

A Convergência NBIC: origem, atualidade e projeção de futuro

Clóvis Eduardo Godoy Ilha
Fábio Netto Pinheiro Grande
Hugo Fernandes Marques Freitas

Resumo

Este artigo analisa a origem, a evolução e as perspectivas futuras da Convergência NBIC – a integração entre nanotecnologia, biotecnologia, tecnologia da informação e ciências cognitivas. Essa convergência inspira-se nos debates das Conferências Macy e na cibernética, podendo ser entendida como um instrumento para potencializar as capacidades humanas físicas, cognitivas e sociais. O tema provoca a divergência entre duas correntes filosóficas: a tecnoética, baseada na responsabilidade ética do avanço tecnológico, e o transumanismo, que defende o aperfeiçoamento contínuo do ser humano por meio da tecnologia. O artigo também compara as estratégias de Estados Unidos, União Europeia, China e Rússia diante da NBIC, destacando sua relevância geopolítica e militar. Por fim, examina aplicações atuais, como interfaces cérebro-computador e terapias avançadas, além de discutir os riscos éticos, psicológicos e estratégicos associados ao chamado “soldado do futuro”.

Abstract

This article analyzes the origins, evolution, and future prospects of NBIC Convergence – the integration of nanotechnology, biotechnology, in-

formation technology, and cognitive science. This convergence draws inspiration from the debates at the Macy Conferences and from cybernetics, and can be understood as a tool for enhancing human physical, cognitive, and social capabilities. The topic sparks a divergence between two philosophical currents: technoethics, based on the ethical responsibility of technological advancement, and transhumanism, which advocates for the continuous improvement of human beings through technology. The article also compares the strategies of the United States, the European Union, China, and Russia regarding NBIC, highlighting its geopolitical and military relevance. Finally, it examines current applications, such as brain-computer interfaces and advanced therapies, and discusses the ethical, psychological, and strategic risks associated with the so-called “soldier of the future.”

1. Introdução

1.1 Transformações tecnológicas contemporâneas

Vivemos um período de aceleração tecnológica sem precedentes, em que diferentes campos científicos amadurecem simultaneamente e passam a interagir de forma profunda. Quando combinadas, tecnologias que já eram transformadoras isoladamente ampliam mutuamente seu alcance.

É nesse contexto que se insere a Convergência NBIC, cuja origem, atualidade e projeções de futuro serão examinadas neste trabalho. Trata-se de um modelo de integração tecnológica orientado ao aprimoramento das capacidades humanas, mas que também expõe uma tensão filosófica fundamental: de um lado, uma visão que busca subordinar o avanço científico a princípios de responsabilidade social e limites éticos; de outro, uma perspectiva que entende a ciência como vetor legítimo, e desejável, de transformação radical do ser humano.

O eixo central deste estudo é demonstrar como essa tensão orienta a forma como as grandes potências incorporam a Convergência NBIC em suas estratégias tecnológicas, condicionando sua busca por superioridade científica, econômica e militar.

1.2 Conceito de convergência tecnológica

A convergência tecnológica ocorre quando diferentes tecnologias passam a operar de forma integrada em uma mesma plataforma funcional. Para que essa integração seja possível, três condições fundamentais devem ser atendidas: (1) compatibilidade de escala física; (2) viabilidade de comunicação, com uma linguagem comum entre os componentes; e (3) viabilidade intelectual, entendida como o domínio dos processos e princípios que regem essa interação (Andler et al., 2008). Um exemplo ilustrativo é o dos biossensores, nos quais a biologia realiza a detecção e a eletrônica processa a informação, combinando dois domínios distintos em um único sistema operacional.

2. Origem do termo NBIC

2.1 A Convergência tecnológica do início do Século XXI

Nas tecnologias convergentes, o avanço em uma área tende a impulsionar o progresso em outras, gerando capacidades mais eficientes, rápidas e com aplicações cada vez mais amplas. No início do século XXI, já se percebia a aproximação entre campos como biologia, física, química, ciência dos materiais e engenharias mecânica e elétrica, todos avançando rumo à manipulação de estruturas na faixa de 1 a 100 nanômetros. Apesar desse movimento comum, cada disciplina parecia desenvolver sua própria forma de “nanotecnologia”, ainda sem uma integração efetiva entre si (Spohrer e Engelbart, 2003).

2.2 A nanotecnologia como revolução científica e estratégica

À época, a nanotecnologia era vista como um campo ainda em sua infância, em que apenas nanoestruturas rudimentares podiam ser produzidas com algum grau de controle. Apesar disso, já se reconhecia nela uma “revolução em curso”, com potencial para gerar impactos profundos na economia e na sociedade, comparáveis aos provocados pela tecnologia da informação e pela biologia celular e genética. Esse cenário levou, no início dos anos 2000, à criação da *National*

Nanotechnology Initiative (NNI), concebida para posicionar os Estados Unidos na vanguarda da nanotecnologia e assegurar sua competitividade global e superioridade militar ao longo do século XXI (Estados Unidos, 2000).

O cientista Mihail Roco, então conselheiro sênior da National Science Foundation (NSF), a principal agência de fomento à pesquisa científica básica dos Estados Unidos, foi o arquiteto e a figura central da NNI. Ele compreendia que a nanotecnologia não constituía apenas um novo campo acadêmico, mas uma tecnologia estruturante, capaz de transformar a ciência e a sociedade. Além disso, via na convergência entre nanotecnologia e biotecnologia uma oportunidade singular de expandir as fronteiras da capacidade humana, abrangendo suas dimensões físicas, intelectuais e sociais (Grebenshchikova, 2016).

Em dezembro de 2001, Roco e William Bainbridge, então diretor de programas da NSF, organizaram um seminário dedicado às tecnologias convergentes voltadas ao aprimoramento do desempenho humano. O encontro reuniu dezenas de representantes de agências governamentais, universidades, corporações tecnológicas e setores industriais, consolidando um espaço de diálogo estratégico sobre o futuro da integração tecnológica.

O relatório resultante daquele encontro cunhou o termo “**Convergência NBIC**” e lançou as bases para uma estratégia nacional de pesquisa e desenvolvimento que integrasse a ciência básica à indústria, sob fomento e normatização do governo, com o intuito de aprimorar as capacidades humanas e, conseqüentemente, promover o crescimento econômico (Roco e Bainbridge, 2002).

2.3 Significado estratégico da sigla NBIC

A sigla NBIC designa a interseção estratégica entre sistemas computacionais avançados e a biologia molecular, aliada à precisão da nanotecnologia e à modelagem das funções cerebrais. A Nanotecnologia fornece a manipulação da matéria; a Biotecnologia permite a aplicação em sistemas vivos; a Tecnologia da Informação oferece o controle e o proces-

samento de dados; e as Ciências Cognitivas fornecem os fundamentos para compreender o funcionamento da mente humana e desenvolver interfaces capazes de interagir diretamente com seus processos.

3. Ligação do NBIC com as Conferências Macy e a cibernética

3.1 O Seminário de 2001 e sua herança intelectual

O Seminário de 2001 foi motivado pela oportunidade criada pelo avanço da nanotecnologia, mas também herdou o caráter multidisciplinar que regeu os debates das “Conferências Macy”. Estas foram uma série de reuniões realizadas nas décadas de 1940 e 1950 e cuja gênese remonta à busca de uma solução para um problema eminentemente militar: o desenvolvimento de sistemas de controle para a artilharia antiaérea (Fredrikzon, 2016).

3.2 O problema militar que originou a cibernética

Durante a Segunda Guerra Mundial, os cientistas Norbert Wiener e Julian Bigelow foram encarregados de melhorar a precisão dos canhões antiaéreos contra aviões alemães, que estavam se tornando rápidos e manobráveis demais para os cálculos manuais. O desafio era melhorar a eficácia dos sistemas de interceptação antiaérea, o que exigia prever o comportamento futuro de um sistema complexo composto pelo piloto (homem) e o avião (máquina) (Fredrikzon, 2016).

Naquela mesma época, um evento em Nova Iorque marcaria o início de uma série de encontros científicos que teriam significativo impacto na ciência e, em última análise, encaminhariam a solução daquele problema da artilharia antiaérea.

3.3 O encontro de 1942 e o nascimento do diálogo interdisciplinar

Em maio de 1942, Frank Fremont-Smith, que era diretor da Fundação Josiah Macy Jr, organizou um encontro científico em Nova Iorque, cha-

mado *Cerebral Inhibition Meeting*, dedicado à hipnose e à fisiologia do reflexo condicionado. Foi um evento de caráter interdisciplinar reunindo dois grupos distintos de cientistas, de um lado, matemáticos, médicos, biólogos e engenheiros, e do outro, psicólogos, antropólogos e cientistas sociais (Masaro, 2010).

O encontro de 1942 estabeleceu as bases para uma nova forma de investigar sistemas vivos e artificiais. Essa abertura intelectual seria decisiva para o surgimento da cibernética e, posteriormente, para abordagens contemporâneas que tratam processos biológicos e tecnológicos sob uma lógica comum de informação e controle.

3.4 O artigo de 1943 e o conceito de feedback

Em 1943, Norbert Wiener, Julian Bigelow e o fisiologista Arturo Rosenblueth publicaram o artigo *Behavior, Purpose and Teleology*, no qual propuseram que o comportamento de máquinas e organismos vivos poderia ser compreendido a partir de princípios comuns de finalidade (propósito) e controle.

Nesse enquadramento, o sistema homem-máquina passa a ser concebido como um arranjo dinâmico que requer mecanismos de correção contínua de desvios em relação a um objetivo, o que conduz diretamente à formulação do conceito de *Feedback* (retroalimentação), elemento central da cibernética e fundamento para o desenvolvimento de sistemas capazes de ajustar seu comportamento com base em informações do ambiente (Masaro, 2010).

O artigo de 1943 não apenas ofereceu uma solução teórica para o problema militar da época, mas também inaugurou uma nova forma de pensar a relação entre organismos vivos e máquinas, abrindo caminho para uma intensa atividade intelectual nos anos seguintes e para a consolidação da cibernética como campo interdisciplinar emergente.

3.5 As Conferências Macy e a consolidação da Cibernética

Dando continuidade aos encontros iniciados em 1942, Frank Fremont-Smith organizou, entre 1946 e 1953, uma série de dez reuniões intitula-

das *Feedback Mechanisms and Circular Causal Systems in Biology and the Social Sciences*, posteriormente conhecidas como Conferências Macy. Esses encontros reuniram matemáticos, engenheiros, médicos, psicólogos e cientistas sociais em um ambiente de diálogo interdisciplinar sem precedentes, no qual Norbert Wiener e Julian Bigelow se destacaram como figuras centrais.

Em 1948, Wiener publicou *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, obra que formalizou o termo “cibernética” e estabeleceu as bases conceituais para um campo dedicado ao estudo dos mecanismos de controle e comunicação em sistemas naturais e artificiais. A partir da sexta reunião, em 1949, o binômio homemmáquina ganhou protagonismo, com debates sobre a substituição de receptores sensoriais por dispositivos protéticos e sobre a possibilidade de integração funcional entre organismos vivos e máquinas.

Nas reuniões subsequentes, temas como aprendizagem, emoções, comunicação humana e funcionamento do sistema nervoso ampliaram o escopo das discussões, mas mantiveram um eixo comum: a busca por princípios unificadores capazes de explicar o comportamento de sistemas complexos. Esse esforço consolidou a cibernética como um campo interdisciplinar emergente e preparou o terreno conceitual para abordagens contemporâneas que tratam processos biológicos e tecnológicos sob uma mesma lógica de controle e informação.

3.6 Legado das Conferências Macy

As Conferências Macy consolidaram a compreensão de que máquinas e organismos vivos podem ser analisados como sistemas regidos por princípios comuns de controle e comunicação. Tal perspectiva encontra ressonância no pressuposto central da Convergência NBIC, segundo o qual áreas como a nanotecnologia e a biotecnologia podem ser compreendidas e manipuladas sob a lógica de sistemas de informação, um conceito de profundas repercussões políticas, tecnológicas e até mesmo filosóficas (Fredrikzon, 2016).

4. Discussões éticas quanto à Convergência NBIC

4.1 NBIC como oportunidade para o melhoramento do corpo humano

A ideia de que a Convergência NBIC oferece oportunidades para aprimorar o desempenho humano remete à concepção do organismo como um sistema composto por partes passíveis de reparo, aprimoramento ou substituição. O aprimoramento físico envolveria o desenvolvimento de novas capacidades sensoriais, bem como na utilização de implantes capazes de ampliar a força humana; o aprimoramento intelectual poderia ocorrer, por exemplo, por meio da integração do cérebro a supercomputadores portáteis; e, adicionalmente, vislumbrava-se a possibilidade de interfaces cérebro-cérebro como forma de aprimoramento social (Yoon e Cho, 2024).

No desenvolvimento dessas ideias, a Convergência NBIC passou a ser interpretada à luz de duas correntes filosóficas com graus distintos de divergência: a tecnoética e o transumanismo.

4.2 A tecnoética

O conceito de tecnoética, formulado pelo filósofo Mario Bunge em 1977, refere-se à responsabilidade moral e social dos agentes envolvidos no progresso tecnológico. Nessa perspectiva, torna-se necessária a construção de uma matriz ética capaz de orientar não apenas a eficiência técnica das inovações, mas também a avaliação crítica de suas implicações sociais e morais (Grebenshchikova, 2016).

Tal abordagem exerceu influência significativa sobre a perspectiva europeia acerca da Convergência NBIC. Em 2004, o relatório *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies* apresentou as conclusões de um grupo de especialistas incumbido de analisar os impactos da convergência tecnológica. Nesse contexto, foi proposta a abordagem denominada CTEKS (*Converging Technologies for the European Knowledge Society*), voltada à integração entre nanotecnologia, biotecnologia, tecnologias da informação e ciências cognitivas, com o objetivo de impulsionar a competitividade e o dinamismo da economia europeia, sem desconsidere-

rar demandas sociais, valores de diversidade e princípios de justiça, característicos da sociedade europeia (European Commission, 2004).

A concepção de Bunge – segundo a qual o desenvolvimento tecnológico deve ser orientado por critérios éticos capazes de prevenir danos sociais – alinha-se diretamente a essa abordagem europeia, que compreende a convergência tecnológica como um projeto normativo orientado ao bem comum, e não apenas à maximização da eficiência técnica.

4.3 O transumanismo

Em contraste com a technoética, destaca-se a perspectiva do Transumanismo, cujas origens remontam à década de 1950 e que foi posteriormente sistematizado, nos anos 1990, pelo filósofo Nick Bostrom. Essa corrente interpreta a Convergência NBIC como um vetor para a superação de limitações biológicas humanas, tais como o envelhecimento e, em última instância, a própria morte.

Sob essa ótica, o corpo humano é concebido como uma plataforma suscetível e, em certa medida, desejável, de otimização tecnológica, por meio de recursos como interfaces cérebro-máquina e engenharia genética. A natureza humana, por sua vez, é entendida como um estágio evolutivo transitório, passível de aperfeiçoamento contínuo mediante intervenções científicas e tecnológicas (Bostrom, 2005).

5. A postura dos principais atores geopolíticos quanto à Convergência NBIC

As posturas dos Estados Unidos, da União Europeia, da China e da Rússia em relação à Convergência NBIC refletem, de modo direto, seus valores e objetivos estratégicos. Nesse contexto, o contraste entre o transumanismo e a technoética constitui um eixo interpretativo central para compreender, sobretudo, as posições dos Estados Unidos e da União Europeia.

Nos Estados Unidos, a convergência NBIC é frequentemente associada a uma visão otimista e instrumental da tecnologia, fortemente ali-

nhada aos princípios do transumanismo. Tal perspectiva busca superar as limitações biológicas por meio do aprimoramento de capacidades físicas, cognitivas e emocionais, concebendo o desempenho humano ampliado como um vetor para a obtenção de superioridade econômica e militar (Yoon e Cho, 2024).

Em contraste, a União Europeia, que, no âmbito da convergência NBIC, desenvolve uma vasta gama de tecnologias com um forte foco em aplicações civis e médicas, adota uma abordagem mais cautelosa. Essa postura, ancorada em princípios tecnoéticos, compreende a tecnologia como inseparável de seus impactos sociais e normativos. Assim, privilegia-se a promoção do bem comum e a observância de critérios éticos em detrimento da mera maximização da eficiência técnica. No âmbito institucional, destaca-se ainda a tendência de dissociar o desenvolvimento de tecnologias convergentes de aplicações explicitamente militares (Burt, 2023).

No caso da China, a convergência NBIC é orientada por objetivos estratégicos vinculados ao fortalecimento do poder estatal. Tal orientação materializa-se na Fusão Civil-Militar, que promove a integração entre inovações civis e aplicações militares, em uma lógica pragmática de aceleração tecnológica. Nesse contexto, o melhoramento humano é concebido como instrumento para ampliar a competitividade e a capacidade de dissuasão do país (Global X., 2020).

Por último, a Rússia desenvolveu uma formulação própria, ao incorporar as ciências sociais e humanidades ao acrônimo original, denominando-a NBICS. Essa abordagem enfatiza aplicações militares de alta intensidade, incluindo o desenvolvimento de combatentes com capacidades ampliadas, como a operação de sistemas por meio de sinais neurais e maior resistência a condições extremas. Em comparação com a postura europeia, observa-se menor ênfase em restrições éticas formais, bem como uma maior tolerância ao risco e menor transparência regulatória (Timashev, 2019).

De modo geral, as estratégias desses atores moldam o avanço científico e tecnológico no campo da convergência NBIC, especialmente no que se refere às suas aplicações militares. Nesse cenário, enquanto a

abordagem europeia impõe freios normativos mais robustos e a Rússia enfrenta limitações decorrentes de seu contexto geopolítico recente, os Estados Unidos e a China emergem como os principais protagonistas na disputa pela liderança em áreas estratégicas, notadamente a nanotecnologia e a biotecnologia.

6. Situação atual e importância estratégica da nanotecnologia e da biotecnologia

No prosseguimento da discussão sobre a convergência NBIC, será apresentada uma breve síntese da atual situação da nanotecnologia e da biotecnologia em termos de principais atividades e volume de mercado; bem como uma rápida descrição de sua importância estratégica.

6.1 Nanotecnologia

6.1.1 Situação atual da Nanotecnologia

Atualmente, a nanotecnologia está num momento de transição da experimentação laboratorial para a escala industrial massiva, com o mercado global em forte expansão. Vários fatores contribuem para quadro, com destaque para a crescente adoção de nanodispositivos no setor aeroespacial e de defesa; e a incorporação da nanotecnologia em diagnósticos e outras aplicações na medicina. Por outro lado, o alto custo da infraestrutura de nanomateriais restringe o crescimento de um mercado muito segmentado em diferentes setores como eletrônica, saúde, manufatura, energia, automotivo, aeroespacial e defesa, alimentos e bebidas, dentre outros (Fortune Business Insights, 2024).

O segmento dos nanodispositivos desempenha um papel importante na nanotecnologia, permitindo a manipulação e o controle da matéria em nanoescala. Eles são essenciais para diversas aplicações, incluindo diagnósticos médicos, eletrônica, dispensação de brocas e ciência dos materiais.

A título de ilustração, vale a pena citar um exemplo de nanodispositivo que representa a convergência da nanotecnologia com a biotecnologia.

logia. Trata-se dos tipos de vacinas utilizadas no contexto da pandemia de Covid-19 cujo funcionamento baseou-se no princípio de que o RNA Mensageiro (mRNA) será traduzido em um antígeno após ser introduzido nas células hospedeiras. Naquelas vacinas, o mRNA é encapsulado em nanopartículas lipídicas, que são estruturas em escala nanométrica (geralmente entre 1 e 100 nanômetros), um procedimento que protege o mRNA e facilita sua entrada nas células (Park, 2021).

6.1.2 Importância estratégica da nanotecnologia.

Os dois maiores atores globais da atualidade, Estados Unidos e China, consideram a nanotecnologia como uma ferramenta indispensável em sua disputa pelo domínio de tecnologias críticas e emergentes. A aplicação militar da nanotecnologia foca na possibilidade de obtenção de materiais leves que suportem altas pressões e temperaturas, adequados para empregos diversos, como em drones ou em sistemas hipersônicos e espaciais. Além disso, a nanotecnologia tem sido utilizada em programas voltados para a defesa química, biológica, radiológica e nuclear (DQBRN), e na indústria de comunicações e eletrônica (Estados Unidos, 2026).

Embora a China já lidere em volume de pesquisas de alto impacto em diversas áreas de nanotecnologia e materiais avançados, há um grande esforço transpor o gargalo da fabricação física. Os chineses buscam reduzir a dependência de tecnologias ocidentais para garantir que sua infraestrutura crítica não seja vulnerável a sanções ou interrupções na cadeia de suprimentos. A disputa entre as potências pelo domínio da manufatura em escalas nanométricas ou menores é determinante na corrida pela vantagem em capacidades de defesa (Gaida, 2023).

6.2 Biotecnologia

6.2.1 Situação atual da biotecnologia

A análise da Biotecnologia pode ser estruturada a partir de dois de seus principais ramos: a biologia sintética e a bioinformática.

6.2.1.1 *Biologia sintética*

A biologia sintética redesenha sistemas biológicos para produzir funções específicas, valendo-se de engenharia genômica, sequenciamento e edição genética. Abrange áreas como síntese de DNA, engenharia de proteínas e desenvolvimento de sistemas celulares artificiais, alcançando valores expressivos e sendo impulsionado pela inovação tecnológica e pelo lançamento contínuo de novos produtos.

No cenário internacional, destacam-se os Estados Unidos, com sua liderança em medicamentos, diagnósticos e biomanufatura; a China, atuando fortemente em sequenciamento e síntese genética; o Japão, com ênfase em medicina regenerativa e doenças associadas ao envelhecimento; e a Europa, com foco em soluções biológicas sustentáveis (Fortune Business Insights, 2026b).

6.2.1.2 *Bioinformática*

A Bioinformática consiste no uso de ferramentas computacionais para coletar, processar e interpretar dados biológicos, contribuindo para o estudo de processos fisiológicos e patológicos, bem como para a descoberta de novos fármacos.

Os Estados Unidos lideram esse setor, com significativa participação da aplicação da bioinformática na área da saúde. A Europa se destaca pelos investimentos em pesquisa genômica, enquanto a China amplia sua presença por meio do crescimento no número de ensaios clínicos. No Japão, observa-se ênfase no desenvolvimento de plataformas genômicas baseadas em inteligência artificial, uma tendência global que conduz à medicina personalizada e acelera a descoberta de novos medicamentos (Fortune Business Insights, 2026a).

6.2.2 *Importância estratégica da biotecnologia*

A biotecnologia também é objeto de intensa competição entre Estados Unidos e China. Um relatório oficial do governo dos Estados Unidos destaca que a integração entre biotecnologia e inteligência artificial tende a repercutir fortemente nos setores de defesa, agricultura e saú-

de, além de alertar para o risco daquele país perder sua liderança global em biotecnologia (National Security Commission on Emerging Biotechnology, 2025).

Outro relatório, dessa vez do Pentágono, reforça a ideia de que a biotecnologia é uma das tecnologias críticas para a segurança nacional, citando aplicações como o desenvolvimento de biopolímeros, que são materiais leves e resistentes de interesse da Defesa, bem como de soluções médicas avançadas. O objetivo central do Departamento de Defesa dos Estados Unidos é acelerar a transição entre pesquisa e a aplicação prática, fortalecendo sua superioridade tecnológica e operacional frente aos demais países do mundo (Estados Unidos, 2023).

Por sua vez, a China inclui a biotecnologia na categoria de Indústria Emergente Estratégica (SEI), considerando-a essencial tanto para a competitividade econômica quanto para a segurança nacional. Essa estratégia integra o esforço de transição para uma economia baseada em inovação de alta tecnologia. A biotecnologia é tratada como tecnologia de uso dual, na qual os avanços em áreas como medicina e biologia sintética podem ser adaptados para aplicações em defesa biológica, assim como para o aumento da resiliência e das capacidades operacionais das forças armadas (Global X, 2020).

As possibilidades de integração e a importância estratégica da nanotecnologia e da biotecnologia reforçam a pertinência de se analisar a situação da Convergência NBIC e suas implicações em termos militares.

7. A situação atual e futura da Convergência NBIC e seu uso militar

7.1 Situação atual

Observa-se, na atualidade, uma integração acelerada das tecnologias associadas à Convergência NBIC, com destaque para algumas aplicações práticas atualmente em fase de consolidação.

7.1.1 Nanotecnologia e microeletrônica

Na interface entre a Nanotecnologia e a tecnologia da informação, a indústria de semicondutores já opera em escalas de 5 nm e 3 nm. Paralelamente, o desenvolvimento de materiais como grafeno, nanomateriais de carbono e componentes eletrônicos flexíveis tem viabilizado a produção de dispositivos vestíveis. Nesse cenário, a China atualmente desponta como o líder global em patentes na área de nanotecnologia (National Center for Nanoscience and Technology, 2025)

7.1.2 Biotecnologia e saúde

A convergência entre nanotecnologia e Biotecnologia amplia a precisão e a eficácia de tratamentos médicos, com destaque para o desenvolvimento de terapias direcionadas, como fármacos antitumorais capazes de atingir alvos específicos com maior seletividade e menor toxicidade sistêmica.

7.1.3 Interfaces cérebro-computador e neurotecnologia

No âmbito da Neurotecnologia, as interfaces cérebro-computador integram biotecnologia, tecnologia da informação e ciências cognitivas, apresentando aplicações tanto médicas quanto militares. No campo clínico, sobressaem programas de restauração sensorio-motora, que viabilizam próteses controladas neuralmente e capazes de fornecer feedback sensorial por meio de estimulação direta do córtex cerebral (Perry World House, 2016).

Adicionalmente, tecnologias de aprimoramento cognitivo baseadas nessas interfaces permitem monitorar fadiga, otimizar desempenho e ampliar a capacidade analítica, com aplicações potenciais em atividades como inteligência e tomada de decisão. No âmbito militar, iniciativas como o programa “Soldado Ciborgue 2050” exploram a viabilidade de comunicação bidirecional direta entre cérebro e sistemas autônomos (Burt, 2023).

7.1.4 Digitalização e inteligência artificial

A convergência entre tecnologia da informação e ciências cognitivas, impulsionada pela Inteligência Artificial, tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas autônomos capazes de mimetizar processos biológicos e cognitivos, ampliando o grau de automação e adaptabilidade em diversos domínios.

7.2 A Convergência NBIC e o soldado na guerra do futuro

Algumas projeções para o ano de 2050 indicam que os conflitos ocorrerão simultaneamente no ciberespaço e no ambiente físico, com a convergência NBIC integrando ambas as dimensões. Isso explica os esforços atuais e futuros em aperfeiçoar as capacidades humanas nas suas dimensões físicas, sensoriais e cognitivas, por meio de aprimoramentos tecnológicos (Burt, 2023).

Pode-se imaginar inúmeras possibilidades de aplicação da convergência NBIC na fabricação de um “soldado do futuro”, um combatente que seria capaz, por exemplo, de controlar de sistemas autônomos por meio de interfaces neurais, dotado de ampla percepção sensorial (como visão em múltiplos espectros), ou provido de sensores subcutâneos e fibras ópticas integradas ao sistema neuromuscular. Certamente, tal soldado teria excepcional eficiência operacional, não sofreria tanto com a fadiga de combate e seria dotado de ampla consciência situacional do campo de batalha, mas, qual seria o preço a ser pago pelo homem de baixo da armadura?

7.3 Desafios e riscos

A incorporação intensiva de tecnologias NBIC em combatentes introduz desafios significativos. A grande dependência de sistemas digitais aumenta a vulnerabilidade a ataques cibernéticos e a pulsos eletromagnéticos. A integração homem-máquina também poderá gerar relevantes impactos psicológicos, incluindo transtornos durante e após o combate, assim como dificuldades na posterior reintegração à vida civil. Tudo isso sem se falar no debate ético de se investir tempo e dinheiro para

fabricar o tal soldado do futuro, num mundo repleto de pessoas descapacitadas sem acesso mesmo a serviços médicos básicos.

8. Conclusão

A Convergência NBIC é mais do que um fenômeno tecnológico, mas um marco civilizacional que redefine a relação entre ciência, sociedade, ética e poder. Desde suas raízes na cibernética e nas Conferências Macy até sua consolidação como estratégia nacional no início do século XXI, a NBIC evoluiu de um projeto intelectual interdisciplinar para um eixo estruturante das capacidades científicas e militares contemporâneas.

A integração entre nanotecnologia, biotecnologia, tecnologia da informação e ciências cognitivas é um instrumento para a manipulação da matéria, da vida e da mente de forma simultânea e interdependente e que gera discussões éticas que transcendem mesmo para a esfera religiosa. Afinal, o homem deve ou não se submeter aos limites impostos por Deus?

A disputa entre modelos normativos, tais como o transumanismo norte-americano, a tecnoética europeia e as abordagens pragmáticas de China e Rússia, evidencia que a convergência NBIC é também um campo de disputa de valores. A capacidade de ampliar o desempenho humano, integrar sistemas biológicos a plataformas digitais e desenvolver aplicações de uso dual exige mecanismos robustos de governança, capazes de equilibrar inovação, segurança e responsabilidade social. O que é mais certo? Limitar o avanço de uma tecnologia com tal capacidade disruptiva em nome de princípios éticos ou atirar primeiro antes que o seu adversário o faça?

À medida que a convergência NBIC avança, especialmente em aplicações militares e de segurança, torna-se essencial reconhecer que seus benefícios vêm acompanhados de vulnerabilidades profundas. A dependência crescente de sistemas digitais, a possibilidade de impactos psicológicos decorrentes da integração homem-máquina e os riscos de

assimetrias tecnológicas entre Estados reforçam a necessidade de reflexão crítica e regulação internacional.

O futuro da convergência NBIC dependerá, em grande medida, da solução de dilemas éticos e civilizatórios, ou seja, seu destino não está tanto no que o cientista realiza no laboratório, mas será o resultado de qual visão predominará no choque de interesses entre os principais centros de poder global.

Referências

ANDLER, Daniel et al. **Converging Technologies and their impact on the Social Sciences and Humanities (CONTECS):** An analysis of critical issues and a suggestion for a future research agenda: Final Report. Coordenadores: Bernd Beckett; Michael Friedewald. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, maio 2008. 421 p. Disponível em: <http://www.contecs.fraunhofer.de>. Acesso em: 17 abr. 2026.

ALVES, Marcos Antonio; VALENTE, Alan Rafael. **O estatuto científico da ciência cognitiva em sua fase inicial:** uma análise a partir da estrutura das revoluções científicas de Thomas Kuhn. Marília: Oficina Universitária; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2021. 148 p.

BOSTROM, Nick. **Transhumanist Values.** Oxford: Oxford University, 2005. p. 3-14. (Ethical Issues for the Twenty-First Century). Disponível em: <http://www.nickbostrom.com>. Acesso em: 3 abr. 2026.

BURT, Peter. **Cyborg dawn?:** the military use of human augmentation for war fighting. Shaftesbury: Drone Wars UK, maio 2023. Disponível em: <https://dronewars.net>. Acesso em: 8 abr. 2026.

ESTADOS UNIDOS. National Science and Technology Council. Committee on Technology. Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology. National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan. Washington, D.C.: NSTC, 2000.

ESTADOS UNIDOS. Executive Office of the President. National Nanotechnology Initiative Supplement to the President's 2026 Budget. Washington, DC: National Science and Technology Council, 2026.

ESTADOS UNIDOS. Department of Defense. Department of Defense Biomanufacturing Strategy. Washington, DC: Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering, 2023. Disponível em: [arquivo anexo]. Acesso em: 17 abr. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **High Level Expert Group “Foresighting the New Technology Wave”.** Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies:

Report 2004. Rapporteur: Alfred Nordmann. Brussels: European Commission, 2004. 64 p.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Nanotechnology Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Nanosensors and Nanodevices), By Application (Electronics, Healthcare, Manufacturing, Energy, and Others), and Regional Forecast, 2024-2032**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/nanotechnology-market-108466>. Acesso em: 23 maio 2024.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Synthetic Biology Market Size, Share, Growth & Forecast, 2034**. [S. l.], mar. 2026. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/synthetic-biology-market-107168>. Acesso em: 17 abr. 2026.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Bioinformatics Market Size, Share, Growth & Forecast, 2032**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/bioinformatics-market-109493>. Acesso em: 17 abr. 2026.

FREDRIKZON, Johan. Review: Cybernetics: The Macy Conferences. **Sensorium Journal**, v. 3, n. 2021, p. 56-59, 2021. Resenha de: PIAS, Claus (ed.). *Cybernetics: The Macy Conferences 1946-1953: The Complete Transactions*. Zurich: Diaphanes, 2016.

GAIDA, Jamie et al. **ASPI's Critical Technology Tracker: The global race for future power**. Canberra: Australian Strategic Policy Institute, 2023. (Report No. 69/2023). Disponível em: <https://www.aspi.org.au/report/critical-technology-tracker>. Acesso em: 17 abr. 2026.

GLOBAL X. **China Government Initiatives in Biotechnology**. Hong Kong: Global X by Mirae Asset, 2020. Disponível em https://www.globalxetfs.com.hk/content/files/China_Government_Initiatives_in_Biotechnology.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.

GREBENSHCHIKOVA, Elena. NBIC-Convergence and Technoethics: Common Ethical Perspective. **International Journal of Technoethics**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 77-84, jan./jun. 2016.

MASARO, Leonardo. **Cibernética: ciência e técnica**. 2010. 213 f. Dissertação (Mestrado em Sociologia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

NATIONAL CENTER FOR NANOSCIENCE AND TECHNOLOGY (China); NANOTECHNOLOGY INDUSTRY INNOVATION STRATEGIC ALLIANCE. **White Paper: China Nanotechnology Industry (2025): Global Leadership and Technological Breakthrough Empowered by the tiny, Empowering the industry**. Beijing: NCNST, ago. 2025. 862 p.

NATIONAL SECURITY COMMISSION ON EMERGING BIOTECHNOLOGY (NSCEB). **Charting the Future of Biotechnology: An action plan for American security and prosperity**. Washington, D.C.: NSCEB, abr. 2025. Disponível em: [arquivo anexo]. Acesso em: 17 abr. 2026.

PARK, Jung Woo et al. mRNA vaccines for COVID-19: what, why and how. *International Journal of Biological Sciences*, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 1446-1460, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7150/ijbs.59233>. Acesso em: 16 abr. 2026.

PERRY WORLD HOUSE. **When neuroscience leads to neuroweapons**. Chicago: Bulletin of the Atomic Scientists, out. 2016. Disponível em: <https://thebulletin.org/2016/10/when-neuroscience-leads-to-neuroweapons/>. Acesso em: 8 abr. 2026.

ROCO, Mihail C.; BAINBRIDGE, William Sims (ed.). **Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (NBIC)**. [S. l.]: National Science Foundation, 2002. 405 p. Disponível em: https://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC_report.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.

SANTOS, Dalci Maria dos. **Convergência Tecnológica: Implicações e Desafios para os Neurocientistas na América Latina**. 2012. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Paulista de Medicina, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2012.

SPOHRER, James C.; ENGELBART, Douglas C. **Converging Technologies for Enhancing Human Performance: Science and Business Perspectives**. [S. l.]: [s. n.], 2003. (Draft).

YOON, Youngsam; CHO, Il-Joo. **A review of human augmentation and individual combat capability: focusing on MEMS-based neurotechnology**. *Micro and Nano Systems Letters*, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 1-9, 2024.

TIMASHEV, S. A. **Infranetics: The New MAICS-convergent Technology Science**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [S. l.], v. 481, n. 012023, p. 1-12, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012023>. Acesso em: 9 abr. 2026.

Clóvis Eduardo Godoy Ilha é engenheiro-militar e doutor em química pela Universidade de Brasília (UnB). Foi diretor do Arsenal de Guerra General Câmara (AGGC), chefe do Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército (CIGEx) e supervisor do Projeto de Reestruturação do Sistema de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear do Exército Brasileiro (Pjt Retta DQBRNEx). Também foi membro titular da Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), foi inspetor de armas químicas na Organização das Nações Unidas (ONU) e atuou no Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), no Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM) e na Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL). Integra o Grupo IlhaGrande, com campo de atuação focado na cientometria. E-mail clovis.ilha@gmail.com

Fábio Netto Pinheiro Grande é tecnólogo em redes de computadores, com pós-graduação em Big Data e Analytics e é mestrando em Economia pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Trabalha na Caixa Econômica Federal (CEF) como Gerente Executivo na área de Gestão de Relacionamento com o Cliente (CRM), atuando com marketing digital. Também atuou no processo de tratamento de dados de Open Finance e na implantação de modelos IFRS9 e PLDFT na área de risco. No grupo IlhaGrande, exerce a função de engenheiro de dados. Email speedsrj@gmail.com

Hugo Fernandes Marques Freitas é engenheiro Mecânico formado pelo Centro de Universitário do Distrito Federal (UDF), com pós-graduação em Gestão estratégica de Pessoas, e trabalha na Caixa Econômica Federal (CEF). Atualmente como auditor interno trabalha na Célula de Auditoria de Dados e Informações. Foi representante da CEF em três grupos de trabalho junto à Federação Brasileira de Bancos (FEBRABAN): GT Serviços, GT Dados Abertos e GT SandBox, tendo sido o coordenador do GT de Dados Abertos. Integra o Grupo IlhaGrande, onde atua na modelagem, mineração e consolidação de dados. E-mail hugofmfreitas@gmail.com