desenvolvem tecnologias quânticas.

Quanto à pesquisa, a TAU desenvolve trabalhos nas áreas de: simulações quânticas de teorias quânticas de campo usando átomos "ultracold" e íons aprisionados; processamento de informações quânticas com "solitons"; emaranhamento em sistemas e campos de muitos corpos; operações e medições não locais; medições fracas; informação quântica; fundamentos da mecânica quântica; e interpretações da mecânica quântica.

Por oportuno, recorro que o Centro de Ciência e Tecnologia Quântica da Universidade de Tel Aviv assinou, em janeiro deste ano, Memorando de Entendimento com a multinacional indiana de TI Wipro para o desenvolvimento de aplicações em computação quântica relacionadas aos serviços da empresa. Mais informações podem ser encontradas na página: https://english.tau.ac.il/news/quantum_center.

9.8 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Não foram identificadas políticas especificamente relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos.

10. JAPÃO

O Japão foi um país central no desenvolvimento da tecnologia utilizada hoje em computadores quânticos. Foram pesquisadores japoneses que conseguiram, em 1999, demonstrar a utilização de bits quânticos (qubits) em estado sólido. Além disso, em 2003, a empresa NEC e o instituto de pesquisa RIKEN apresentaram, pela primeira vez, um circuito quântico operando com dois qubits.

A despeito das mencionadas inovações, o Japão perdeu sua liderança na pesquisa de tecnologias quânticas, diante dos expressivos investimentos chineses, europeus e norte-americanos no setor. A crescente necessidade de processamento de dados foi atendida pelo avanço da área de supercomputadores, baseada em sistemas clássicos de computação.

A aposta japonesa em supercomputadores trouxe resultados positivos para o país. O supercomputador Fugaku permanece, pelo terceiro ano consecutivo, no topo da lista de

computadores mais potentes do mundo e tem prestado inestimável contribuição em pesquisas na área de Covid-19.

As lideranças deste país têm presente, contudo, que a atual proeminência japonesa na área de computação é precária, frente ao rápido desenvolvimento da tecnologia quântica. Serão necessários significativos investimentos para resgatar a liderança perdida em tecnologias quânticas, que devem revolucionar diversos aspectos de nossa vida econômica e social.

As informações reunidas pelo Posto sobre a estratégia local área de computação quântica retratam o renovado esforço do governo japonês, desde 2018, de firmar-se como ator relevante em computação quântica.

10.1 Estratégias/políticas públicas nacionais

Em janeiro de 2020, o governo japonês divulgou a Estratégia de Inovação em Tecnologia Quântica. A estratégia considera tecnologias quânticas como "fundamentais em termos de indústria e segurança e capazes de provocar transformações profundas na sociedade e economia". Para alcançar o domínio dessa área, o Japão promoverá investimentos em pesquisa e desenvolvimento, em industrialização e em comercialização de "tecnologias-chave".

São estabelecidas metas para desenvolvimento de hardware, software e aplicações práticas tanto na área de recozimento quântico ("annealing"), quanto em modelos baseados na tecnologia de gates quânticos.

A Estratégica enumera, ainda, os princípios e o planejamento que irão nortear o setor nos próximos 10 e 20 anos, com base nos seguintes pontos:

a) desenvolvimento de mapas do caminho para quatro áreas de prioridade tecnológica: computação quântica e simulação, sensores quânticos e metrologia, comunicação quântica, e materiais quânticos; - estabelecimento de mapas do caminho em três áreas consideradas essenciais para o avanço da indústria japonesa: inteligência artificial quântica, biotecnologia quântica e segurança quântica; - criação de cinco ou mais centros de inovação quântica para aproximar universidades, laboratórios de pesquisa e indústria;

b) estabelecimento do Conselho de Inovação em Tecnologia Quântica, novamente com a participação de universidades, laboratórios de pesquisa e indústria; - formação de dez ou mais start-ups promissoras na área quântica, com apoio de programas de financiamento público.

Foram identificados cinco pilares se alcançar o domínio a tecnologia quântica, a saber: i) desenvolvimento tecnológico; ii) colaboração internacional; iii) industrialização e inovação; iv) propriedade intelectual e estabelecimento de padrões internacionais ("international standardization"); v) desenvolvimento de recursos humanos.

Quanto à colaboração internacional, o Japão busca promover projetos conjuntos nas áreas de indústria e segurança, sobretudo com seus tradicionais parceiros Estados Unidos e União Europeia. Esse movimento de aproximação tem como primeiro marco a realização do Simpósio Internacional Japão-EUA-UE sobre Tecnologia Quântica, em dezembro de 2019.

10.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

As atividades de pesquisa e desenvolvimento de computação quântica estão dispersas em programas coordenados por diferentes órgãos do governo japonês.

O principal programa é o "Quantum Leap Flagship Program"(Q-LEAP), do Ministério da Educação, Cultura, Desporto, Ciência e Tecnologia (MEXT). O objetivo do programa é o desenvolver e aprimorar a tecnologia NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) - a mesma utilizada pela Google para supostamente alcançar a chamada "supremacia quântica", em 2019.

O Q-LEAP foi estabelecido em 2018 e terá duração até 2027. As atividades do programa são coordenadas por diretores indicados pelo governo, responsáveis pela formação de redes de pesquisa nas seguintes áreas tecnológicas: a) tecnologia de informação quântica (simuladores e computadores); b) metrologia e sensores quânticos; c) laser de próxima geração. São diretores, respectivamente, os professores Yasunobu Nakamura (Center for Emergent Matter Science, RIKEN), Mutsuko Hatano (School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology) e Teruo Fujii / Kenichi Ishikawa (The University of Tokyo).

A Organização de Desenvolvimento de Nova Energia e Tecnologia Industrial NEDO mantém programa decenal (2018-2027) para o desenvolvimento de chips inovadores de inteligência artificial e de tecnologias de computação de próxima-geração. Vale lembrar que a NEDO é a principal instituição pública de gestão e financiamento de pesquisas aplicadas nas áreas industrial, energética e ambiental. No âmbito do mencionado programa, são financiados projetos em quatro áreas de pesquisa, duas das quais envolvendo tecnologia quântica: o desenvolvimento de computador ultra veloz e preciso por meio da tecnologia de recozimento quântico ("annealing"), assim como a plataforma de softwares necessária para seu uso.

O Programa Interministerial de Promoção da Inovação Estratégica (SIP), coordenado pelo Conselho para Ciência, Tecnologia e Inovação (CSTI) do gabinete do Primeiro-Ministro, promove igualmente pesquisas na área quântica. Para período 2018-2022, as pesquisas concentram-se em comunicações quânticas por fótons e no desenvolvimento de tecnologias seguras de computação em nuvem, com vistas a proteger a comunicação, o armazenamento e o uso de dados.

Finalmente, a área de computação quântica foi considerada estratégica pelo "Moonshot Research and Development Program", iniciativa lançada em 2020 pelo gabinete do Primeiro-Ministro japonês. O objetivo do programa é promover projetos desafiadores de pesquisa e desenvolvimento, de longo prazo, a fim de enfrentar questões sociais de difícil solução.

O sexto grupo de trabalho do programa Moonshot é denominado "creating innovative non-traditional sciences and technologies based on quantum and related phenomena". No âmbito desse grupo, foram estabelecidas metas decenais para avanço das pesquisas em tecnologia quântica, com vistas a desenvolver, até 2050, um computador quântico universal tolerante a erros ("large-scale, fault-tolerant quantum

computer"). Trata-se, segundo especialistas, de tecnologia disruptiva, com capacidade de revolucionar a economia, a indústria e a segurança. As pesquisas são coordenadas pelo Professor Masahiro Kitagawa, da Faculdade de Ciências da Engenharia da Universidade de Osaka.

10.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Observa-se no Japão grande ênfase em pesquisa e desenvolvimento de sistemas de recozimento quântico. A principal pesquisa é conduzida pela multinacional comunicações NEC, em projeto apoiado pelo governo japonês por meio da NEDO.

As pesquisas contam com a participação de diversas instituições japonesas. Na área de hardware, a NEC trabalha com o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Industrial Avançada (AIST) e a Universidade Nacional de Yokohama. Em teoria quântica e softwares, a empresa mantém parceria com o Instituto de Tecnologia de Tóquio, a Universidade de Waseda e a Universidade de Osaka.

Foi estabelecida a meta de desenvolver, até 2023, uma máquina de recozimento quântico, usando a tecnologia de supercomputadores da NEC, baseada no processador SX-Aurora Vector. O objetivo final é a realização de um computador quântico adiabático. Atualmente, a empresa está aprimorando a velocidade e a precisão de uma célula com quatro qubits. Essas unidades-base serão utilizadas na construção do computador quântico da empresa, cuja capacidade de processamento poderá ser estendida pela adição de novas células.

As empresas NEC, Toshiba, Hitachi e Fujitsu investem também no desenvolvimento dos chamados computadores pseudoquânticos, que simulam a tecnologia de processamento de dados via recozimento. Na realidade, esses sistemas podem ser classificados como computadores clássicos especializados no aperfeiçoamento da capacidade de cálculo. Apesar de sua aplicação no curto prazo para o cumprimento de determinadas tarefas, devem perder utilidade na medida em que avançam as pesquisas em tecnologia quântica.

O instituto RIKEN, renomado centro de pesquisas científicas, também concentra esforços no desenvolvimento da tecnologia quântica. Em abril de 2021, foi inaugurado seu Centro para Computação Quântica (RQC), que servirá de ponto focal da estratégia nacional de inovação nesse setor. As pesquisas coordenadas pelo instituto RIKEN estão relacionadas ao modelo gate de computação quântica e no desenvolvimento de algoritmos NISQ ("noisy intermediate-scale quantum"). O instituto trabalha para ter um protótipo em funcionamento até o final de 2021, operando um sistema com 50 qubits.

O RQC promove pesquisas em diversas áreas, com destaque para o trabalho dos professores Yasunobu Nakamura e Jaw-Shen Tsai em qubits supercondutores, assim como do professor Akira Furusawa em computadores quânticos ópticos. Além disso, são realizadas pesquisas em sistemas quânticos com base em duas propostas: i) o controle da sincronização do spin de elétrons em semicondutores; e ii) o controle do padrão de átomos eletrificados em ambientes de hélio líquido. Por fim, são realizadas pesquisas nas áreas quânticas de teoria computacional, algoritmo e arquitetura, com o objetivo de desenvolver um computador tolerante a erros.

Em abril de 2021, o instituto RIKEN e a empresa de tecnologia Fujitsu anunciaram a abertura do "Centro de Colaboração RIKEN RQC-Fujitsu". A iniciativa promove pesquisas nas áreas de hardware e software, de modo a desenvolver, conjuntamente, um computador quântico supercondutor, tolerante a erros, com até mil qubits.

O instituto RIKEN serve também de sede da iniciativa "Quantum Technology Innovation Hubs" (QIH), que envolve a criação de centros para ações integradas envolvendo governo, indústria e academia. Além da unidade no instituto RIKEN, outros centros foram instalados no Instituto de Tecnologia de Tóquio, no Instituto Nacional de Ciências Materiais, no Instituto Nacional para Ciências e Tecnologias nas Áreas Quântica e Radiológica, no Instituto Nacional de Tecnologias de Informação e Comunicação, na Universidade de Osaka, no Instituto de Ciência de Industriais Avançadas e Tecnologia.

10.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

A Universidade de Tóquio e a empresa IBM lançaram, em julho de 2020, o Consórcio de Iniciativas em Inovação Quântica (QIIC), integrado por duas universidades e doze empresas japonesas. A iniciativa objetiva expandir a colaboração entre governo, indústria e academia para avançar as pesquisas em tecnologia quântica e suas aplicações práticas.

Por meio desse consórcio, será instalado, ainda em 2021, o primeiro computador quântico do Japão para uso comercial, o IBM (R) Quantum System One. O computador está sendo construído pela matriz norte-americana da IBM no Kawasaki Business Incubation Center (KBIC), localizado na cidade de Kawasaki. As empresas participantes do QIIC terão acesso garantido a computador de alto desempenho para alavancar suas atividades de pesquisas e desenvolvimento.

Estão previstas, ainda, iniciativas de qualificação de recursos humanos, com medidas para aumentar o engajamento de estudantes, professores e pesquisadores com o tema de computação quântica. Para esse fim, serão organizados seminários, workshops e outros eventos para promover oportunidades de negócio no setor e explorar aplicações práticas da tecnologia.

10.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

O orçamento atribuído pelo governo japonês a atividades na área quântica foi de 16 bilhões de ienes em 2019 (USD 140 milhões) e de 21.5 bilhões de ienes (USD 190 milhões) em 2020. Em linha com a prioridade conferida ao tema, no ano-fiscal 2021, esse valor foi ampliado para 30 bilhões de ienes (USD 270 milhões). Esses recursos são utilizados para financiar os projetos Q-LEAP, NEDO, SIP, além de outras atividades no setor.

O programa Moonshot tem orçamento próprio, quinquenal, fixado em 100 bilhões de ienes (USD 900 milhões). Não há informação sobre quanto desse montante será destinado, especificamente, para pesquisas na área quântica.

10.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Diversas empresas japonesas têm investido em pesquisas na área de computação quântica. No setor privado, os principais atores são IBM (por meio de sua filial local), NEC, Fujitsu, Hitachi, Mitsubishi, NTT, Toshiba e Mizuho Financial Group.

A atuação dessas empresas concentra-se, sobretudo, nos seguintes setores: i) soluções para otimizar as capacidades de computadores quânticos e para apoiar seu desenvolvimento; ii) desenvolvimento de algoritmos e softwares para computadores quânticos e consultoria para organizações que querem utilizá-los; iii) desenvolvimento de hardware em computadores quânticos ou pseudoquânticos.

Ao lado das tradicionais corporações japonesas, algumas startups surgiram nos últimos anos para explorar oportunidades comerciais nesse setor. Fundada em 2018, a Jij trabalha com o desenvolvimento de softwares e de aplicações práticas para computadores de recozimento quântico. A empresa também desenvolveu uma iniciativa de código aberto, OpenJij, voltada à formação de uma plataforma de recozimento quântico unificada. Mais informações podem ser obtidas no site: <https://www.j-ij.com/>.

A Fixstars é uma empresa de TICs que opera tanto do desenvolvimento de software para a área industrial e financeira, quanto no fornecimento de processadores e placas de computador de acordo com a necessidade do cliente. Em parceria com a empresa D-Wave Systems, foi criado, em 2021, o "Quantum Annealing Cloud Fixstars Amplify". Trata-se de uma plataforma de computação, baseada em unidades de processamento de alto desempenho, que pode interoperar com sistemas de recozimento quântico. Segundo a empresa, a plataforma possibilita a utilização de máquinas de recozimento quântico de maneira "fácil e efetiva". Mais informações em: <https://www.fixstars.com/ja/solutions/quantum-computing/>.

A MDR é uma empresa que desenvolve hardware, middleware e aplicativos para computação quântica, colaborando com empresas, organizações e universidades japonesas. Ela oferece dois serviços nesse setor: i) o kit de desenvolvimento "Wildqat", que é uma ferramenta de desenvolvimento baseada na linguagem Python que lida com o "modelo Ising"; e, ii) o kit "Blueqat" (<https://blueqat.com/>), que é uma ferramenta de desenvolvimento baseada em Python para o desenvolvimento de aplicativos para computadores quânticos de modelo gate. Ambos os kits permitem ao usuário simular e executar cálculos em uma máquina local, sem conhecimento específico de física. Atualmente, projetos estão em andamento nas áreas de finanças, mobilidade e medicamentos. Mais informações em <https://startup-db.com/companies/rB5WJbnUoPmJo97q>.

A startup QunaSys, fundada em 2018, desenvolve algoritmos e softwares para promover aplicações práticas da tecnologia quântica. A "arma secreta" do QunaSys é o Qulacs, um "simulador de alta velocidade de circuitos quânticos para pesquisa computacional quântica". Em 2020, a empresa anunciou a criação da Comunidade Científica de Aplicações Quânticas Práticas (QPARC), em parceria com outras 20 empresas, com o objetivo de qualificar recursos humanos e desenvolver pesquisas em química quântica, notadamente na área de novos materiais. Mais informações em <https://en.qunasys.com/>.

A Sigma-i denomina-se uma "empresa acadêmica de base tecnológica", que serve como ponte entre universidade, centros de pesquisa e setor empresarial na área de

tecnologias quânticas. A empresa fornece serviços de consultoria para a implementação e o desenvolvimento conjunto da máquina de recozimento quântico "D-Wave2000Q" e de outros equipamentos para uso em larga escala. Mais informações em <https://sigmailab.com/>.

10.7 Simuladores quânticos

Atualmente, há apenas um simulador quântico no Japão, operado pela empresa QunaSys em colaboração com a Universidade de Osaka. Denominado Qulacs, o simulador de circuitos quânticos é utilizado apenas em pesquisas científicas.

Trata-se de um sistema rápido e versátil, que tem contribuído nas pesquisas de um algoritmo quântico de escala intermediária, de curto prazo, ("near-term intermediate-scale quantum algorithm") e de computação quântica tolerante a falhas, de longo prazo (long-term fault-tolerant quantum computing").

O sistema foi desenvolvido pelo grupo Fujii da Universidade de Kyoto e está disponível em nove repositórios ativos no GitHub, plataforma de hospedagem de código-fonte e arquivos utilizada por programadores. A QunaSys é responsável pela manutenção do simulador e pelo desenvolvimento de novas funções.

Informações técnicas podem ser encontradas no artigo científico "Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose" (<https://www.arxiv-vanity.com/papers/2011.13524/>).

10.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto

Os principais centros japonesas de pesquisa na área de computação quântica, com base em cada setor, são os seguintes:

a) Hardware

Local: RIKEN Center for Quantum Computing (RQC) Diretor: Dr. Yasunobu Nakamura
 Telefone: +81 4 8467 7892 Email: rqc_info@ml.riken.jp Site:
<https://www.riken.jp/en/research/labs/rqc/>

Local: NEC System Platform Laboratory Diretor: Dr. Tsuyoshi Yamamoto E-mail:
tsuyoshi.yamamoto@nec.com Site: <https://www.nec.com/en/global/quantum-computing/index.html> <https://ms-iscqc.jp/en/>

Local: Universidade de Osaka Quantum System Electronics Group Diretor: Dr. Akira Oiwa
 Telefone: +81-6-6879-8405, 8406, 8407 FAX. +81-6-6879-8405 Email:
oiwa@sanken.osaka-u.ac.jp Site: https://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/en/research_groups/group/14-2_oiwa/index.html

b) Aplicações:

Local: Universidade de Tóquio Quantum Computing Research and Education
 Laboratory Diretor: Dr. Hiroshi Imai Telefone: +81-3-5841-4117(ext. 24117) Email:
imai@is.s.u-tokyo.ac.jp Site: https://www.u-tokyo.ac.jp/adm/fsi/en/projects/quantum/project_00039.html

c) Software:

Local: Universidade de Osaka - Computational Quantum Information Electronics Area
Mori Lab Diretor: Dr. Nobuya Mori Telephone: +81 6 6879 7791 Email: mori@physics.org
Site: <http://www.si.eei.eng.osaka-u.ac.jp/index-e.html>

d) Equipamentos ("devices"):

Local: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Industrial Avançada (AIST) - NEC-AIST Quantum Technology Cooperative Research Laboratory Diretor Masayuki SHIRANE, Sub Leader (Adjunct): Shiro KAWABATA Email: s-kawabata@aist.go.jp

10.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Não existe, até o momento, programa do governo japonês para garantir o fornecimento de insumos para a fabricação de circuitos quânticos. Segundo avaliação de interlocutores do Posto, não se observa risco imediato de ausência no mercado dos materiais utilizados na construção dos sistemas quânticos. O principal material utilizado nas pesquisas do instituto RIKEN, por exemplo, é o alumínio, metal abundante na natureza.

A despeito da ausência de política específica, vale mencionar o bem-sucedido programa de reciclagem dos metais (ouro, prata, cobre, lítio, etc) contidos em velhos equipamentos eletrônicos, a denominada "mineração urbana". O processamento de equipamentos descartados pela população japonesa alcançou, em 2018, o patamar de 370 mil toneladas/ano.

11. PAÍSES BAIXOS

Desde setembro de 2019, os Países Baixos contam com uma Agenda Nacional de Tecnologias Quânticas. O desenvolvimento do programa, encomendado pela Secretaria de Estado do Ministério de Assuntos Econômicos e Clima, foi coordenado pelo professor Robbert Dijkgraaf, diretor do Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em consultas com as principais instituições do sistema neerlandês de inovação, oriundas da Academia, do Governo e do Setor Privado. Tomaram parte nessas discussões, juntamente com outros atores relevantes: a Organização Neerlandesa para Pesquisa Científica Aplicada (TNO), o Instituto de Pesquisa para Computação e Internet Quânticos (QuTech), o Centro de Pesquisa para Software Quântico (QuSoft), o Ministério de Assuntos Econômicos e Clima (EZK ou MINEZ), o Conselho Neerlandês de Pesquisa (NWO), o Centro para Materiais e Tecnologias Quânticas de Eindhoven (QT/e) e o Instituto Lorentz, o Amsterdam Internet Exchange (AMS-IX), a Techleap.nl (antiga StartupDelta, responsável pela formulação e execução de políticas de fomento às startups) e a Microsoft.

O programa neerlandês reconhece a posição de liderança das universidades e instituições de conhecimento do país nas áreas de qubits, internet quântica, algoritmos quânticos e criptografia pós-quântica. Também reconhece as capacidades do país em sistemas de engenharia e na aplicação de tecnologias em sistemas operacionais, o que é crucial para a inovação. Embora os Países Baixos já tenham atrativos para investimentos globais e talentos em quantum, o programa busca determinar prioridades estratégicas para esse esforço. O objetivo da Agenda é encontrar ponto de equilíbrio entre o fortalecimento

das capacidades nacionais e a cooperação internacional, de modo a posicionar o país como líder global na área. A Agenda Nacional se autodefine como "ponto de partida" para colocar em marcha um processo de inovação no setor, mediante o investimento no desenvolvimento de tecnologias quânticas em seus estágios iniciais.

Para tanto, o programa define quatro grandes linhas de ação: - realização de grandes descobertas ("breakthroughs") em pesquisa e inovação; - desenvolvimento de ecossistema, criação de mercado e infraestrutura; - capital humano: educação, conhecimento e habilidades; e - estabelecimento de diálogo com a sociedade sobre tecnologias quânticas.

No âmbito da Agenda Nacional neerlandesa, ademais das quatro linhas de ação, três ambiciosos programas transversais catalisadores ("CAT programmes") visam a acelerar os desenvolvimentos, e tornar a tecnologia quântica tangível por meio de demonstrações, e permitir que usuários finais e pesquisadores adquiram experiência em seu uso. São eles:

CAT 1 - Computação e Simulação Quântica: com o objetivo de preparar a sociedade para computadores quânticos, busca desenvolver aplicações quânticas e disponibilizar versões demo online por meio das instalações participantes do projeto. Isso permite que governo, empresas, desenvolvedores de tecnologia e estudantes visitem computadores quânticos, explorem suas capacidades e adquiram experiência com "hardware" real. As diversas instalações do projeto deverão servir como ponto de conexão entre instituições de conhecimento e empresas envolvidos com computação quântica, em "hardware", "software" e aplicações.

CAT 2 - Rede Nacional de Quantum: sua criação visa a promover o desenvolvimento de redes quânticas e da internet quântica, mediante a interconexão de "clusters" locais de conhecimento. O programa busca habilitar pesquisa fundamental e aplicada, e providenciar uma base para a participação de fabricantes de "hardware" no desenvolvimento de componentes da infraestrutura. A composição aberta da Rede também visa a estimular o desenvolvimento de uma indústria de "software" e de segurança. Por fim, a Rede deve servir como plataforma de testes para aplicações intensivas em dados, como computação em nuvem, internet das coisas e veículos autônomos.

CAT 3 - Aplicações de sensoriamento quântico: trata-se de uma plataforma de cooperação multidisciplinar, onde pesquisadores, engenheiros de sistemas e desenvolvedores podem trocar experiências, compartilhar resultados e associar-se a empresas e usuários finais em vários setores para desenvolver protótipos. Uma instalação de uso e testes está sendo disponibilizada, para apoiar empresas e outras organizações com a geração de inovação e de tecnologias para o mercado. Também há intenção de estimular a criação de laços com tecnologias relacionadas, como fotônica e eletrônica.

O documento integral, em inglês, pode ser acessado em <https://quantumdelta.nl/TUQ/wp-content/uploads/2020/04/NAQT-2019-EN.pdf>.

Após o lançamento da política setorial, em setembro de 2019, o Gabinete aprovou, em fevereiro de 2020, o investimento de EUR 23,5 milhões em tecnologias quânticas, a serem aplicados ao longo de 5 anos. O montante corresponderia ao "pontapé inicial financeiro" para a implantação da Agenda Nacional de Tecnologia Quântica, de acordo com as definições das linhas de ação e dos programas catalisadores.

No entanto, tendo em vista o modelo de atuação do sistema de inovação dos Países Baixos, vale notar que há abundante disponibilidade de financiamento direto pelos órgãos públicos a startups e empresas consolidadas de base tecnológica. Independentemente das ações voltadas exclusivamente para a Agenda (como as infraestruturas de pesquisa de grande porte), projetos de pesquisa básica ou aplicada na área podem valer-se das linhas de pesquisa oferecidas pela TNO e pela NWO, por exemplo. As universidades reconhecem a importância e o potencial da pesquisa quântica e também disponibilizam recursos para institutos com financiamento direto (do Ministério da Educação, Cultura e Ciência). Especificamente quanto ao financiamento de startups, ver parágrafo 12 abaixo.

A Quantum Delta NL (<https://quantumdelta.nl/>) é a organização criada para executar a Agenda Nacional de Tecnologias Quânticas, de modo a posicionar os Países Baixos como centro internacional de vanguarda para a tecnologia quântica. A Quantum Delta NL consiste na união de 5 principais "hubs", e diversas universidades e centro de pesquisas, todos conectados pela colaboração em projetos de inovação em tecnologia quântica.

Entre outros objetivos, a Quantum Delta visa a acelerar desenvolvimentos em criação de redes, simulação e aplicações nos três programas catalisadores. Para tanto, fortalece as instalações de grande escala nos cinco locais de pesquisa designados. A meta da organização é criar um ecossistema nacional plenamente funcional para inovação de excelência em quantum, de modo a permitir que computadores, redes e sensores quânticos sejam trazidos ao mercado.

São os seguintes os "hubs" da organização Quantum Delta NL, localizados em algumas das principais universidades do país, em parceria com instituições de governo, grandes empresas de base tecnológica e startups:

Delft (computação quântica, internet e redes), com laboratórios da QuTech, Kavli Institute, Microsoft, Intel e outras empresas;
Amsterdam (algoritmos quânticos aplicados, sensores e simuladores quânticos), com QuSoft, CWI, UvA, VU, SURFsara e outras;
Leiden (algoritmos quânticos aplicados), com aQa, Google, Shell, Volkswagen, Total e outras;
Eindhoven (criptografia pós-quântica, materiais e simulação quântica), com ASML, ThermoFisher, NanoLabNL e outras; e
Twente (eletrônica e fotônica quântica), com MESA+, Lockheed Martin, QuiX, Imec e outras.

Além das instituições de conhecimento e das corporações que investem em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia quântica, os Países Baixos abrigam atualmente 7 startups com foco em quantum. A Quantum Delta NL estabeleceu como missão institucional a elevação desse número para 100 empresas, até 2027. Para tanto, foi lançado, em 15 de julho de 2021, o LightSpeed Fund 1, fundo de EUR 2 milhões para apoiar startups em estágio inicial ("pre-seed"). A startup QuantWare, baseada em Delft, foi a primeira a receber os recursos, no valor de EUR 50.000. O LightSpeed adotou um instrumento moderno de financiamento, adaptado às necessidades da tecnologia quântica: a nota SAFE ("Simple Agreement for Future Equity"), que dá flexibilidade às empresas

para avançarem nos tempos próprios ao campo da pesquisa em quantum, e não exige reembolso se a empresa não conseguir se consolidar.

As startups neerlandesas na área de tecnologias quânticas gravitam em torno dos "hubs" da Quantum Delta NL, e de dois centros e eles ligados:

O QuSoft (<https://www.qusoft.org/about/>) é o centro neerlandês de pesquisa em software quântico. A sua missão é desenvolver novos protocolos, algoritmos e aplicações que possam ser utilizados em protótipos de computadores quânticos de pequeno e médio porte. O QuSoft foi estabelecido em parceria do Centro de Matemática e Informática do parque científico de Amsterdam (CWI), vinculado à NWO, com a Universidade de Amsterdam (UvA) e com a Universidade Livre de Amsterdam (VU). O centro é dirigido pelos professores Harry Buhrman, da cátedra de ciência da computação da UvA, e chefe do Grupo de Algoritmos e Complexidade do CWI; e Kareljan Schoutens, da cátedra de física teórica da UvA.

O Instituto QuTech (<https://qutech.nl/>) é uma iniciativa conjunta da Universidade Tecnológica de Delft (TU Delft) e da TNO. O QuTech abriga um laboratório de quantum próprio da Microsoft e diversas pequenas empresas de alta tecnologia. O instituto, que atualmente emprega mais de 200 pesquisadores e desenvolvedores, foi plenamente integrado à Agenda Nacional e ao Quantum Delta.

Entre as startups dedicadas às tecnologias quânticas, destacam-se as seguintes:

Delft Circuits (<https://delft-circuits.com/>): A Delft Circuits é uma startup originada em 2017 no departamento de Nanociência Quântica da TU Delft. A empresa desenvolve o cabeamento que é necessário dentro e fora dos criostatos para controlar qubits. Este é um nicho de mercado no qual poucos atores atuam atualmente. O primeiro produto, Cri/oFlex®, é um tipo de cabeamento de baixa carga térmica, altamente escalável e flexível. Empregando cerca de doze pessoas com formação multidisciplinar, a Delft Circuits fornece para laboratórios neerlandeses, bem como universidades e empresas em todo o mundo. Contato: e-mail via website; Tel: +31 153010607

Qblox (<https://www.qblox.com/>): A Qblox, "spinoff" do QuTech, também emprega um time dedicado de cientistas, engenheiros e desenvolvedores no desenvolvimento de equipamentos de controle de qubits escaláveis e de baixa-latência. Contato: hello@qblox.com

Leiden Spin Imaging - LSI (<https://leidenspinimaging.com/applied-physics/>): A LSI opera no campo de microscópios de resolução atômica, com o objetivo de permitir a captura de imagens com resolução "single-spin", mediante a utilização de microscópio com temperaturas de milli-kelvin graus, geradas por uma solução de criostato seco. A startup opera em escala global, para clientes como universidades, centros de pesquisa e empresas. Contato: info@leidenspinimaging.com; Tel: +31 (0)85 401 76 18

Startup Single Quantum (<https://singlequantum.com/>): A Single Quantum também está localizada em Delft, e é especializada em detectores de fóton único com nanocabeamento superconductor (SNSPD - "superconducting nanowire single photon detector"). Trata-se de detector capaz de perceber uma única partícula de luz, um fóton simples. A empresa já disponibiliza dois produtos no mercado: o Single Quantum Eos, sistema de ciclo

fechado multicanal de SNSPD; e Single Quantum Iris-S19, um espectroscópio de fóton único. Contato: info@singlequantum.com; Tel:+31 (0) 152 026 050

Startup Quix (<https://www.quix.nl/>): A empresa QuiX, de Enschede, é um "spin-off" da Universidade de Twente. A empresa produz processadores fotônicos quânticos universais de 12-modos. De acordo com a própria startup, "é um ótimo exemplo de como o mundo da tecnologia quântica e a fotônica integrada se unem". Contato: info@quix.nl

QuantWare (<https://www.quantware.eu/>): A startup, igualmente localizada em Delft, dedica-se de a projetar, desenvolver e fabricar "hardware" para computação quântica. Contato: via website.

Outra relevante infraestrutura quântica nos Países Baixos, inserida no âmbito da QuTech, a TU Delft conta com um simulador quântico universal, o QX Simulator, desenvolvido pelo cientista Nader Khammassi. O QX Simulator permite que desenvolvedores de algoritmos simulem a execução de seus circuitos quânticos e um computador quântico. O simulador define uma linguagem de junção de quantum de baixo nível (cQASM), chamada Quantum Code, que possibilita aos usuários descrever seus circuitos em um arquivo de códigos de fontes textuais simples. O código de fonte pode, posteriormente, ser utilizado como "input" para o simulador, que executa o seu conteúdo. É possível descarregar e instalar uma versão do QX Quantum Computer Simulator, por meio do link <https://qutech.nl/qx-quantum-computer-simulator/>.

12. REINO UNIDO

12.1 Estratégias/políticas nacionais para tecnologias quânticas

O governo britânico vem promovendo o discurso de que o Reino Unido se encontra em lugar privilegiado para emergir como líder global no setor de tecnologias quânticas (fala-se em uma "new quantum revolution"). A posição está em linha com a narrativa mais ampla que, no pós-Brexit, projeta este país como "science superpower" - o que, por sua vez, seria faceta da "Global Britain".

Conforme tenho relatado, em anúncios recentes autoridades britânicas vêm repisando o compromisso de tornar o Reino Unido "o destino mais atraente do mundo" para pesquisadores e inovadores. Adicionalmente, vêm abertamente declarando que o desenvolvimento científico e tecnológico doméstico se insere no contexto de uma corrida internacional por excelência nesse campo. Essa visão está relacionada, ainda, com o mote "build back better" - recuperação econômica fundada em investimentos e inovação, e em bases sustentáveis -, bem como nas diretrizes do documento "Integrated Review", lançado já após a efetivação do Brexit.

Essa abordagem para a ciência de corte geopolítico - lastreada em perspectiva de competição global por liderança - é especialmente evidente no caso das tecnologias quânticas. O UK National Quantum Technologies Programme estabelece: "The nation is home to world-class researchers and facilities that have enabled the UK to achieve a deep understanding of fundamental quantum science. These credentials allow us to compete with other research leaders such as the US and China."

Sempre segundo o governo, a força potencial do Reino Unido em matéria quântica adviria de dois fatores principais: i) presença de talentos científicos de primeira garndeza no Reino Unido e ii) altas capacidades industriais no desenvolvimento de componentes fundamentais para sistemas quânticos, tais como: "lasers" especiais, equipamentos de alto vácuo, sistemas de controle eletrônico e detectores de fótons. A conjuntura britânica seria, portanto, na leitura oficial, particularmente propícia para o desenvolvimento e a comercialização de novas tecnologias quânticas.

Os substantivos investimentos do governo no setor estão fortemente vinculados ao horizonte de ganhos comerciais. Em pronunciamentos a respeito, o governo britânico alude reiteradamente a um potencial mercado internacional de bilhões de libras esterlinas para suas tecnologias. Por exemplo, o mercado internacional de semicondutores por si só estaria estimado em 200 bilhões de libras esterlinas.

Finalmente, julgo ser de interesse registrar que, em nota à imprensa quando de recente visita ao Reino Unido do Presidente dos EUA, Joe Biden, o governo britânico fez questão de ressaltar, como ponto de convergência bilateral, que ambos os países estariam em posição de liderança global em tecnologia quântica. O governo britânico sinalizou que o tema deverá ser central na cooperação bilateral em C,T&I, a ser pautada pelas prioridades já consolidadas no "UK R&D Roadmap", no "Integrated Review" e nas "10 Tech Priorities".

12.2 Programa Nacional para Tecnologias Quânticas

O Reino Unido estabeleceu o National Quantum Technologies Programme em 2013. O programa deverá durar pelo menos 10 anos e já teria articulado 1 bilhão de libras esterlinas em investimentos públicos e privados para o segmento de tecnologia quântica. Originalmente programado para durar apenas 5 anos, em 2019 o programa foi renovado para segunda fase de investimentos, com validade estendida para 2024.

O objetivo do programa é coordenar governo, setor privado e academia em uma estratégia nacional coerente para o setor, a fim de posicionar o Reino Unido como líder dos "novos mercados de tecnologia quântica". Fala-se em acelerar a absorção de tecnologias quânticas no mercado; estimular a indústria doméstica (agregando valor a setores estratégicos); e aprimorar a qualidade de vida da população.

O National Quantum Technologies Programme é executado conjuntamente pelos seguintes órgãos: o Departamento de Comércio, Energia e Estratégia Industrial, o Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC, vinculado ao UK Research and Innovation), o Innovate UK (agência de fomento à inovação empresarial); o National Physical Laboratory; o Government Communications Headquarters (agência de inteligência e de segurança cibernética); o Defence Science and Technology Laboratory; e a Knowledge Transfer Network (rede academia-governo-setor privado, ligada ao Innovate UK).

Paralelamente ao lançamento do National Quantum Technologies Programme, o governo britânico estabeleceu um Quantum Technology Strategic Advisory Board, o qual operou entre 2014-2019. Sua função foi desenhar uma estratégia nacional para tecnologias quânticas, a fim de subsidiar ações do programa. Em 2015, o conselho tornou público o documento "National Strategy for Quantum Technologies", que sugere as

seguintes áreas prioritárias para o Reino Unido: i) fortalecer as capacidades do Reino Unido em pesquisa, recursos humanos e infraestrutura para C,T&I quântica; ii) estimular oportunidades de mercado e aplicações comerciais da tecnologia quântica; iii) gerar uma força de trabalho doméstica especializada no setor; iv) estabelecer um contexto regulatório e social adequado; v) maximizar os ganhos da tecnologia quântica por meio de cooperação internacional. Cada prioridade contou com lista de recomendações específicas para atingir as metas elencadas. O documento completo está disponível em https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/414788/Strat_egy_QuantumTechnology_T15-080_final.pdf.

Como resultado, o National Quantum Technologies Programme foi desenhado com recorte marcadamente econômico. Observa-se que os recursos canalizados para o programa são utilizados para fomentar pesquisa, inovação e capacitação, sempre com o fim de apoiar a indústria britânica a comercializar as novas tecnologias.

O programa consiste em frentes variadas de atuação - as quais sistematizo aqui em três pontos: (a) Editais públicos; (b) Rede de centros de pesquisa; e (c) Rede de centros de capacitação.

(a) Editais públicos

O governo britânico tem investido pesadamente no lançamento de editais públicos voltados a empresas, com o objetivo de: consolidar inteligência sobre o mercado de tecnologias quânticas; identificar e desenvolver usos comerciais estratégicos; encurtar o caminho entre pesquisa-mercado, facilitando a aplicação da tecnologia no desenvolvimento industrial de componentes ou mesmo de produtos completos para o mercado.

O programa tem dado forte ênfase à destinação de recursos para o desenvolvimento de produtos para aplicações-nicho (defesa, comunicações seguras, tecnologia da informação, petróleo e gás). A ideia é que, progressivamente, o programa passe a incentivar a geração de aplicações comerciais mais voltadas ao mercado consumidor.

Exemplos de editais passados e correntes oferecidos no âmbito do programa estão disponíveis em <https://uknqt.ukri.org/funding/> e <https://www.ukri.org/our-work/our-main-funds/industria-1-strategy-challenge-fund/artificial-intelligence-and-data-economy/commercialising-quantum-technologies-challenge/>.

(b) Rede de centros de pesquisa

O arcabouço do National Quantum Technologies Programme estabelece, ainda, rede nacional de quatro Quantum Technology Hubs (UKNQT), os quais têm por objetivo acelerar o desenvolvimento de novas tecnologias. Os centros - estabelecidos em Birmingham, Glasgow, Oxford e York - representam uma porta de acesso para empresas interessadas em pleitear subsídios governamentais para P&D de novos produtos quânticos. Os centros são os seguintes: i) UK Quantum Technology Hub Sensors and Timing; ii) Quantic; iii) Quantum Computing & Simulation Hub; e iv) EPSRC Quantum Communications Hub. Detalhes sobre cada centro serão declinados mais adiante.

Na primeira fase do National Quantum Technologies Programme (2014-2019), o governo alocou 120 milhões de libras aos quatro "hubs". Na segunda fase (2019-2024), os centros deverão receber 94 milhões de libras, com vistas a consolidar e ampliar as pesquisas iniciadas na fase anterior.

(c) Rede de centros de capacitação

Outra frente é o estabelecimento de Centre for Doctoral Training in Quantum Engineering, cujo objetivo é capacitar novas gerações de pesquisadores. O Quantum Metrology Institute e o National Physical Laboratory (também associado a metrologia) igualmente contribuem para o esforço de treinamento de especialistas. Lista completa dos centros será reproduzida mais adiante.

12.3 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

O Reino Unido vem conferindo particular atenção ao tema da computação quântica, em função de seu alto potencial de aplicação na indústria. O governo britânico considera que a computação quântica oferece oportunidades para que empresas possam encontrar caminhos mais ágeis para desenvolver soluções que não seriam possíveis apenas com computadores comuns. Na ótica britânica, os setores que mais teriam a ganhar com a computação quântica seriam as indústrias farmacêutica (aceleração da descoberta de novos fármacos), aeroespacial (aprimoramento de cadeias globais de abastecimento) e de transportes (maior eficiência em tráfego urbano e redução da poluição automotiva).

No Reino Unido, o setor público, o setor privado e a academia estão trabalhando em estreita coordenação para ampliar oportunidades da computação quântica no mercado doméstico. Desse modo, não se observa a existência de iniciativas privadas realizadas de forma separada dos programas governamentais. Essa abordagem vale, aliás, para todos os investimentos em tecnologia quântica neste país - não apenas para a vertente computacional.

Em 2020, o Reino Unido formalmente lançou o National Quantum Computing Centre, em Oxfordshire. O governo anunciou compromisso de canalizar 93 milhões de libras esterlinas para o empreendimento. O centro congregará governo, academia e setor privado em esforço de dar escala a tecnologias da computação quântica, de forma a torná-las comercialmente viáveis e permitir que agreguem valor aos produtos britânicos. O centro igualmente apoiará entidades locais no acesso às funcionalidades de computadores quânticos localizados em outros países.

Também em 2020, o governo anunciou investimentos governamentais e privados da ordem de 10 milhões de libras esterlinas para o desenvolvimento do primeiro computador quântico destinado a fins comerciais no Reino Unido. A máquina será desenvolvida pelas empresas de tecnologia Rigetti Computing, Oxford Instruments, Standard Chartered e Phasecraft, em parceria com a Universidade de Edimburgo. O computador será estabelecido igualmente em Oxfordshire. Pretende-se que o equipamento seja útil para empresas interessadas em explorar o potencial da computação quântica para seus produtos e serviços. Apesar de estar fisicamente localizado no Reino Unido, o computador também estará acessível a clientes interessados, por meio de plataforma de nuvem.

Recordo, ainda, que, conforme assinalado no item (I), o National Quantum Technologies Programme previu o estabelecimento de um Quantum Computing & Simulation Hub, cujos detalhes serão indicados mais adiante.

12.4 Principais linhas de pesquisa aplicada

As principais linhas de pesquisa privilegiadas pelo governo britânico estão refletidas nos temas dos quatro hubs de parcerias governo-academia-indústria já mencionados no item (I): i) tecnologias de sensoriamento e mensuração para usos comerciais; ii) imagens quânticas; iii) computação quântica; e iv) comunicações quânticas.

Além dos hubs oficiais, algumas universidades britânicas contam com centros de pesquisa próprios dedicados a estudos quânticos. Citam-se como exemplos:

a) Universidade de York - York Centre for Quantum Technologies

Áreas de pesquisa: comunicações quânticas; sensoriamento, imagens e tecnologias de computação; termodinâmica quântica (aplicações em tecnologia de satélites); criptografia quântica; redes quânticas; informação e processamento quântico; ótica quântica.

Dados de contato: Email: ycqt@york.ac.uk Telefone: +44 (0)1904 324410 Endereço: Department of Physics University of York, Heslington, York, YO10 5DD

Sítio eletrônico: <https://www.york.ac.uk/physics/ycqt/aboutus/>

b) Imperial College London - Imperial Centre for Quantum Engineering, Science and Technology

Áreas de pesquisa: sensoriamento e navegadores quânticos; comunicações quânticas; simulações quânticas; informação e controle quântico; fontes de luz quânticas; fundamentos quânticos.

Dados de contato: Email: m.kim@imperial.ac.uk Telefone: 020 7594 7754 Endereço: South Kensington Campus Imperial College London London SW7 2AZ

Sítio eletrônico: <http://www.imperial.ac.uk/quantum-engineering-science-technology/research/>

c) University College London - Institute of Quantum Science and Technology

Áreas de pesquisa: interfaces e comunicações quânticas; sensoriamento e padrões quânticos; processadores quânticos de estado sólido; algoritmos, arquiteturas e sistemas quânticos complexo.

Dados de contato: Email: quantumadmin@ucl.ac.uk Telefone: +44 (0)20 7679 0604 Endereço: London Centre for Nanotechnology 17-19 Gordon Street London WC1H 0AH

Sítio eletrônico: <https://www.ucl.ac.uk/quantum/research>

12.5 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Conforme antecipado, o National Quantum Technologies Programme instituiu, em 2015, um Quantum Communications Hub, localizado na Universidade de York.

Em linha com a proposta da rede de hubs, o centro de pesquisa em questão congrega universidades, empresas e órgãos do setor público, com o objetivo de acelerar o desenvolvimento e a comercialização de tecnologias de comunicação quântica seguras, em todas as medidas de distância.

Mais especificamente, conforme o governo britânico, a missão do Quantum Communications Hub consiste em:

- a) explorar o potencial de comercialização de protótipos seguros de tecnologia quântica, superando limitações atuais, com vistas a "deliver deliver future-proof, practical, secure communications";
- b) contribuir para o estabelecimento de uma indústria de comunicação quântica no Reino Unido; e
- c) alimentar a expansão, competitividade, diversificação e sustentabilidade dessa indústria nascente, no longo prazo.

Dados de contato estão elencados abaixo. Informações mais detalhadas sobre as linhas de pesquisa do centro, parcerias governo-academia-indústria privada e engajamento com escolas e sociedade civil podem ser encontradas em: <<https://www.quantumcommshub.net/>> .

12.6 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

Como assinalado, a meta do governo britânico ao amparo do National Quantum Technologies Programme era de articular 1 bilhão de libras esterlinas (em investimentos públicos e privados) ao longo dos 10 anos previstos para sua duração.

Em junho de 2019, o governo indicou que os investimentos combinados no setor já teriam ultrapassado a marca de 1 bilhão de libras. De acordo com autoridades britânicas, "the investment has secured the UK's status as a world-leader in quantum science and technologies, keeping pace with the US and China".

Na mesma ocasião, também o governo deu conta de que, pela primeira vez, os investimentos do setor privado em P&D no setor de tecnologia quântica teriam superado os recursos governamentais, no que seria evidência da confiança do mercado no potencial comercial dos avanços científicos sendo alcançados no Reino Unido.

Lista não exaustiva de alguns dos investimentos de maior destaque inclui:

Junho de 2019: investimentos de 153 milhões de libras do governo e 205 milhões de libras da indústria para financiar o Commercialising Quantum Technologies Challenge; trata-se de edital aberto a projetos de inovação em gama variada de setores, como saúde, infraestrutura, telecomunicações, segurança cibernética e defesa. O Challenge apoia projetos em quatro diretrizes: i) inovação em produtos e serviços; ii) projetos de desenvolvimento tecnológico liderados pela indústria, focados em superar problemas específicos; iii) cadeia de abastecimento; e iv) aceleração de investimentos (apoio a start-ups e spin-outs);

Junho de 2020: investimentos adicionais para o Commercialising Quantum Technologies Challenge, da ordem de 70 milhões de libras governamentais e de 30 milhões de libras do setor privado; os recursos financiarão 38 projetos de tecnologia quântica que buscam responder a desafios industriais, em áreas que vão do diagnóstico de câncer ao desenvolvimento de baterias para veículos elétricos;

Junho de 2021: investimento de 172 milhões de libras do governo e de 38 milhões de libras da IBM para a abertura e manutenção do Hartree National Centre for Digital Innovation (HNCDI), por período de cinco anos; trata-se de centro de pesquisa em matéria de computação e inteligência artificial, sediado na região de Liverpool; noticia-se que o HNCDI explorará o desenvolvimento de aplicações industriais da computação quântica e da inteligência artificial, como processos de empacotamento em armazéns comerciais, controle de tráfico, distribuição energética, e design e manufatura no setor automotivo; articulará academia, comunidades empresariais, start-ups e pequenas e médias empresas, além de entidades de governo, em esforço de tornar tais tecnologias acessíveis a empreendimentos privados e órgãos públicos;

Julho de 2019: investimentos governamentais de 94 milhões de libras, no contexto da renovação, por período de mais cinco anos, do apoio governamental à rede de Quantum Technology Hubs; o investimento foi feito por meio do Engineering and Physical Sciences Research Council;

Setembro de 2020: conforme registrado no item (III), o Reino Unido anunciou investimentos governamentais e privados da ordem de 10 milhões de libras esterlinas para o desenvolvimento do primeiro computador quântico destinado a fins comerciais no Reino Unido.

Os recursos públicos e privados acima indetificados contribuirão para a meta governamental de canalizar, até 2027, investimentos da ordem de 2,4% do PIB para pesquisa e desenvolvimento. Como se recorda, tal meta foi fixada pelo governo britânico no contexto da Estratégia Industrial Nacional.

12.7 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Segue relação não exaustiva de start-ups/empresas de base tecnológica dedicadas ao tema. Muitas das empresas citadas estão vinculadas aos Quantum Hubs já descritos. Grande parte das empresas aqui listadas concentram-se nas áreas de computação e de comunicação quântica. Esta a lista:

a) AegiQ: fundada em 2019, trata-se de spin-off da Universidade de Sheffield; especializa-se em "high-performance quantum photonic applications with its core technology being in semiconductor-based deterministic and indistinguishable single-photon sources".

Dados de contato: Formulário para contato: <https://www.aegiq.com/about> Endereço: 283 Glossop Road, Sheffield, S10 2HB, UK

b) ArQit: fundada em 2017 e sediada em Londres, sua especialização é em criptografia quântica; seu objetivo é aplicar "QKD technology to create unique keys that can be shared between two parties using laser transmissions from a satellite".

Dados de contato: LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/arqit> Sítio eletrônico: <https://arqit.uk/>

c) Cambridge Quantum Computing Limited (CQC): fundada em 2014, a empresa tem por objetivo desenvolver ferramentas para aplicação comercial de computadores quânticos, inclusive algoritmos e software; tem operações nos EUA e no Japão.

Dados de contato: Email: info@cambridgequantum.com Telefone: +44(0)203 301 9333
Endereço: The Cambridge Union Society Building 9a Bridge Street Cambridge, CB2 1UB United Kingdom Sítio eletrônico: <https://cambridgequantum.com/about/>

d) Crypta Labs: fundada em 2014 e sediada em Londres, a empresa desenvolve Quantum Random Number Generators (QRNGs) para fins de criptografia.

Dados de contato: Formulário para contato: <https://www.cryptalabs.com/contact>
Telefone: +44 020 3600 0072 Endereço: Crypta Labs Ltd 51-52 St John's Square Farringdon EC1V 4JL

e) Crypto Quantique: a empresa foi fundada em 2016 e tem sede em Londres; especializa-se na geração de chaves criptográficas seguras a partir de chip.

Dados de contato: Email: info@cryptoquantique.com Sítio eletrônico: <https://www.cryptoquantique.com/contact-us/> Endereço: Studio 506, 164-180 Union Street, London SE1 0LH

f) KETS Quantum Security: sediada na cidade de Bristol, a empresa desenvolve ampla gama de tecnologias para comunicações quânticas seguras ("quantum key distribution" e "quantum random number generation").

Dados de contato: Email: enquiry@kets-quantum.com Sítio eletrônico: <https://kets-quantum.com/about-us/> Endereço: Unit Dx St Philips Central Albert Rd Bristol BS2 0XJ

g) Nu Quantum: fundada em 2018 e com sede em Londres, trata-se de spin-out do Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, com especialização em tecnologias quânticas seguras de comunicação.

Dados de contato: Email: info@nu-quantum.com Sítio eletrônico: <https://nu-quantum.com/contact> Endereço: NU QUANTUM LTD Cavendish Laboratory Cambridge, CB3 0HE

h) ORCA Computing: fundada em 2019 e com sede em Londres, a empresa especializa-se na área de computação quântica e fibra ótica.

Dados de contato: Formulário para contato: <https://www.orcacomputing.com/contact>
Telefone: +44 (0) 208 811 6773 Endereço: 84 Wood Lane London W12 0BZ

i) Oxford Ionics: fundada em 2019 e localizada em Oxford, é spin-out do Departamento de Física da Universidade de Oxford; desenvolve computadores quânticos de alto desempenho com base em tecnologia única de "noiseless electronic qubit".

Dados de contato: Email: info@oxionics.com Sítio eletrônico: <https://www.oxionics.com/>

j) Oxford Quantum Circuits: fundada em 2017 pelo Professor Peter Leek da Universidade de Oxford (vide item IX, abaixo), especializa-se em circuitos quânticos supercondutores, com vistas à construção de computador quântico.

Dados de contato: Email: hello@oxfordquantumcircuits.com Sítio eletrônico: <https://nu-quantum.com/contact> Endereço: Oxford Quantum Circuits Thames Valley Science Park Shinfield, Reading RG2 9LH

k) PhaseCraft: instituída em 2018 e sediada em Londres, trata-se de empresa de software quântico fundada por professores da University College London e da universidade de Bristol; sua especialização, portanto, é em computação quântica.

Dados de contato: Email: info@phasecraft.io Sítio eletrônico: <https://www.phasecraft.io/>

l) Post-Quantum (PQ Solutions): fundada em 2009 e sediada em Londres, a empresa oferece amplo espectro de serviços de criptografia quântica segura; seu portfólio inclui outras ferramentas de segurança cibernética.

Dados de contato: Email: info@post-quantum.com Telefone: +44 (0)20 8106 6913 Sítio eletrônico: <https://www.post-quantum.com/>

m) PQShield: fundada 2019 e sediada em Oxford, é spin-out do Instituto de Matemática da Universidade de Oxford; especializa-se no desenvolvimento de algoritmos criptográficos pós-quânticos de alto desempenho.

Dados de contato: Formulário para contato: <https://pqshield.com/contact-us/> Endereço: PQShield Ltd Prama House, Oxford OX2 7H

n) Q&I: sediada no Reino Unido, provê serviços de consultoria em todo o setor de tecnologias quânticas; oferece tanto estudos e relatórios sob encomenda quanto apoio com temas como diligência devida e avaliações de "preparo quântico".

Dados de contato: Email: enquiries@qandi.co.uk Formulário para contato: <http://www.qandi.co.uk/#contact> Sítio eletrônico: <http://www.qandi.co.uk/#contact>

o) Quantopticon: fundada em 2017 e sediada em Londres, produz software de modelagem para o desenho e otimização de componentes quânticos.

Dados de contato: Email: info@quantopticon.co.uk Sítio eletrônico: <https://quantopticon.co.uk/contact/>

p) Quantum Base: fundada em 2014 e localizada em Lancaster, a empresa desenvolve produtos e soluções de segurança quântica em escala nano; as ferramentas têm PUF (Physically Unclonable Functions) que não podem ser copiadas ou clonadas.

Dados de contato: Email: info@quantumbase.com Formulário para contato: <https://quantumbase.com/quantum-base/contact/> Endereço: Department of Physics, Physics Avenue, Lancaster University, Lancaster, LA1 4YB

q) Quantum Dice: fundada em 2019 e com sede em Oxford, a empresa é uma spin-out da Universidade de Oxford; comercializa equipamentos de "self-certifying random number generator (QRNG)".

Dados de contato: Formulário para contato: <https://quantum-dice.com/>

r) Quantum Motion Technologies: fundada em 2017 e com escritórios em Londres e em Oxford, a empresa desenvolve modelos para computadores quânticos, com vistas a atingir "high-density qubits".

Dados de contato: Email: webquery@quantummotion.tech Formulário para contato: <https://quantummotion.tech/about/>

s) QURECA: fundada em 2019 e sediada em Glasgow, a empresa oferece serviços de consultoria e capacitação no setor de tecnologias quânticas.

Dados de contato: Email: info@qureca.com Formulário para contato: <https://qureca.com/contact-us-qureca-quantum/>

t) Rahko: fundada em 2018 e sediada em Londres, é especializada em aplicação de tecnologias quânticas em aprendizagem de máquina, com enfoque na indústria farmacêutica; é parceira associada à IBM e à Microsoft.

Dados de contato: Formulário para contato: <https://rahko.ai/> Endereço: The Coalface Clifton House 46 Clifton Terrace Finsbury Park London N4 3JP

u) Riverlane: fundada em 2016 e localizada em Cambridge, a empresa é especializada no desenvolvimento de software para uso comercial de computadores quânticos. - Dados de contato: Email: team@riverlane.com Sítio eletrônico: <https://www.riverlane.com> Endereço: 1st Floor, St. Andrews House, 59 St. Andrews Street, Cambridge, CB2 3BZ

v) SpinUp AI: fundada em 2019, desenvolve software quântico para gerar algoritmos para mercados financeiros; conta com funcionários em Londres e em Zurique.

Dados de contato: Email: hello@spinup.ai Sítio eletrônico: <https://spinup.ai/>

w) TundraSystems Global LTD: fundada em 2014 e localizada em Cardiff, especializa-se no setor de computação quântica e seu objetivo é "develop the next frontier of computing solutions in a silicon photonics technology that address the limitations of semiconductors".

Dados de contato: Email: info@tsgl.xyz Telefone: +447961364051 Sítio eletrônico: <https://tsgl.xyz/> Endereço: FRJC+J9 Cardiff

y) Universal Quantum: fundada em 2019 e localizada em Brighton, trata-se de spin-off da Universidade de Sussex; desenvolve tecnologias de computação quântica.

Dados de contato: Email: quantum@universalquantum.com Sítio eletrônico: <https://universalquantum.com/>

12.8 Simuladores quânticos

Segue relação de projetos universitários ligados a simulação quântica:

a) Imperial College London <https://www.imperial.ac.uk/quantum-engineering-science-technology/research/quantum-simulations/#:~:text=Quantum%20Simulations%20range%20from%20the,used%20to%20study%20biomedical%20problems>

b) Universidade de Bristol <http://www.bristol.ac.uk/physics/research/quantum/engagement/qcloud/simulator/>

c) Consórcio Quantum Simulators for Fundamental Physics (universidades: St.Andrews, Cambridge, King's College London, Newcastle, Nottingham, University College London e Royal Holloway University of London) <http://qsimfp.org/>

d) Universidade de Sussex <http://www.sussex.ac.uk/physics/iqt/>

e) recordem-se também os trabalhos do Quantum Computing & Simulation Hub

12.9 Principais centros/institutos de pesquisa/redes de pesquisadores dedicados ao assunto

Seguem detalhes sobre i) os Quantum Technology Hubs; ii) os "Centres for Doctoral Training in Quantum Technology"; e iii) os Training and Skills Hubs in Quantum Systems Engineering.

i) Quantum Technology Hubs

Conforme antecipado em itens anteriores, um dos eixos do National Quantum Technologies Programme é uma rede nacional de Quantum Technology Hubs (UKNQTH), os quais têm por objetivo acelerar o desenvolvimento de novas tecnologias quânticas. Os centros localizam-se em Birmingham, Glasgow, Oxford e York.

Estabelecidos na primeira fase do National Quantum Technologies Programme (2014-2019), os quatro Quantum Technology Hubs receberam investimento inicial de 120 milhões de libras do governo britânico. Após a renovação do programa nacional para uma segunda fase (2019-2024), a rede recebeu 94 milhões de libras adicionais, como anotado no item (I).

Compilo informações sobre cada centro, bem como respectivos dados de contato:

a) UK Quantum Technology Hub Sensors and Timing

Liderado pela Universidade de Birmingham, o centro reúne especialistas das áreas de física e engenharia das Universidades de Birmingham, Glasgow, Imperial, Nottingham, Southampton, Strathclyde e Sussex, bem como representantes do National Physical Laboratory, do British Geological Survey e de mais de 70 parceiros industriais. Seu objetivo é desenvolver amplo leque de tecnologias de mensuração para usos comerciais (aplicações possíveis cobrem segmentos variados, como saúde, navegação e arqueologia). O centro também se dedica a capacitar especialistas da comunidade de tecnologia quântica do país. Conduz, atualmente, mais de 110 projetos, avaliados em 120 milhões de libras. Já submeteu 17 pedidos de patentes.

Dados de contato: Email: qthub@contacts.bham.ac.uk Telefone: 0121 414 8283

Endereço: School of Metallurgy and Materials University of Birmingham B15 2SE

Formulário para contato: <https://www.quantumsensors.org/contact-us> Sítio eletrônico: <https://www.quantumsensors.org/>

b) QUANTIC

Liderado pela Universidade de Glasgow, reúne mais de 120 especialistas daquela instituição e das universidades de Bristol, Edimburgo, Heriot Watt, Oxford e Strathclyde. O centro trabalha estreitamente com mais de 30 parceiros da indústria para desenvolver câmeras de ultra-sensibilidade ("single-photon visible and infrared cameras, single-pixel cameras, extreme time-resolution imaging, 3D profiling, hyper-spectral, ultra-low flux covert illumination, imaging beyond line-of-sight, and imaging of local gravity fields"). Câmeras quânticas permitem o aprimoramento substantivo de sistemas de imagens. Aplicações comerciais incluem, por exemplo, a visualização de vazamentos de gás. Além de parcerias de pesquisa com a indústria, o centro também oferece vagas de doutorado industrial, para capacitar a nova geração de engenheiros quânticos.

Dados de contato: Email: info@quantic.ac.uk Telefone: 0141 330 2338 Endereço: University of Glasgow QuantIC Innovation Space James Watt South University of Glasgow G12 8QQ

Sítio eletrônico: <https://quantic.ac.uk/preview/> Brochura informativa: <https://uknqt.ukri.org/files/quantic-flyer/>

c) Quantum Computing & Simulation Hub (QCS Hub)

Liderado pela Universidade de Oxford, o centro congrega, no total, 17 universidades britânicas e mais de 25 entidades adicionais dos setores público e privado. É o sucessor do Networked Quantum Information Technologies Hub (NQIT), que funcionou entre 2014 e 2019. O novo centro busca desenvolver e aprimorar os avanços científicos obtidos pelo NQIT, entre os quais um arcabouço de "photonicallly-networked ion trap architecture". Seu objetivo é acelerar a aquisição de conhecimento no setor de computação quântica, em apoio à emergente "economia da informação quântica" no Reino Unido. Dedicar-se tanto a pesquisa sobre "core technologies" quanto a estudos sobre potenciais aplicações industriais (descoberta de novos fármacos e materiais; aprendizagem de máquina aprimorada por tecnologia quântica; redução de emissões de carbono por otimização de recursos). O hub conta com um Partnership Resource Fund específico para colaboração com novos parceiros.

Dados de contato: Email: evert.geurtsen@physics.ox.ac.uk; celia.yeung@physics.ox.ac.uk; rupesh.srivastava@physics.ox.ac.uk. Endereço: Department of Physics University of Oxford Clarendon Laboratory Parks Road, Oxford OX1 3PU

Formulário para contato: <https://www.qcshub.org/contact> Sítio eletrônico: <https://www.qcshub.org/>

d) EPSRC Quantum Communications Hub

Liderado pela Universidade de York, trata-se de parceria entre 10 universidades do Reino Unido (além da líder, Bristol, Cambridge, Glasgow, Heriot Watt, Kent, Oxford, Queen's Belfast, Sheffield e Strathclyde), empresas e órgãos de governo. O objetivo é realizar pesquisas sobre o desenvolvimento e a comercialização de comunicações quânticas seguras. Confere particular atenção ao tema de "quantum key distribution" (QKD), tecnologia especialmente avançada para a distribuição segura de chaves de criptografia - e com potencial substantivo para comercialização. Entre os avanços já realizados pelo hub, sobressai a configuração da primeira Quantum Network do Reino Unido. Todas as tecnologias desenvolvidas têm foco em segurança e cobrem amplo conjunto de temas - "work on metrology, calibration and worldwide certification of standards for industry (particularly through partnership with NPL and ETSI); integration of quantum and post-quantum technologies; undertaking cryptographic and security analysis, vulnerability analysis and testing, combined with the development of countermeasures".

Dados de contato: Email: enquiries@quantumcommshub.net Telefone: +44 (0)1904 32 44 10/ 32 65 90 Endereço: Information Centre Market Square University of York Heslington York YO10 5DD

Sítio eletrônico: <https://www.quantumcommshub.net/>

ii) Centres for Doctoral Training in Quantum Technology

Outra frente do National Quantum Technologies Programme é o estabelecimento de Centres for Doctoral Training in Quantum Technology, cujo objetivo é capacitar novas gerações de pesquisadores. O eixo integra a categoria mais ampla de Centres for Doctoral Training estabelecidos pelo UK Research and Innovation.

Como se sabe, os referidos centros foram criados pelo governo britânico com vistas a prover treinamento de cientistas e engenheiros em temas estratégicos para a indústria doméstica. Estudantes recebem financiamento por período de quatro anos para

completar capacitação em nível de doutorado. Em 2018, edital público financiou 75 centros EPSRC, em valor total de 440 milhões de libras.

Entre os centros contemplados, dois se dedicam principalmente à capacitação em nível de doutorado no campo das tecnologias quânticas:

EPSRC Centre for Doctoral Training in Delivering Quantum Technologies (University College London) Sítio eletrônico: <https://www.ucl.ac.uk/quantum/study-here/cdt-deliverin-g-quantum-technologies>

EPSRC Centre for Doctoral Training in Quantum Engineering (University of Bristol) Sítio eletrônico: <http://www.bristol.ac.uk/quantum-engineering/>

Adicionalmente, vale salientar que edital prévio, de 2013, também financiou centro no Imperial College London, o qual já recebeu sua última turma de estudantes para o período contemplado:

EPSRC Centre for Doctoral Training in Controlled Quantum Dynamics (Imperial College London) Sítio eletrônico: <https://www.imperial.ac.uk/controlled-quantum-dynamics> .

iii) Training and Skills Hubs in Quantum Systems Engineering

Finalmente, há os Training and Skills Hubs in Quantum Systems Engineering. Consistem em núcleos dentro da rede de Quantum Technology Hubs, núcleos consagrados a capacitar e coordenar engenheiros em início de carreira no setor quântico. Buscam facilitar iniciativas de desenvolvimento profissional para pesquisadores engenheiros. Há três hubs nessa categoria:

Training and Skills Hub in Quantum Systems Engineering: Imperial Centre for Quantum Engineering and Science (QuEST) Sítio eletrônico: <https://www.imperial.ac.uk/quantum-engineering-science-technology>;

Training and Skills Hub in Quantum Systems Engineering: innovation in Quantum Business - Applications, Technology and Engineering (InQuBATE) Sítio eletrônico: <https://www.ucl.ac.uk/quantum/>;

Training and Skills Hub in Quantum Systems Engineering: The Quantum Enterprise Sítio eletrônico: <http://www.bristol.ac.uk/qtec/>.

12.10 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Não se identificaram políticas públicas específicas sobre insumos para a fabricação de circuitos quânticos.

A propósito, cabe assinalar que Oxford conta com empresa spin-out e grupo de pesquisa dedicados ao tema de circuitos quânticos, ambos capitaneados pelo Dr. Peter Leek, que atua no âmbito do Quantum Computing & Simulation Hub da universidade.

A empresa por ele fundada, a Oxford Quantum Circuits, desenvolveu a tecnologia patenteada Coaxmon, que possibilita a configuração de inovadora arquitetura 3D para circuitos supercondutores (item III). Detalhes e especificações técnicas do produto estão disponíveis em <https://oxfordquantumcircuits.com/technology>.

O grupo de pesquisa, por sua vez, chama-se Leek Lab. Desenvolve linhas de pesquisa dedicadas à física de circuitos supercondutores e a sua aplicação na computação quântica ("quantum computing with superconducting circuits; circuit quantum electrodynamics; hybrid quantum circuits"). Informações sobre a equipe e os estudos conduzidos estão disponíveis em <https://leeklab.org/research/>.

13. RÚSSIA

As políticas de governo referentes a tecnologias quânticas inserem-se no âmbito do Programa Nacional de Economia Digital, mais especificamente no Projeto Federal de Tecnologias Digitais, que contém o "mapa do caminho para o desenvolvimento de tecnologia digital do tipo aberto tecnologias quânticas". Nesse sentido, o Projeto Federal tem como objetivo de médio e longo prazo a obtenção de resultados científicos, tecnológicos e práticos em nível mundial para a Rússia nos segmentos de (a) computação quântica; (b) comunicações quânticas; e (c) sensores quânticos. O "mapa do caminho", com prazo de execução para o período entre 2019 e 2024, tem orçamento estimado em RUB 51,1 bilhões (aproximadamente USD 709,22 milhões, de acordo com a taxa de câmbio atual).

Em linhas gerais, os principais objetivos do "Economia Digital" são: (1) aumento progressivo dos investimentos em economia digital até 5,1% do PIB até 2024; (2) criação de 50 centros de formação de especialistas em economia digital até 2023; (3) matrícula de mais de 120 mil estudantes do ensino superior na área de tecnologia da informação; (4) programas de alfabetização digital para mais de 10 milhões de pessoas; (5) apoio financeiro a mais de 1.300 projetos técnico-científicos na área digital; (6) apoio financeiro a mais de 1.400 instituições de ensino com os melhores resultados em matemática, informática e tecnologia; (7) apoio financeiro a 33.000 alunos com demonstrada capacidade em matemática, informática e tecnologia; (8) apoio financeiro a mais de 200 instituições de ensino básico e médio para estudos avançados em matemática e informática; (9) aulas especializadas de matemática, informática e tecnologias digitais para mais de 130.000 crianças em colônias de férias; e (10) criação de mais de 70 complexos educacionais digitais com simuladores e laboratórios virtuais.

Para além do Programa "Economia Digital", o governo russo aprovou, em outubro de 2020, lista de setores relacionados à ciência, tecnologia e inovação que se beneficiariam de regimes jurídicos simplificados ("sandbox"). Foram incluídos na relação os segmentos de computação quântica, comunicações quânticas e sensores quânticos.

Como é de conhecimento, as políticas do governo russo para o setor de ciência, tecnologia e inovação pautam-se pela constante busca, por parte de Moscou, de autonomia tecnológica e de liderança em determinados segmentos, como na pesquisa e desenvolvimento de inteligência artificial. Pode-se afirmar que estas premissas permanecem válidas para a área de tecnologias quânticas.

Seguem, abaixo, informações sobre as políticas governamentais nos três setores indicados

A) Computação Quântica

O principal mecanismo para o desenvolvimento da área de comunicações quânticas é o acordo de intenções para o desenvolvimento do setor de altas tecnologias de computação quântica, celebrado em 10/7/2019 entre o Governo da Federação da Rússia e a Companhia Estatal de Energia Nuclear (Rosatom). A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de computação quântica está vinculado ao "mapa do caminho" para este segmento, elaborado entre julho e dezembro de 2019, cujo cumprimento está sob responsabilidade da Rosatom.

Nesse sentido, foi criada, sob a égide da Rosatom, a joint-venture Kvant Ltda, que deverá coordenar as ações das principais organizações russas participantes da iniciativa e gerenciar o orçamento dos projetos do setor, estimado em RUB 23,7 bilhões (cerca de USD 329,16 milhões) até 2024.

Entre os principais objetivos do "roadmap" no setor de computação quântica estão: (i) criação, até 2024, de computador quântico nacional de 100 qubits; (ii) o desenvolvimento de unidades quânticas de processamento de quatro tipos diferentes, com base em supercondutores, átomos neutros, chips fotônicos e íons em receptor); e (iii) a criação de plataforma em nuvem de acesso para computação quântica.

O projeto de criação do computador quântico nacional foi lançado pela Rosatom em novembro de 2019 e envolve os principais centros científicos do país especializados em estudos de física quântica e no desenvolvimento de tecnologias quânticas. Nesse sentido, foi criado, em novembro de 2020, o Laboratório Quântico Nacional, que congrega universidades, centros científicos, empresas tecnológicas, startups e organizações financeiras, entre os quais se destacam: (i) a joint-venture Kvant; (ii) Universidade Higher School of Economics; (iii) Universidade Nacional de Ciência e Tecnologia (MISiS); (iv) Instituto de Física e Tecnologia e Moscou (MIPT); (v) Instituto de Física P.N. Lebedev, vinculado à Academia de Ciências da Rússia; (vi) Centro Quântico Russo; e (vii) Fundação Skolkovo.

Os membros do Centro Quântico Russo, com sede no Parque Tecnológico Skolkovo, concentram-se na resolução de questões como a geração e atualização de infraestrutura e capacitação dos quadros dedicados ao setor de computação quântica. Entre as soluções cuja implementação está em curso, merece destaque a construção de centro de nano fabricação, com área de 2.000 m², e de centro de laboratórios, com instalações da ordem de 3.500 m², no território do Parque Tecnológico Skolkovo, em Moscou. Entre 12 e 16/7, o Centro Quântico Russo realizará a VI International Conference on Quantum Technologies, com participação on-line gratuita mediante inscrições na página eletrônica <https://conference.rqc.ru/>.

Outra iniciativa dentro do projeto de desenvolvimento de computação quântica foi a instituição, pela Rosatom, da Univesidade de Ciência e Tecnologia Sirius, baseada em Sochi.

Entre os principais resultados alcançados pelo governo russo na área de computação quântica constam, até o momento: (i) criação de sistemas de 1-2 qubit, para posterior dimensionamento; (ii) desenvolvimento de diversos projetos vinculados ao desenvolvimento do computador quântico (10 dos quais já foram periciados por cientistas de países como Estados Unidos, Alemanha, França, Dinamarca, Holanda, Suíça, Espanha, Cingapura e Israel); (iii) lançamento de programas especializados de pós-graduação e mestrado nas Universidades Lomonossov, em Moscou; Universidade Nacional de Pesquisa Nuclear (MEPhI) e Instituto de Física e Tecnologia e Moscou (MIPT); e (iv) início do programa de divulgação de tecnologias quânticas entre estudantes escolares.

O governo russo estima que, até 2024, deverão estar disponíveis os primeiros dispositivos quânticos de informática nacionais. Atualmente, funcionam, na Rússia, protótipos de computadores quânticos de 2-10 qubits e simuladores quânticos de 10-20 qubits. No final de abril do corrente, o Laboratório Quântico Nacional informou sobre a criação de protótipo de computador quântico com plataforma de 20 íons. Em maio, cientistas do Instituto de Física e Tecnologia de Moscou (MIPT) utilizaram, pela primeira vez, simulador quântico formado por 5 qubits supercondutivos desenvolvido na referida instituição.

Segue, abaixo, lista e contatos das principais instituições no desenvolvimento de computação quântica na Rússia:

Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Moscou) Página eletrônica: <http://www.vniia.ru/eng/about/about.php> E-mail: vniiia@vniiia.ru;

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) Página eletrônica: <https://www.iae.nsk.su/en/> E-mail: iae@iae.nsk.su , office@iae.nsk.su;

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) (Nizhny Novgorod) Página eletrônica: <https://ipfran.ru/> E-mail: dir@ipfran.ru;

Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences (ISAN) (Moscou) Página eletrônica: <https://isan.troitsk.ru/en/> e-mail: isan@isan.troitsk.ru;

Landau Institute for Theoretical Physics of Russian Academy of Sciences (região de Moscou) Página eletrônica: <https://www.itp.ac.ru/en/> Email: office@itp.ac.ru;

The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISP SB RAS) (Novosibirsk) Página eletrônica: <https://www.isp.nsc.ru/en/> E-mail: ifp@isp.nsc.ru;

P.L. Kapitza Institute for Physical Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscou) Página eletrônica: <https://kapitza.ras.ru/index.php?cont=index&lang=en> E-mail: office@kapitza.ras.ru;

The Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences (região de Moscou) <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/en/> E-mail: adm@issp.ac.ru;

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KAI Página eletrônica: <https://kai.ru/web/en> E-mail: kai@kai.ru;

The Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute (KPhTI) Página eletrônica: <http://www.kfti.knc.ru/eng/> e-mail: phys-tech@kfti.knc.ru;

Kazan Federal University Página eletrônica: <https://eng.kpfu.ru/> Email: inter@kpfu.ru;

Moscow Pedagogical State University Página eletrônica: <http://en.mpgu.su/> E-mail: ums@mpgu.su;

Bauman Moscow State Technical University <https://bmstu.ru/en> E-mail: bauman@bmstu.ru;

The Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) Página eletrônica: <https://mipt.ru/english/> E-mail: info@mipt.ru;

The National University of Science and Technology "MISiS" (Moscou) Página eletrônica: <https://en.misis.ru/> E-mail: welcome@misis.ru;

Novosibirsk State Technical University Página eletrônica: <https://en.nstu.ru/> E-mail: is@nstu.ru;

Russian Quantum Center (RQC) (Moscou Parque Tecnológico Skolkovo) Página eletrônica: <https://www.rqc.ru/> E-mail: mail@rqc.ru;

The Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech - Moscou) Página eletrônica: <https://www.skoltech.ru/en> Email: inbox@skoltech.ru;

Universidade de São Petersburgo de Tecnologia da Informação, Mecânica e Ótica (ITMO University) Página eletrônica: <https://en.itmo.ru/en/> E-mails: international@itmo.ru; tpbanderova@itmo.ru;

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscou) Página eletrônica: <https://lebedev.ru/ru> E-mail: office@lebedev.ru;

The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (São Petersburgo) Página eletrônica: http://www.ioffe.ru/index_en.html E-mail: post@mail.ioffe.ru;

The K.A. Valiev Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences (Moscou) Página eletrônica: <http://www.ftian.ru/> E-mail: ftian.director@bk.ru; lukichev@ftian.ru;

MSU Quantum Technology Centre (Universidades Lomonossov, em Moscou) Página eletrônica: <https://quantum.msu.ru/en> E-mail: contact@quantum.msu.ru.

B) Comunicações quânticas

A exemplo do observado no setor de computação quântica, a área de comunicações quânticas dispõe de "roadmap" para o seu desenvolvimento. O documento foi concluído em setembro de 2020, em conformidade com memorando celebrado entre o governo russo e a companhia estatal "Ferrovias Russas" (RZD). O orçamento estimado para iniciativas no segmento de comunicações quânticas é de RUB 16,7 bilhões de rublos (aproximadamente USD 231,94 milhões), dos quais cerca de 75% deverão ser destinados para o financiamento da construção de redes quânticas.

Entre os principais objetivos do "mapa do caminho" para o setor está (i) a realização, até 2024, de 120 iniciativas e projetos relacionados ao desenvolvimento das tecnologias de comunicação por fibras óticas, atmosféricas e via satélite; (ii) criação de redes quânticas comerciais de comunicação com os respectivos equipamentos adequados; (iii) desenvolvimento de dispositivos voltados para o segmento; (iv) desenvolvimento da Internet quântica das coisas; e (v) formação de mercado e ecossistema da educação nacional voltados para o setor. Em linhas gerais, o projeto de desenvolvimento de comunicações quânticas tem duas vertentes: (a) a criação de sistema de cômputo quântico com base na Internet das coisas, que permitirá o deslocamento seguro de trens não pilotados; e (b) a adoção de redes quânticas para a transmissão segura de dados.

Um dos projetos mais importantes, em fase final de conclusão, é a construção da rede quântica Moscou-São Petersburgo, com cerca de 800km de extensão, concluída pela TransTeleCom, empresa afiliada da RZD, em abril do corrente. Prevê-se que a linha entrará em funcionamento no segundo trimestre de 2021, o que beneficiará atores governamentais, financeiros e de segurança pública.

Seguem, abaixo, os contatos das principais instituições russas no setor de comunicações quânticas:

Fundação de Pesquisa SCONTEL (Moscou) Página eletrônica: <https://www.scontel.ru/>
Email: scontel@scontel.ru;

The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISP SB RAS) (Novosibirsk) Página eletrônica: <https://www.isp.nsc.ru/en/> E-mail: ifp@isp.nsc.ru;

Moscow Pedagogical State University Página eletrônica: <http://en.mpgu.su/> E-mail: ums@mpgu.su;

Rostelecom PJSC (companhia do setor de telecomunicações, baseada em Moscou) Página eletrônica: <https://www.company.rt.ru/en/> E-mail: rostelecom@rt.ru;

Russian Quantum Center, em parceria com as seguintes empresas: - QRATE: <https://goqrates.com/en> , - S-Terra: <https://www.s-terra.ru/company/about-s-terra-csp/> , - CryptoPro: <https://cryptopro.com/> , - Amicon: <https://www.amicon.ru/> , - Security Code: <https://www.securitycode.ru/>;

The Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences (em Moscou) Página eletrônica: <http://www.mi-ras.ru/index.php?l=1>;

Universidade de São Petersburgo de Tecnologia da Informação, Mecânica e Ótica (ITMO University), em parceria com as seguintes empresas: - Smarts: https://smarts.ru/ru/home_en/ - Quanttelecom LLC: <http://quanttelecom.ru/en/> - Quantum Center of Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KAI: <https://kai.ru/web/en/quantum-center/>;

MSU Quantum Technology Centre (Universidades Lomonossov, em Moscou), em parceria com as seguintes empresas: - Infotecs: <https://infotecs.ru/> - Cryptosoft: <https://cryptosoft.ru/>;

C) Sensores quânticos

O "roadmap" referente à área de sensores quânticos encontra-se em processo de elaboração e estará sob responsabilidade da Rostec, corporação estatal russa que tem como principal tarefa o desenvolvimento, a fabricação e a exportação de bens manufaturados de alta tecnologia de aplicação civil e militar.

O orçamento inicialmente previsto para a criação de sensores quânticos foi estimado em RUB 18,4 bilhões (aproximadamente USD 255,55 milhões). Todavia, existe a possibilidade de corte dos recursos da ordem de RUB 7 bilhões (USD 97,22 milhões).

Seguem, abaixo, as principais instituições russas relacionadas ao setor de sensores quânticos:

JSC ACADEMICIAN M.F. RESHETNEV Information Satellite Systems (região de Krasnoyarsk) Página eletrônica: <http://www.iss-reshetnev.com/> E-mail: office@iss-reshetnev.ru;

Russian Institute of Radionavigation and Time RIRT (São Petersburgo) Página eletrônica: <https://irt.ru/en/> E-mail: office@irt.ru;

The Federal State Unitary Enterprise «Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering» (FSUE «VNIIFTRI») (região de Moscou) Página eletrônica: <https://www.vniiftri.ru/en/> E-mail: office@vniiftri.ru;

VREMYA-CH JSC (Nizhny Novgorod) Página eletrônica: <https://vremya-ch.com/english/news/index.html> E-mail: admin@vremya-ch.com;

Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) Página eletrônica: <http://www.laser.nsc.ru/> E-mail: info@laser.nsc.ru;

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences - IAP RAS (Nizhny Novgorod) Página eletrônica: <https://ipfran.ru/> E-mail: dir@ipfran.ru;

Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences - ISAN (Moscou) Página eletrônica: <https://isan.troitsk.ru/en/> E-mail: isan@isan.troitsk.ru;

The Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences (região de Moscou) Página eletrônica: <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/en/> E-mail: adm@issp.ac.ru;

Moscow State University Página eletrônica: <https://www.msu.ru/> E-mail: info@rector.msu.ru;

The Moscow Institute of Physics and Technology MIPT Página eletrônica: <https://mipt.ru/english/> E-mail: info@mipt.ru;

The National University of Science and Technology - MISiS (Moscou) Página eletrônica: <https://en.misis.ru/> E-mail: welcome@misis.ru;

The National Research Nuclear University - MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Página eletrônica: <https://eng.mephi.ru/> E-mail: info@mephi.ru;

The Joint Institute for Nuclear Research (organização governamental intergovernamental localizada na região de Moscou) Página eletrônica: <http://www.jinr.ru/main-en/> E-mail: post@jinr.ru;

The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (São Petersburgo) Página eletrônica: http://www.ioffe.ru/index_en.html E-mail: post@mail.ioffe.ru;

Russian Quantum Center - RQC (Moscow, Skolkovo) Página eletrônica: <https://www.rqc.ru/> E-mail: mail@rqc.ru;

ITMO University (São Petersburgo) Página eletrônica: <https://en.itmo.ru/en/> E-mail: international@itmo.ru; tpbanderova@itmo.ru;

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscou) Página eletrônica: <https://lebedev.ru/ru> E-mail: office@lebedev.ru;

MSU Quantum Technology Centre Página eletrônica: <https://quantum.msu.ru/en> E-mail: contact@quantum.msu.ru;

D) Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Segue, abaixo, relação de startups e empresas de referência no desenvolvimento de tecnologias quânticas na Rússia:

QRate Área de atuação: comunicações quânticas Página eletrônica: <https://goqr.com/em>;

Quanttelecom LLC Área de atuação: sistemas de criptografia quântica Página eletrônica: <http://quanttelecom.ru/en/>;

Dephan Área de atuação: desenvolvimento de fotodetectores de última geração Página eletrônica: <https://www.dephan.com/about/>;

FemtoVision Área de atuação: sistemas de bombeamento de diodo laser Página eletrônica: <https://en.femtovision.ru/>;

QApp Área de atuação: soluções de segurança cibernética com base em algoritmos resistentes ao quantum Página eletrônica: <https://qapp.tech/>;

QSpace Technologies Área de atuação: sistemas de criptografia quântica via satélite
Página eletrônica: <http://www.goqspace.com/>.

E) Simuladores quânticos

Atualmente, na Rússia, pesquisas relacionadas ao síncrotron são realizadas no Complexo Kurchatov para Pesquisas de Síncrotron e Nêutron ("Kurchatov Complex for Synchrotron and Neutron Investigations" - KISI-Kurchatov; página eletrônica: <http://kcsni.nrcki.ru/pages/en/source/index.shtml>), em Moscou; e no Centro da Sibéria para Síncrotron e Radiação Terahertz ("The Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center" SSTRC; página eletrônica: <https://ssrc.biouml.org/#!main>), vinculado ao Instituto Budker de Física Nuclear, em Novosibirsk.

Em março do corrente, o governo russo aprovou programa nacional para o desenvolvimento de infraestrutura e pesquisa de síncrotrons e nêutrons até 2027. A iniciativa prevê a criação de instalações científicas de alto nível, com destaque para o Centro de Uso Coletivo Skif, em Novosibirsk, que utilizará fonte de luz síncrotron de geração 4+; o Centro Internacional de Pesquisa de Nêutrons com base em reator de alto fluxo PIK, em Gatchina, na região de Leningrado; e o protótipo de fonte de nêutrons pulsados com base em reação do tipo espalhamento-evaporação, em Protvino, na região de Moscou.

Outras iniciativas previstas no âmbito do programa são a modernização do Centro Nacional de Pesquisa Instituto Kurchatov, a principal instituição científica russa no tema; e a instalação de base da classe de "megaciências" na ilha Rusky, em Vladivostok.

F) Considerações Finais

A Rússia dispõe, tradicionalmente, de mão de obra extremamente qualificada no setor de ciência, tecnologia e inovação, formada, essencialmente, em centros especializados em matemática, física e ciências localizados em seu vasto território. Apesar de a formação de quadros capacitados constituir pedra fundamental do sistema de inovação local, o governo russo ainda enfrenta certas dificuldades de manter seus cientistas e pesquisadores no país, não obstante programas de repatriação que permitiram o retorno de parcela da mão de obra que havia deixado o país.

Ademais, o sistema de inovação russo depende, fundamentalmente, conforme demonstram as políticas voltadas para o desenvolvimento de tecnologias quânticas, pautadas sobretudo no papel indutor das empresas estatais (Rosatom, RZD e Rostec), de políticas e recursos públicos. As empresas privadas russas têm papel de pouco relevo em matéria de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e demandam, para tal, atuação do Estado como principal parceiro e fonte de recursos. A título exemplificativo, vale recordar que, na formação de consórcio público-privado voltado para o desenvolvimento de inteligência artificial na Rússia, alguns dos principais participantes são o Sverbank e o Fundo Russo de Investimento Direto (RDIF).

14. SINGAPURA

14.1 Estratégias/políticas nacionais

Os esforços desenvolvidos em Singapura no campo de computação e comunicação quânticas são concentrados no "Centre for Quantum Technologies" (CQT) da Universidade Nacional de Singapura. No âmbito do denominado "Quantum Engineering Programme" (QEP), pesquisadores em ciência quântica e engenharia de sistemas são colocados em contato com o setor privado. O QEP, lançado em 2018, recebe apoio da Fundação Nacional de Pesquisa ("National Research Foundation") e também é sediado na Universidade Nacional de Singapura.

14.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

O "Centre for Quantum Technologies" (CQT) é um centro de pesquisa de excelência, fundado com apoio da "National Research Foundation" e do Ministério da Educação (MOE). O CQT opera dentro da sede da Universidade Nacional de Singapura (NUS) e conta com a colaboração de cientistas e pesquisadores da Nanyang Technological University (NTU), a outra grande universidade pública do país.

14.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

O CQT reúne físicos, cientistas de computação e engenheiros com o objetivo de desenvolver pesquisas básicas em física quântica e construir dispositivos baseados em fenômenos quânticos. A pesquisa realizada no CQT abrange comunicação e segurança quânticas, computação e simulação quântica, e sensoriamento quântico e metrologia, apoiada pelo desenvolvimento de instrumentos avançados. Os pesquisadores do centro também exploram possíveis novas aplicações para a ciência quântica básica. Aspectos pormenorizados das pesquisas desenvolvidas no CQT podem ser acessados na página <<https://www.quantumlah.org/research/area.php>>.

14.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

No campo da comunicação quântica, o CQT tem especial interesse em iniciativas de proteção de dados. O centro detém experiência em distribuição de chave quântica (QKD) e criptografia pós-quântica, duas abordagens que têm como propósito estabelecer comunicação segura. O CQT abriga pesquisas em procedimentos para envio de chaves quânticas via fibra e satélite, de forma a oferecer criptografia resistente a "hacks" computacionais. São também conduzidas iniciativas para tornar os esquemas de criptografia matemática seguros contra futuros computadores quânticos. Informações pormenorizadas encontram-se na página <<https://www.quantumlah.org/research/area/quantum-communication-security>>.

14.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

O CQT divulgou em seu relatório anual de 2020 que o total de recursos alocados ao centro entre 2017 e 2022 somaria SGD 100 milhões (cerca de USD 74 milhões). Somente em 2020, o centro reportou dispêndios de SGD 23,75 milhões (cerca de USD 17,5 milhões). O relatório informa que a maior parte dos recursos para pesquisa e desenvolvimento provém da NUS, instituição que abriga o centro, e da NTU, que cede pesquisadores seus ao CQT. Adicionalmente, bolsas de pesquisa são concedidas por

diferentes instituições, como o Ministério da Educação, a "National Research Foundation" e empresas do setor privado.

14.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas ao tema

Singapura possui um próspero ecossistema dedicado à tecnologia quântica. Existem mais de 40 grupos de pesquisa, 26 dos quais afiliados à CQT, além de diferentes startups e agências. Dentre as startups originadas dentro do CQT, destacam-se as seguintes:

Atomionics A Atomionics constrói sistemas de detecção baseados em interferometria atômica para navegação e exploração. Seu objetivo é tornar os sistemas de navegação mais confiáveis e precisos, permitindo-lhes funcionar em qualquer ambiente - incluindo subaquático, subterrâneo e outras áreas de difícil alcance por GPS. Os sistemas de exploração atômica permitem localizar com precisão reservas de hidrocarbonetos e minerais. <<http://www.atomionics.com>>;

Entropica Labs A Entropica prepara as bases para a computação quântica. Desde o seu início, a empresa tem colaborado com os principais fabricantes de hardware quântico para fazer avançar a tecnologia e explorar domínios de aplicação inovadores para computação quântica. O foco atual da Entropica é desenvolver ferramentas de "software" para permitir o aprendizado e otimização de máquina quântica escalonável, útil e acessível. <<https://www.entropicalabs.com>>;

Horizon Quantum Computing A Horizon desenvolve uma nova geração de ferramentas de programação para simplificar e agilizar o processo de desenvolvimento de software para computadores quânticos. Ao eliminar a necessidade de experiência anterior em computação quântica, as ferramentas da Horizon pretendem democratizar o desenvolvimento de aplicativos aprimorados por quantum, tornando o poder da computação quântica acessível a todos os desenvolvedores de software. <<http://horizonquantum.com>>;

S-Fifteen Instruments A S-Fifteen Instruments foi desmembrada da CQT para comercializar tecnologias quânticas proprietárias desenvolvidas ao longo de décadas de pesquisa. A empresa oferece equipamentos para controle quântico, bem como dispositivos de hardware para soluções quânticas seguras voltadas a atender clientes que necessitem confiança e transparência para seus requisitos criptográficos. <<https://www.s-fifteen.com>>;

SpeQtral A SpeQtral constrói sistemas de comunicação quântica baseados no espaço, enraizados em tecnologias avançadas desenvolvidas no CQT. A tecnologia permite criptografia para proteger as comunicações com segurança de encaminhamento. A equipe de SpeQtral realizou uma demonstração bem-sucedida em órbita de uma fonte de luz quântica em um cubo. <www.speqtral.space>;

Quantum SG A comunidade de pesquisa se reuniu em uma iniciativa de base chamada "Quantum SG", que visa construir uma rede de conhecimento em ciência e tecnologia quânticas. O grupo representa a comunidade acadêmica em todos os institutos de ensino superior e organizações de pesquisa de Singapura. <<https://quantumsg.org/>>;

14.7 Simuladores quânticos

Há diversos relatos de atuação com simulação quântica em laboratório no CQT. Em determinada linha de pesquisa, um grupo estuda o controle de átomos e moléculas no nível de partícula única e estado-quântico único. Para tanto, o grupo desenvolve ferramentas para controlar com precisão o movimento, os estados quânticos internos e o arranjo espacial de partículas individuais. Esses versáteis "blocos quânticos de lego" são, por sua vez, usados para simulação quântica, permitindo estudar materiais quânticos em laboratório, e preparar as bases para a construção computadores quânticos escaláveis.

14.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto

Os principais centros dedicados ao tema são o Centre for Quantum Technologies (contato <https://www.quantumlah.org>) e o grupo Quantum SG Contato <https://quantumsg.org/>).

14.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Em 2019, equipe de pesquisadores da Nanyang Technological University logrou desenvolver um chip quântico com dimensão de apenas 3 milímetros, ou seja, mil vezes menor do que outros componentes do gênero. Artigo acadêmico publicado pela equipe informa que o microchip foi construído com silicone, o que o torna compatível com circuitos integrados convencionais. A pesquisa, que se estendeu ao longo de dois anos, dedicou atenção especial a garantir proteção contra pequenas flutuações de temperatura, as quais poderiam alterar o funcionamento das quias de onda miniaturizadas do microchip. Em março de 2020, a Universidade Nacional de Singapura estabeleceu contrato de colaboração com a empresa IBM, de duração de três anos, para a conversão de resultados de pesquisa em ciência quântica em produtos comercializáveis. A ênfase da política nacional para o setor concentra-se, no entanto, no desenvolvimento de novos softwares de tecnologia quântica.

15. TAIWAN

15.1 Estratégias/políticas nacionais

Para fins de acelerar o desenvolvimento de tecnologia quântica de Taiwan, foi estabelecida uma equipe nacional interministerial formada pelos 'ministérios' da Ciência e Tecnologia, da Economia, a Academia Sinica, e outras entidades responsáveis pela elaboração de projetos de P&D da tecnologia quântica na ilha. As novas tecnologias serão empregadas para desenvolver aplicativos em áreas que abrangem segurança cibernética, finanças, defesa nacional e outras em definição.

15.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

As pesquisas nessa área têm sido iniciadas e patrocinadas pelo governo de Taiwan, com a participação de universidades e de institutos de pesquisa no desenvolvimento de software e hardware para tecnologia quântica.

Em 2018, o 'ministério' da Ciência e Tecnologia (MOST, na sigla em inglês) lançou o Projeto de Computador Quântico ("Quantum Computer Project"), por meio do qual são concedidos subsídios para universidades e instituições locais, dentre as quais se destacam:

- a) "National Tsing Hsu University", para desenvolver um Centro da Pesquisa em Tecnologia Quântica, em cooperação com o Ministério da Educação;
- b) "National Taiwan University" para estabelecer Centro de Computador Quântico IBM-NTU;
- c) "National Taiwan University" (NTU), "National Central University" (NCU), "National Tsing Hua University" (NTHU) e "National Cheng Kung University" (NCKU) para formar três equipes escolares especializadas no setor;
- d) "Taiwan Semiconductor Research Institute", para o desenvolvimento de "silicon-based quantum computing sub-system" e integração de circuitos de computador quânticos em sistemas.

15.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Destaca-se pesquisa em tecnologia de "software" e "hardware" para computador quântico e comunicação quântica. Os focos de pesquisa financiado com recursos públicos são dispositivos quânticos, computadores, algoritmos e tecnologias de comunicação quântica.

15.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

O Centro da Pesquisa em Tecnologia Quântica da NTHU realizou pesquisas multifacetadas sobre tecnologia quântica, sendo a principal a comunicação quântica. Em setembro de 2019, a equipe concluiu a primeira criptografia de comunicação quântica externa de Taiwan: a fonte de fótons criptografada alcançou brilho 10 vezes maior do que fonte de luz inicial, resultando em rápido índice de encriptação e em maior distância de transmissão, fatores capazes de fazer face a eventuais ataques de "hackers" quânticos.

15.5 Investimentos já realizados e previsão de investimentos para os próximos anos

Em dezembro de 2020, o 'governo' de Taiwan anunciou investimento de US\$ 282 milhões para desenvolvimento de tecnologia quântica nos cinco anos subsequentes. O 'governo' incorporará verbas oficiais e somando recursos da indústria e academia privada, construirá uma nova base tecnológica no Campus Sul da renomada Academia Sinica, localizado em Tainan. A infraestrutura relevante está planejada para ser erguida entre 2022 e 2024, incluindo a construção de um laboratório para experimentos.

15.6 Startups/empresas de base tecnológica consolidadas dedicadas as tema

No momento, existem poucas empresas taiwanesas que investem na P&D de tecnologia quântica. Não foi possível identificar startups/empresas focalizadas nessa tecnologia.

15.7 Simuladores quânticos

Estão sendo instalados o "IBM-NTU Quantum Computer Center" da National Taiwan University, e o "Quantum Cloud Computing Center", da National Cheng Kung University. Essas instalações disponibilizarão simuladores de computador quântico para uso de acadêmicos taiwaneses.

15.8 Principais centros/institutos de pesquisas/redes de pesquisadores dedicadas ao assunto

- a) National Taiwan University IBM Q Hub at National Taiwan University <https://quantum.ntu.edu.tw/en.html>
- b) National Central University <https://www.ncu.edu.tw>
- c) National Tsing Hua University Center for Quantum Technology <https://cqt.site.nthu.edu.tw>
- d) National Cheng Kung University Center for Quantum Frontier of Science and Technology <https://qfort.ncku.edu.tw>
- e) Academia Sinica Quantum Electronics Laboratory <https://www.phys.sinica.edu.tw/~quela>

15.9 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Atualmente, não há políticas ou regulamentos específicos para a fabricação de circuitos quânticos. A P&D e a fabricação de circuitos relacionados a computadores quânticos estão cobertas no plano da equipe nacional interministerial.

O 'Ministério' da Ciência e Tecnologia definiu sete metas para desenvolvimento da tecnologia quântica na ilha:

- a) Integrar força de pesquisa e desenvolvimento, desenvolver tecnologias-chave para computadores quânticos e hardware de comunicação quântica e estabelecer a base industrial da tecnologia quântica de Taiwan;
- b) Estabelecer uma plataforma conjunta de pesquisa e desenvolvimento que inclua teoria quântica; tecnologia de software para computação quântica; criptografia quântica para segurança da informação, em finanças, indústria e defesa nacional;
- c) Cooperação interacadêmica e de unidades de pesquisa, incluindo a Academia Sinica, faculdades/universidades e a indústria para, trabalhando em conjunto, construir instalações de tecnologia quântica de ponta;
- d) Combinar os pontos fortes da indústria para pesquisar e desenvolver componentes e módulos da tecnologia quântica, bem como construir sistema de resfriamento digital;
- e) Estabelecer uma plataforma de intercâmbio e cooperação industrial, promover o intercâmbio de informações entre academia e indústria e estabelecer uma ponte de cooperação entre entidades acadêmicas, empresas e o 'governo';
- f) Incentivar a formação de técnicos em P&D de tecnologia de hardware e software, em resposta às mudanças trazidas pela geração quântica em Taiwan;
- g) Promover a popularização da educação em ciências quânticas, particularmente junto ao público jovem, encorajando os mais novos a se dedicarem a investir em pesquisas neste setor promissor.

16. UNIÃO EUROPEIA

16.1 Estratégias/políticas

O ano de 2016 foi um importante ponto de inflexão para as iniciativas europeias na área de tecnologias quânticas, que, até então, eram marcadas pela fragmentação. Isso não impediu que cerca de EUR 550 milhões tivessem sido investidos nesse domínio, no curso dos cerca de 20 anos precedentes. Tais investimentos foram aplicados, sobretudo, por meio dos programas-marco comunitários de pesquisa e inovação dedicados a "Future and Emerging Technologies" (FET), que registrou projetos nessa área, desde a quarta edição do programa (conhecida como `framework program 4`, ou simplesmente pela sigla FP4), levada a cabo entre 1994 e 1998. Recursos também foram canalizados às ciências quânticas, até aquele momento, no contexto de convocatórias do "European Research Council" (ERC) e das "Marie Skłodowska-Curie Actions" (MSCA), que beneficiaram pesquisadores individuais. Os projetos de pesquisa cobriam uma ampla variedade de tecnologias quânticas, incluindo novos sensores, distribuição de chave quântica (QKD) e "qubits". Em paralelo, um conjunto de ações de coordenação e apoio contribuíram para estabelecer, ao longo do tempo, uma comunidade de pesquisa europeia de "classe mundial" em tecnologias quânticas.

O lançamento de uma estratégia comum nesse domínio foi advogada formalmente, em abril de 2016, em um documento de trabalho da Comissão Europeia ("Commission Staff Working Document on Quantum Technologies" - SWD (2016) 107), anexo a uma "comunicação" da Comissão, cujo principal foco era a chamada "European Cloud Initiative" (COM(2016) 178). Confrontada com o avanço de outros países nessa área - com destaque para a China, o Japão e os Estados Unidos -, a Comissão Europeia já vinha organizando uma série de consultas públicas abertas, a partir de 2015, que redundaram no lançamento, em maio de 2016, do "Quantum Manifesto" (<https://bit.ly/2TPxGWE>), durante a "Quantum Europe Conference" (Delft, 17-18/5/2016), que recomenda a adoção de uma série de medidas coordenadas para que os estados membros da União Europeia assumam a liderança da "segunda revolução quântica". O documento foi firmado por mais de 3.500 interessados, a maioria oriunda da academia ou da indústria.

Na mesma oportunidade, o então comissário europeu para a Economia e Sociedade Digital, Günther H. Oettinger, anunciou que a Comissão estava preparando uma "Quantum Technologies Flagship", a ser viabilizada em prazo de cerca de dois anos, com orçamento previsto de EUR 1 bilhão de euros (financiada, inicialmente, com recursos do programa Horizonte 2020), a serem investidos no prazo de 10 anos. Fiel à proposta original, a Comissão apresentou os contornos da iniciativa, em outubro de 2018, após período de intensos esforços preparatórios, cujo principal resultado foi a elaboração da primeira versão da "Strategic Research Agenda", que preconizava estar a visão de longo prazo da iniciativa orientada à conformação de uma "Quantum Web", constituída de:

"(...) Quantum computers, simulators and sensors interconnected via quantum networks distributing information and quantum resources such as coherence and entanglement. On the corresponding time scale - which is in fact longer than 10 years - the performance

increase resulting from Quantum Technologies will yield unprecedented computing power, guarantee data privacy and communication security, and provide ultra-high precision synchronization and measurements for a range of applications available to everyone locally and in the cloud".

Importa registrar que, entre as diretrizes políticas que atualmente norteiam a estratégia digital europeia está a busca da chamada "soberania digital" aberta e autodeterminada "(...) by building on its strengths and reducing its weaknesses and through smart and selective action, preserving open markets and global cooperation", conforme assinalam as conclusões do Conselho Europeu de 25 de março passado. Essa orientação permeia todos programas europeus voltados ao domínio digital, sobretudo aqueles considerados estratégicos, como o referente a tecnologias quânticas. Como reflexo direto dessa ambição, especulou-se que a vertente do Horizonte Europa dedicada a essa área seria inteiramente vetada à participação de terceiros países, inclusive dos associados ao programa quadro, por conflitar com interesses estratégicos europeus. Tal barreira, no entanto, deve ser objeto de flexibilização, tendo em conta que diversos estados membros se opõem a essa limitação, embora ela seja prevista no marco legal do programa, aprovado recentemente.

16.2 Iniciativas/programas públicos ou privados de apoio ao desenvolvimento da computação quântica

Em nível comunitário, a "Quantum Technologies Flagship" permanece sendo a principal iniciativa de coordenação de esforços nacionais dos estados membros da UE na área. Em seus três anos iniciais, aglutinados no que se batizou como "ramp-up phase" (outubro de 2018 a Setembro de 2021), a iniciativa prevê investimentos equivalentes a EUR 152 milhões (quase inteiramente do H2020 e do Horizonte Europa). Estão em curso 24 projetos, distribuídos em quatro segmentos principais: (a) computação quântica; (b) simulações quânticas; (c) comunicação quântica; e (d) metrologia e sensoriamento quânticos. Complementam esses quatro pilares os eixos transversais de educação, engenharia/controle, `software`/teoria e cooperação internacional (focada no Canadá, Estados Unidos e Japão), assim como o fundamento comum da pesquisa básica.

O principal órgão de governança da Flagship é o Conselho de Financiadores ("Board of Funders"), integrado por representantes dos estados membros e da Comissão Europeia. Suas decisões são subsidiadas pela "Quantum Flagship Coordination and Support Action" (CSA), ou simplesmente "QFlag", que reúne especialistas independentes de alto nível para a definição das diretrizes de atuação da parceria, bem como para monitorar a implementação da sua "Agenda". Tal estrutura é complementada pelo "Conselho de Ciência e Engenharia" (SEB), que reúne, por sua vez, os coordenadores dos projetos e representantes da QuantERA, iniciativa descrita mais adiante. Por último, a "comunidade quântica" europeia faz parte da Flagship por intermédio da "Quantum Community Network" (QCN), composta por representantes de todos os estados membros da UE e de países associados ao programa quadro.

Outra fonte de recursos para o setor, de menor monta, é a "QuantERA ERA-NET Cofund in Quantum Technologies" (<https://www.quantera.eu>), lançada ainda em novembro de 2016 com alocação de EUR 67 milhões (para o período até 2020), arrecadados a partir de contribuições da Comissão Europeia e das agências de financiamento nacionais de 26 estados membros e países associados. A "QuantERA" é,

assim, uma rede estruturada com o objetivo de explorar as sinergias entre as ações de financiamento de pesquisas em nível nacional e regional, promovendo a cooperação e sinergias entre os países que a integram. Ela age também como incubadora de projetos, que, após análise individual, podem ascender ao financiamento sob a égide da "Quantum Flagship". A segunda fase do projeto (conhecida como "QuantERA II") está vigente desde janeiro do ano corrente, com recursos previstos da ordem de EUR 55 milhões para o atual ciclo orçamentário da UE, até 2027.

O recém-aprovado programa "Digital Europe", com orçamento total de cerca de EUR 7,6 bilhões para o corrente ciclo orçamentário de longo prazo (2021-2027), também financiará atividades relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias quânticas, sobretudo na sua vertente de apoio à "federalização de capacidades" nas áreas de computação de alta performance (HPC, da sigla em inglês) e cibersegurança. A este programa subordinou-se, recentemente, a "European High Performance Computing Joint Undertaking" (EuroHPC), lançada originalmente em 2018. Integram a iniciativa, além da própria Comissão Europeia, 32 países (26 estados membros da UE e seis dos países associados ao programa Horizonte 2020), mais duas entidades de natureza privada: a "European Technology Platform for High Performance Computing Association" (ETP4HPC) e a "Big Data Value Association" (BDVA).

Até o momento, EUR 1,1 bilhão foi investido no marco da EuroHPC, pouco mais da metade dos quais com origem no orçamento do ciclo anterior de longo prazo da UE (2014-2020). Recente reforma da normativa da EuroHPC, levada a cabo em setembro passado, mobilizará investimentos adicionais da ordem de EUR 8 bilhões, a serem desembolsados entre 2021 e 2033, com recursos suplementares dos programas "Horizon Europe" e "Connecting Europe Facility", bem como do próprio "Digital Europe". Os objetivos da EuroHPC serão atualizados de forma a ambicionar o desenvolvimento de supercomputadores capazes de processar um número de cálculos por segundo de 10 elevado à décima oitava potência, além de computadores quânticos e híbridos (que combinam tecnologia tradicional com inovações quânticas).

No atual ciclo orçamentário, recursos adicionais para tecnologias quânticas poderiam ter origem, igualmente, nos programas "Connecting Europe" (dotação de EUR 21,7 bilhões), sobretudo a projetos voltados à comunicação quântica, e "InvestEU" (EUR 13 bilhões). Vale reiterar, ainda, que 20% dos recursos mobilizados no contexto da "Recovery and Resilience Facility" serão dirigidos à transformação digital dos estados membros.

16.3 Principais linhas de pesquisa aplicada

Como já informado, a "Quantum Technology Flagship" tem quatro pilares principais de atuação: (a) computação quântica; (b) simulações quânticas; (c) comunicação quântica; e (d) metrologia e sensoriamento quânticos. Complementam esses quatro pilares os eixos transversais de educação, engenharia/control, `software`/teoria e cooperação internacional (focada no Canadá, Estados Unidos e Japão), assim como o fundamento comum da pesquisa básica. Vinte e quatro projetos estão em curso no momento, no marco da Flagship, cujo detalhamento pode ser consultado em <https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/>.

Um relatório de avaliação do progresso da iniciativa foi publicado em setembro do ano passado (disponível em <https://bit.ly/2TTB42J>). Conforme as conclusões do relatório, os projetos da Flagship estão progredindo de acordo com as expectativas iniciais. Cerca de 1.400 cientistas estão diretamente envolvidos nos projetos, representando 236 organizações: um terço (77) delas são empresas privadas, enquanto as demais são universidades (103) e institutos de pesquisa (56). Das empresas, 23 são qualificadas como `startups`. Prevê-se que, ao longo da vida útil dos projetos sejam criadas outras 20 empresas `spin-offs`. Os projetos teriam registrado progresso na especificação, modelagem e validação de tecnologias, no desenvolvimento de metodologias de integração e no aperfeiçoamento das tecnologias quânticas existentes, tornando-as mais eficientes e compactas. Dois terços dos projetos da Flagship apresentaram pelo menos um pedido de patente até agora, gerando 60 pedidos no total. Já foram concedidas 16 patentes. Os resultados científicos alcançados foram publicados em mais de 500 artigos, dos quais cerca de 80% são textos de periódicos totalmente revisados por pares (`peer reviewed`), enquanto outros 160 estavam ainda em revisão no momento da publicação do relatório. Do total, 50 artigos publicados foram o resultado da colaboração entre dois ou mais projetos.

16.4 Iniciativas específicas em comunicação quântica

Em 2019, durante o evento "Digital Assembly" (Bucareste, 13-14/6/19), um grupo de estados membros subscreveu uma "Declaração de Cooperação" na área de comunicação quântica, que prevê o estabelecimento de uma iniciativa - denominada EuroQCI - para explorar a possibilidade de desenvolver e implantar, no decorrer de uma década, a infraestrutura necessária para a comunicação quântica "de ponta a ponta", segura e certificada ("quantum communication infrastructure", ou QCI), integrada por soluções espaciais e terrestres que permitam a transmissão e o armazenamento de dados de forma segura.

Com o apoio da Comissão e da Agência Espacial Europeia, o EuroQCI pretende integrar tecnologias e sistemas quânticos a infraestruturas de comunicação convencionais. Isso tornará possível proteger os sistemas de criptografia e infraestruturas críticas da Europa contra ameaças cibernéticas, armazenar e trocar informações confidenciais com segurança e preservar os dados públicos contra ameaças atuais e futuras. O primeiro serviço a fazer uso dele será a distribuição de chaves quânticas (QKD), uma técnica de criptografia que usa fenômenos quânticos e não está sujeita às mesmas vulnerabilidades das formas tradicionais de criptografia, baseadas em funções matemáticas. O QKD pode, portanto, ser usado para habilitar a segurança de dados e mensagens de comunicação, no longo prazo. No momento, estão em curso trabalhos de concepção do EuroQCI, tendo em conta as tecnologias disponíveis, e de desenvolvimento dos requisitos para os estados membros participantes. O plano de longo prazo é que o EuroQCI se torne a base de uma internet quântica na Europa, conectando computadores quânticos, simuladores e sensores por meio de redes quânticas para distribuir informações e recursos com segurança. O programa "Digital Europe" e a "Connecting Europe Facility" irão contribuir para o financiamento do EuroQCI.

16.5 Simuladores quânticos

Ainda em 2021, serão iniciados trabalhos no marco da EuroHPC com vistas ao desenvolvimento do primeiro simulador quântico da iniciativa, que será interligado a um

supercomputador. Este será o primeiro elemento de uma infraestrutura de simulação quântica europeia a ser disponibilizada através da "nuvem", em base não comercial, para usuários europeus públicos e privados. A infraestrutura será empregada para tratar de problemas complexos de simulação e otimização, particularmente nas áreas de desenvolvimento de materiais, pesquisa de medicamentos e transportes, entre outros desafios de grande relevância para a indústria e o setor público.

16.6 Principais centros/ institutos de pesquisa/ redes de pesquisadores dedicados ao tema

Os centros de pesquisa comunitários, até onde foi possível apurar, não estão diretamente envolvidos em investigações na área de tecnologias quânticas. Quando se envolvem com a matéria, o fazem com o intuito de orientar a formulação de políticas públicas, como na publicação, pelo "Joint Research Center" (JRC), de 2016, do estudo intitulado "Quantum Technologies: Implications for European Policy".

16.7 Eventuais políticas relacionadas a insumos usados na fabricação de circuitos quânticos

Em harmonia com a expressa ambição pela sua "soberania estratégica", a UE conta com uma política voltada à redução da dependência europeia e aumento da resiliência das cadeias de valor globais de recursos naturais "críticos", explicitada no documento intitulado "Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability". Entre outras provisões, o referido plano inclui uma relação extensiva desses recursos, que, sob a ótica da Comissão Europeia, inclui minerais de terras raras e outros insumos relevantes ao desenvolvimento de tecnologias quânticas.

Um repositório de documentos acerca da evolução das políticas europeias no setor está disponível em <https://qt.eu/about-quantum-flagship/resources/>.