 <https://doi.org/10.56238/tecavanaborda-042>

Fernando M. Araújo-Moreira

Instituto Militar de Engenharia/IME; Praça General Tibúrcio 80, Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro RJ.
E-mail: fernando.manuel@ime.eb.br

J. F. Galdino

Instituto Militar de Engenharia/IME; Praça General Tibúrcio 80, Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro RJ.

Eliene B. Simão-Silva

Instituto Militar de Engenharia/IME; Praça General Tibúrcio 80, Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro RJ.

A. S. Faddul-Stelzenberger

Instituto Militar de Engenharia/IME; Praça General Tibúrcio 80, Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro RJ.

A.J. Boareto-Mendes

Instituto Militar de Engenharia/IME; Praça General Tibúrcio 80, Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro RJ.

1 INTRODUÇÃO



A Guerra será ganha pelas invenções.
Almirante britânico John Fisher (1915)¹.

Em seu livro *Quantum Dialogue - The Making of a Revolution*², a escritora Mara Beller mostra que a ciência está enraizada não apenas na conversa (frase do Werner K. Heisenberg), mas na discordância, na dúvida e na incerteza. Ela argumenta que é justamente essa cultura de diálogo e polêmica dentro da comunidade científica que alimenta a criatividade. Beller extrai seu argumento de sua nova leitura radical da história da revolução quântica, especialmente o desenvolvimento da interpretação de Copenhague. Uma das várias abordagens concorrentes, esta versão teve sucesso em

¹ John Fisher, 1.º Barão Fisher – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

² M. Beller; *Quantum Dialogue - The Making of a Revolution*; The Chicago University Press (2001).

grande parte devido às habilidades retóricas de Niels Bohr e seus colegas. Usando uma extensa pesquisa de arquivo, Beller mostra como Bohr e outros comercializaram seus pontos de vista, deturpando e descartando seus oponentes como irracionais e defendendo sua própria posição nem sempre coerente ou bem apoiada como sendo inevitável. Na atual conjuntura de negociações entre os diferentes stakeholders relacionados com as tecnologias quânticas, as habilidades retóricas de Niels Bohr estão mais válidas do que nunca. A pergunta principal a ser respondida neste artigo é *quem deve gerenciar e liderar no Brasil o desenvolvimento dessas tecnologias?*

A Segunda Guerra Mundial alçou a Inovação, a Ciência e a Tecnologia ao patamar de assunto de extrema relevância para nortear os destinos de um país. Para incentivá-las, países proeminentes, como os EUA, desencadearam políticas e ações estratégicas de longo prazo. O relatório elaborado em 1945 pelo Diretor do Escritório de Pesquisa Científica e Desenvolvimento, Vannevar Bush, por determinação do Presidente Roosevelt, e as contribuições de outros visionários, ajudaram a definir o novo modelo norte-americano de desenvolvimento da Ciência e Tecnologia (C&T), em substituição àquele que destinava a maioria dos investimentos governamentais às pesquisas militares.

Em essência, nesse novo modelo a pesquisa científica básica, desenvolvida sem preocupação de aplicação imediata, assume importância crucial pelo vasto rol de conhecimentos produzidos e que, utilizados por terceiros, gerariam aplicações de outro modo impossíveis de vislumbrar. Nele, atores públicos e privados, civis e militares, compartilham a responsabilidade pela realização da pesquisa científica básica e aplicada e pelo desenvolvimento tecnológico. Isso viria a tornar o ecossistema norte-americano de inovação dinâmico, eficiente e eficaz, beneficiando tanto a área de Defesa quanto o desenvolvimento econômico e social. Mas seguir o exemplo norte-americano nem sempre é adequado. O progresso tecnológico resultante da mecânica quântica é um desses casos.

Figura 1: Einstein and Bohr; Park Kultury, Moscou/ Rússia Science is rooted in conversations; frase de Werner Karl Heisenberg (Würzburg, 1901 — Munique, 1976)³.



³ Einstein and Bohr; Park Kultury, Moscou/ Rússia; Foto de Marcella Bona; Marcella | Flickr (Acesso em maio/2023).

Mais do que uma possibilidade, o uso na área de Defesa das chamadas Tecnologias Quânticas é uma necessidade premente tanto tática quanto estratégica. O Brasil perdeu enormes oportunidades quando deixou passar outras revoluções tecnológicas bem menos importantes do que aquela associada às tecnologias quânticas, tais como a informática e a nanotecnológica. Por conta disso, o preço pago hoje por esse atraso é tão incalculável quanto irreversível. Entretanto, o país não participar efetivamente desta que é a maior revolução tecnológica da história humana, pode significar uma verdadeira catástrofe não somente socioeconômica, mas principalmente em relação a sua soberania. Estadistas, estrategistas e formuladores de políticas públicas enaltecem o valor da liberdade, da democracia e da antes mencionada soberania, ao reconhecer que a preservação dessa conquista depende da eterna vigilância, ou seja, de uma Defesa Nacional capaz de rechaçar ameaças atuais e futuras. O estado de permanente alerta é o preço a se pagar por algo tão precioso. Como sintetiza Rui Barbosa: “Um exército pode passar 100 anos sem ser empregado, mas não pode passar um minuto sem estar preparado”. Esse pensamento alicerça o sentimento de autopreservação e coesão nacional que deve nortear investimentos em Defesa. Embora diversos setores do Poder Nacional possam ser mobilizáveis para atuar em proveito da soberania de um país, cabe ao Estado orquestrar, obter e integrar os Sistemas e Materiais de Emprego Militar (SMEM), a fim de robustecer as capacidades militares de suas Forças Armadas. Essa robustez passa, necessariamente, por estar atualizada do que existe de melhor em termos de tecnologia não somente em termos de poder de combate, mas principalmente em termos de capacidade operacional e de defesa. E não existe nada mais moderno e fundamental em termos de tecnologia de Defesa do que as tecnologias quânticas. Dado o portfólio de projetos estratégicos do Exército Brasileiro (Figura 02) veremos ao longo deste artigo que as Tecnologias Quânticas têm potencial de afetar praticamente todos os seus aspectos, desde aqueles com maior conteúdo tecnológico até os menos sofisticados.

Figura 2: Portfólio dos projetos estratégicos do Exército Brasileiro⁴.



Indissociável da sobrevivência de Estados e dependente de inovações tecnológicas de alto valor agregado, o setor de Defesa impulsiona o desenvolvimento científico e tecnológico, mobilizando um mercado bilionário de empresas que integram a Base Industrial de Defesa (BID). Imprescindível para induzir projetos inovadores, sobretudo os relacionados diretamente com a Defesa Nacional, os mecanismos adotados pelo Estado em proveito da BID dispõem de poucos estudos para caracterizar os múltiplos fatores intervenientes em sua gênese ou desenvolvimento. Contudo, sabe-se que protagonistas nesse setor, como EUA, a União Europeia, Inglaterra e Rússia, lastrearam suas conquistas nas principais guerras do século XX a partir de uma pujante indústria de defesa e de investimentos continuados em educação, ciência e tecnologia, provando a importância dessa tríade para seus povos na solução dos conflitos⁵.

2 O INEGÁVEL LEGADO TECNOLÓGICO DOS CONFLITOS BÉLICOS.

Ao longo da história humana, é possível constatar claramente que o nosso mundo é dual, onde bem e mal são inseparáveis. Dessa maneira, as guerras também deixam sempre um legado positivo, não somente de aprendizado socioeconômico, mas principalmente em termos de produtos úteis para a nossa sociedade pós- conflito. Nos dias atuais, mesmo que não sejam derivadas de conflitos bélicos explícitos, existem inúmeras tecnologias de enorme utilidade para a nossa sociedade que foram derivadas da aplicação de vultuosos recursos financeiros nas áreas de segurança e defesa nacional. Com as tecnologias quânticas, essenciais para essas duas áreas, certamente será igual onde o

⁴ O PORTFÓLIO - Site EPEX (eb.mil.br) (Acesso em maio/2023).

⁵ J. F. Galdino; Base industrial de defesa: ambivalência e sustentabilidade in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 397-400 (2023).

desenvolvimento de produtos visando a proteção e soberania do país trarão enormes benefícios para a população civil.

Será equivalente ao que aconteceu com a internet. A sua história começa no ambiente da Guerra Fria (1945- 1991). As duas superpotências envolvidas, Estados Unidos e União Soviética, disputavam poderes e hegemonias. Com o intuito de facilitar a troca de informações, pois temiam ataques dos soviéticos, o Departamento de Defesa dos EUA através da ARPA (Advanced Research Projects Agency) criou um sistema de compartilhamento de informações entre pessoas distantes geograficamente, a fim de facilitar as estratégias de guerra. Nesse momento, surge o protótipo da primeira rede de internet, a Arpanet (Advanced Research Projects Agency Network). Em 29 de outubro de 1969 foi estabelecida a primeira conexão entre a Universidade da Califórnia e o Instituto de Pesquisa de Stanford. Foi um momento histórico, uma vez que o primeiro e-mail foi enviado. Hoje, é inimaginável um mundo sem internet. Dessa forma, um produto desenvolvido com objetivo 100% militar se transformou em poucos anos num produto mais do que essencial para a sociedade civil e as suas múltiplas formas de uso (redes sociais, vendas online, teleconferências etc.)

2.1 1ª GUERRA MUNDIAL

O centenário do início da I Guerra Mundial (1914 -1918) é lembrado pelo saldo devastador do conflito que deixou mais 15 milhões de mortos, entre militares e civis. Mas, para além das perdas provocadas pelo primeiro conflito moderno da História, a guerra também motivou descobertas e inovações – algumas delas existentes até hoje. O prático horário de verão, os laváveis e elegantes talheres de aço inoxidável e até as cirurgias plásticas surgiram ou se desenvolveram durante esse período.

Figura 03: (a) soldados franceses usando máscaras de gás em uma trincheira em 1917; a tecnologia de máscaras de gás variou muito durante a guerra e acabou se tornando uma defesa eficaz, limitando a capacidade dos ataques com gás em anos posteriores; (b) parte dos 600 militares italianos mortos por ataque alemão com gás fosgênio; (c) alemães improvisam máscara de gás para um cavalo. As fotos de (b) e (c) correspondem à região de Caporetto (Itália) em 1917^{6,7}.



(a)



(b)



(c)

⁶ Rusmea: Primeira Guerra Mundial em Fotos: A Frente Ocidental - 100 anos atrás (Acesso em maio/2023).

⁷ Histórias: Guerra Química (historiasylvio.blogspot.com) (Acesso em maio/2023).

A Guerra iniciou-se com tecnologias muito pessoais, ou seja, homem a homem. Diversas tecnologias, como o submarino e a aviação, já existiam antes de 1914, mas ganharam força só na segunda metade do conflito. A apropriação das tecnologias para fins bélicos caracteriza esse conflito. Um dos principais avanços foi o uso da eletricidade no campo militar. O rádio, que transmitia voz em vez de códigos, se tornou essencial para a comunicação. Além disso, navios foram equipados com lâmpadas de sinal, alarmes de fogo elétricos e controles remotos. As armas químicas, como gás mostarda e gás cloro, representaram um novo perigo no combate (Figura 03).

Figura 04: Oficiais alemães num carro blindado em 1918⁸.



Além das vítimas militares, o gás matou civis porque o vento levava os gases para áreas residenciais. A utilização de gás de mostarda e de cloro rompeu com a tradição estática da denominada Guerra de Trincheiras. Porém, o uso de gases tóxicos ainda era precário já que o próprio atacante podia ser prejudicado, dependendo de onde o vento batia.

Segundo o site Global History Network, os oficiais da época sabiam que seria a tecnologia o que determinaria o curso do conflito. O almirante britânico John Fisher (foi o primeiro Lorde do Almirantado da Marinha Real Britânica) escreveu, em 1915, que a Guerra seria “ganha pelas invenções”. Os lança-chamas, os carros blindados (Figura 04), os tanques (Figuras 05 e 06), aviões de guerra, zepelins e os submarinos usados na Primeira Guerra Mundial se tornaram tecnologias decisivas na Segunda Guerra Mundial, iniciada em 1939⁹.

⁸ Tecnologia e as armas da Primeira Guerra Mundial, 1914-1918 (Acesso em maio/2023).

⁹ Jornal da PUC - Os avanços da tecnologia na Primeira Guerra (puc-rio.br) (Acesso em maio/2023).

Figura 05: Veículo blindado Mark 1. Popularmente chamados de tanques, estes veículos de invenção britânica, eram tracionados por lagartas em vez dos pneus (que tinham o problema de atolarem na lama) e movidos por motores à combustão interna. Esses blindados partiram para a sua primeira luta no “moedor de carne” chamado de Batalha do Rio Somme (na França) em setembro de 1916. Armado com dois canhões e três metralhadoras, o chamado monstro blindado pesava 28,4 toneladas e media mais de 10 metros de comprimento. Foi a estreia deste tipo de veículo na Primeira Guerra Mundial¹⁰.



Figura 06: Veículo blindado alemão modelo A7V (a) numa plataforma de trem em 1917; (b) Uma réplica do A7V no Panzermuseum Munster (Alemanha). Este veículo foi o único blindado alemão produzido durante a Primeira Guerra Mundial. Seu desenvolvimento ocorreu somente no final do conflito, quando em 1917 foram encomendadas 100 unidades, e devido ao pequeno número de unidades produzidas ele teve pouca influência no curso da guerra. Estiveram em combate somente entre março e outubro de 1918. O blindado possuía 7 metros de comprimento, 3 metros de largura e com altura de 3 metros com blindagem feita com chapas de aço de 20 mm nas laterais, 30 mm na frente e 10 mm no teto. Sua blindagem não era de aço endurecido, eficiente apenas em deter tiros de metralhadoras e rifles, mas, não os tiros de calibre maior. O A7V estava equipado com 6 metralhadoras calibre 7.92 mm e um canhão frontal de 5.7 cm. A velocidade máxima era de aproximadamente 15 quilômetros por hora. A suspensão das 24 rodas das lagartas foi suspensa individualmente - uma vantagem sobre os tanques britânicos que não tinham suspensão¹¹.



(a)



(b)

¹⁰ 1916: Primeiro tanque de guerra em ação – DW – 15/09/2021 (Acesso em maio/2023).

¹¹ A7V – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

A Primeira Guerra Mundial foi um dos eventos mais significativos da história moderna, deixando um legado duradouro em todo o mundo. A guerra começou como um conflito entre as potências europeias, mas logo se tornou um conflito global, com países de todo o mundo se envolvendo. A Alemanha, a Áustria-Hungria e o Império Otomano lutaram contra a França, a Grã-Bretanha e a Rússia, além de outros países aliados. No início, a Alemanha liderava o mundo em poder aéreo com 260 aviões e uma frota de 14 zepelins. Outros aliados da Alemanha, incluindo a Itália, também tinham armas aéreas recém-formadas. Os britânicos tinham cerca de 100 aeronaves nesta época; os franceses, apoiados pela principal indústria aeronáutica do mundo, tinham 156. Cerca de 100.000 aeronaves voaram na guerra, principalmente em apoio às tropas terrestres e marítimas.

Durante a guerra, rápidos avanços foram feitos tanto na estratégia de poder aéreo quanto na tecnologia. Em 1914, os aviões mobilizados para a guerra eram frágeis, estruturas semelhantes a pipas, alimentadas por motores de potência incerta. Na melhor das hipóteses, eles poderiam subir de 2.000 a 3.000 pés (600 a 900 metros) e voar a velocidades de 60 a 70 milhas (95 a 110 quilômetros) por hora.

Apenas quatro anos depois, caças com motores de 150 a 200 cavalos de potência foram equipados com metralhadoras para batalhar a 15.000 pés (4.600 metros) no ar. As aeronaves que foram desenvolvidas durante a Primeira Guerra Mundial eram de três tipos principais, cada um com sua própria finalidade específica. Esses aviões eram embarcações de reconhecimento, aviões de combate e bombardeiros¹².

Figura 07: Avião de reconhecimento britânico⁸.



¹² air force - Students | Britannica Kids | Homework Help (Acesso em maio/2023).

O uso de aeronaves para reconhecimento (Figura 07) foi provavelmente a contribuição mais importante do poder aéreo para o esforço de guerra. Nas primeiras semanas de hostilidades, aviões franceses avistaram os movimentos do Primeiro Exército Alemão, e isso levou à Primeira Batalha do Marne. Os alemães, por sua vez, usaram com sucesso dirigíveis zepelins para monitorar os movimentos de navegação de seus oponentes. Em 1917, essas naves podiam permanecer no ar por mais de 95 horas de cada vez. Centenas de dirigíveis foram construídos durante a guerra para o trabalho de comboio antissubmarino e patrulha costeira. As técnicas de reconhecimento foram muito melhoradas durante a Primeira Guerra Mundial. Os britânicos adicionaram a fotografia à observação visual em 1914, quando tiraram fotos das posições das tropas alemãs durante a Primeira Batalha de Aisne. O rádio passou a ser usado nesta época como um meio de passar mensagens entre aeronaves de reconhecimento e pessoal de terra. No início da guerra, as embarcações de reconhecimento eram geralmente desarmadas. Logo a percepção de que essas naves eram vulneráveis a ataques levou à adoção generalizada do avião de combate - uma aeronave projetada para atacar aeronaves de reconhecimento e bombardeio inimigos. A Grã-Bretanha foi pioneira no uso de aviões de combate. Em 1913 desenvolveu o Vickers Destroyer, um biplano de combate (Figura 08). Em 1915, os franceses desenvolveram o monoplano Morane-Saulnier equipado com um sincronizador de armas que permitia que balas de metralhadora passassem entre as pás de uma hélice giratória. Quando os alemães abateram um avião de combate francês em 1915, o designer holandês Anthony Fokker usou a nave francesa capturada como modelo para seu Fokker Eindecker, um caça monoposto que daria à Luftwaffe (força aérea da Alemanha) superioridade aérea temporária na frente ocidental. De outubro de 1915 até maio de 1916, os Fokker Eindeckers explodiram os franceses e britânicos dos céus, uma maestria que só foi encerrada quando as forças aliadas melhoraram suas próprias naves de combate em 1916. Naquele ano, os britânicos desenvolveram os caças pusher D.H.2 e F.E.2b. Esses aviões eram equipados com uma ou mais armas fixas no nariz que disparavam para a frente, e o piloto podia apontar sua aeronave como uma arma de disparo.

Figura 08: O Vickers F.B.5 (de Fighting Biplane 5), conhecido como Gunbus, foi um biplano militar britânico de configuração por impulsão de dois lugares utilizado na Primeira Guerra Mundial e desenvolvido em 1915. Estava armado com uma única metralhadora Lewis de calibre 7,7 mm operada pelo observador/artilheiro na parte da frente, foi a primeira aeronave construída especificamente para combate ar-ar a entrar em serviço, tornando-se o primeiro caça operacional do mundo^{13,14}.



A guerra foi marcada por batalhas sangrentas e táticas brutais, incluindo o uso de gás venenoso e o lança- chamas (Figura 09) mas também foram desenvolvidas novas formas de atendimento médico como a radiografia móvel (Figura10). Estima-se que mais de 16 milhões de pessoas morreram durante a guerra, incluindo civis e militares. Ela teve um impacto significativo na economia global onde muitos países aumentaram seus gastos militares para financiá-la. Isso resultou em uma inflação significativa em muitos deles. Além disso, a guerra interrompeu o comércio global e a produção industrial.

¹³ air force - Students | Britannica Kids | Homework Help (Acesso em maio/2023).

¹⁴ Vickers F.B.5 – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

Figura 09: Lançachamas⁹.



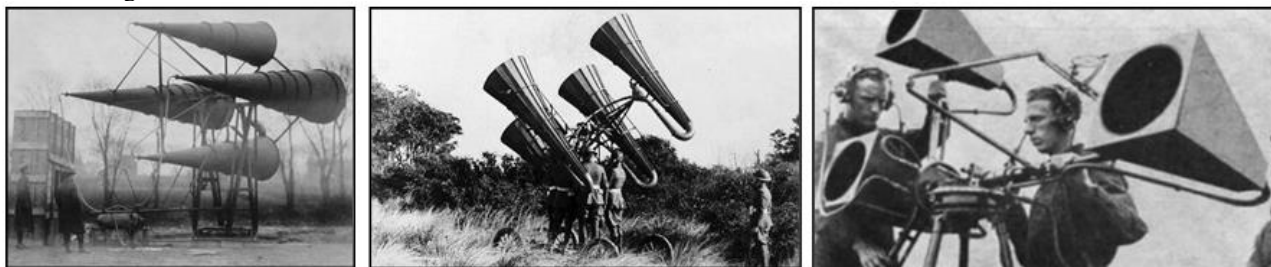
A Alemanha, em particular, sofreu uma grande crise econômica, o que contribuiu para o surgimento do Partido Nazista e a Segunda Guerra Mundial. Ela também teve um impacto humano significativo. Milhões de pessoas morreram durante a guerra, incluindo civis e soldados. Além disso, muitos soldados voltaram para casa com ferimentos graves ou doenças relacionadas à guerra.

Figura 10: Radiografia móvel⁹



As consequências desse conflito foram devastadoras para o mundo. Mas também foram muitos os avanços tecnológicos que derivaram em grandes invenções futuras. Esse é o exemplo do chamado localizador acústico (Figura 11) que daria lugar ao radar durante a Segunda Guerra Mundial, hoje equipamento essencial para atividades civis como o transporte aéreo.

Figura 11: Três modelos diferentes de localizador acústico montados em uma plataforma de rodas e que amplificavam sons distantes monitorados através de fones de ouvido usados por um membro da tripulação, que poderiam direcionar a plataforma para mover e localizar aeronaves inimigas distantes. O desenvolvimento da localização acústica passiva acelerou durante a Primeira Guerra Mundial, e mais tarde foi superado pelo desenvolvimento do radar na década de 1940 durante a Segunda Guerra Mundial^{15,16}.



Também, a Primeira Guerra obrigou acontecer uma mudança drástica no tipo de capacetes utilizados. Em 1915, o francês August-Louis Adrian desenvolveu o capacete de aço fino, com uma viseira soldada na parte dianteira e uma crista correndo pelo meio. Na Grã-Bretanha, surgiu um pouco depois um capacete de aço mais grosso, o Brodie, que lembrava os chapéus usados pelos homens de Enrique V, na Agincourt. Em 1916, a Alemanha estabeleceu o padrão para capacetes, com o *Stahlhelm*, criado pelo Dr. Friedrich Schwerd, que seria usado por forças alemãs durante a Segunda Guerra Mundial. Seu modelo ainda é usado, com variações, em exércitos da atualidade. Também na área médica houve avanços derivados da guerra. Os primeiros enxertos de pele bem-sucedidos foram realizados em soldados cujos rostos foram severamente desfigurados. Harold Gillies, um cirurgião nascido na Nova Zelândia, foi o pioneiro no tratamento na Inglaterra. Suas ações foram impulsionadas pelas milhares de vítimas que regressavam da batalha em 1916 e alavancou o caminho para a cirurgia plástica de hoje em dia. Uma das técnicas inovadoras introduzidas pelo Dr. Gillies foi a que utiliza o próprio tecido do paciente para ajudar a cirurgia de reconstrução, reduzindo a chance de rejeição.

2.2 2ª GUERRA MUNDIAL

A 2ª Guerra Mundial só terminou com a rendição do Japão no dia 2 de setembro de 1945. Contudo, na Europa, o conflito acabou um pouco antes, no dia 8 de maio quando Berlim sucumbiu às ações do Exército Vermelho da antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas). Este conflito de proporções globais geralmente é lembrado, e estudado, pelo viés da sua violência. Estima-se que mais de 85 milhões de vidas foram ceifadas neste período, sendo a maioria dela de civis. Mas há um outro lado bem menos sombrio e que hoje é o responsável por salvar vidas que é o conjunto de tecnologias desenvolvidas associado com esse conflito. Como mencionamos anteriormente, durante as guerras é comum que centros de pesquisas se dediquem ao desenvolvimento e produção de

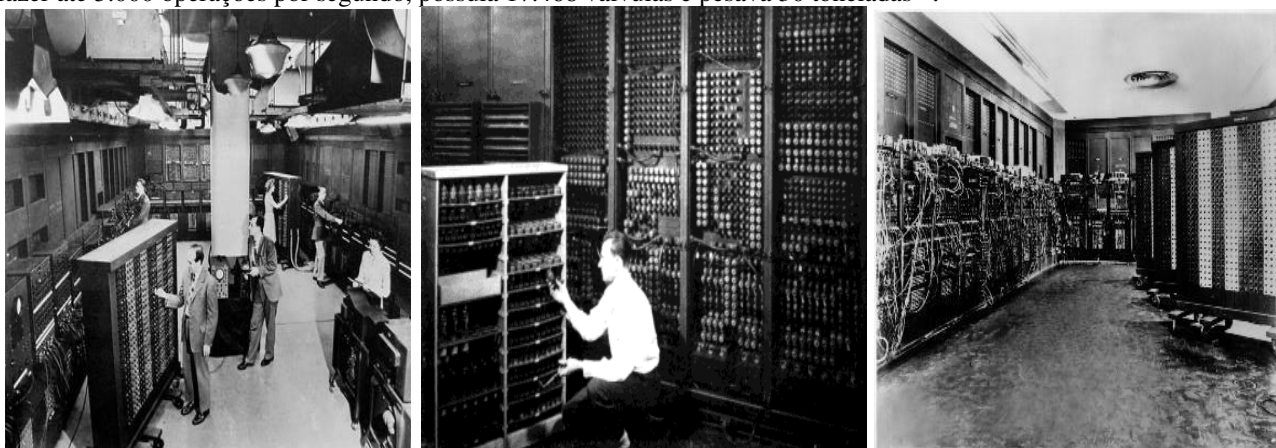
¹⁵ O localizador acústico - Mundo Engenharia (Acesso em maio/2023).

¹⁶ Google images (Acesso em maio/2023).

equipamentos para fins bélicos. Findado o conflito, é natural que estas tecnologias deixem os quartéis e campos de batalha e venham a ser utilizados para fins pacíficos no meio civil. Assim também ocorreu com muitas das tecnologias desenvolvidas durante a 2ª Guerra Mundial.

Quando se pensa em um computador digital eletrônico, considera-se o ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) como sendo o primeiro modelo produzido. Embora ele tenha entrado em operação em 1946, o início do seu desenvolvimento começou ainda em 1943. Era capaz de fazer até 5.000 operações por segundo, possuía 17.468 válvulas e pesava 30 toneladas (Figura 12). Quando projetado, tinha como finalidade fazer cálculos balísticos. Contudo, há quem considere que o primeiro computador de fato, tenha sido a máquina de Turing. O matemático, criptoanalista e cientista Alan Turing, desenvolveu durante a 2ª Guerra mundial uma máquina eletromecânica capaz de quebrar os códigos da máquina Enigma, responsável pela criptografia alemã. De qualquer maneira, considera-se que o computador é mais um produto decorrente da Segunda Guerra Mundial.

Figura 12: Imagens do primeiro computador eletromecânico, o ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Embora ele tenha entrado em operação em 1946, o início do seu desenvolvimento começou ainda em 1943. Era capaz de fazer até 5.000 operações por segundo, possuía 17.468 válvulas e pesava 30 toneladas¹⁶.



Também, a tecnologia de micro-ondas foi criada no esforço de guerra originalmente com fins de identificar a posição de aviões inimigos. Um dos engenheiros ao se aproximar do aparelho em teste com uma barra de chocolate no bolso, observou que esta acabou derretendo. Depois de alguns testes com outros alimentos, como ovo e pipoca, acabou patentando a invenção em 1946.

O projeto de um dos carros mais famosos, começou ainda no início da década de 1930. Após vários protótipos (que não saíram do papel), em agosto de 1940 era produzido oficialmente o primeiro KDF Wagen, que depois acabou virando Volkswagen/Fusca. Mesmo tendo contado com o apoio do estado no início do projeto, logo após poucas unidades fabricadas teve sua produção interrompida só retornando de fato em 1948. Durante o período da 2ª guerra, a fábrica se dedicou a produzir veículos de guerra baseados na plataforma do Fusca.

Outra tecnologia inventada muito tempo antes, mas aprimorada durante a 2ª Guerra foram os radares. Esse equipamento tem sua origem em uma série de pesquisas feitas em 1887 por Heinrich Hertz. Ele realizou experimentos de laboratório que comprovaram a existência das ondas de rádio e sua capacidade de serem refletidas. Esses experimentos foram realizados para testar a proposta de Maxwell de que havia diversas formas de radiação eletromagnética, das quais a luz era uma delas. Hertz e outros físicos subsequentes mostraram que essas ondas têm natureza semelhante à luz visível, pois também podem ser refletidas, refratadas e polarizadas. O radar, do inglês radio detection and ranging (Detecção e distânciometria por rádio), é um dispositivo que permite detectar objetos distantes e inferir suas distâncias à antena direcional transceptora do rádio. Durante a Segunda Guerra Mundial, o radar tornou-se uma ferramenta vital para as operações militares em todo o mundo. O desenvolvimento do radar permitiu que os militares detectassem aeronaves inimigas e mísseis, bem como monitorar as condições climáticas e o movimento de tropas terrestres¹⁷.

Figura 13: Imagens dos primeiros helicópteros operacionais: (a) O Focke-Wulf Fw 61 foi o primeiro helicóptero totalmente controlável. O seu primeiro voo ocorreu em 1936, pilotado por Ewald Rohlf. O nome mais adequado para este helicóptero é Fa 61, já que era uma aeronave de pesquisa da Focke Achgelis; (b) Sikorsky R-4 de 1944, o primeiro helicóptero produzido em massa¹⁸.



(a)



(b)

Os helicópteros são um outro exemplo de veículo concebido muito antes de ser, de fato, desenvolvido. Eles entraram em operação para fins de resgate e observação durante a Segunda Guerra Mundial e teve a sua produção desenvolvida em grande escala. A primeira ideia pouco prática de um helicóptero foi concebida por Leonardo da Vinci no século XV, mas permaneceu esquecida até a invenção do avião no início do século XX. O primeiro voo bem-sucedido e registrado de um helicóptero ocorreu em 1907, realizado por Paul Cornu, na França. O(a) primeiro voo de um helicóptero completamente controlável foi demonstrado por Hanna Reitsch em 1937 em Berlim conduzindo um Focke-Wulf Fw61. No início do ano de 1940 Igor Sikorsky desenvolveu o Sikorsky R-4 e em 1941

¹⁷ Radar – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

¹⁸ Helicóptero – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

adaptou flutuadores num Vought-Sikorsky VS-300, tornando-o o primeiro helicóptero anfíbio prático do mundo (Figura 13).

Semelhantemente aos casos anteriores, os antibióticos também foram inventados antes. Alexander Fleming, oficial médico da Marinha Britânica durante 1ª Guerra Mundial, descobriu a penicilina em 1928. Somente em 1938 foi isolada e purificada por W. Florey e Ernst B. Chain. Contudo, foi durante a 2ª Guerra Mundial que a Penicilina passou a ser produzida em larga escala. Como resultado, milhares de soldados aliados foram salvos durante este conflito.

Mais um exemplo de herança tecnológica extremamente relevante derivada de um conflito bélico é o caso do programa espacial norte-americano. O homem só conseguiu colocar o primeiro satélite em órbita e enviar o primeiro homem à Lua graças a outra tecnologia desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial. Foram os foguetes desenvolvidos com fins bélicos que mais tarde encontrariam outros destinos e outros fins. Os alemães, liderados por Wernher von Braun, desenvolveram, durante esse conflito, os foguetes (chamados de bombas voadoras) denominados V1 e V2 (ou A-4 na terminologia alemã), que foram a base para as pesquisas sobre foguetes dos Estados Unidos e da União Soviética no pós-guerra. Ambas as bombas nazistas, usadas para bombardear as cidades de Londres e Paris no final da guerra, podem ser mais bem definidas como mísseis e não como foguetes. A rigor, a V-1 não chega a ser um foguete, mas um míssil que voa com propulsão de avião a jato. Mais recentemente, foram desenvolvidos foguetes especificamente destinados para uso militar, normalmente conhecidos como ICBMs ou mísseis balísticos intercontinentais. Os programas espaciais que tanto americanos quanto soviéticos colocaram em marcha basearam-se em foguetes projetados com finalidades próprias para a astronáutica, derivados destes foguetes de uso militar. Os foguetes usados no programa espacial soviético eram derivados do míssil balístico R.7 que acabou sendo usado para lançar as missões Sputnik¹⁹.

2.3 A GUERRA FRIA

A Guerra Fria começou por volta de 1946 e esse período foi caracterizado pela extrema rivalidade política, ideológica, econômica e militar entre os líderes dos blocos capitalista (EUA) e comunista/socialista (URSS). Como ambos os países previam um confronto direto, eles deram início a uma nova corrida armamentista, mas dessa vez nuclear. Em 1949, foi criada a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) que atendia aos interesses dos países ocidentais liderados pelos Estados Unidos da América que financiavam a Europa Ocidental destruída pela Segunda Guerra Mundial. Em troca, os americanos estimulavam os governantes europeus a preservarem o capitalismo e, principalmente, a instalar armas nucleares controladas pela OTAN. Por outro lado, em 1955 foi feita

¹⁹ Foguete espacial – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org)(Acesso em maio/2023).

uma aliança similar, mas do lado comunista denominada “Pacto de Varsóvia”. A chamada Guerra Fria e a corrida armamentista decorrente dela estavam iniciadas. Em 1945 a primeira bomba atômica foi produzida e detonada em Hiroshima pelos Estados Unidos. Na sequência, quatro anos mais tarde a URSS também detinha artefatos nucleares se instalando assim o chamado equilíbrio pelo terror. Em 30 de outubro de 1961, a URSS detonou o mais potente artefato nuclear jamais construído, denominado de Bomba Tsar e com poder de destruição de 58 megatons, ou seja, equivalente à detonação de 58 milhões de toneladas de TNT. Entretanto, essa rivalidade entre ambos os blocos também se estendeu ao campo técnico-científico e uma das primeiras – e principais – arenas da disputa, foi na área aeroespacial. Em 04 de outubro de 1957 a URSS colocou em órbita o primeiro satélite artificial lançado pela humanidade, o Sputnik 1 (que significa satélite ou Companheiro Viajante). Em 1961, os soviéticos lançaram a nave espacial Vostok I, tripulada pelo major da Força Aérea russa, o cosmonauta Yuri Gagarin. Com 27 anos de idade, ele foi o primeiro homem a fazer um voo orbital em torno da Terra. As duas primeiras observações que fez em 12 de abril desse ano estando em órbita foram a terra é azul e eu não vejo nenhum *Deus aqui em cima*²⁰. Em 16 de julho de 1969, os americanos enviaram à Lua a espaçonave Apollo 11 e em 20 de julho o módulo lunar Eagle possuiu lá e consagrando Neil Alden Armstrong²¹ como o primeiro homem a pisar no seu solo^{22,23} (Figura 14). Nessa vontade de mostrar superioridade ao mundo, os EUA e a URSS investiram pesadamente em inovação, ciência, tecnologia, pesquisa, sistema de informação e telecomunicações, todas elas focadas na área de Defesa. Por conta disso, nesse período foram muitos os avanços tecnológicos diretamente decorrentes da Guerra Fria. Dentre eles destacamos o forno de micro-ondas, o GPS, as câmeras digitais, os computadores, a internet e significativos avanços militares.

²⁰ Muito provavelmente ele não disse isso, e essas palavras podem ter sido a ele atribuídas para fins políticos pela propaganda soviética Há 60 anos, o primeiro homem no espaço: “Daqui de cima a Terra é belíssima e sem limites” - Vatican News (Acesso em maio de 2023).

²¹ Neil Alden Armstrong foi um engenheiro aeroespacial, aviador naval, piloto de teste, astronauta e professor norte-americano que se tornou o primeiro ser humano a pisar na Lua em 20 de julho de 1969. Armstrong estudou engenharia na Universidade Purdue; em 1949 tornou-se aspirante da Marinha dos Estados Unidos da América e, no ano seguinte, formou-se aviador naval. Lutou na Guerra da Coreia a partir do porta-aviões USS Essex e depois completou seu bacharelado em engenharia; na sequência, trabalhou como piloto de testes na Estação de Voo de Alta-Velocidade da Base Aérea Edwards, voando diversas aeronaves da Série Centenária e, por sete vezes, no North American X-15. Também participou de dois programas espaciais concebidos pela Força Aérea: Man in Space Soonest e X-20 Dyna-Soar. Neil Armstrong – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

²² Apollo 11 – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

²³ “A Terra é azul”: há 60 anos, o homem chegava à órbita do planeta | Agência Brasil (ebc.com.br) (Acesso em maio/2023).

Figura 14: Imagens relacionadas a uma das maiores conquistas do ser humano através da NASA: a chegada do homem na Lua em julho de 1969: (a) foguete Saturno V transportando a nave Apollo 11; (b) caminhada de Neil Armstrong na superfície lunar; (c) resgate da tripulação de volta à Terra no Oceano Pacífico.



(a)



(b)



(c)

Certamente, o maior resultado desse conflito velado foi a criação da própria NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) em 29 de julho de 1958 (Figura 14), em plena Guerra Fria. E é enorme o número de produtos dela derivados e que hoje são de uso diário, por exemplo: filtro de água, câmera de celular, travesseiro de viscoelástico, fórmula de alimentos enriquecida para bebês, ranhuras transversais em pavimentos (grooving), lentes refletoras de raios ultravioleta, aparelhos dentais transparentes, GPS preciso, tecidos resistentes de aplicação na arquitetura, controles digitais para naves e aviões, amortecedores para terremotos, isolamento térmico, monitores de saúde, normas de segurança alimentar, tênis com amortecedores, colchão ortopédico de espuma com memória, máquina de exercícios bowflex, termômetro auricular, vidro resistente a arranhões, creme dental restaurador, cobertor térmico, relógios de quartzo, prancha de cabelo (a chamada chapinha), aeroponia, dentre muitos outros²⁴.

3 O QUE É FÍSICA QUÂNTICA

3.1 O DEBATE DO SÉCULO XX

²⁴ 40 Years of NASA Spinoff | NASA (Acesso em maio/2023).

Figura 15: Chamada de a fotografia mais inteligente da história, esta imagem da 5ª Conferência Solvay de Física Quântica (outubro de 1927) mostra os 29 cientistas mais famosos da época, dos quais 17 se tornariam ganhadores do Prêmio Nobel nos anos seguintes²⁵.



Sem entrar em uma explicação detalhada da física envolvida, é interessante discutir brevemente alguns dos princípios subjacentes fundamentais para ajudar a entender as aplicações potenciais das chamadas Tecnologias Quânticas na área de Defesa. Elas exploram fenômenos físicos na escala atômica e subatômica. Fundamental para a mecânica quântica é que, nessa escala atômica, o mundo é probabilístico em oposição ao determinístico. Essa noção de probabilidade foi tema de um debate mundialmente famoso entre Albert Einstein e Niels Bohr durante a quinta Conferência Solvay sobre Física quântica, realizada em outubro de 1927 em Bruxelas (Figura 15). Esta conferência reuniu os 29 físicos mais notáveis da época (17 deles mais tarde se tornariam ganhadores do Prêmio Nobel) para discutir a teoria quântica recém-formulada.

Nesse que foi chamado de debate do século, Niels Bohr defendeu a nova teoria da mecânica quântica tal como foi formulada por Werner Heisenberg, enquanto Albert Einstein tentou manter o paradigma determinista de causa e efeito. Einstein disse que "Deus não joga dados", após o que Niels Bohr rebateu "Einstein, pare de dizer a Deus o que fazer". Hoje em dia, a comunidade científica concorda que Niels Bohr venceu o debate. Isso significa que nosso mundo não tem um roteiro fixo baseado em causa e efeito, mas está de fato sujeito ao acaso. Em outras palavras, você pode saber tudo o que há para saber no universo e ainda não saber o que acontecerá a seguir. Este novo paradigma probabilístico abriu caminho para uma melhor compreensão de algumas das propriedades-chave das partículas quânticas subjacentes às tecnologias quânticas, tais como tunelamento, superposição e emaranhamento. A melhor compreensão desses princípios quânticos fundamentais é o que estimulou

²⁵ Albert Einstein – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

o desenvolvimento de Tecnologias Quânticas da próxima geração: sensoriamento quântico, comunicação quântica e computação quântica, dentre outras.

3.2 A ORIGEM

Como mencionado anteriormente, a física (ou mecânica) quântica²⁶ é a teoria que descreve com sucesso os sistemas físicos cujas dimensões são próximas ou abaixo da escala atômica (átomos, moléculas, partículas atômicas e subatômicas etc.). Ela surgiu no início do século XX em função de problemas encontrados na área industrial associados com a medida de temperatura em fornos siderúrgicos. Em alguns casos, ela também tem sucesso na descrição e explicação de fenômenos macroscópicos tais como supercondutividade e superfluidez (denominados de estados quânticos macroscópicos) e cujos portadores são denominados de bósons (seguem a distribuição estatística de Bose-Einstein). Com o avanço do estudo de fenômenos na escala atômica ficava cada vez mais clara a falha da física newtoniana nessa escala. Assim, foi necessária uma profunda revisão conceitual que derivou na geração de novas ideias que, em muitos casos, contrariam – até hoje - a nossa intuição. Fenômenos como tunelamento, superposição e emaranhamento quânticos fazem parte desses novos conceitos.

O físico alemão Max Planck é considerado o pai da física quântica. Seu foco foram os estudos das radiações eletromagnéticas e do seu estudo aparece uma das mais importantes constantes da física moderna, denominada de constante de Planck ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$). Ela é usada para definir a energia (E) e a frequência (f) de um fóton associado a uma radiação eletromagnética. Essa constante determina a energia de um fóton, mediante a equação $E = h \times f$.

O desenvolvimento da física quântica foi consequência da necessidade de explicar diversos resultados experimentais obtidos entre o final do século XIX e princípios do século XX, que não conseguiam ser entendidos à luz das teorias físicas existentes nesse tempo. Alguns desses fenômenos inexplicados para os quais ela fornece descrições precisas são²⁷:

- Espectro de radiação do corpo negro, resolvido por Planck com a proposição da quantização da energia.
- Explicação do experimento de dupla fenda, no qual elétrons produzem um padrão de interferência condizente com o comportamento ondulatório.
- Explicação por Albert Einstein do efeito fotoelétrico descoberto por Heinrich Hertz, onde propõe que a luz também se propaga em forma de partículas quantizadas com energia definida.

²⁶ Eisberg, R.; Física Quântica; Ed. Geral; ISBN 9788570013095 (2023).

²⁷ Mecânica quântica – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

- O Efeito Compton, no qual se propõe que a radiação eletromagnética pode se comportar como partícula, quando sua energia for grande o suficiente.
- A questão do calor específico dos sólidos em baixas temperaturas, cuja discrepância foi explicada pelas teorias de Einstein e Debye baseadas na equipartição da energia segundo a interpretação da energia quantizada de Planck.
- A absorção ressonante e discreta de energia por gases, provada no experimento de Franck-Hertz quando submetidos a certos valores de diferença de potencial elétrico.
- A explicação da estabilidade atômica e da natureza discreta das raias espectrais, graças ao modelo atômico de Bohr, que postulava a quantização dos níveis de energia do átomo.

Além de Planck, também contribuíram para os alicerces desta área Albert Einstein, Werner Heisenberg, Louis de Broglie, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Max Born, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, dentre outros¹¹.

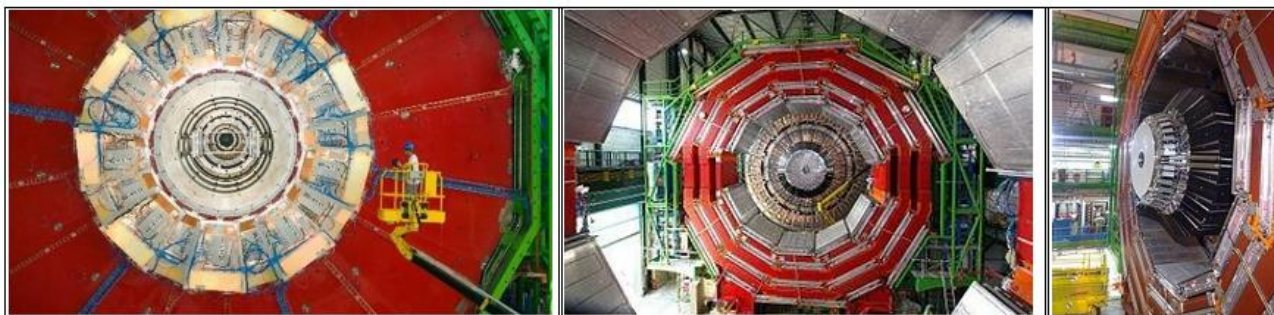
A física quântica é uma das áreas mais promissoras da física moderna e pode levar a avanços consideráveis na área de tecnologia da informação e computação quântica, dentre outras áreas que formam as chamadas Tecnologias Quânticas e que descreveremos na próxima seção. Ela pode ser considerada a base de toda a física moderna e tem implicações profundas em muitas áreas, desde a tecnologia, (em comunicação e computação quântica), até a cosmologia (no estudo da formação do Universo).

Na física convencional as partículas – que podem ser de luz, por exemplo - são estudadas como algo sólido, que tem um estado, uma energia e um movimento determinado. Já na física quântica, o comportamento e as grandezas dessas partículas mudam de acordo com a interação entre elas, gerando o que se chama de princípio da incerteza de Heisenberg formulado pelo físico alemão Werner Karl Heisenberg em 1927. No mundo microscópico (ou quântico) acontece que se você conhece muito bem a posição de um objeto, por exemplo, você não conhece nada sobre a sua velocidade e vice-versa. Ou seja, não é possível conhecer simultaneamente certos pares de propriedades quânticas com precisão absoluta, por exemplo, posição e momento, ou energia e tempo. Na física quântica quanto mais precisamente conhecemos uma propriedade do objeto estudado, menos precisamente podemos conhecer outra. Outro fenômeno que define os estudos quânticos é a chamada dualidade onda-partícula que descreve a natureza dual de alguns elementos que podem se comportar tanto quanto uma onda – ou seja, uma perturbação que se propaga no espaço ou em qualquer outro meio - ou como uma partícula. Exemplo disso é a luz que, em alguns fenômenos é estudada como uma onda (em fenômenos como refração, difração, espectro de cores etc.) e em outros casos é considerada como uma partícula na forma do chamado fóton, que nada mais é do que um quantum de radiação eletromagnética. Esse comportamento corpuscular do fóton foi explicado por Einstein, como mencionado anteriormente,

através do experimento do efeito fotoelétrico²⁸ em 1905 e que lhe rendeu, junto com os seus trabalhos em física teórica na área de relatividade, o Prêmio Nobel de física em 1921^{11,12}.

As previsões da mecânica quântica foram verificadas experimentalmente com um grau extremamente alto de precisão. Muitas vezes isso tem sido feito com estruturas incrivelmente grandes e sofisticadas como o Grande Colisor de Hádrons (GCH), o maior acelerador de partículas do mundo (Figura 16). De acordo com o denominado princípio de correspondência entre a mecânica clássica e a quântica, todos os objetos obedecem às leis da mecânica quântica. A mecânica clássica é apenas uma aproximação para grandes sistemas de objetos, equivalente a uma mecânica quântica estatística de uma grande coleção de partículas. As leis da mecânica clássica, portanto, seguem as leis da mecânica quântica como uma média estatística no limite de grandes sistemas.

Figura 16: Três imagens do chamado solenoide de múon compacto (21 metros de comprimento por 15 de altura e 15 de largura, pesando aproximadamente umas 12.500 toneladas) que é um dos detectores de partículas construídos no Grande Colisor de Hádrons (GCH), o maior acelerador de partículas do mundo, com 27 km de circunferência. Localizado próximo a Genebra, na Suíça, o GCH tem contribuído para desvendar alguns dos segredos da teoria quântica, como a partícula chamada de bóson de Higgs, predita inicialmente em 1964 e detectada somente em julho de 2012²⁹.



As consequências mais importantes são:

- Em estados ligados, como o elétron girando ao redor do núcleo de um átomo, a energia não se troca de modo contínuo, mas sim de modo discreto (descontínuo), em transições cujas energias podem ou não ser iguais umas às outras. A ideia de que estados ligados têm níveis de energias discretos é devida diretamente a Planck.
- É impossível atribuir ao mesmo tempo (i.e., simultaneamente) a posição e o momento exatos de uma partícula quântica, eliminando assim o conceito de trajetória, que é essencial em mecânica clássica. Em vez de trajetória, o movimento de partículas em mecânica quântica é descrito por meio da chamada função de onda, que nada mais é do que uma função da posição da partícula e do tempo.

²⁸ Efeito fotoelétrico – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

²⁹ Solenoide de Múon Compacto – Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org) (Acesso em maio/2023).

- A função de onda é interpretada por Max Born como uma medida da probabilidade de se encontrar a partícula em determinada posição e em determinado tempo. Esta interpretação é a mais aceita pelos físicos hoje, no conjunto de atribuições da Mecânica Quântica regulamentados pela Escola de Copenhagen. Assim, para descrever a dinâmica de um sistema quântico deve-se, portanto, achar sua função de onda, e para este efeito usam-se as equações de movimento, propostas de maneira independente por Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger.

As aplicações da mecânica quântica tanto no início (primeira revolução quântica) quanto na atualidade (segunda revolução quântica) são resultado do enorme sucesso que ela teve em explicar muitas das características do nosso universo e é frequentemente a única teoria que pode revelar os comportamentos individuais das partículas subatômicas que compõem a matéria. A mecânica quântica também é extremamente importante para entender, por exemplo, como átomos individuais são unidos por uma ligação covalente para formar moléculas. Ela também pode fornecer informações quantitativas sobre os processos de ligação iônica e covalente mostrando explicitamente quais moléculas são energeticamente favoráveis em relação a outras assim como, os tamanhos das energias envolvidas^{11,12}.

Em vários aspectos, muitas das tecnologias modernas operam em uma escala em que os efeitos quânticos são significativos. Aplicações importantes da mecânica quântica incluem química quântica, óptica quântica, computação e comunicação quânticas, ímãs supercondutores, magnetômetros S.Q.U.I.D. (Superconducting QUantum Interference Device), diodos emissores de luz, amplificadores ópticos, laser, transistores e semicondutores, microprocessadores, imagens em medicina e pesquisa em materiais como ressonância magnética nuclear e microscopia eletrônica^{11,12}.

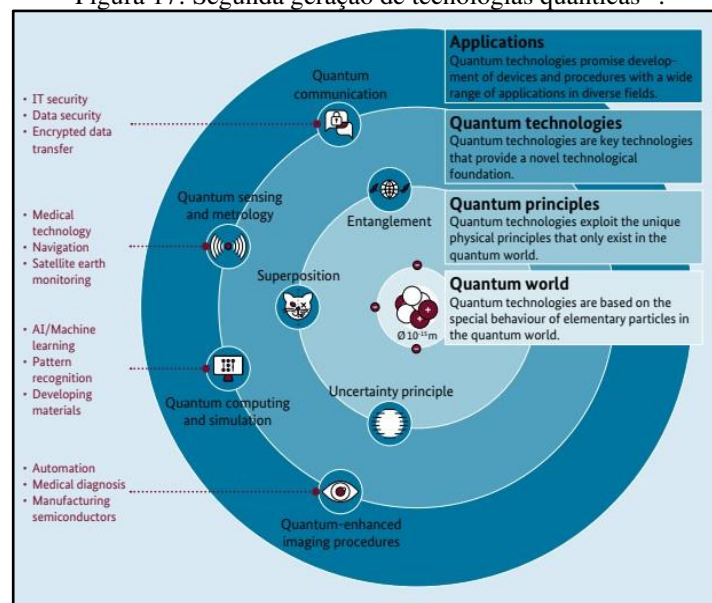
3.3 O SURGIMENTO DA SEGUNDA REVOLUÇÃO QUÂNTICA

O experimento de 1950 realizado pela física sino-americana Chien Shiung Wu, em colaboração com seu assistente de pesquisa, Irving Shakhov ficou conhecido como experimento WS. É comumente apontado como sendo o primeiro experimento capaz de representar o fenômeno de entrelaçamento quântico antes mencionado, tornando-se a chave para o desenvolvimento de novas tecnologias, tais como a criptografia, o teletransporte, e comunicação e computação quânticas. Foi o início da Segunda Revolução Quântica³⁰. O fenômeno do entrelaçamento quântico se mostrou tão relevante para a ciência que o físico francês Alain Aspect, premiado por seus trabalhos experimentais associados ao EPR e o teorema de Bell, cunhou o termo segunda revolução quântica por considerar a década de 60 como o

³⁰ A. M. Maia Filho e I. Silva; O experimento WS de 1950 e as suas implicações para a segunda revolução da mecânica quântica; Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 2, e20180182 (2019).

momento de mudança na física e de grande avanço tecnológico. A habilidade experimental dos físicos em manipularem individualmente sistemas quânticos, tais como elétrons e fótons, também faz parte desta revolução na física. De maneira semelhante à primeira revolução quântica, a qual se refere ao próprio advento e desdobramentos da mecânica quântica, em meados da década de 1920, a segunda revolução quântica também teve seu desenvolvimento de maneira gradual. A própria cultura material, associada às técnicas e à instrumentação disponível à época para a obtenção de resultados significativos, teve seu avanço gradualmente. Se pensarmos na segunda revolução quântica com base nos experimentos, onde o fenômeno do entrelaçamento foi um dos principais a ser desenvolvido, fica claro que esta teoria iria precisar de algumas gerações de experimentos para chegar até o estágio atual. Um fator importante que contribuiu para a consolidação da segunda revolução quântica foi a maneira com que os pares de fótons emaranhados foram produzidos, além das técnicas de detecção e do aparato experimental que se desenvolveu ao longo dos anos.

Figura 17: Segunda geração de tecnologias quânticas³¹.



Surgiram assim, decorrentes dessa nova era denominada de segunda revolução quântica, as chamadas tecnologias quânticas, com aplicações que, até recentemente, eram inimagináveis. Estas novas tecnologias são claramente disruptivas e é inegável o papel fundamental, preponderante e estratégico que elas terão nas próximas décadas, principalmente nas áreas de segurança e defesa. Dentre elas destacamos a computação quântica, criptografia quântica, simulação quântica, metrologia quântica, sensores quânticos, imagem quântica, internet quântica etc. (Figura 17).

³¹ Adaptado de: Quantum technologies – from basic research to market; Federal Ministry of Education and Research (Germany); A Federal Government Framework Program (2022).

Muitos dispositivos eletrônicos operam sob efeito do tunelamento quântico que está presente até nos interruptores de luz que não funcionariam se os elétrons não pudessem realizar um túnel quântico através da camada de oxidação nas superfícies de contato do metal. Os chips de memória flash encontrados nas unidades USB usam o tunelamento quântico para apagar suas células de memória. Alguns dispositivos de resistência diferencial negativa também utilizam o efeito de tunelamento quântico, como o diodo de tunelamento ressonante. Ao contrário dos diodos clássicos, sua corrente é transportada por tunelamento ressonante através de duas ou mais barreiras de potencial. Seu comportamento de resistência negativa só pode ser entendido com a mecânica quântica: à medida que o estado confinado se aproxima do chamado nível de energia de Fermi, a corrente túnel aumenta. À medida que se afasta, a corrente diminui. A mecânica quântica é essencial para entender e projetar esses dispositivos eletrônicos¹².

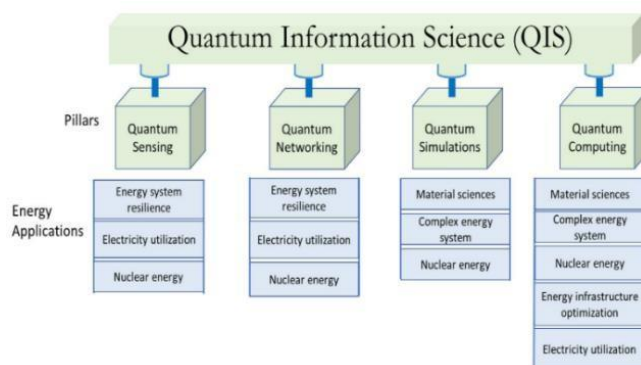
Os pesquisadores estão atualmente buscando métodos robustos de manipulação direta de estados quânticos. Esforços estão sendo feitos para desenvolver mais completamente a criptografia quântica, que teoricamente permitirá a transmissão segura e garantida de informações. Uma vantagem inerente gerada pela criptografia quântica quando comparada à clássica é a detecção de hackers realizando espionagem passiva. Este é um resultado natural do comportamento dos bits quânticos; devido ao chamado efeito observador, se um bit em um estado de superposição fosse observado, o estado de superposição entraria em colapso e se tornaria um estado autônomo. Como o destinatário pretendido esperava receber o bit em um estado de superposição, o destinatário saberia que houve um ataque, porque o estado do bit não estaria mais no estado original.

A teoria quântica também tem fornecido descrições precisas para fenômenos como o funcionamento de muitos biológicos diferentes dando lugar à chamada biologia quântica, incluindo o estudo de receptores de cheiro e de estruturas de proteínas. Trabalhos recentes sobre fotossíntese forneceram evidências de que as correlações quânticas desempenham um papel essencial nesse processo fundamental das plantas e de muitos outros organismos. Mesmo assim, a mecânica clássica geralmente pode fornecer boas aproximações aos resultados obtidos de outra forma pela física quântica, normalmente em circunstâncias com grande número de partículas. Como as fórmulas clássicas são muito mais simples e fáceis de calcular que as fórmulas quânticas, as aproximações clássicas são usadas e preferidas quando o sistema é grande o suficiente para tornar insignificantes os efeitos da mecânica quântica. Embora a computação quântica tenha recebido a maior parte da atenção em torno das tecnologias quânticas, existem também outras enormes possibilidades na área de defesa e segurança como mostrado na Figura 17 e que veremos em detalhes a seguir.

3.3.1 Sensoriamento quântico

Os sensores quânticos são baseados em átomos ou fótons ultrafrios, cuidadosamente manipulados usando superposição ou emaranhamento em "estados quânticos" específicos. Ao explorar o fato de que os estados quânticos são extremamente sensíveis a perturbações, os sensores quânticos são capazes de medir pequenas diferenças em todos os tipos de propriedades diferentes, como temperatura, aceleração, gravidade ou tempo. O sensoriamento quântico tem potencial transformador para nossa tecnologia de medição e detecção. Não só permite medições muito mais precisas e sensíveis, como também abre possibilidades para medir coisas que nunca fomos capazes de medir antes. Para citar alguns, os sensores quânticos poderiam nos permitir descobrir exatamente o que está sob nossos pés através de mapeamento subterrâneo; fornecer sistemas de alerta precoce para erupções vulcânicas; permitir que sistemas autônomos "vejam" ao virar das esquinas; e fornecer scanners portáteis que monitoram a atividade cerebral de uma pessoa³². Embora as Tecnologias Quânticas possam parecer tecnologias de um futuro distante, os primeiros sensores quânticos já estão no mercado (por exemplo, relógios atômicos e gravímetros). Olhando para o futuro, podemos esperar que mais aplicações de sensoriamento quântico estejam disponíveis ao longo dos próximos cinco a sete anos, com dispositivos de Navegação e Temporização de Posicionamento quântico (PNT) e tecnologias de radar quântico como aplicações específicas a serem observadas.

Figura 18: Os quatro pilares da QIS e as possíveis aplicações para diferentes áreas relacionadas à pesquisa e engenharia de energia³³.



Especificamente na área de energia, o papel a ser desempenhado pelos sensores quânticos será extraordinário. O sensoriamento quântico já está criando oportunidades transformadoras para explorar outras maneiras de fazer medições ultrasensíveis de múltiplos parâmetros. Ao mesmo tempo, o crescente interesse em sensoriamento quântico criou oportunidades para sua implantação visando melhorar os processos relativos à produção, distribuição e consumo de energia. A utilização segura de

³² Quantum Sensors Could Let Autonomous Cars 'See' around Corners - Scientific American (Acesso em maio/2023).

³³ Scott E. Crawford et al.; Quantum Sensing for Energy Applications: Review and Perspective; Adv. Quantum Technol. 2021, 2100049 (2021).

energia depende de enfrentar os desafios relacionados à estabilidade dos materiais e a sua função, o monitoramento seguro da infraestrutura e a precisão na detecção e medição³³.

3.3.2 Comunicação quântica

O potencial da comunicação quântica depende de sua promessa de permitir uma comunicação de dados ultra segura, potencialmente até mesmo completamente não hackeável. Atualmente, nossa troca de dados depende de fluxos de sinais elétricos que representam '1s' e '0s' correndo através de cabos de fibra óptica. Um hacker que consegue acessar esses cabos pode ler e copiar esses bits enquanto eles viajam pelo cabo. Na comunicação quântica, por outro lado, a informação transmitida é codificada em uma partícula quântica em uma superposição de '1' e '0', o chamado 'qubit'. Por causa da sensibilidade dos estados quânticos a perturbações externas, sempre que um hacker tenta capturar quais informações estão sendo transmitidas, o qubit "colapsa" para um "1" ou um "0" – destruindo assim a informação quântica e deixando um rastro suspeito. A primeira aplicação da comunicação quântica é chamada de Quantum Key Distribution (QKD), que usa partículas quânticas para a troca de chaves criptográficas. No QKD, os dados reais são transmitidos através da infraestrutura de comunicação tradicional usando bits normais, no entanto, as chaves criptográficas necessárias para descriptografar os dados são transmitidos separadamente usando partículas quânticas. Uma extensa experimentação em QKD já está ocorrendo, tanto usando a comunicação terrestre quanto a comunicação baseada no espaço. Em 2016, a China lançou o primeiro satélite de ciência quântica do mundo, Micius, que desde então demonstrou QKD intercontinental terra-satélite e satélite-terra, garantindo uma reunião por videoconferência entre Pequim e Viena³⁴.

3.3.3 Teletransporte quântico

O teletransporte quântico seria o próximo passo na comunicação quântica. Enquanto no QKD as chaves criptográficas são distribuídas usando tecnologia quântica, com o teletransporte quântico é a própria informação que está sendo transmitida usando pares quânticos emaranhados. A maior distância em que o teletransporte quântico foi alcançado até agora por cabo de fibra óptica é de 50 quilômetros, e o desafio nos próximos anos é escalar o teletransporte quântico para permitir uma comunicação segura em distâncias maiores³⁵. O objetivo final na comunicação quântica é criar uma internet quântica: uma rede de computadores quânticos emaranhados conectados com comunicação quântica ultra segura garantida pelas leis fundamentais da física. No entanto, uma internet quântica não só requer teletransporte quântico em distâncias muito grandes, mas também exigiria o

³⁴ National agenda on quantum technology: the Netherlands as an international centre for Quantum Technology - QuTech (Acesso em maio/2023).

³⁵ Entanglement sent over 50 km of optical fiber (uibk.ac.at) (Acesso em maio/2023).

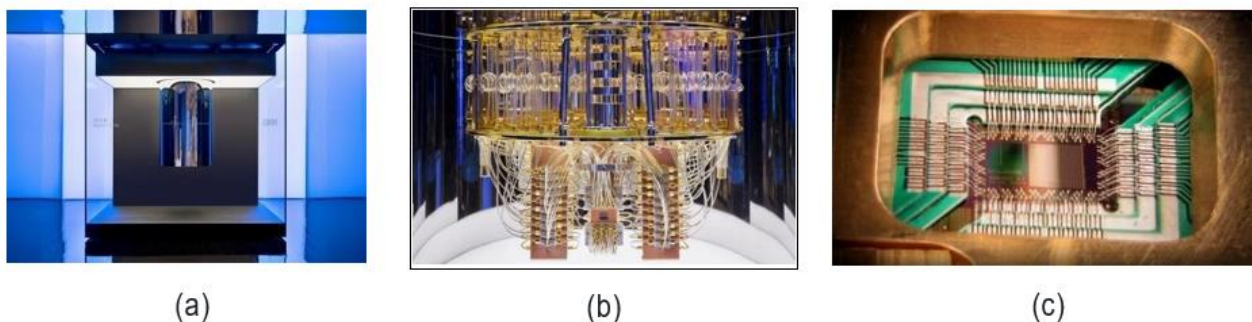
desenvolvimento adicional de outras tecnologias habilitadoras cruciais, como processadores quânticos, uma pilha de internet quântica abrangente, incluindo protocolos de internet e aplicativos de software de internet quântica. Este é realmente um esforço de longo prazo e, embora seja difícil determinar quando exatamente essa tecnologia vai estar pronta, a maioria dos estudiosos se refere a um horizonte de tempo de 10 a 15 anos.

3.3.4 Computação quântica

Outra aplicação da mecânica quântica é o desenvolvimento de computadores quânticos, que devem executar determinadas tarefas computacionais exponencialmente mais rápido que os computadores clássicos. Em vez de usar bits clássicos, os computadores quânticos usam qubits (ou quantum bits), que podem estar em estados superpostos. Programadores quânticos são capazes de manipular a superposição de qubits, a fim de resolver problemas que a computação clássica não pode fazer de maneira eficaz, como pesquisar bancos de dados não classificados ou fatorar números inteiros. A IBM alega que o advento da computação quântica pode progredir nos campos da medicina, logística, serviços financeiros, inteligência artificial e segurança na nuvem.

A computação quântica aumentará significativamente nossa capacidade de resolver alguns dos problemas computacionais mais complexos. Na verdade, a computação quântica é dita ser tão diferente da computação clássica, como um computador clássico difere do ábaco. Como explicado acima, enquanto os computadores clássicos realizam cálculos usando dígitos binários (0 ou 1), os computadores quânticos representam informações usando bits quânticos (qubits) que podem estar em uma superposição de ambos os estados (0 e 1 ao mesmo tempo). Como os qubits são extremamente sensíveis a perturbações externas, para poder controlá-los, manipulá-los e explorá-los, os qubits precisam ser resfriados até um nível extremamente próximo da temperatura mínima absoluta (ou zero kelvin), em torno de 15 mK. Isso é mais frio do que o espaço sideral. Na verdade, o interior de um computador quântico é o lugar conhecido mais frio do universo.

Figura 19: Imagens do computador quântico desenvolvido pela IBM denominado Q System One: (a) imagem externa; (b) imagem das conexões internas dentro do criostato que opera na temperatura de 15mK; (c) imagem do chip, que é o processador fabricado com qubits baseados em junções Josephson feitas a base de nióbio^{36,37}.



Qubits permitem que computadores quânticos (Figura 19) façam vários cálculos ao mesmo tempo, potencialmente resultando em um imenso aumento na eficiência computacional em oposição aos computadores clássicos. Há uma série de aplicações em que os computadores quânticos serão particularmente transformadores:

- Simulação de sistemas físicos para descoberta de fármacos e projeto de novos materiais.
- Resolução de problemas complexos de otimização em supply chain, logística e finanças.
- Combinação com inteligência artificial para aceleração de machine learning.
- Fatoração de números inteiros, permitindo a descriptação dos protocolos de cibersegurança mais utilizados (por exemplo, RSA, um algoritmo de encriptação assimétrica, utilizado para transmissão segura de dados).

Grandes empresas de tecnologia (chamadas de Big Techs) como IBM, Google e Microsoft estão correndo pela supremacia quântica, que é o ponto em que um computador quântico consegue resolver um problema que nenhum computador clássico poderia resolver em qualquer quantidade viável de tempo. Em outubro de 2019, o Google afirmou ter alcançado a supremacia quântica em seu computador quântico de 53 qubits. No entanto, os críticos dizem que o problema resolvido no experimento do Google não tinha valor prático e que, portanto, a corrida pela supremacia quântica ainda está em andamento. Os computadores quânticos atuais têm cerca de 60 qubits, mas novos desenvolvimentos se sucedem em rápida sucessão e as ambições são altas. Em setembro passado, a IBM anunciou um roteiro para o desenvolvimento de seus computadores quânticos, incluindo sua meta de construir um computador quântico com 1000 qubits ainda neste ano de 2023³⁸. O Google tem seu próprio plano de construir um computador quântico de um milhão de qubits até 2029³⁹. Com

³⁶ The Quantum Computing Era Is Here. Why It Matters—And How It May Change Our World. (forbes.com) (Acesso em maio/2023).

³⁷ The Sounds of IBM: IBM Quantum - YouTube (Acesso em maio/2023).

³⁸ IBM promises 1000-qubit quantum computer—a milestone—by 2023 | Science | AAAS (Acesso em maio/2023).

³⁹ 1 Million Qubit, Error Corrected Computer : Google's Goal (quantumcomputingreport.com) (Acesso em maio/2023).

computadores quânticos de 1000 qubits, os chamados computadores Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ), já podemos ver algumas aplicações práticas valiosas no design de materiais, descoberta de medicamentos ou logística. Os próximos cinco a dez anos, portanto, serão incrivelmente produtivos para a computação quântica.

Um grande diferencial em termos de computação quântica será quando for possível embarcá-las nos diferentes meios, o que afetará fortemente, por exemplo, a área de robótica. Ainda, deverá ser possível associar a nova área de inteligência artificial quântica. Essa combinação de tecnologias certamente terá fortíssimo impacto na sociedade tanto civil quanto militar.

4 TECNOLOGIAS QUÂNTICAS & DEFESA NACIONAL

Estudar, compreender e trabalhar com mecânica quântica é um dos maiores desafios da ciência e da engenharia de todos os tempos. Derivar a partir dela as denominadas Tecnologias Quânticas é a maior revolução tecnológica da história humana. Elas prometem impactar fortemente, direta ou indiretamente, todas as áreas. Uma delas será, certamente, a de segurança e defesa nacional, como pode ser amplamente constatado na Figura 20 a seguir.



As Tecnologias Quânticas têm o potencial de trazer novas e profundas capacidades, permitindo-nos medir o que até agora não era possível de ser mensurado, transformando a cibersegurança e permitindo resolver problemas que nunca fomos capazes de resolver antes. No

⁴⁰ Adaptado de: Krelina, M.; Quantum technology for military applications; EPJ Quantum Technol. 8, 24 (2021); <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>

ambiente de defesa e segurança, duas aplicações terão implicações particularmente significativas a curto e médio prazo⁴¹.

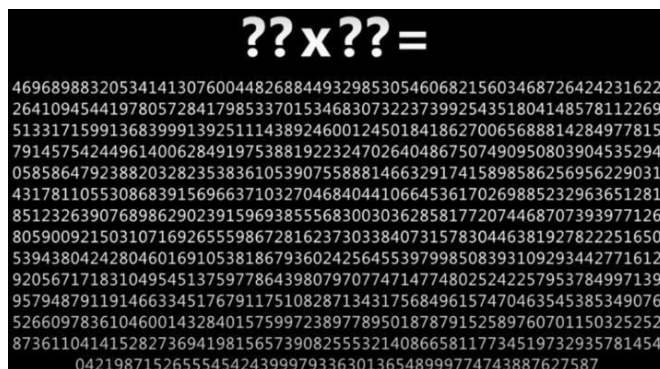
Em primeiro lugar, devemos considerar as aplicações do sensoriamento quântico. Os sensores quânticos apresentam diversas e promissoras aplicações militares. Por exemplo, sensores quânticos poderiam ser usados para detectar submarinos e aeronaves furtivas, e poderiam ser usados para determinar Posição, Navegação e Temporização (PNT). Tais dispositivos PNT quânticos poderiam ser usados como sistemas de navegação inercial confiáveis, que permitiriam a navegação sem a necessidade de referências externas, como GPS. Esta seria uma capacidade revolucionária para a navegação subaquática em submarinos, por exemplo, mas também como um sistema de navegação de reserva para plataformas acima da água em caso de perda de sinal GPS.

Os primeiros sensores quânticos já estão disponíveis comercialmente, tornando-se a tecnologia mais madura em sensoriamento, comunicações e computação. Além disso, para a comunicação e computação quânticas, espera-se que o setor civil impulse o seu desenvolvimento, dado o imenso valor potencial que elas têm para a indústria civil. No entanto, para o sensoriamento quântico, aplicações potenciais como PNT quântico e radar quântico são particularmente interessantes para os militares. Portanto, cabe aos militares apoiarem e orientar a pesquisa e o desenvolvimento nessa área para tornar reais essas aplicações potenciais.

Em segundo lugar, devemos considerar a chamada ameaça quântica representada pela computação quântica. Como mencionado na seção anterior, a fatoração de inteiros é um tipo de problema que os computadores quânticos podem resolver de forma particularmente eficiente. A maior parte da nossa infraestrutura digital e basicamente tudo o que fazemos online – seja videoconferência, envio de e-mails ou acesso à nossa conta bancária online – é criptografada através de protocolos baseados na dificuldade de resolver este tipo de problemas de fatoração de inteiros (por exemplo, o algoritmo RSA). Embora computadores quânticos que sejam utilizáveis do ponto de vista prático ainda precisem ser desenvolvidos, o algoritmo quântico para resolver esses problemas e descryptografar nossa comunicação digital, ou seja, o algoritmo de Shor, já foi desenvolvido em 1994 e está esperando por um computador quântico capaz de executá-lo. Em 1994, Peter Shor apresentou um algoritmo para computador quântico visando fatorar um número inteiro de tamanho arbitrário. Um cálculo para 4096 bits, usando um computador clássico de 100 MHz levaria 10^{26} anos para ser resolvido. O mesmo problema, usando o algoritmo de Shor num computador quântico, poderia ser concluído em aproximadamente cinco horas. A Figura 21 exemplifica o problema de fatoração de inteiros utilizado para proteger informações potencialmente confidenciais.

⁴¹ NATO Review - Quantum technologies in defence & security (Acesso em maio/2023).

Figura 21: Exemplo de um problema de fatoração de inteiros, que constitui a base dos nossos atuais sistemas de cibersegurança⁴².



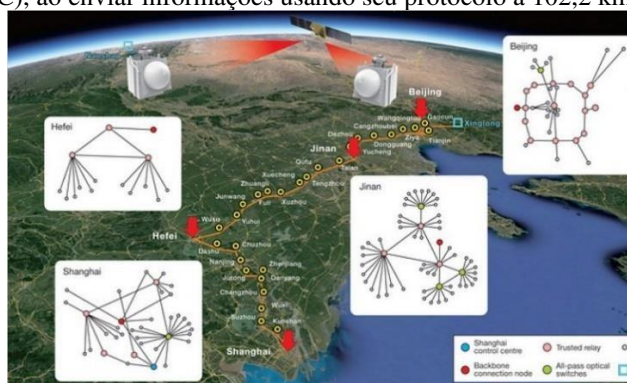
Embora possa se pensar que qualquer calculadora gráfica seria capaz de resolver esse problema matemático aparentemente simples, na verdade, o supercomputador mais rápido do mundo levaria toda a vida útil do universo para resolvê-lo. Um computador quântico, no entanto, seria capaz de resolvê-lo em alguns minutos. Trata-se de uma ameaça urgente para a sociedade, mas também é urgente do ponto de vista da segurança e defesa nacional, ou seja, de conteúdo militar dada a importância de uma comunicação segura. Para combater essa ameaça, teremos que atualizar completamente toda a nossa infraestrutura digital tornando-a segura usando criptografia que seja resistente ao fator quântico, ou seja, segura contra computadores quânticos e clássicos. Uma opção seria esperar que a comunicação quântica (QKD ou teletransporte quântico) amadureça e use essa tecnologia quântica para proteger-se contra uma outra tecnologia quântica. No entanto, o tempo não está do nosso lado. Não só a tecnologia de computação quântica poderia superar o desenvolvimento da comunicação quântica, como a ameaça já está presente. Com a perspectiva de futuros computadores quânticos, os hackers poderiam roubar informações criptografadas hoje, armazená-las e descriptografá-las em 10 ou 15 anos usando um futuro computador quântico. A melhor opção é implementar a denominada Criptografia Pós-Quântica (PQC), novos algoritmos criptográficos clássicos (ou seja, não quânticos) que nem mesmo os computadores quânticos serão capazes de resolver. O NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia) equivalente ao INMETRO brasileiro, liderou uma competição internacional para selecionar o(s) algoritmo(s) PQC a ser(em) padronizado(s) e adotado(s) em todo o mundo. O processo começou em 2016 e em julho de 2020 o NIST anunciou que tinha sete candidatos finais. Podemos esperar que o NIST faça sua seleção final para padronização e estabeleça padrões reais até 2024. Os tomadores de decisão em todos os setores e dentro das Forças Armadas devem escrever essas datas em seus diários e começar a se preparar para uma grande atualização de segurança cibernética⁴³.

⁴² In the war for information, will quantum computers defeat cryptographers? | Craig Costello - YouTube

⁴³ Cyber Centre's summary review of final candidates for NIST Post Quantum Cryptography standards - Canadian Centre for Cyber Security (Acesso em maio/2023).

Novos avanços na pesquisa e desenvolvimento de tecnologia quântica têm o potencial de trazer novas e extraordinárias capacidades para as forças armadas. Dado o considerável interesse e financiamento para Tecnologias Quânticas vindo tanto da indústria civil quanto dos governos, espera-se que a tecnologia amadureça e que novas aplicações quânticas estejam disponíveis nos próximos anos.

Figura 22: Rede criada pela China quebrando recorde de distância de comunicação direta com segurança quântica. Uma equipe de pesquisadores da Universidade de Tsinghua, na China, quebrou o recorde de distância para comunicação direta com segurança quântica (QSDC), ao enviar informações usando seu protocolo a 102,2 km^{44,45}.

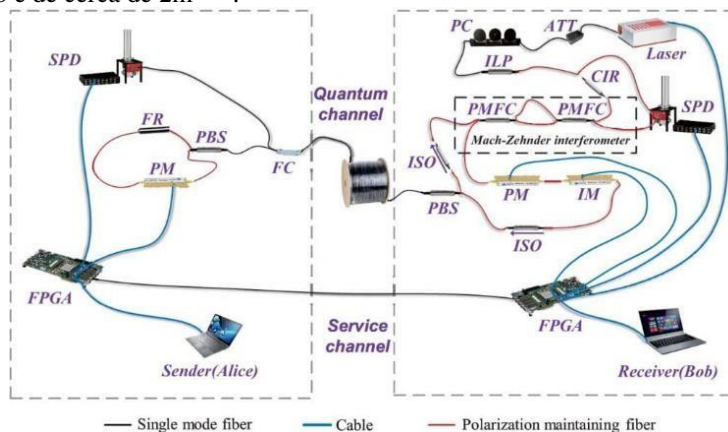


No entanto, para que os militares possam realmente colher os benefícios dessas novas tecnologias quânticas, é essencial que eles se envolvam proativamente neste campo e orientem o desenvolvimento e a adoção das aplicações militares das tecnologias quânticas. Isso deve incluir não apenas o envolvimento com grandes empresas de tecnologia, mas também especificamente com startups, universidades e institutos de pesquisa, pois estes são vitais para a inovação nessas novas tecnologias. Entretanto, dado tratar-se de tecnologias com conteúdo muito sensível para a segurança e defesa do país, esse processo de desenvolvimento deve ser liderado pelos militares e a suas instituições de pesquisa, desenvolvimento e inovação. A experimentação precoce dessas tecnologias não apenas contribui para seu desenvolvimento, mas também permite que as diferentes organizações militares que serão dele usuárias, se familiarizem com essas tecnologias e suas capacidades, o que ajuda a facilitar a adoção futura. Além disso, a participação ativa no ecossistema quântico aumenta a compreensão dos militares sobre os riscos potenciais associados às tecnologias quânticas, especificamente dentro do domínio cibernético. Exemplo disso é o desenvolvimento da internet quântica que usa comunicação quântica. A China é o país do mundo que está mais avançado nessa tecnologia (Figuras 22 e 23).

⁴⁴ China quebra recorde de distância de QSDC - Olhar Digital (acessado em maio/2023).

⁴⁵ Zhang, H., Sun, Z., Qi, R. et al.; Realization of quantum secure direct communication over 100 km fiber with time-bin and phase quantum states; Light Sci Appl 11, 83 (2022).

Figura 23: Configuração do experimento utilizado na Figura 22; laser: 1550 nm com frequência de repetição de pulso de 50 MHz; Conjunto de porta programável de campo FPGA, atenuante ATT, controlador de polarização de PC, polarizador em linha ILP, Circulador óptico CIR, divisor de feixe de polarização PBS, acolinhador de filtro FC 90:10, polarização PMFC, modulador de fase PM, modulador de intensidade IM com proporção de extinção de 45,1 dB, isolador ISO, rotor Faraday DE 90 graus, detector de nanofios de nanofiação de 85% com mais de 85% de eficiência de detecção, taxa de contagem escura de 50Hz e tempo de reset de 15 ns. O interferômetro assimétrico Mach-Zehnder consiste em dois PMFC, e o comprimento de atraso é de cerca de 2m^{44,45}.

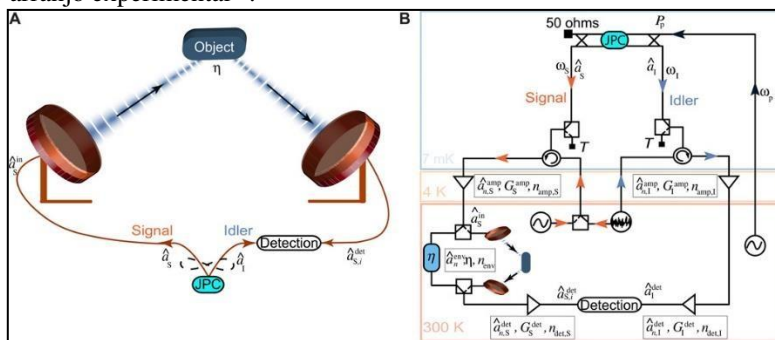


Assim, as Tecnologias Quânticas constituem uma área emergente e potencialmente disruptiva de enorme e fundamental relevância para as áreas de defesa e segurança. São tecnologias duais e, como tais, são de interesse para a indústria da defesa e da segurança e para atores militares e governamentais. As Tecnologias Quânticas para aplicações militares introduzem novas capacidades, melhorando a eficácia e aumentando a precisão, levando assim à chamada guerra quântica, em que devem ser estabelecidas novas estratégias, doutrinas, políticas militares etc. Essas tecnologias podem ter aplicações militares para vários domínios de guerra, por exemplo, terra, ar, espaço, eletrônica, cibernética, submarina e no chamado domínio ISTAR (do inglês intelligence, surveillance, target acquisition and reconnaissance ou seja inteligência, vigilância, aquisição de alvos e reconhecimento). Embora a guerra moderna de quarta geração seja caracterizada pela descentralização e pela perda do monopólio dos Estados na guerra, os exércitos de países avançados caracteristicamente têm acesso a tecnologias militares de ponta, o que inclui o aparecimento das Tecnologias Quânticas em toda a sua extensão.

O desenvolvimento do chamado radar quântico desenvolvido em 2020 pela China é um novo tipo de tecnologia de detecção. É chamada de iluminação quântica de micro-ondas, mas é mais conhecida como radar quântico que utiliza fótons de micro-ondas entrelaçados como método de detecção. Certamente, os radares quânticos poderão anular a tecnologia stealth dos chamados aviões invisíveis⁴⁶. O princípio de funcionamento do radar quântico é simples (Figura 24). Em vez de usar micro-ondas "no atacado", dois grupos de fótons, chamados de sinal e inativo, ou intermediário, são entrelaçados. Os fótons de sinal são enviados para o objeto de interesse, enquanto os fótons intermediários são medidos em relativo isolamento, livres de interferências e ruídos. Quando os fótons de sinal são refletidos pelo objeto, o entrelaçamento entre eles e os fótons inativos é perdido, mas uma

pequena quantidade de correlação sobrevive, criando uma assinatura que descreve a existência ou a ausência do objeto, independentemente do ruído no ambiente. Ou seja, um grupo de fótons atinge o objeto, e as informações são lidas nos seus parceiros entrelaçados, que nunca vão até o objeto.

Figura 24: Implementação de iluminação quântica de micro-ondas: (A) Representação esquemática de micro-ondas QI. Uma fonte quântica gera e emite campos de micro-ondas emaranhados estacionários em dois caminhos separados. (B) Diagrama de circuito do arranjo experimental⁴⁶.



O processo é basicamente o mesmo usado recentemente para criar uma câmera quântica que, literalmente, fotografa o que nunca visualizou. "O que nós demonstramos é uma prova de conceito para o radar quântico de micro-ondas" disse Shabir Barzanjeh, que já havia ajudado a desenvolver a tecnologia de radar quântico em 2015. Usando o entrelaçamento gerado a alguns milésimos acima do zero absoluto, foi possível detectar objetos de baixa refletividade a temperatura ambiente⁴⁶. Embora o entrelaçamento quântico seja frágil, o radar quântico tem algumas vantagens sobre os radares convencionais. Por exemplo, em baixos níveis de energia, os sistemas de radar convencionais sofrem de baixa sensibilidade, tendo dificuldade em distinguir entre a radiação refletida pelo objeto e o ruído de fundo. A iluminação quântica oferece uma solução para esse problema, uma vez que as semelhanças entre o sinal e os fótons intermediários gerados pelo entrelaçamento quântico tornam mais eficaz distinguir os fótons de sinal (recebidos do objeto de interesse) do ruído gerado no ambiente⁴⁷.

5 CIENCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM DEFESA NACIONAL

⁴⁶ Construído primeiro protótipo de radar quântico (inovacaotecnologica.com.br) (Acesso em maio/2023).

⁴⁷ Shabir Barzanjeh, Stefano Pirandola, David Vitali, Johannes M. Fink; Microwave quantum illumination using a digital receiver; Science Advances 6, 19, 0451 (2020). DOI: 10.1126/sciadv.abb0451.

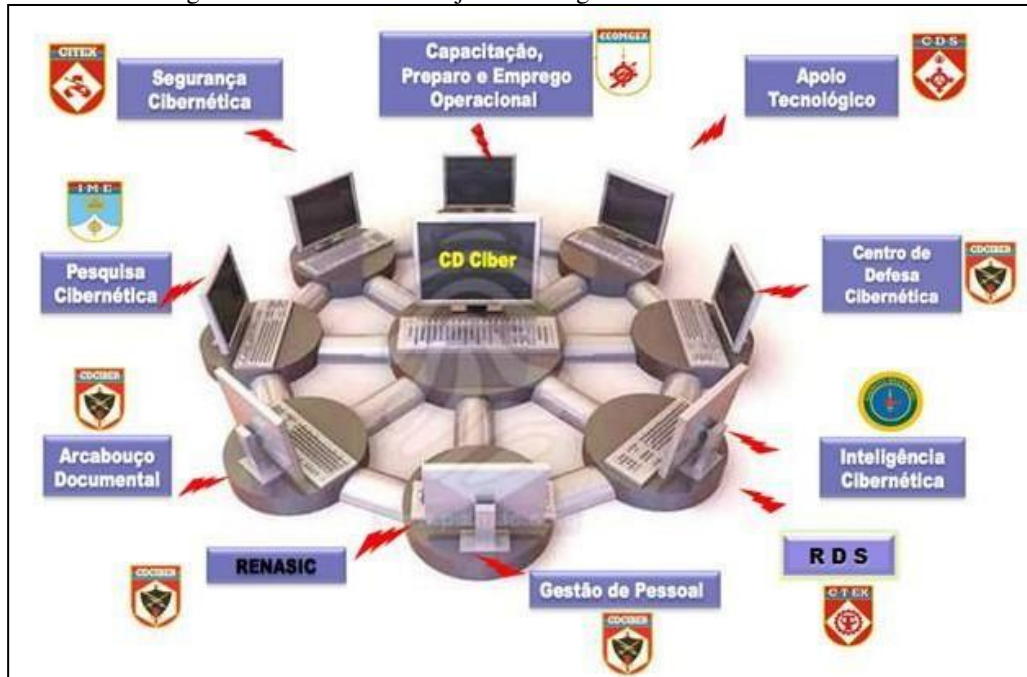
Figura 25: O principal sistema anti-blindagem de ombro do mundo, o chamado Javelin dispara um míssil guiado automaticamente para o alvo após o lançamento, permitindo que o artilheiro se proteja e evite o contra-fogo. Soldados ou fuzileiros navais podem se reposicionar imediatamente após o disparo, ou recarregar para enfrentar outra ameaça. Usando um perfil de ataque superior arqueado, Javelin sobe acima de seu alvo para melhorar a visibilidade e, em seguida, ataca onde a armadura é mais fraca. Para disparar, o artilheiro coloca um cursor sobre o alvo selecionado. A unidade de lançamento de comando Javelin então envia um sinal de bloqueio antes do lançamento para o míssil. Com seu design de lançamento suave, o Javelin pode ser disparado com segurança de dentro de edifícios ou bunkers. Ele foi desenvolvido e produzido para o Exército e Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA pela Joint Venture Javelin entre a Lockheed Martin em Orlando, Flórida e a Raytheon em Tucson, Arizona⁴⁸.



A atual guerra Ucrânia-Rússia mostra que a tecnologia do lançador de mísseis Javelin (Figura 25) colocou toda a frota de blindados russos fora do conflito, já que frente ao seu poder de fogo, ela ficou literalmente obsoleta. Essa tecnologia não acoplou – ainda – nenhum conceito associado às tecnologias quânticas que, na sua maioria, ainda não são embarcáveis. Mas isso chegará a ser realidade muito rápido. Provavelmente, quando isso acontecer, as Tecnologias Quânticas estarão associadas a conceitos de inteligência artificial, robótica, cibernética, comunicação quântica, computação quântica e internet quântica descritas anteriormene. Como expressou o Almirante britânico John Fisher em 1915, quando se referia à Primeira Guerra Mundial, que o conflito ia ser ganho pelas invenções. Nada mais verdadeiro.

⁴⁸ Javelin Weapon System | Lockheed Martin (Acesso em maio/2023).

Figura 26: Estrutura do Projeto Estratégico de Defesa Cibernética⁴⁹.



O Setor Cibernético abrange atualmente todos os aspectos da vida cotidiana, uma vez que atua através do emprego de modernos meios tecnológicos, redes de computadores e de comunicações destinadas ao trânsito de informações. Desta forma, seja no atendimento das necessidades individuais das pessoas, seja dando suporte para as organizações diversas, inclusive aquelas dedicadas a setores estratégicos do País, como a Defesa Nacional, a Cibernética é um campo de atuação vasto e complexo, e sua segurança implica na segurança das pessoas e da própria Nação.

Figura 27: Concepção do Programa Estratégico SISFRON⁵⁰.



⁴⁹ CIBERNÉTICA - Site EPEX (eb.mil.br) (Acesso em maio/2023).

⁵⁰ SISFRON - Site EPEX (eb.mil.br) (Acesso em maio/2023).

A Figura 26 mostra a estrutura do Projeto Estratégico de Defesa Cibernética, a partir do Comando de Defesa Cibernética (ComDCiber). A Figura 27 mostra a concepção do Programa Estratégico de Vigilância das Fronteiras (SISFRON). Em ambas as figuras fica clara o potencial de vulnerabilidade do sistema e a capacidade de dano que pode significar o acesso a ele de hackers. E isso, como vimos antes, é completamente possível de acontecer haja vistas que estruturas cibernéticas bem mais sofisticadas do que as nossas (Pentágono, Nasa, US Navy etc.) foram invadidas por hackers em diversas oportunidades infringindo a eles pesados danos financeiros e, principalmente, estratégicos.

5.1 A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL, A GUERRA DO FUTURO E AS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

A influência da tecnologia em todas as áreas, em particular na de Defesa, vem sendo cada vez mais preponderante⁵¹. A chamada Quarta Revolução Industrial está afetando o crescimento econômico, o desenvolvimento, a segurança e a soberania dos países, as relações internacionais e em particular a natureza dos conflitos bélicos. Diferentemente das antecessoras, lastreadas em inovações disruptivas em áreas específicas, a Quarta Revolução Industrial se desenvolve a partir da confluência de inovações ocorridas em várias áreas. Nesse diapasão, não é possível destacar algo que sintetize a essência desse novo período, como inegavelmente foram as molas propulsoras das três primeiras revoluções industriais, tal como a construção de ferrovias e a invenção da máquina a vapor; o advento da eletricidade e da linha de montagem; e o surgimento dos semicondutores, da computação e da internet. Porém, é possível identificar algumas tendências, como hiperconectividade, digitalização e convergência digital; e o compartilhamento de informações e dados, estes, muitas vezes, armazenados na “nuvem”. O aparecimento da computação quântica e da internet quântica terá enormes reflexos em todos esses aspectos.

A Quarta Revolução Industrial é caracterizada pela combinação de avanços ocorridos em três dimensões: (a) a física que compreende incessantes e surpreendentes progressos em novos materiais, sensores, nanotecnologia, microeletrônica e infraestrutura física de Tecnologia de Informações e Comunicações (TIC); (b) a lógica alavancada pela Inteligência Artificial (IA), protocolos de comunicações e algoritmos utilizados em vasta gama de aplicações; e (c) a Humana e da Natureza compreendendo estudos de fenômenos naturais, do mundo animal e de segredos do funcionamento e do comportamento dos seres humanos. Algoritmos genéticos, redes neurais artificiais, técnicas de aprendizagem, sequenciamento genético, bioimpressão e enxames de drones, são algumas das linhas de pesquisa inspiradas por tais estudos.

⁵¹ J. F. Galdino; A quarta revolução industrial e a guerra do futuro; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 126-128 (2023).

Avanços concomitantes nessas dimensões tornam possível o desenvolvimento de: internet ubíqua e móvel de alto desempenho; sensores menores, mais poderosos e baratos; robótica; Internet das Coisas (IoT, do termo em inglês Internet of things), Internet das Coisas no Campo de Batalha (IoBT, do termo em inglês Internet of Battle-Field Things), cidades inteligentes, veículos autônomos, impressão aditiva, tecnologias vestíveis, enxames de VANT, armas inteligentes etc. Inovações baseadas em IA estão surgindo em decorrência: do fácil acesso à grandes quantidades de dados, os quais são imprescindíveis para a aprendizagem e convergência de algoritmos “inteligentes”; do aumento exponencial na capacidade de processamento (Lei de Moore) e de armazenamento, de ser fundamental para viabilizar a execução de algoritmos de IA em tempo real; dos avanços no desenvolvimento de software de busca e de técnicas de aprendizagem profunda; da disponibilização de sensores que capturam volumoso conjunto de dados em tempo real; e do progressos na área de atuadores, em muitos casos, essenciais para que as ações advindas dos algoritmos de IA sejam implementadas. Quando as novas tecnologias quânticas, principalmente a computação, forem embarcáveis o desempenho funcional de veículos autônomos, enxames de VANT e todas as áreas da robótica deverá ser extraordinário. Ainda, se associado à IA, teremos veículos com desempenho funcional hoje inimaginável.

Na defesa, o uso de Tecnologias Quânticas terá reflexos muito significativos. Eletrônica embarcada e componentes de software passam a assumir papel relevante nos artefatos e nos vetores aéreos, navais e terrestres. O advento das Redes Cognitivas, Computação em Nuvem e os avanços nas comunicações digitais em canais sem fio intensificam a interconectividade. As tecnologias críticas subjacentes a esses assuntos permitem às Forças Armadas desenvolverem o princípio de guerra centrada em rede, a adoção de sofisticados sistemas de comando e controle, bem como alcançar consciência situacional no Teatro de Operações em nível de detalhe jamais observado na história.

Destaca-se também que avanços em dispositivos (sensores, detectores e atuadores) quânticos, processamento digital de sinais utilizando computação quântica, materiais avançados desenvolvidos usando IA associada à computação quântica, automação, comunicação quântica, processadores digitais e processamento paralelo irão impulsionar extraordinariamente o desenvolvimento Sistemas Militares Mecatrônicos Autônomos. O advento dessa grande rede provocará, indubitavelmente, mudanças paradigmáticas na face da batalha, descortinando novos e hercúleos desafios, oportunidades e ameaças. Robôs e outros sistemas inteligentes operando com Tecnologias Quânticas e com IA, com graus variados de autonomia e locomoção bioinspirada, enxames de drones, diversos tipos de sensores, tecnologias vestíveis formarão uma grande rede, por meio da qual esses dispositivos irão interagir em tempo real não apenas entre si, mas também com seus controladores e “clientes” humanos. Executando inúmeras missões críticas, esses sistemas inteligentes serão alvos altamente compensadores. A

segurança – amparada por protocolos baseados em Tecnologias Quânticas - será, portanto, um requisito primordial na concepção e operação de sistemas de guerra inteligentes e suas redes de apoio. Indubitavelmente, os avanços são enormes, mas trazem grandes ameaças, particularmente para países que possuem baixa capacidade tecnológica acumulada em setores críticos, sendo capazes apenas de operar as tecnologias advindas da Quarta Revolução Industrial.

Uma das facetas mais visíveis disso é a Guerra Cibernética, cujas vulnerabilidades intensificam-se com a dependência tecnológica, mas que serão extraordinariamente minimizadas através do uso de Tecnologias Quânticas (computação, comunicação e criptografia quânticas). O estudo da 4ª Revolução Industrial e da Guerra Cibernética torna-se fulcral à evolução da arte e do pensamento militar e da Guerra Híbrida. É notório o aumento de casos de ataques cibernéticos divulgados na imprensa e emblemático de um novo paradigma o ataque desferido pelas Forças Armadas Israelenses, bombardeado um prédio que supostamente servia de base para um grupo de hackers do grupo terrorista Hamas. A face mais obscura e pouco explorada desse período bélico relaciona-se com os reflexos em relação à Guerra do Futuro. Porém, é evidente e translúcido que, nessa nova era, a dependência tecnológica será extremamente grave para um país, comprometendo-se de forma massiva não apenas o crescimento econômico e o desenvolvimento, mas principalmente a segurança e a soberania, por se intensificarem as vulnerabilidades cibernéticas. A forma mais rápida e segura de se proteger-se contra essas ameaças é o desenvolvimento de sistemas de proteção baseados em tecnologias quânticas, tanto pela adoção de sistemas de comunicação e computação quânticas, quanto pelo uso de dispositivos (sensores, detectores e atuadores) baseados em tecnologias quânticas.

Assim, mais do que nunca é preciso investir em ferramentas de prospecção, planejamento estratégico e estabelecer metas e objetivos focados nas áreas auspiciosas e portadoras de futuro, dentre as quais, as Tecnologias Quânticas são, de longe, as mais promissoras. Torna-se peremptório realizar planejamento de médio e longo prazos para retirar o Brasil do enorme atraso no campo da inovação, e colocá-lo em posição compatível com sua musculatura fisiográfica e econômica, sobretudo em áreas que se inserem no cerne da Quarta Revolução Industrial. Certamente é o caso das Tecnologias Quânticas. A busca, na maioria das vezes infrutífera, de se tentar suplantando o gap tecnológico, sobretudo em áreas inerentes a Era Industrial deve ficar em um segundo plano.

5.2 SUPREMACIA QUÂNTICA E DEFESA NACIONAL: O PAPEL DAS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

No cenário quase sombrio descrito anteriormente, qual é a relação entre a supremacia quântica de uma nação e a defesa nacional?⁵². A União Europeia anunciou em 2016 um investimento de US\$ 1,13 bilhão em um projeto para acelerar as pesquisas em tecnologias quânticas⁵³. Em 2019, durante o Workshop Quantum Computing “Are You Ready?” foi apresentada a iniciativa europeia para as comunicações quânticas. Ela foca no desenvolvimento de uma estratégia no campo da computação quântica que emerge em vários setores como o financeiro, o farmacêutico, o da indústria, o da energia e o da mobilidade. Em abril de 2019, matéria da revista *IstóÉ Dinheiro* mostrou, sob o título “A corrida pelo computador quântico”, que esta nova tecnologia, de acordo com o Boston Consulting Group (BCG), deve movimentar no mundo até 2030 ao redor de US\$ 50 bilhões com avanços associados em diversas áreas como economia, agricultura e medicina. Ainda de acordo com essa mesma revista, a corrida para estar na vanguarda dessa tecnologia não se limita ao setor privado, sendo que o governo norte-americano anunciou, em dezembro de 2018, que iria disponibilizar US\$ 1,2 bilhão para financiar pesquisa quântica no país. Entretanto, é a China que lidera os investimentos visando obter produtos com Tecnologias Quânticas ao destinar US\$ 10 bilhões para a construção de um laboratório de Ciência da Informação Quântica inaugurado em 2020. A nossa dependência de sistemas avançados de tecnologia de informação é total e absoluta em todas as áreas. Em defesa nacional certamente isso é um fator de extrema importância. Em junho de 2018, a IBM apresentou o denominado Summit, supercomputador mais rápido do mundo construído com recursos de inteligência artificial e machine learning, mas sem recursos de computação quântica nem de materiais supercondutores. Este computador tradicional (i.e., não quântico), considerado como sendo a ferramenta científica mais poderosa já criada até então, foi projetado e construído para o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América e é capaz de realizar 200 quatrilhões de operações matemáticas ($200.000.000.000.000.000 = 2 \times 10^{17}$) por segundo. No final de setembro de 2019, o jornal britânico *Financial Times* anunciou que a empresa Google teria atingido a “supremacia quântica”, ponto em que um computador quântico teria realizado uma operação que uma máquina tradicional não seria capaz de fazer. Nesse caso, o chip Sycamore, projetado pelo Google, teria executado em pouco mais de três minutos um cálculo que o IBM Summit levaria 10 mil anos para realizar. Pouco mais de um mês depois, na edição 284 de outubro de 2019, matéria da *Revista Fapesp* mostrou que os computadores quânticos, finalmente, estão saindo dos laboratórios de pesquisa e ficando disponíveis comercialmente. Nesse sentido, em janeiro desse ano, a IBM fez o lançamento do denominado Q System One que é o

⁵² Araujo-Moreira, F.M.; Supremacia quântica e defesa nacional: a nova realidade; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 245-247 (2023).
⁵³ Quantum Manifesto - A New Era of Technology (tno.nl) (Acesso em maio de 2023).

primeiro computador quântico universal disponível ao público e que pode realizar vários tipos de operações. Um programa de inteligência artificial produzido na Universidade de Flinders, na Austrália, desenvolveu sozinho em 2019 uma nova vacina para o vírus influenza (gripe) tão eficaz que testes em humanos já estão sendo realizados nos Estados Unidos da América. Por outro lado, pesquisadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology), da Universidade de Oxford e da IBM, mostraram que o uso da computação quântica poderia acelerar o Machine Learning, tecnologia que junto com Deep Learning são derivadas (e incluídas) na inteligência artificial (IA). Juntar ambas as áreas têm um potencial de processamento de informações e obtenção de resultados muito grande que, na maioria das situações, tem enorme relevância estratégica. Durante a pandemia da Covid-19, ficou claro, e de maneira semelhante ao trabalho feito na Austrália, que dispormos de uma vacina confiável e economicamente viável num curto período poderia ter salvado milhões de vidas no mundo. Dispor de recursos científicos de última geração tais como a computação quântica é essencial para a soberania de uma nação. É essencial, quase emergencial, o Brasil desenvolver e adotar Tecnologias Quânticas em todos os setores estratégicos, principalmente o de segurança e defesa.

5.3 O SISTEMA DE INOVAÇÃO MILITAR E AS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

Levando em conta os parágrafos anteriores, aparece como sendo fundamental a integração do sistema de inovação militar com o sistema nacional de inovação⁵⁴. Ao longo da história, incontáveis avanços tecnológicos, originalmente destinados ao desenvolvimento de produtos e sistemas militares, “transbordaram” para outros setores gerando inovações de ruptura com enormes benefícios para a sociedade. Particularmente no século XX, sofisticadas pesquisas de interesse militar impulsionaram inovações e o crescimento econômico dos países pioneiros. Malgrado a tese defendida por alguns pensadores, especialmente aquela expressa por Samuel P. Huntington em seu famoso livro *O choque de civilizações*⁵⁵, prosperou hipótese diversa de que a queda do Muro de Berlim representaria a promessa de uma época de progressivo declínio de crises e de grandes conflitos internacionais. Em que pese a proliferação de conflitos sugerindo a confirmação das teorias de Samuel P. Huntington, o fato é que o desmantelamento da União Soviética contribuiu, sobretudo, para reduzirem-se os gastos direcionados à defesa, tanto para a aquisição de artefatos bélicos, como para a realização de pesquisas

⁵⁴ J. F. Galdino; A importância da integração do sistema de inovação militar e o sistema nacional de inovação; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 155-157 (2023).

⁵⁵ O livro *O choque de civilizações* é uma teoria proposta pelo cientista político Samuel P. Huntington, segundo o qual as identidades culturais e religiosas dos povos serão a principal fonte de conflito no mundo pós-Guerra Fria. A teoria foi originalmente formulada em 1993, num artigo da *Foreign Affairs* chamado "The Clash of Civilizations?" como reação ao livro de Francis Fukuyama *The end of history and the last man*, lançado em 1992. Huntington posteriormente expandiu sua tese num livro de 1996 chamado *The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order*. A expressão foi usada pela primeira vez por Bernard Lewis num artigo do exemplar de setembro de 1990 de *The Atlantic Monthly*, chamado *The Roots of Muslim Rage* (do inglês, *As Raízes da Ira Muçulmana*).

científicas, arrefecendo assim o dinamismo do setor e o correspondente efeito de transbordamento. Por outro lado, nos últimos trinta anos, o ritmo de inovação voltado para setores civis da sociedade vem atingindo patamares que os especialistas definem como inusitados na história. Nesse mesmo diapasão, estudos prospectivos indicam que essa tendência intensificar-se-á ainda mais em razão: dos impressionantes avanços nas comunicações digitais de abrangência planetária; do invulgar dinamismo que impulsionou a Era do Conhecimento; e, mais recentemente, dos progressos que vem ocorrendo no bojo da Quarta Revolução Industrial. Em suma, com apoio estatal em pesquisas básica e aplicada e os investimentos privados focados em inovação, os desenvolvimentos voltados para o mercado civil tornaram-se grandes impulsionadores dos avanços científicos e tecnológicos. Contribuíram para essa conjuntura: o modelo de Inovação Aberta; a criação de redes de inovação, que transcendem fronteiras nacionais; e a proliferação de ambientes de inovação, como parques, polos e distritos. Enfim, atualmente, são inúmeras as demonstrações de *transbordamento às avessas*, em que inovações destinadas ao mercado convencional, são robustecidas e integradas para gerar novas capacidades na área de Defesa. Isso vem se tornando especialmente corriqueiro nas chamadas tecnologias genéricas e duais, com grande potencial mercadológico, em especial, aquelas ligadas à área da 4ª Revolução Industrial. Por conta disso, uma maior sinergia entre os setores de P&D militares e civis, bem como as adoções do modelo de Inovação Aberta e de Tríplice Hélice na Defesa são uma tendência mundial e o mote de diretrizes e aspirações nacionais. As estratégias de Desenvolvimento e de Defesa tornam-se cada vez mais indissociáveis e impulsionadas pela inovação. De fato, em um mundo globalizado e no qual emergem novas e desafiadoras ameaças assimétricas que se somam às tradicionais, a inovação torna-se fundamental para promover o crescimento econômico, o acúmulo das capacidades tecnológicas e a autonomia em áreas sensíveis à Defesa Nacional. A sinergia entre setores civis e militares que labutam para promover a inovação pode tornar eficiente, eficaz e parcimonioso o uso dos recursos públicos, sobretudo em um País com déficit em diversos setores da sociedade e com poucos meios para investir em ciência e tecnologia, especialmente, na área de Defesa. A área de Defesa é altamente demandante de ciência, tecnologia e inovação. No caso de tecnologias quânticas, dado o seu alto custo e seu enorme grau de solicitação, essa demanda crescerá várias ordens de grandeza. Por conta disso, tanto o Livro Branco de Defesa, quanto a Política Nacional de Defesa e a Estratégia Nacional de Defesa destacam a associação, a vinculação e a mútua dependência entre a Estratégia de Defesa e a Estratégia de Desenvolvimento, bem como a necessidade de desenvolvimento científico e tecnológico para promover autonomia em áreas importantes, como a cibernética, a nuclear e a espacial. Novamente, as Tecnologias Quânticas deverão impactar fortemente essas três grandes pelo que fica clara a necessidade de seu preempatório desenvolvimento e implantação nas nossas forças armadas e estruturas associadas.

O Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército Brasileiro passa por um processo de transformação objetivando criar um ambiente favorável à inovação; fortalecer a Base Industrial de Defesa do Brasil; e, particularmente, intensificar a integração e cooperação entre a academia, o governo e as corporações. Uma importante etapa desse processo é a consolidação do Sistema Defesa, Indústria e Academia de Inovação (SisDIA), recém-criado e inspirado no modelo da Hélice Tríplice, e a implantação da Agência de Gestão de Inovação Tecnológica (AGITEC) do Exército Brasileiro, vocacionada para as áreas de informações e prospecções tecnológicas, gestão do conhecimento científico tecnológico, gestão da propriedade intelectual e promoção da cultura de inovação no Exército Brasileiro. Todavia, o Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército Brasileiro interage, depende e está condicionado ao sistema nacional de inovação do Brasil. Portanto, a capacidade de inovação daquele, depende visceralmente da deste sistema. Assim, analisar este sistema é importante não apenas para a adoção de políticas públicas que viabilizem o crescimento e desenvolvimento nacionais, mas também para impulsionar a área de Defesa. Convém lembrar que a expressão “Sistema Nacional de Inovação” (SNI) foi cunhada por Freeman, no final da década de 1980, para designar um conjunto de instituições públicas e privadas, cujas atividades e interações contribuem para a criação, avanço e difusão das inovações tecnológicas de um país. O conceito vem evoluindo desde então, mas seus elementos essenciais mantêm-se preservados. Mensurar a capacidade de um sistema de inovação de um país é uma tarefa bastante complexa, porém peremptória não apenas para subsidiar a definição de políticas públicas, mas também para avaliar os resultados das aplicações das ações estratégicas decorrentes dessas iniciativas. Muitos estudos e pesquisas são realizados com o objetivo de desenvolver indicadores de inovação e avanços marcantes ocorrem nessa área. Dentre os indicadores que avaliam a capacidade de inovação de SNI, destacam-se os produzidos pelo Global Innovation Index (GII). Infelizmente, a capacidade de inovação do Brasil é bastante modesta, conforme mostram diversos indicadores. Considerando os índices do GII, o Brasil encontra-se na 54ª posição no ranking internacional, segundo o relatório de 2022 do GII⁵⁶. Dessa maneira é necessário considerar a priorização de áreas tecnológicas como premissa para impulsionar a inovação. E nesse conjunto, as Tecnologias Quânticas certamente deverão ser prioritárias.

5.4 INOVAÇÃO MILITAR E AS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

Ao se analisar a importância da integração do Sistema de Inovação Militar com o Sistema Nacional de Inovação aparece uma notável faceta da interdependência desses sistemas de inovação: os transbordamentos de inovações desenvolvidas para atender necessidades militares para aplicações

⁵⁶ Brasil ganha três posições no ranking global de inovação — Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (www.gov.br) (Acesso em maio/2023).

civis e o aproveitamento daquelas originalmente destinadas ao mercado convencional na concepção de produtos e sistemas de emprego militar⁵⁷. Há também inúmeras interdependências decorrentes dos insumos que um sistema aporta no outro e diversos projetos de pesquisas e desenvolvimento empreendidos com a participação de atores dos dois sistemas. Entretanto, para se alcançar um sistema militar de inovação expressivo, é fundamental dispor de um Sistema Nacional de Inovação (SNI) pujante e eficiente. Todavia, em que pesem as diversas políticas e ações estratégicas nacionais promovidas nos últimos vinte anos para impulsionar o SNI do Brasil, o país exibe indicadores de desempenho bastante modestos e indícios de tendências não permitem vislumbrar um cenário auspicioso no curto prazo. Ao contrário, as inferências são de afastamento dos países mais inovadores do mundo. O Brasil encontra-se na 54ª posição no ranking internacional de inovação, sendo superado por alguns países da América Latina. A suposta incompatibilidade entre os recursos investidos e os pífios indicadores de desempenho do SNI levou o Tribunal de Contas da União (TCU) a realizar uma auditoria operacional nos programas nacionais voltados para a promoção da inovação. O escopo da auditoria se restringiu a aspectos de governança e concluiu que não há planejamento de longo prazo para o setor, tampouco coordenação das iniciativas governamentais, nem formas eficientes de se avaliar a execução e os resultados das ações desencadeadas. O estudo indicou o excesso de temas priorizados na Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI), a ausência de mecanismos que visem desdobrar a estratégia em planos de médio prazo, a carência de eficientes processos de acompanhamento das ações empreendidas, resultando em falhas de monitoramento e avaliação das políticas públicas de fomento à inovação, além do inexistente alinhamento das iniciativas governamentais com a ENCTI em questão. São enormes os desafios a serem superados para que o Brasil logre posição de destaque no campo da inovação. A literatura especializada difunde muitos estudos que analisam o desempenho do Sistema Nacional de Inovação do Brasil e discutem óbices que extrapolam os aspectos de governança apontados pelo TCU. Entretanto, um dos mais instigantes e essenciais é, indubitavelmente, a realização de ações estratégicas de longo prazo, que devem compreender o planejamento, a execução, o monitoramento e a avaliação dessas estratégias. Porém mais complexo do que diagnosticar o problema é descobrir como resolvê-lo. Nessa caminhada um passo inicial basilar é a fixação de prioridades, seara na qual, é mister trazer à baila iniciativas recentes do Exército Brasileiro. Desde 2009, quando iniciou o seu Processo de Transformação, o Exército vem envidando esforços para ampliar sua capacidade de inovação e de planejamento de longo prazo a fim de proporcionar à Força Terrestre meios mais modernos para cumprir suas missões constitucionais em um contexto cada vez mais dinâmico e incerto. Inspiradas em teorias e práticas consagradas no mundo,

⁵⁷ J. F. Galdino; A priorização de áreas tecnológicas como premissa para impulsionar a inovação; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 189-192 (2023).

as ações em andamento no Exército buscam, dentre outros objetivos, aperfeiçoar seu planejamento estratégico de longo prazo com base na convergência e no desenvolvimento de eficientes metodologias de prospecção tecnológica, prontidão tecnológica, alinhamento estratégico e criticidade que em conjunto constituem a essência da denominada Metodologia de Planejamento e de Gestão da Inovação, desenvolvida pela AGITEC e que se encontra em fase de experimentação. Com isso, o processo decisório de nível estratégico, bem como os órgãos formuladores de políticas voltadas para o Sistema Militar de Inovação passarão a contar com subsídios que certamente aprimorarão suas práticas, pois resultarão da aplicação de métodos científicos consistentes. São informações detalhadas sobre: tecnologias portadoras de futuro, ainda nas fases de iniciação e de crescimento do ciclo de vida; seus impactos potenciais nas capacidades pretendidas pelo Exército no horizonte temporal de 20 anos; as vulnerabilidades decorrentes de uma eventual dependência estrangeira com relação às tecnologias prospectadas; os benefícios auferidos pelos domínios autóctones dessas tecnologias quanto ao Desenvolvimento e Soberania Nacionais; e os riscos tecnológicos de se empreender novos e instigantes projetos de Pesquisa e Desenvolvimento. Com esse arcabouço de informações, augura-se facilitar o complexo e fundamental processo de priorização de áreas tecnológicas para inovação. Apontado em alguns estudos que analisam o desempenho do SNI como um importante gargalo das políticas públicas voltadas para o setor, a falta de foco e a conseqüente pulverização dos recursos públicos destinados à promoção da inovação também é destacada no relatório do TCU. Identificar as vocações nacionais, selecionar as áreas tecnológicas e promover ações continuadas de longo prazo de fomento nessas áreas são temas que seguramente devem ser contemplados na concepção de uma PNI capaz de alçar o Brasil a uma posição de destaque na inovação. O Exército nos ensina que a solução para a falta de foco pode ser encaminhada com a adoção de ferramentas como Prospecção Tecnológica, Prontidão Tecnológica, Alinhamento Estratégico e Análise de Criticidade, fatores todos essenciais para que o desenvolvimento e adoção de Tecnologias Quânticas seja exitoso.

5.5 AS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS COMO VETOR DE TRANSFORMAÇÃO DO EXÉRCITO BRASILEIRO

Pelo anteriormente exposto, a gestão da inovação deve ser considerada como o vetor de transformação do Exército Brasileiro⁵⁸ e as Tecnologias Quânticas devem ser o seu carro-chefe. A indústria de defesa brasileira atingiu o apogeu na década de 1980, quando 90% das demandas do Exército eram atendidas pelo mercado interno e a pauta de exportação incluía diversos produtos de elevado valor agregado com considerável conteúdo nacional. A capacidade tecnológica do Brasil no

⁵⁸ J. F. Galdino; Gestão da inovação como vetor de transformação do Exército Brasileiro; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 288-291 (2023).

setor de defesa era reconhecida internacionalmente e o País figurava como o 8º maior exportador mundial nesse concorrido nicho de mercado. Por diversas razões internas e externas em 2013, o Brasil ocupava apenas a 23ª colocação no ranking das exportações de defesa. O período de “apagão” (de aproximadamente 25 anos) coincidiu com uma época de vertiginoso desenvolvimento tecnológico internacional e de intensas e marcantes transformações no mundo. Readquirir proeminência e alcançar elevada capacidade tecnológica é uma tarefa hercúlea, cujo sucesso depende da persistência de inventores e gestores, de investimento contínuo, da participação de diversos setores da sociedade, e, sobretudo, de planejamento estratégico de longo prazo. O abissal hiato tecnológico enfrentado pela Base industrial de Defesa (BID) e pelo EB revelou a necessidade de ir-se além da mera, conquanto imprescindível, aquisição de equipamentos novos e modernos. Era mister empreender um amplo Processo de Transformação no seio da Força, com o objetivo precípua de transmutar estruturas concebidas sob a égide da Era Industrial em uma organização capaz de enfrentar os complexos desafios da Era do Conhecimento e de responder, com oportunidade, às demandas do Exército Brasileiro. Nesse processo ganhou vulto a vertente de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), vertente na qual as Tecnologias Quânticas certamente deverão ter um papel mais do que preponderante. Destarte, o Departamento de Ciência e Tecnologia (DCT) elaborou estudos específicos que concluíram sobre a necessidade imperiosa de implantar-se: modelos de gestão da inovação que privilegiem a participação da comunidade científica nacional de forma ampla em assuntos de Defesa; que possibilitem o domínio de tecnologias críticas subjacentes aos produtos e sistemas de Defesa; que incentivem a pesquisa básica e aplicada, bem como a pesquisa e o desenvolvimento (P&D) em rede, congregando organizações civis e militares que labutam no campo da ciência e tecnologia do País, e que irmanadas terão melhores condições de ampliar a capacidade tecnológica nacional, passo indispensável para o desenvolvimento, o crescimento econômico e a soberania; que busquem a exploração da natureza dual das tecnologias desde os seus níveis iniciais de maturidade; e que realizem a proteção, divulgação e externalização dos ativos intangíveis do Exército Brasileiro em proveito do desenvolvimento da indústria nacional. Enfim, almeja-se um novo paradigma de gestão da inovação alinhado com a visão de um Exército Empreendedor, atento aos acontecimentos atuais, capaz de prospectar o futuro e as oportunidades de progresso tecnológico, ao mesmo tempo que valoriza suas tradições e reafirma os princípios e valores que notabilizam essa secular, permanente e regular Instituição do Estado brasileiro. Nesse diapasão, tornaram-se essenciais a adoção de paradigmas modernos na área de gestão da inovação, como a Inovação Aberta e a Tríplice Hélice, a realização de mudanças organizacionais em estruturas existentes e a criação de organizações específicas para contribuir com a gestão da inovação. Assim surgiram o Sistema de Defesa, Indústria e Academia de Inovação (SisDIA de Inovação) e a AGITEC. Por uma questão de exiguidade de espaço, focarei doravante nesta última. Ativada como Organização Militar

do DCT em janeiro de 2018, a AGITEC foi preparada para lidar com áreas complexas, multidisciplinares, abrangentes e fulcrais da Era do Conhecimento, como prospecção tecnológica, gestão do conhecimento científico-tecnológico, promoção da cultura de inovação e gestão da propriedade intelectual. Tendo por essência a condição de órgão de assessoramento, a Agência gera subsídios para contribuir com processos decisórios que promovam a criação de um ambiente favorável à inovação no campo científico-tecnológico, sobretudo em colaboração com os diversos setores da sociedade (Tríplice Hélice & Inovação Aberta).

5.6 A QUESTÃO FULCRAL: CIBERNÉTICA E A CAPACIDADE NACIONAL FRENTE ÀS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

Para alavancar o desenvolvimento e o crescimento econômico do Brasil é fundamental incentivar áreas indutoras das tecnologias que compõem a 4ª Revolução Industrial, dentre as quais se destaca a nova Cibernética, que deverá ser baseada em Tecnologias Quânticas. De não ser assim, a atual cibernética ficará rapidamente obsoleta, e pior, extremamente vulnerável. Uma análise cuidadosa nos mostra a sua importância e indícios da capacidade nacional⁵⁹. A interconectividade impactou transversalmente a sociedade e alçou a cibernética ao patamar de assunto estratégico, repercutindo simultaneamente nas expressões científica e tecnológica, política, econômica, militar e psicossocial das nações. Desenvolver tecnologias cibernéticas de amplo espectro de aplicações tornou-se fulcral para incorporar os extraordinários avanços advindos da 4ª Revolução Industrial antes mencionada, amplificar vocações técnicas e industriais, melhorar a qualidade de serviços e atividades essenciais ao funcionamento da sociedade sem, contudo, desgarnecer a segurança de infraestruturas críticas, ou expor a soberania nacional a riscos sem precedentes. Por força das relações humanas estabelecidas no ambiente doméstico ou corporativo, pessoas e objetos se conectam a intrincadas redes de comunicações, potencializando as possibilidades de intercâmbio de ideias e de conhecimentos e favorecendo a ciclos cada vez mais breves de aprendizado e inovação. Paradoxalmente, essa interconexão de valor inestimável também facilita que ações nefastas sejam perpetradas contra indivíduos, instituições e, até mesmo, Estados. Essas atividades ilegais não se restringem ao roubo e à exposição de dados para fins sombrios, mas abrangem ataques cujos epicentros eclodem na dimensão digital, e as consequências infringem danos no plano físico, impactando serviços essenciais ou conduzindo ao caos ou ao colapso de sistemas complexos como os utilizados nos setores aeroportuários, financeiros, geração e distribuição de energia elétrica, militares e de saúde pública/privada. Com frequência, as diferentes mídias difundem a ocorrência de problemas

⁵⁹ J. F. Galdino; Cibernética: importância e indícios da capacidade nacional; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 319-322 (2023).

econômicos, políticos, militares e geopolíticos desencadeados por exitosas ações cibernéticas. Essas notícias sugerem que as ameaças cibernéticas são capazes não apenas de provocar a desordem urbana, mas também de negar capacidades operativas militares explorando vulnerabilidades de sistemas, plataformas e produtos de defesa integrados em rede. Esse cenário suscita alguns questionamentos, como: em que estágio de evolução se encontra a ameaça Cibernética? Como o Brasil se posiciona em termos de capacidade tecnológica nesse setor? As respostas dessas questões podem subsidiar a adoção de políticas públicas e estratégias de Estado visando preparar adequadamente o País para enfrentar os desafios do futuro. A AGITEC conduziu um estudo de prospecção tecnológica sobre as principais ameaças cibernéticas, buscando explorar as questões supracitadas e concluiu que a cibernética, em amplo senso, ainda é uma área de conhecimento incipiente, sugerindo que seus efeitos, consequências e possibilidades apresentaram apenas as primeiras evidências. Ao avaliar o estágio de evolução das principais tecnologias, os atores mundiais mais proeminentes e a participação nacional, o estudo em comento evidenciou que o setor se encontra fragilizado quanto ao desenvolvimento autóctone, ao menos em relação a seus ativos de propriedade intelectual e de artigos científicos indexados. Essa constatação se coaduna com a histórica dependência do Brasil de fornecedores internacionais na obtenção de produtos e sistemas complexos, neste caso, nas áreas de tecnologias da informação e comunicação. A implementação em curso de infraestrutura importada para a nova geração de telefonia móvel celular de 5G no Brasil, ilustra a limitada capacidade tecnológica do País concernente ao desenvolvimento de ativos para o mundo digital, expõe vulnerabilidades nacionais a ataques cibernéticos, cujas consequências são potencialmente nefastas à Defesa e Segurança nacionais. Outros países, como a Índia, tomaram a decisão estratégica de desenvolver tecnologias visando a concepção de seus próprios sistemas de 6G em um futuro não muito distante. No aludido estudo, foram identificadas apenas 17 patentes depositadas no Brasil por residentes e 182 por não residentes, particularmente de empresas multinacionais com possíveis pretensões de realizar reserva de mercado no País. Chama atenção o baixo percentual de patentes de residentes, apenas 8,54%, muito aquém da média nacional que gira em torno de 20%, ou seja, se habitualmente a maior parcela das invenções protegidas no Brasil provém do capital intelectual estrangeiro, essa relação é ainda mais desfavorável no setor cibernético. Ao se confrontar a quantidade de patentes de nacionais ou residentes com o total evidenciado pelo estudo prospectivo de quase 51 mil no mundo, constringe constatar que a capacidade tecnológica nacional predita pelos documentos se mostra inexpressiva, sendo inferior a 0,04%. Em que pese modesta, a participação do País em termos de produção científica indexada gira em torno de 0,7%, bem superior à de patentes de invenção. Todavia, vale lembrar, que essa performance é bem inferior ao padrão médio do País que supera a marca de 3%. Além disso, os estudos indicam que o Brasil possui percentual maior de publicação nas ameaças cibernéticas com histórico mais remoto e que apresentam

estágio avançado do ciclo de vida. Nas tecnologias recentes a produção nacional é ainda mais modesta. Um futuro mais promissor passa por: intensificar a formação de recursos humanos; fomentar startups e empresas; e investir em P&D em Defesa Cibernética. Ações exitosas na Guerra do Futuro serão dependentes de tecnologias susceptíveis a ameaças cibernéticas e as Forças Armadas capazes de atuar neste domínio estarão mais bem preparadas para enfrentar as ameaças difusas que notabilizam o século XXI, logrando maior grau de liberdade para conduzir operações de múltiplo espectro. Nesse sentido, as Tecnologias Quânticas certamente vão desempenhar um papel fundamental. Sendo que a defesa do Estado é missão constitucional das Forças Armadas, para o seu cumprimento os empreendimentos envolvendo Ciência, Tecnologia e Inovação vêm assumindo uma relevância cada vez maior. No Processo de Transformação do Exército, iniciado em 2010, a efetiva participação da indústria e da academia é considerada fulcral para aprimorar a capacidade do Sistema Setorial de Inovação do Exército, encurtar os prazos das atividades de pesquisa e desenvolvimento, aumentar o conteúdo nacional de projetos estratégicos e elevar o estoque de conhecimento em temas críticos para o desenvolvimento de capacidades militares terrestres. Essa busca de integração cada vez maior com a parcela civil da sociedade vem contando com ações norteadas por referenciais teóricos modernos, como a Inovação Aberta, referenciais estes já difundidos e praticados nos países e setores empresariais que se destacam pela capacidade de inovação.

Outra área além da cibernética que será fortemente impactada pelas Tecnologias Quânticas será a de Inteligência Artificial (IA). Os estudos sobre Inteligência Artificial iniciaram-se na década de 1950, com os trabalhos seminais do inglês Alan Turing e com os empreendimentos da Corporação Research and Development (RAND), que em 1956 cria e financia o primeiro programa de inteligência artificial, o Logic Theorist, projetado para imitar as habilidades de resolução de problemas de um ser humano. As aplicações baseadas em IA, geralmente, empregam algoritmos sofisticados que executam uma quantidade surpreendente de operações lógicas e matemáticas, utilizam volumoso conjunto de dados para sua convergência e, em alguns casos, usam sensores e atuadores. No setor de defesa, as capacidades de percepção, cognição, gestão automatizada ou semiautônoma de artefatos bélicos habilitadas pela IA, têm potencial para adicionar nova dinâmica ao combate e aumentar a velocidade das ações ou de resposta para lapso temporal sem precedentes. As aplicações militares de IA são transversais e impactam áreas como coleta e análise de inteligência, logística, operações ciberespaciais, comando e controle, além de uma variada gama de armas de defesa antiaérea e de veículos militares autônomos. A evidência de dispositivos ciberfísicos na escala de 5 nanômetros, como o menor chip da IBM, corrobora a opinião de estudiosos, estrategistas e visionários do setor de defesa, para os quais as capacidades tecnológicas de alguns países possibilitarão construir artefatos bélicos como robôs militares e drones muito pequenos e altamente letais. Especialistas militares alertam que a IA possui o

condão de reduzir barreiras de entrada, ou seja, de permitir que países e empresas com pouco lastro tecnológico possam se tornar competitivos em curto intervalo de tempo, o que pode ser corroborado por análise da trajetória econômica das principais empresas emergentes no setor.

5.7 OS RUMOS PARA A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL QUÂNTICA

É a Inteligência Artificial Quântica a próxima fronteira a ser superada? Em recente estudo⁶⁰ de prospecção tecnológica realizado pela AGITEC foi investigado o tema de IA e mostrou que o Brasil contribui com apenas 1,84% das publicações científicas em revistas indexadas e com 0,39% dos depósitos de patentes de invenção no mundo. Sob a ótica do setor de defesa, esse estudo evidenciou como auspiciosa a aplicação da IA em Cibernética, Redes de Sensores sem Fio, Simulação, Detecção de Objetos e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), Sistemas de Comando e Controle e Sistemas Mecatrônicos. Aplicações como seleção, detecção e engajamento de alvos, e o uso autônomo de enxames de drones estão entre as expectativas mais endossadas de IA para a Guerra do Futuro. Em que pese importantes para múltiplos setores e essenciais para a defesa, constatou-se que os esforços nacionais de ciência e tecnologia para tais aplicações são ainda mais incipientes, uma vez que as principais iniciativas nacionais se voltam para energia, educação, inteligência computacional, direito, sistemas de informação, banco de dados, realidade virtual e agricultura de precisão. Em tempos remotos, espadas, arcos e flechas eram consideradas as mais avançadas e importantes armas de guerra. O estado da arte do pensamento militar revolucionou-se com o advento da pólvora e das armas de fogo. Outras inovações militares infletiram irreversivelmente o poder de combate na era moderna, mas nenhuma introduziu tanta capacidade de destruição e aniquilação em massa quanto as armas nucleares. No período pós-moderno, a Inteligência Artificial emerge como tecnologia disruptiva de baixa barreira de entrada, característica que permite a novos atores governamentais ou privados lograr protagonismo. Ao adicionar cognição a robôs, a artefatos cibernéticos, a armamentos e a diversos dispositivos, a IA associada com Tecnologias Quânticas demonstra potencial inimaginável incluindo a condução e coordenação de operações complexas com vantagens sem precedentes sobre a capacidade humana. Suas implicações transversais para múltiplos setores da economia, defesa e segurança nacional justificam as Políticas de Estado e as ações estratégicas adotadas por vários países que não pretendem negligenciar neste domínio tecnológico portador de futuro.

A capacidade científico-tecnológica é fundamental para impulsionar as expressões econômica e militar das nações⁶¹. Neste caso, ela é essencial para tornar mais eficiente, eficaz e dinâmico o

⁶⁰ J. F. Galdino; Inteligência artificial, ainda dá tempo; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 375-378 (2023).

⁶¹ J. F. Galdino; A indústria de defesa e a expressão militar do poder nacional; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 360-362 (2023).

Sistema Setorial de Inovação de Defesa que tem a Base Industrial de Defesa nacional como elemento fulcral. Assim sendo, inferir sobre o desempenho das empresas que atuam no setor de defesa pode evidenciar tendências ou fatos portadores de futuro com possibilidade de indicar mudanças no tabuleiro geopolítico mundial. As Forças Armadas de países que desenvolvem seus sistemas, equipamentos e armamentos ou que induzem adequadamente o desenvolvimento tecnológico e de fronteira autóctone, faz extensivo uso das capacidades técnicas nacionais e empreendem visão de longo prazo. Os investimentos em Defesa cooperam para o transbordamento tecnológico, ou seja, para que soluções técnicas concebidas originariamente para determinada finalidade logrem resultados mais abrangentes, gerando, entre outros ativos, conhecimento científico, patentes, profissionais capacitados e novas empresas, que servirão de insumos para um novo ciclo virtuoso. Os países que não possuem uma estratégia de Estado eficiente para impulsionar a ciência, a tecnologia e a inovação, especialmente, em assuntos de interesse militar, mormente conduzem processos de obtenção priorizando a aquisição no mercado externo em detrimento do desenvolvimento próprio. Entre as razões para abdicar ou restringir o desenvolvimento tecnológico interno, pode-se citar a premência de preservar a capacidade operativa, posto que atividades de P&D nacionais podem ensejar delongas orçamentárias, administrativas e até fabris que resultem na indisponibilidade do produto ou em sua disponibilidade posterior às necessidades da Força. Em suma, convém que os empreendimentos tecnológicos de impacto conciliem as prementes necessidades operacionais com o fortalecimento da BID nacional, buscando atingir um bom compromisso entre aquisição internacional e PD&I autóctone, particularmente visando aumentar o conteúdo nacional em áreas críticas sem alongar cronogramas de obtenção de produtos, sistemas e armamentos centrais para a manutenção da capacidade operacional da Força.

Para o desenvolvimento autóctone de tecnologias críticas de interesse da Defesa, que é o caso das tecnologias quânticas, deve-se promover maior integração entre Governo, Academia e setor produtivo (BID), ampliar o estoque de conhecimento nacional, elevar a capacidade de realizar P&D e impulsionar a inovação. O Sistema Setorial de Inovação de Defesa interage e depende do próprio Sistema Nacional de Inovação. Os grandes players buscam evitar que neófitos prosperem e logrem êxito no mercado mundial de Defesa. Nesse setor, que envolve a soberania dos países, fóruns econômicos e organismos multilaterais possuem pouca ou nenhuma ingerência.

6 SUMÁRIO & CONCLUSÕES

O século XIX foi conhecido como a era das grandes máquinas, por exemplo a máquina a vapor. Apesar dos inúmeros e importantes avanços em todas as áreas registrados século XX, ele certamente passa para a história como a era da informação. O século XXI era aguardado para dar início da nova

era da inovação. Entretanto, o que devia ter seguido seus antecessores e durar 100 anos, durou menos do que 20, dando lugar ao início da chamada era das Tecnologias Quânticas. Tal fato comprovou, mais uma vez, as previsões futuristas de Raymond Kurzweil, inventor e futurista norte-americano, feitas na década de 1980 relativas ao crescimento exponencial^{62, 63}.

O ex-engenheiro do Google, Raymond Kurzweil, se tornou pioneiro em campos de reconhecimento ótico de caracteres, síntese de voz, reconhecimento de fala e teclados eletrônicos, e há algum tempo vem trazendo algumas previsões para o futuro principalmente nesse tipo de segmento. Em 1990 ele previu que um computador conseguiria vencer dos campeões mundiais de xadrez no ano de 2000. Além disso, ele também conseguiu prever o surgimento de aparelhos como os computadores portáteis e smartphones, além da evolução da tecnologia sem fio e até mesmo da internet. Atualmente, suas previsões estão focadas principalmente na corrida da evolução em termos de inteligência artificial. Segundo ele, o rápido crescimento nesse campo fará com que a imortalidade seja alcançada em pouco tempo, até 2030. Ray acredita que esse processo irá evoluir no ponto de vista médico, principalmente, permitindo que a robótica, que ele denomina como nanobots, possam trabalhar de forma rápida no corpo humano a nível celular para combater tanto doenças quanto o envelhecimento. Com isso, se terá alcançado a imortalidade, já que ele afirma que os humanos poderemos aumentar a expectativa de vida mais de um ano a cada ano. Esses nanobots estariam implantados dentro do corpo, fluindo pela corrente sanguínea e fazendo reparos sempre que necessário. Independentemente do Ray acertar ou não essas próximas previsões, a questão central é que, para elas se tornarem realidade, muito possivelmente o serão somente através do uso das Tecnologias Quânticas.

Independentemente dessas previsões estarem ou não certas, o caso é que o uso dessas novas tecnologias é urgente e essencial principalmente nas áreas de segurança e defesa de forma a podermos garantir a nossa soberania como país. E, dados os objetivos marcadamente diferentes⁶⁴ dos três principais players – academia, corporações e forças armadas – parece óbvio que o processo de desenvolvimento e implantação das Tecnologias Quânticas, deve ser gerenciado e liderado pelas Forças Armadas, em particular pelo Exército Brasileiro. Isso, porque cabe às outras forças cuidar das outras duas áreas estratégicas, ou seja, a área nuclear cabe à Marinha do Brasil e do setor aeroespacial cabe à Força Aérea Brasileira. Integrado ao Programa de Defesa Cibernética na Defesa Nacional, o Exército Brasileiro desenvolve o seu Programa Estratégico de Defesa Cibernética, que tem por finalidade coordenar e integrar os projetos e processos do Setor Cibernético, bem como desenvolver

⁶² Raymond Kurzweil; *The Age of Intelligent Machines*; ISBN: 9780262111218; Ed. Mit Press (1990).

⁶³ Raymond Kurzweil; *The Age of Spiritual Machines*; ISBN: 0-670-88217-8; Ed. Viking Press (1999).

⁶⁴ O interesse precípua da academia é formar recursos humanos e gerar publicações; o interesse precípua do setor corporativo é gerar valor e lucros através do comércio dos seus produtos. No caso das Forças Armadas, esse interesse não é nem intelectual nem financeiro, mas a defesa da pátria e da sua soberania.

as capacidades cibernéticas das Forças Armadas, por meio de integração, coordenação e atuação conjuntas.

É inimaginável pensar que dados estratégicos e sigilosos das operações das nossas Forças Armadas tenham de ser analisados por um computador quântico estrangeiro como o Sycamore (do Google) ou o Osprey (da IBM) pela falta de equipamento local. Ou desenvolvemos de forma autóctone as Tecnologias Quânticas necessárias ou as nossas áreas de segurança e defesa ficarão, em pouco tempo, obsoletas com inimagináveis e nefastas consequências. Ninguém irá fazer por nós o nosso dever de casa⁶⁵.

Respondendo à pergunta: *quem deve gerenciar e liderar no Brasil o desenvolvimento dessas tecnologias?* A resposta é óbvia e decorrente do texto anterior: cabe ao Exército Brasileiro gerenciar e liderar o processo de pesquisa, inovação e desenvolvimento das diferentes tecnologias quânticas na forma que melhor se garanta o bem-estar da população e a soberania do Brasil.

⁶⁵ J. F. Galdino; Lições sobre os desafios enfrentados pela indústria de defesa do Brasil no período de 1950 a 1990; in: Collection of opinion articles on strategic studies in defense and security. ISBN 978-65- 87080-44-4; Ed. JC Sanches, FM Araujo-Moreira; 393-396 (2023).