

# **O Avanço do Bioprocessamento com Neurônios Humanos na IA Generativa: Potenciais, Riscos Cognitivos e Imperativos Éticos**

## **1. Introdução**

### **A Convergência Tríplice: Neurociência, Biotecnologia e Inteligência Artificial Generativa**

A trajetória da inteligência artificial (IA) tem sido marcada por uma busca incessante por paradigmas computacionais capazes de superar as limitações inerentes às arquiteturas tradicionais, como a de Von Neumann, e aos substratos baseados em silício. Esta busca torna-se particularmente premente face às exigências de tarefas complexas executadas por IAs generativas, que demandam vastos recursos computacionais e energéticos. Neste contexto, a própria biologia, com destaque para a neurobiologia humana, emerge como um modelo paradigmático de eficiência e capacidade computacional, oferecendo um vasto campo de inspiração e, potencialmente, de integração direta.<sup>1</sup> A eficiência energética do cérebro humano, por exemplo, é estimada em ordens de magnitude superiores à da IA convencional, e sua capacidade de aprendizado e adaptação continua inigualada.<sup>1</sup> Esta constatação impulsiona a exploração de fronteiras onde a neurociência, a biotecnologia e a IA convergem.

A aspiração de replicar ou mesmo cooptar a essência da inteligência biológica transcende a mera busca por ganhos de processamento. O cérebro humano, descrito como o "computador mais complexo" ao qual temos acesso, capaz de processar informações de maneiras que desafiam os sistemas de silício<sup>2</sup>, representa não apenas um modelo de eficiência, mas um repositório dos próprios mecanismos que tornam a inteligência humana tão poderosa.<sup>1</sup> A ideia de que a IA poderia ser uma "extensão de nós"<sup>1</sup> sugere uma motivação que se aprofunda em questões filosóficas sobre a natureza da inteligência, da consciência e da própria condição humana. Assim, a corrida para desenvolver IAs que utilizam neurônios humanos é impulsionada não apenas por imperativos de eficiência, mas por uma tentativa de compreender e, quiçá, replicar os fundamentos da cognição de uma forma mais intrínseca, confrontando-nos com a singularidade da inteligência humana.

### **Bioprocessamento com Neurônios Humanos: Uma Nova Fronteira para a IA**

Dentro desta convergência, o bioprocessamento com neurônios humanos surge como uma fronteira particularmente audaciosa. Define-se, neste contexto, como a utilização de neurônios humanos vivos, frequentemente organizados em culturas

celulares ou em estruturas mais complexas denominadas organoides cerebrais, como componentes funcionais de sistemas computacionais. Esta abordagem propõe ir além da mera inspiração biológica, buscando integrar o próprio tecido neural no hardware da IA. O artigo "AI Wants Our Brains" <sup>1</sup> serve como um catalisador para esta discussão, ao delinear tanto o potencial revolucionário desta tecnologia quanto os profundos dilemas éticos que ela suscita.

## **Objetivos e Estrutura do Relatório**

O presente relatório visa analisar criticamente o estado da arte e o potencial futuro do bioprocessamento com neurônios humanos aplicado às IAs generativas. Os objetivos específicos incluem:

1. Avaliar o potencial de aprimoramento da capacidade de processamento das IAs através desta abordagem.
2. Analisar os riscos inerentes ao avanço desta prática para a autonomia cognitiva das pessoas, especialmente num cenário de crescente dependência da IA para a resolução de problemas.
3. Discutir os imperativos éticos e as necessidades de governança que emergem desta nova fronteira tecnológica.

Para atingir estes objetivos, o relatório está estruturado da seguinte forma: A Seção 2 explora o potencial de processamento da IA bio-híbrida, comparando-a com a eficiência do cérebro humano e com outras abordagens como a computação neuromórfica. A Seção 3 analisa os riscos para a autonomia cognitiva humana decorrentes da crescente delegação de tarefas à IA, e como a IA bio-híbrida poderia intensificar esses riscos. A Seção 4 aprofunda-se nos dilemas éticos fundamentais, incluindo questões de senciência, consentimento informado, neurodireitos e uso indevido. Finalmente, a Seção 5 discute os desafios de governança e regulação, e a Seção 6 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

## **2. O Potencial de Processamento da IA Bio-híbrida: Rumo a uma Nova Fronteira Computacional**

A busca por sistemas de inteligência artificial mais poderosos e eficientes tem levado pesquisadores a explorar alternativas radicais ao silício. Entre estas, a IA bio-híbrida, que propõe a utilização de neurônios humanos ou organoides cerebrais como unidades de processamento, destaca-se pelo seu potencial disruptivo, prometendo não apenas ganhos de performance, mas uma redefinição dos próprios fundamentos da computação.

## **2.1. A Incomparável Eficiência do Cérebro Humano: Um Paradigma para a IA**

O cérebro humano representa um feito da evolução em termos de eficiência computacional. Opera com aproximadamente 20 watts de potência – o equivalente a uma lâmpada de baixa intensidade<sup>1</sup> – um consumo energético ínfimo quando comparado aos sistemas de IA tradicionais. O treinamento do modelo GPT-4, por exemplo, demandou o equivalente ao consumo anual de eletricidade de 3.600 residências nos Estados Unidos.<sup>1</sup> De forma similar, unidades de processamento gráfico (GPUs) comumente utilizadas em IA consomem cerca de 10 a 15 quilowatts-hora (kWh) por dia, enquanto o cérebro humano opera com apenas 0,3 kWh diários, majoritariamente através de processos metabólicos.<sup>3</sup>

Esta disparidade não se limita ao consumo energético. Estima-se que os neurônios humanos sejam até um milhão de vezes mais eficientes no processamento de informações do que a IA baseada em silício.<sup>1</sup> O cérebro humano exibe uma superioridade notável em tarefas que envolvem processamento paralelo massivo, reconhecimento de padrões complexos e, crucialmente, aprendizado a partir de dados limitados.<sup>2</sup> A neuroplasticidade, a capacidade intrínseca do cérebro de se reorganizar formando novas conexões neurais ao longo da vida, confere-lhe uma adaptabilidade e uma capacidade de aprendizado que os sistemas artificiais ainda lutam para emular.<sup>2</sup> Estas características fazem do cérebro não apenas uma fonte de inspiração, mas um verdadeiro paradigma a ser alcançado pela inteligência artificial.

## **2.2. Avanços em Bioprocessamento: Da Cultura Celular à Inteligência Organoide e "Cérebro-em-um-Chip"**

Impulsionados pela promessa de replicar a eficiência neural, diversos avanços têm sido registrados no campo do bioprocessamento, explorando diferentes formas de integrar tecido neural vivo em sistemas computacionais.

Empresas Pioneiras e Demonstrações Iniciais:

A vanguarda desta pesquisa inclui empresas como a Cortical Labs, na Austrália, e a FinalSpark, na Suíça.<sup>1</sup> A Cortical Labs ganhou notoriedade ao demonstrar que células cerebrais humanas cultivadas em laboratório poderiam aprender a jogar o clássico videogame Pong, um feito que, embora simples, sinaliza o potencial de aprendizado em substratos biológicos.<sup>1</sup> Esta empresa desenvolveu também o CL1, um computador biológico que integra células nervosas humanas com microchips de silício, operado por um sistema denominado biOS (biological intelligence Operating System), projetado para permitir que estas células executem comandos e realizem cálculos.<sup>4</sup>

Inteligência Organoide (IO):

Um desenvolvimento particularmente promissor é o da Inteligência Organoide (IO). Este campo emergente utiliza organoides cerebrais – aglomerados tridimensionais de células

cultivadas em laboratório que replicam aspectos da estrutura e função do cérebro humano – com o objetivo de explorar suas capacidades de aprendizado, armazenamento de informações e execução de tarefas computacionais, frequentemente com o auxílio de algoritmos de IA.<sup>5</sup> Estes organoides são tipicamente derivados de células-tronco pluripotentes e podem exibir estruturas neurais, conexões sinápticas e a formação de circuitos elétricos espontâneos.<sup>5</sup> Avanços recentes têm permitido a criação de organoides que mimetizam diferentes regiões cerebrais, como o mesencéfalo, hipocampo e cerebelo, ampliando a complexidade e a especificidade dos modelos.<sup>7</sup>

O treinamento destes "minicérebros" envolve técnicas sofisticadas que combinam neurociência e aprendizado de máquina. Duas abordagens se destacam:

- **Reservoir Computing:** Nesta técnica, os organoides cerebrais atuam como "reservatórios" dinâmicos que processam sinais de entrada. Algoritmos de IA são então utilizados para decodificar as respostas neurais complexas geradas pelo organoide, permitindo classificar padrões e inferir como o sistema biológico se adapta a diferentes estímulos.<sup>5</sup>
- **Aprendizado por Reforço (Closed-loop learning):** Em configurações de "circuito fechado", os organoides são imersos em ambientes virtuais simulados, onde podem "interagir" e aprender através de feedback. Utilizando arranjos de multieletrodos de alta densidade (MEAs), os pesquisadores podem fornecer padrões de estimulação elétrica e registrar a atividade neural, criando um ciclo de biofeedback que permite aos organoides ajustar seu comportamento em resposta a estímulos e recompensas, demonstrando formas rudimentares de aprendizado e memória de curto prazo.<sup>5</sup>

A interação dinâmica entre a IA e o substrato biológico na Inteligência Organoide representa mais do que uma simples análise de dados biológicos por algoritmos. Configura-se um ciclo de feedback coevolutivo: a biologia inspira os algoritmos de IA, e estes, por sua vez, "treinam" e otimizam o comportamento do tecido neural. O organoide não é um sistema passivo; ele aprende e se adapta, enquanto a IA interpreta e direciona esse aprendizado. Esta simbiose sugere um futuro onde a distinção tradicional entre o "computador" (o hardware biológico) e o "programador" (os algoritmos de IA) pode se tornar cada vez mais fluida, caminhando para sistemas onde a "programação" é um processo emergente e contínuo de adaptação mútua.

"Cérebro-em-um-Chip" (Wetware Computing):

Paralelamente à IO, o conceito de "cérebro-em-um-chip" ou wetware computing explora a integração direta de neurônios cultivados sobre chips de microeletrodos, que servem como interface para enviar e receber sinais de e para outros componentes de hardware e software.<sup>2</sup> Esta abordagem busca capitalizar as vantagens intrínsecas do tecido neural, como o massivo processamento paralelo, o baixo consumo energético e a natureza analógica do

processamento de informações, que é particularmente adequada para a implementação de redes neurais artificiais.<sup>2</sup>

Um debate relevante neste campo diz respeito à dimensionalidade das culturas neurais. Enquanto muitas demonstrações atuais, como as da Cortical Labs, utilizam culturas neuronais bidimensionais (2D) por sua relativa simplicidade de interface e análise <sup>4</sup>, há um reconhecimento crescente de que os organoides tridimensionais (3D) oferecem um potencial muito maior. Organoides 3D apresentam maior densidade celular, uma organização estrutural mais próxima à do cérebro real e, consequentemente, demonstram melhores capacidades de aprendizado e memória em comparação com as culturas 2D.<sup>2</sup> No entanto, a complexidade dos sistemas 3D também impõe desafios significativos. A interface com estes organoides para enviar e receber sinais de forma precisa é consideravelmente mais difícil do que com culturas 2D.<sup>2</sup> Esta tensão entre a fidelidade biológica e a complexidade dos modelos 3D, por um lado, e a tratabilidade experimental e computacional oferecida pelos sistemas 2D, por outro, representa um obstáculo que precisará ser superado para que o pleno potencial da inteligência bio-híbrida seja realizado. O progresso dependerá não apenas do avanço na cultura de organoides, mas também no desenvolvimento de tecnologias de interface e análise capazes de lidar com a riqueza e a complexidade dos sistemas neurais tridimensionais.

### **2.3. Capacidades Emergentes: Aprendizado, Memória e o Horizonte da IA Generativa Bio-inspirada**

As pesquisas atuais já demonstram capacidades emergentes notáveis em sistemas bio-híbridos. Organoides cerebrais treinados com IA exibiram memória de curto prazo e a capacidade de aprender a executar tarefas comportamentais simples em ambientes simulados.<sup>5</sup> O potencial vislumbrado vai além, abrangendo o reconhecimento de padrões complexos e a adaptação a fluxos de dados dinâmicos, tudo isso com uma eficiência energética potencialmente muito superior à dos sistemas convencionais.<sup>5</sup>

Embora a aplicação direta de neurônios humanos em IAs generativas ainda seja um campo incipiente e não extensivamente detalhado nas fontes consultadas, as características intrínsecas das redes neurais biológicas (BNNs) oferecem pistas sobre seu potencial transformador. A capacidade de aprendizado eficiente a partir de poucos exemplos, o processamento inerentemente paralelo e analógico <sup>2</sup>, e a plasticidade estrutural – incluindo a neurogênese (formação de novos neurônios) e a reorganização sináptica, características ausentes nas redes neurais artificiais (ANNs) atuais <sup>10</sup> – são todos atributos que poderiam, teoricamente, superar algumas das limitações mais prementes das IAs generativas contemporâneas. Estas limitações

incluem a necessidade massiva de dados para treinamento, o alto custo energético e, por vezes, uma criatividade considerada superficial ou a propensão a "alucinações" (geração de informações factualmente incorretas ou incoerentes).<sup>10</sup> Uma IA generativa bio-inspirada ou bio-híbrida poderia, em tese, exibir maior adaptabilidade, robustez e uma forma de criatividade mais profunda e contextualizada.

## **2.4. Comparativo com a Computação Neuromórfica: Sinergias e Diferenças**

No espectro das abordagens de IA inspiradas no cérebro, a computação neuromórfica ocupa um lugar de destaque, compartilhando alguns objetivos com o bioprocessamento, mas diferindo fundamentalmente em sua materialidade.

Computação Neuromórfica:

A computação neuromórfica busca replicar a arquitetura e os princípios de processamento do cérebro humano utilizando hardware baseado em silício.<sup>12</sup> Ela emprega conceitos como Redes Neurais Pulsadas (SNNs), onde os neurônios artificiais comunicam-se através de pulsos discretos (semelhantes aos potenciais de ação neurais) e ativam-se apenas quando necessário, e processamento analógico, que pode ser mais eficiente para certas tarefas do que a computação digital binária tradicional.<sup>12</sup> Chips neuromórficos pioneiros, como o Loihi da Intel e o TrueNorth da IBM, demonstraram ganhos significativos de eficiência energética, com o Loihi consumindo até 1.000 vezes menos energia que chips de IA convencionais e o TrueNorth operando com meros 70 miliwatts.<sup>12</sup> As vantagens prometidas incluem custos de treinamento de IA drasticamente reduzidos (potencialmente em 10 vezes ou mais), capacidade de processamento em tempo real com baixa latência (crucial para aplicações como veículos autônomos e robótica), escalabilidade e formas de aprendizado mais próximas às do cérebro.<sup>12</sup> No entanto, a computação neuromórfica enfrenta desafios como a necessidade de desenvolvimento de hardware especializado, a criação de um ecossistema de software robusto e a superação da curva de adoção por parte da indústria, ainda muito investida em arquiteturas de IA tradicionais.<sup>12</sup>

Sinergias e Diferenças Fundamentais:

Tanto o bioprocessamento quanto a computação neuromórfica partilham o objetivo de imitar a extraordinária eficiência do cérebro, visando reduzir o colossal consumo energético da IA convencional e explorar paradigmas de computação que transcendam a arquitetura de Von Neumann. Ambas as abordagens representam uma ruptura com os modelos computacionais dominantes.

Contudo, a diferença fundamental reside no substrato: o bioprocessamento utiliza tecido biológico vivo, com toda a sua complexidade e dinâmica intrínseca, enquanto a computação neuromórfica emprega silício para emular a estrutura e a função neurais. Esta distinção acarreta implicações radicais em termos de manutenção (células vivas requerem nutrientes e um ambiente controlado), escalabilidade (cultivar e manter grandes massas de tecido neural funcional é um desafio) e, de forma mais crítica e

profunda, nas questões éticas envolvidas.<sup>1</sup>

A busca por eficiência energética, um motor poderoso tanto para o bioprocessamento quanto para a computação neuromórfica, pode acelerar significativamente a adoção dessas tecnologias disruptivas. A promessa de reduzir os custos operacionais da IA e sua pegada ambiental é um forte impulsionador econômico e social.<sup>1</sup> No entanto, existe um risco inerente de que este foco na eficiência ofusque a necessidade urgente de uma avaliação ética e de segurança igualmente rigorosa e, crucialmente, antecipatória. A pressão por uma IA mais sustentável e barata <sup>12</sup> pode levar a um investimento acelerado e à implementação de bioprocessadores ou chips neuromórficos antes que a sociedade tenha desenvolvido os quadros regulatórios e éticos robustos necessários para lidar com suas implicações. Esta preocupação é particularmente aguda para o bioprocessamento, que introduz dilemas únicos sobre a natureza da senciência, o uso de material biológico humano e a própria definição de vida e inteligência.<sup>1</sup> A "inevitabilidade" da tecnologia, como sugerido em algumas análises <sup>1</sup>, pode ser perigosamente acelerada por estes ganhos de eficiência, atropelando o debate ético necessário.

A tabela abaixo resume as principais características e distinções entre a IA tradicional, a computação neuromórfica e a IA bio-híbrida:

**Tabela 1: Comparativo de Paradigmas de Inteligência Artificial**

| Característica                | IA Tradicional<br>(Baseada em Silício) | IA Neuromórfica<br>(Baseada em Silício)      | IA Bio-híbrida<br>(Neurônios<br>Humanos/Organoides)                           |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Substrato Computacional       | Silício (CPUs, GPUs, TPUs)             | Silício (Chips Neuromórficos especializados) | Tecido Biológico Vivo (Neurônios, Organoides Cerebrais)                       |
| Consumo de Energia (Relativo) | Muito Alto <sup>1</sup>                | Baixo a Muito Baixo <sup>12</sup>            | Potencialmente Extremamente Baixo (comparável ao cérebro humano) <sup>1</sup> |
| Princípio de Processamento    | Digital Binário, predominantemente     | Analógico/Digital Pulsado (SNNs),            | Eletroquímico Biológico,                                                      |



|                                                |                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                           |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                | serial (Von Neumann)                                                             | Paralelo <sup>12</sup>                                                                  | Massivamente Paralelo, Analógico/Digital Híbrido <sup>2</sup>                                                             |
| <b>Eficiência de Aprendizado</b>               | Requer grandes volumes de dados rotulados, intensivo em treinamento <sup>3</sup> | Potencial para aprendizado mais eficiente, aprendizado não supervisionado <sup>12</sup> | Potencial para aprendizado com dados limitados, aprendizado rápido e adaptativo (neuroplasticidade) <sup>2</sup>          |
| <b>Plasticidade/Adaptabilidade</b>             | Limitada (ajuste de pesos em redes pré-definidas) <sup>11</sup>                  | Alguma plasticidade em chips avançados (ex: Intel Loihi) <sup>12</sup>                  | Alta (neuroplasticidade intrínseca, reorganização estrutural e funcional) <sup>2</sup>                                    |
| <b>Principais Aplicações Atuais/Potenciais</b> | Ampla gama (LLMs, visão computacional, etc.)                                     | Edge AI, IoT, Robótica, Veículos Autônomos, Saúde <sup>12</sup>                         | Pesquisa neurológica, descoberta de fármacos, potencial para IA avançada e IA generativa <sup>4</sup>                     |
| <b>Desafios de Escalabilidade</b>              | Custo energético, tamanho dos data centers <sup>1</sup>                          | Produção de chips especializados, ecossistema de software <sup>12</sup>                 | Manutenção de culturas vivas, viabilidade a longo prazo, interfaceamento complexo <sup>2</sup>                            |
| <b>Principais Desafios Éticos Específicos</b>  | Vieses, explicabilidade, impacto no emprego, privacidade de dados                | Acesso, controle, vieses em hardware                                                    | Senciência, status moral, consentimento para uso de tecido humano, mercantilização do cérebro, neurodireitos <sup>1</sup> |
| <b>Exemplos de Tecnologias/Empres</b>          | OpenAI (GPT), Google (TPUs),                                                     | Intel (Loihi), IBM (TrueNorth),                                                         | Cortical Labs (CL1), FinalSpark, Pesquisas com Inteligência                                                               |



|    |               |                         |                                        |
|----|---------------|-------------------------|----------------------------------------|
| as | Nvidia (GPUs) | SpiNNaker <sup>12</sup> | Organoide (universidades) <sup>1</sup> |
|----|---------------|-------------------------|----------------------------------------|

### 3. Riscos para a Autonomia Cognitiva Humana na Era da IA Avançada

A crescente integração da inteligência artificial nas diversas esferas da vida humana levanta questões cruciais sobre seus impactos na cognição e, em particular, na autonomia do pensamento. À medida que sistemas de IA se tornam mais sofisticados e onipresentes, a forma como os indivíduos processam informações, tomam decisões e exercem seu pensamento crítico pode estar sofrendo transformações profundas e, por vezes, preocupantes.

#### 3.1. A Crescente Delegação Cognitiva à Inteligência Artificial

A tendência humana de "descarregar" tarefas cognitivas para ferramentas externas não é nova; desde a invenção da escrita até calculadoras e computadores, buscamos meios de aliviar a carga mental. No entanto, a sofisticação e a ubiquidade da inteligência artificial contemporânea aceleraram e intensificaram drasticamente este fenômeno.<sup>14</sup> A IA é cada vez mais utilizada não apenas para tarefas rotineiras, mas também para resolver problemas complexos, auxiliar na tomada de decisões críticas e gerar conteúdo criativo, influenciando profundamente a maneira como os seres humanos pensam, aprendem e interagem com o mundo da informação. Esta delegação, embora muitas vezes traga ganhos de eficiência, não está isenta de riscos para a autonomia cognitiva.

#### 3.2. Impactos Observados e Potenciais na Cognição Humana

Estudos e análises especializadas começam a delinear um quadro dos impactos da IA na cognição humana, com algumas observações recorrentes:

- **"Descarregamento Cognitivo" (Cognitive Offloading):** Pesquisas indicam que usuários frequentes de ferramentas de IA são mais propensos a delegar tarefas mentais, confiando na tecnologia para a resolução de problemas e tomada de decisões em detrimento do engajamento em um pensamento crítico e independente.<sup>14</sup> Esta prática, se excessiva, pode levar ao que alguns especialistas descrevem como um cérebro "preguiçoso", menos propenso a exercitar suas próprias capacidades criativas e analíticas.<sup>15</sup>
- **Erosão de Habilidades de Pensamento Crítico:** A dependência contínua da IA para fornecer respostas e soluções pode resultar em uma capacidade reduzida de avaliar informações de forma crítica, discernir nuances e desenvolver

conclusões bem fundamentadas e independentes.<sup>14</sup> A facilidade com que a IA gera conteúdo pode minar o "processo cognitivo de criação" individual.<sup>15</sup>

- **Lacunas Geracionais e de Conhecimento:** Estudos sugerem que participantes mais jovens, que cresceram em um ambiente tecnologicamente mais imersivo, podem exibir uma maior dependência de ferramentas de IA em comparação com grupos mais velhos.<sup>14</sup> Isso levanta preocupações sobre as implicações de longo prazo para o desenvolvimento da experiência profissional e do julgamento crítico. Um risco associado é a formação de "lacunas de conhecimento", onde os usuários perdem a capacidade de verificar, contestar ou mesmo compreender profundamente os resultados gerados pela IA, aceitando-os de forma acrítica.<sup>14</sup>
- **Impacto na Memória, Raciocínio Lógico e Empatia:** Existem apreensões de que a mediação excessiva da IA nas interações e no processamento de informações possa levar a uma superficialização da capacidade de comunicação, do raciocínio lógico e até mesmo da empatia, resultando em uma inteligência que tende à média e a uma cultura de conformidade.<sup>16</sup>
- **Visão de "Inteligência Aumentada" versus "Declínio Cognitivo":** É importante notar que o debate não é unilateral. Enquanto alguns especialistas alertam para um possível declínio cognitivo, outros defendem a perspectiva da "Inteligência Aumentada".<sup>16</sup> Nesta visão, a IA atuaria como um catalisador da eficiência humana, liberando "espaço no cérebro" para atividades cognitivas de ordem superior, como a reflexão aprofundada e a criatividade genuína. O desafio reside em encontrar um equilíbrio onde a IA complemente e expanda as capacidades humanas, em vez de atrofiá-las.

### 3.3. IA Bio-híbrida: Amplificador de Capacidades ou Acelerador da Dependência Cognitiva?

A emergência da IA bio-híbrida, baseada em neurônios humanos ou organoides cerebrais, introduz uma nova dimensão a esta discussão. Embora a análise seja, por ora, especulativa – dado o estágio inicial da tecnologia – é possível inferir potenciais intensificações dos riscos à autonomia cognitiva.

Se a IA bio-híbrida cumprir a promessa de ser significativamente mais poderosa, adaptável e, crucialmente, mais "humana" em sua forma de processar informações – como sugerido pelo potencial inerente das redes neurais biológicas para uma compreensão contextual mais rica<sup>10</sup> – a tentação de delegar tarefas cognitivas ainda mais complexas e centrais pode tornar-se irresistível. O "conforto" psicológico derivado da interação com uma IA que parece "um tanto humana"<sup>1</sup>, por ser construída a partir de blocos biológicos familiares, pode paradoxalmente aumentar a confiança cega e, conseqüentemente, a dependência. Isso poderia tornar ainda mais

difícil para os indivíduos discernirem entre as capacidades da IA e as suas próprias, ou questionar as "opiniões" ou "soluções" propostas por um sistema que parece entender o mundo de uma forma mais análoga à cognição humana.

A "humanização" percebida da IA bio-híbrida <sup>1</sup> pode, assim, criar um falso senso de alinhamento ou compreensão mútua. Esta familiaridade aparente, mesmo que a IA não possua consciência genuína <sup>17</sup>, pode diminuir as defesas cognitivas dos usuários, tornando-os menos críticos em relação às saídas e influências do sistema. O risco transcende a mera perda de habilidades específicas; ele toca na potencial perda de um ceticismo saudável e na erosão da vigilância sobre a autonomia do próprio pensamento.

Ademais, o risco para a autonomia cognitiva não se limita à simples dependência da IA para executar tarefas. Uma preocupação mais profunda reside na potencial *perda da metacognição* – a capacidade de um indivíduo compreender, monitorar e avaliar os seus próprios processos de pensamento. À medida que as IAs, especialmente as bio-híbridas, se tornam mais integradas às nossas vidas e seus processos internos de "pensamento" (sejam eles quais forem) se tornam mais opacos ou, inversamente, indistinguíveis dos nossos, a capacidade de auto-reflexão crítica pode ser comprometida. Se a IA se torna uma "caixa preta" cognitiva, mesmo que baseada em neurônios, a habilidade de um indivíduo para julgar a qualidade do seu próprio raciocínio, ou do raciocínio da IA, e para manter o controle consciente sobre o processo de tomada de decisão, pode ser significativamente diminuída. A autonomia cognitiva não reside apenas em possuir habilidades, mas em exercer controle e compreensão sobre como essas habilidades são aplicadas e formadas.

## **4. Dilemas Éticos Fundamentais e Implicações Societais da IA com Neurônios Humanos**

A perspectiva de integrar neurônios humanos em sistemas de inteligência artificial não apenas redefine as fronteiras da computação, mas também nos confronta com um labirinto de dilemas éticos e implicações sociais de magnitude sem precedentes. Estas questões tocam na essência do que significa ser humano, na natureza da consciência, no valor da vida e nos fundamentos da nossa organização social.

### **4.1. A Fronteira da Senciência: Status Moral, Consciência e os Direitos de Entidades Bio-híbridas**

A questão mais fundamental e, talvez, mais perturbadora levantada pelo bioprocessamento é a possibilidade de que estes sistemas desenvolvam alguma

forma de senciência ou consciência.<sup>1</sup> Se neurônios humanos, organizados de maneira funcional dentro de uma máquina, começarem a exibir propriedades associadas à experiência subjetiva, como definiremos o que é "vida" ou "senciência" neste novo contexto bio-artificial?<sup>1</sup>

Este questionamento abre uma série de indagações subsequentes com profundas implicações morais. Se um bioprocessador ou um organoide cerebral integrado a uma IA atingir um estado que possa ser considerado senciente, ele mereceria algum tipo de status moral? Desligá-lo ou desmantelá-lo seria eticamente problemático, quicã equivalente a findar uma forma de existência consciente?<sup>1</sup> A determinação legal e filosófica da senciência, já complexa no âmbito dos animais não humanos, torna-se exponencialmente mais desafiadora diante de entidades híbridas.<sup>1</sup>

Cientistas e eticistas debatem intensamente a probabilidade e as implicações da consciência em organoides cerebrais. O Dr. Alysson Muotri, um pioneiro na pesquisa com "minicérebros", levanta a questão crucial: "Onde termina a biotecnologia e começa a criação de algo consciente?" ao observar que seus organoides exibem padrões de ondas cerebrais sob anestesia semelhantes aos de seres humanos.<sup>18</sup> Embora um relatório do painel do National Institutes of Health (NIH) dos EUA em 2021 tenha considerado, à época, infundadas as preocupações sobre a consciência em organoides, devido à sua estrutura rudimentar e ausência de tipos celulares e conexões complexas presentes em um cérebro real, o mesmo relatório reconheceu que as fronteiras éticas podem se deslocar à medida que a tecnologia avança.<sup>13</sup> A comunidade científica, incluindo instituições como a Johns Hopkins, continua a explorar ativamente as implicações teóricas e éticas da Inteligência Organoide (IO).<sup>9</sup>

#### **4.2. A Origem da Vida na Máquina: Consentimento Informado, Ética da Doação de Células Neurais e a Mercantilização do Humano**

A própria utilização de neurônios humanos como "matéria-prima" para a IA suscita graves questões éticas sobre a origem e o uso desses materiais biológicos.<sup>1</sup> Uma das preocupações centrais é o risco de mercantilização do poder cerebral, onde células neurais humanas poderiam ser compradas, vendidas e escaladas industrialmente como se fossem meros componentes de CPU, levantando o espectro de uma "escravidão cerebral".<sup>1</sup>

O consentimento informado dos doadores de células ou tecidos dos quais os neurônios ou organoides são derivados é um pilar ético fundamental, mas particularmente complexo neste contexto. É altamente provável que os doadores de tecido, cujas amostras são armazenadas em biobancos, não tenham dado consentimento específico para que suas células fossem usadas na criação de

organoides cerebrais e, menos ainda, para sua integração em sistemas de inteligência artificial.<sup>20</sup> A natureza sem precedentes desta aplicação exige uma reavaliação dos processos de consentimento. Os formulários devem explicar claramente os usos previsíveis das células, incluindo o desenvolvimento de assemblóides complexos, quimeras humano-animais ou sua incorporação em IAs.<sup>13</sup> Modelos de consentimento mais dinâmicos e específicos, que permitam aos doadores optar por sair de certos tipos de pesquisa, estão sendo discutidos.<sup>22</sup> Já em 1999, o relatório da National Bioethics Advisory Commission (NBAC) dos EUA sobre pesquisa com células-tronco embrionárias enfatizava a necessidade de consentimento informado para a doação de embriões e a proibição de sua compra ou venda, princípios que ressoam fortemente no debate atual sobre IA bio-híbrida.<sup>23</sup>

A complexidade do consentimento informado para o uso de células humanas em IA bio-híbrida transcende as considerações típicas da pesquisa biomédica. O produto final – uma entidade potencialmente pensante ou com capacidades cognitivas avançadas, derivada biologicamente do doador – pode ter implicações diretas e imprevistas para a identidade, o status moral e até mesmo os direitos e responsabilidades associados ao "doador" original. Não se trata apenas de consentir com o uso de tecido para pesquisa de doenças ou desenvolvimento de fármacos, mas potencialmente para a criação de uma entidade que carrega uma parte da herança biológica do doador de uma forma que pode interagir, aprender e, talvez, "ser" de uma maneira nova e desconcertante.

#### **4.3. Neurosegurança e Neurodireitos: Protegendo a Privacidade Mental, a Liberdade de Pensamento e a Integridade Cognitiva**

O avanço das neurotecnologias, incluindo aquelas que poderiam surgir da IA bio-híbrida, intensifica as preocupações com a neurosegurança e a necessidade de estabelecer "neurodireitos".<sup>25</sup> A capacidade de acessar, registrar, analisar e potencialmente manipular a atividade cerebral coloca em risco a privacidade mental, a liberdade de pensamento e a integridade cognitiva dos indivíduos. Há um temor real de que estas tecnologias possam ser usadas para elaborar perfis psicológicos sofisticados e, com base neles, modificar pensamentos e manipular comportamentos, seja por atores privados ou estatais, em um nível sem precedentes.<sup>25</sup>

Em resposta a esses riscos, surgiu o movimento pelos neurodireitos, que propõe a proteção legal específica para:

1. A privacidade mental (o direito de manter os pensamentos protegidos de escrutínio não autorizado).
2. A identidade pessoal (o direito de controlar a própria identidade e de não ter a

personalidade alterada sem consentimento).

3. O livre arbítrio (o direito à liberdade de pensamento e de tomada de decisão autônoma).
4. O acesso igualitário aos benefícios das neurotecnologias.
5. A proteção contra vieses algorítmicos e discriminação baseada em dados neurais.<sup>26</sup>

Iniciativas legislativas já estão em curso em alguns países, como o Chile, que incluiu a proteção de dados cerebrais em sua constituição, e propostas similares tramitam no Brasil (PEC 29/2023 e PL 1229/2021).<sup>26</sup> Organismos internacionais como a UNESCO também estão ativamente engajados na elaboração de recomendações para a governança ética da neurotecnologia e sua convergência com a IA, enfatizando a proteção dos direitos humanos.<sup>26</sup>

A discussão sobre neurodireitos, no entanto, precisa evoluir para um duplo desafio. Atualmente, o foco principal é proteger os cérebros humanos *contra* os potenciais usos abusivos da neurotecnologia. Contudo, se a IA bio-híbrida alcançar formas de senciência ou consciência, emergirá uma nova categoria de "entidades" cujos próprios "direitos" ou status moral precisariam ser considerados.<sup>1</sup> Isso cria uma tensão fundamental: como a sociedade protegerá os seres humanos de IAs bio-híbridas potencialmente manipuladoras e, simultaneamente, considerará as obrigações éticas para com essas mesmas IAs, caso elas possam experimentar sofrimento ou possuir interesses? A governança futura precisará, inevitavelmente, abordar ambos os lados desta complexa moeda ética e legal.

#### **4.4. Riscos de Uso Indevido: Controle, Manipulação, Desigualdade e o Futuro da Agência Humana**

Além das questões de senciência e neurodireitos, o potencial de uso indevido da IA bio-híbrida é vasto e multifacetado. A possibilidade de controle político e a ausência de regulamentação internacional robusta são preocupações prementes: se alguns países avançarem sem restrições éticas, que posição isso deixaria para o resto do mundo?<sup>1</sup>

Se uma IA bio-processada eventualmente superar a inteligência humana em diversas áreas, as implicações para a sociedade seriam transformadoras. Poderíamos enfrentar a obsolescência de muitas funções humanas, desde CEOs e médicos até governantes, e potencialmente o fim da tomada de decisões liderada por humanos em esferas críticas.<sup>1</sup> Um mercado de neurotecnologia amplamente desregulado, focado primordialmente na lucratividade em detrimento de considerações éticas e de direitos humanos, poderia exacerbar esses riscos.<sup>25</sup> Alguns estudos sobre

transumanismo e pós-humanismo já alertam para os riscos existenciais e as consequências não intencionais de tecnologias bio-híbridas, incluindo a emergência de "personalidades eletrônicas" e a desumanização progressiva.<sup>30</sup>

A "mercantilização do poder cerebral" <sup>1</sup> pode também pavimentar o caminho para novas e profundas formas de desigualdade socioeconômica. Se o acesso a capacidades cognitivas aumentadas – seja através de interfaces cérebro-computador diretas ou pelo uso de IAs bio-híbridas superiores – se tornar um bem comercializável, é plausível que apenas uma elite econômica possa se beneficiar. Isso poderia criar uma "divisão cognitiva" na sociedade, onde alguns indivíduos ou grupos possuem acesso a capacidades mentais vastamente superiores, exacerbando as disparidades sociais e econômicas de maneiras sem precedentes e minando os ideais de acesso igualitário aos benefícios da tecnologia.<sup>26</sup>

## **5. Governança e Regulação da Inteligência Artificial Bio-híbrida: Navegando o Desconhecido**

A convergência da inteligência artificial com neurônios humanos e organoides cerebrais apresenta desafios de governança e regulação de uma complexidade inédita. A velocidade estonteante do avanço tecnológico frequentemente ultrapassa a capacidade das sociedades de desenvolverem quadros legislativos e diretrizes éticas adequadas, criando um vácuo que pode ser tanto perigoso quanto inibidor da inovação responsável.

### **5.1. Desafios Regulatórios Atuais e a Urgência de Estruturas Proativas e Adaptáveis**

A principal dificuldade reside na natureza intrinsecamente disruptiva e, em muitos aspectos, imprevisível da IA bio-híbrida. Estamos lidando com uma tecnologia que não apenas processa informações de maneiras novas, mas que também borra as linhas entre o biológico e o artificial, o vivo e o construído.<sup>1</sup> O mercado de neurotecnologias, em geral, já é caracterizado por uma regulamentação incipiente e por uma rápida expansão impulsionada por investimentos privados significativos.<sup>25</sup>

Neste cenário, torna-se crucial evitar dois extremos: a "tragédia da antecipação", onde uma regulação excessivamente precoce e restritiva poderia sufocar a inovação e a pesquisa benéfica; e a "tragédia da demora", onde a ausência ou a lentidão da regulação permite o desenvolvimento e a disseminação de tecnologias com consequências danosas e irreversíveis. A IA bio-híbrida se situa na intersecção de múltiplos domínios regulatórios – IA, biotecnologia, pesquisa médica, direitos



humanos – o que exige uma abordagem coordenada e multifacetada.

A governança eficaz da IA bio-híbrida, portanto, demandará uma transição de paradigmas regulatórios predominantemente reativos para modelos "antecipatórios" e "adaptativos". Estes modelos devem ser capazes de evoluir dinamicamente com a tecnologia, incorporando aprendizados e ajustando-se a novas descobertas e riscos emergentes. Contudo, esta abordagem enfrenta o desafio fundamental de regular algo cujas capacidades plenas e cujos riscos mais profundos – como o desenvolvimento de senciência<sup>1</sup> ou implicações existenciais<sup>1</sup> – ainda são, em grande medida, desconhecidos. A "inevitabilidade" da tecnologia<sup>1</sup> e o alerta de que as regras éticas podem mudar com o tempo<sup>19</sup> sublinham a necessidade premente de preparação e de estruturas de governança flexíveis. Isso requer não apenas novas leis, mas também novos processos de elaboração de políticas que sejam iterativos, baseados em cenários futuros plausíveis e que envolvam uma gama diversificada de especialistas – incluindo eticistas, neurocientistas, cientistas sociais, juristas – e, fundamentalmente, o público em geral.

## **5.2. Iniciativas Globais e Diretrizes Éticas: O Papel da UNESCO, OECD e Instituições de Pesquisa**

Felizmente, diversas organizações internacionais e instituições de pesquisa já estão se mobilizando para enfrentar esses desafios, buscando estabelecer princípios e diretrizes para uma inovação responsável.

- **UNESCO:** A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) tem estado na vanguarda da discussão sobre a ética da neurotecnologia e sua convergência com a IA. Sua "Recomendação sobre a Ética da Neurotecnologia"<sup>28</sup> é um marco importante, abordando explicitamente a convergência com a IA e seus impactos nos direitos humanos, privacidade mental, autonomia e dignidade. A UNESCO propõe o desenvolvimento de metodologias para avaliação de prontidão dos países (RAM), avaliação de impacto ético (AIE) de projetos de neurotecnologia, além de programas de monitoramento, pesquisa e capacitação para auxiliar os Estados-membros na implementação de políticas éticas.
- **OECD:** A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) também contribui significativamente para este debate, particularmente através do seu "Framework for Anticipatory Governance of Emerging Technologies".<sup>32</sup> Este framework, aplicável tanto à IA quanto à biotecnologia, propõe uma abordagem baseada em cinco elementos interconectados: (1) Valores Orientadores (como os Princípios de IA da OECD); (2) Inteligência Estratégica (monitoramento de incidentes e previsão de futuros); (3) Engajamento das Partes

Interessadas (consultas públicas e colaborações); (4) Governança Ágil (uso de sandboxes regulatórias e padrões); e (5) Cooperação Internacional. O OECD.AI Policy Observatory serve como um hub para disseminar informações e auxiliar na implementação prática desses princípios.

- **Instituições de Pesquisa:** Universidades e centros de pesquisa de ponta também desempenham um papel crucial. O Stanford Institute for Human-Centered AI (HAI), por exemplo, foca em promover uma IA centrada no ser humano, conduzindo pesquisas sobre o impacto social e ético da IA, desenvolvendo programas educacionais e engajando-se na formulação de políticas.<sup>34</sup> A inclusão de comitês de ética na avaliação de projetos de pesquisa é uma prática fundamental adotada por tais instituições. Pesquisadores da Universidade Johns Hopkins, envolvidos com o desenvolvimento da Inteligência Organoide, estão ativamente engajados em discussões sobre as implicações teóricas e éticas, a governança, a regulação e a necessidade de abordagens de "ética desde o design" (*ethics-by-design*) para a IO.<sup>9</sup>
- **Outras Diretrizes Relevantes:** Documentos como as "Diretrizes para o uso ético e responsável da Inteligência Artificial Generativa: um guia prático para pesquisadores" (desenvolvido por pesquisadores da Unicamp e outras instituições)<sup>36</sup> oferecem princípios valiosos como a desmistificação da tecnologia, a exploração de suas limitações e a preservação da agência humana. O "Livro Branco sobre Inteligência Artificial" do Conselho Nacional de Ética para as Ciências da Vida (CNECV) de Portugal<sup>31</sup> também estabelece imperativos éticos, como o foco no humano como finalidade última da IA, e apresenta propostas detalhadas para áreas como investigação biomédica e assistência clínica.

Embora estas diretrizes éticas existentes para IA e neurotecnologia sejam extremamente valiosas, a convergência específica na IA bio-híbrida pode exigir uma "camada de integração" adicional. Os desafios únicos relacionados ao status moral de entidades híbridas, à origem e ao consentimento para o uso de material biológico humano, e à própria definição de agência e identidade em sistemas parcialmente vivos e parcialmente artificiais, necessitam de consideração explícita. A UNESCO já reconhece que a convergência da neurotecnologia com a IA "amplia as ameaças éticas"<sup>28</sup>, sinalizando a necessidade de um aprofundamento normativo específico para esta interface.

### **5.3. Rumo a um Ecossistema de Inovação Responsável: Princípios, Recomendações e a Necessidade de um Debate Público Amplo**

A construção de um ecossistema de inovação responsável para a IA bio-híbrida

dependerá da adoção e internalização de um conjunto de princípios fundamentais. O princípio do "humano no controle" (*human in the loop* ou *human on the loop*), que assegura a supervisão e a intervenção humana em momentos críticos de decisão, é essencial.<sup>31</sup> A transparência dos algoritmos e dos processos de desenvolvimento, a explicabilidade das decisões tomadas por sistemas de IA, a atribuição clara de responsabilidade por falhas ou danos, a busca pela equidade e a mitigação de vieses, e a incorporação de segurança e privacidade "desde o design" (*by design*) são outros pilares indispensáveis.

Dada a natureza transfronteiriça da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, a colaboração multidisciplinar e internacional é imperativa.<sup>32</sup> Nenhum país ou disciplina isoladamente conseguirá abarcar a totalidade dos desafios e oportunidades. Igualmente crucial é o engajamento público amplo e informado. A literacia digital e científica da população é um pré-requisito para uma governança democrática e participativa destas tecnologias transformadoras.<sup>31</sup> O desenvolvimento e a implementação de "neurodireitos", como parte de um quadro legal mais abrangente que proteja a integridade mental e a autonomia cognitiva, continuarão a ser uma área de intenso debate e desenvolvimento normativo.<sup>26</sup>

Contudo, existe uma tensão inerente entre a necessidade vital de cooperação internacional para a governança da IA bio-híbrida<sup>28</sup> e o risco de uma "corrida ao fundo" regulatória. A preocupação de que alguns países possam optar por uma supervisão menos rigorosa para obter uma vantagem competitiva no desenvolvimento desta tecnologia potencialmente lucrativa é real.<sup>1</sup> Tal cenário poderia minar os esforços globais para estabelecer padrões éticos e de segurança robustos. Portanto, a governança eficaz dependerá não apenas de acordos internacionais, mas também de mecanismos para incentivar a conformidade, promover a harmonização regulatória e abordar as disparidades que podem levar a uma erosão das salvaguardas éticas em nome da celeridade ou do ganho econômico.

A tabela abaixo resume os principais riscos éticos e sociais identificados e algumas das abordagens de mitigação ou governança propostas:

**Tabela 2: Principais Riscos Éticos e Sociais da IA Bio-híbrida e Abordagens de Mitigação/Governança**

| Risco Ético/Societal | Descrição Detalhada do Risco | Implicações Potenciais | Abordagens de Mitigação/Governança Propostas |
|----------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
|----------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|

|                                                                                  |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Emergência de Senciência/Consciência em Constructos Bio-Artificiais</b>       | Organoides/bioprocessadores podem desenvolver formas de consciência ou sentiência, levantando questões sobre seu status moral e tratamento. <sup>1</sup>                   | Necessidade de definir "vida", "senciência"; direitos para entidades bio-híbridas; dilemas sobre "desligar" ou modificar tais entidades. | Pesquisa contínua sobre marcadores de consciência; debate ético multidisciplinar; desenvolvimento de diretrizes específicas para pesquisa com potencial de sentiência; moratórias condicionais. <sup>13</sup> |
| <b>Questões de Consentimento Informado e Origem Celular</b>                      | Doadores de tecido podem não ter consentido especificamente para o uso de suas células na criação de IAs bio-híbridas ou organoides com potencial cognitivo. <sup>13</sup> | Violação da autonomia do doador; preocupações sobre a identidade e o legado biológico; falta de transparência.                           | Revisão e adaptação dos formulários de consentimento; modelos de consentimento dinâmico; maior clareza sobre usos futuros; proibição de mercantilização de embriões/tecidos para este fim. <sup>13</sup>      |
| <b>Mercantilização e Exploração de Tecido Neural Humano</b>                      | Neurônios humanos podem se tornar commodities, comprados e vendidos para alimentar IAs, levando a uma "escravidão cerebral". <sup>1</sup>                                  | Novas formas de exploração; desigualdade no acesso a "poder cerebral"; desvalorização da vida humana.                                    | Regulação estrita sobre a obtenção e uso de tecido neural humano; proibição da comercialização de neurônios para fins de IA; foco em fontes éticas e consentidas. <sup>1</sup>                                |
| <b>Violação da Privacidade Mental e Liberdade de Pensamento (Neurosegurança)</b> | Acesso e manipulação de dados e processos mentais por neurotecnologias avançadas, incluindo IAs bio-híbridas. <sup>25</sup>                                                | Perda de autonomia individual; manipulação comportamental; vigilância de estados mentais; erosão da identidade pessoal.                  | Desenvolvimento e implementação de Neurodireitos; leis de proteção de dados neurais; criptografia e segurança de dados "by design"; mecanismos de supervisão independentes. <sup>26</sup>                     |

|                                                              |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Uso Indevido para Controle, Manipulação ou Vigilância</b> | IAs bio-híbridas podem ser usadas por governos ou entidades privadas para controle social, manipulação de opinião ou vigilância em massa. <sup>1</sup>          | Ameaças à democracia; supressão de dissidência; perda de liberdades civis.                                                  | Proibições de certos usos de alto risco; transparência no desenvolvimento e implantação por entidades estatais; supervisão democrática e judicial robusta; fortalecimento da sociedade civil. <sup>1</sup>                  |
| <b>Exacerbação de Desigualdades Sociais e Econômicas</b>     | Acesso desigual aos benefícios da IA bio-híbrida (ex: capacidades cognitivas aumentadas) pode criar uma "divisão cognitiva". <sup>1</sup>                       | Aumento da disparidade de riqueza e poder; marginalização de grupos desfavorecidos; instabilidade social.                   | Políticas de acesso equitativo; investimento público em pesquisa e desenvolvimento com foco no bem comum; regulação para prevenir monopólios e práticas predatórias; promoção da literacia digital universal. <sup>26</sup> |
| <b>Obsolescência Humana e Perda de Agência</b>               | IAs bio-híbridas superinteligentes podem tornar muitas habilidades e funções humanas obsoletas, diminuindo a agência humana na tomada de decisões. <sup>1</sup> | Desemprego em massa; perda de propósito individual e coletivo; dependência excessiva da IA; questionamento do valor humano. | Foco no desenvolvimento de IA como ferramenta de aumento (augmentation) e não substituição; investimento em educação e requalificação; debate social sobre o futuro do trabalho e o papel dos humanos. <sup>1</sup>         |
| <b>Responsabilidade por Ações de IAs Bio-híbridas</b>        | Dificuldade em atribuir responsabilidade legal e moral por erros, danos ou decisões autônomas                                                                   | Impunidade por danos; incerteza jurídica; erosão da confiança na tecnologia.                                                | Desenvolvimento de quadros legais para responsabilidade de IAs complexas; exigência de explicabilidade e                                                                                                                    |

|  |                                                                           |  |                                                                                                               |
|--|---------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | de IAs bio-híbridas, especialmente se desenvolverem agência. <sup>1</sup> |  | auditabilidade; seguros específicos; manutenção do "humano no controle" para decisões críticas. <sup>31</sup> |
|--|---------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 6. Conclusão e Perspectivas Futuras

A jornada rumo à inteligência artificial enriquecida pelo bioprocessamento com neurônios humanos é emblemática da audácia científica e da incessante busca humana por transcender limites. Contudo, esta fronteira, mais do que qualquer outra na história da IA, exige uma navegação cautelosa, onde o entusiasmo pela inovação deve ser constantemente temperado por uma profunda reflexão ética e uma proativa consideração pelas suas vastas implicações.

### 6.1. Síntese dos Potenciais Transformadores e dos Riscos Intrínsecos

O potencial da IA bio-híbrida para revolucionar o poder de processamento, a eficiência energética e as próprias capacidades da inteligência artificial é inegável. A promessa de sistemas que aprendem mais rapidamente, com menos dados, e que operam com uma fração da energia consumida pelas IAs atuais, aproxima-nos de uma inteligência artificial que não apenas imita, mas que poderia vir a compartilhar características fundamentais da cognição humana.<sup>1</sup> Esta perspectiva abre horizontes para avanços em inúmeras áreas, desde a medicina e a ciência dos materiais até a resolução de problemas globais complexos.

No entanto, intrinsecamente ligados a este potencial transformador, residem riscos de igual magnitude. A autonomia cognitiva humana enfrenta um desafio sem precedentes face à crescente delegação de tarefas mentais a sistemas cada vez mais "inteligentes" e, potencialmente, "humanizados".<sup>14</sup> Os dilemas éticos sobre a sentiência, o status moral de entidades bio-artificiais, o consentimento para o uso de material biológico humano e a própria definição de vida e consciência, colocam-nos perante questões que tocam o cerne da nossa identidade e dos nossos valores.<sup>1</sup> Adicionalmente, os desafios sociais – incluindo o risco de uso indevido para controle e manipulação, a exacerbação de desigualdades e a necessidade premente de quadros de governança robustos e adaptáveis – são formidáveis.<sup>1</sup>

### 6.2. O Imperativo do Equilíbrio: Avanço Tecnológico com Salvaguardas Éticas e Cognitivas

Diante deste panorama, o imperativo é o do equilíbrio. O avanço tecnológico, por mais

promissor que seja, não pode ocorrer em um vácuo ético ou à custa dos valores humanos fundamentais. É essencial um desenvolvimento cauteloso, informado por princípios éticos sólidos e por uma avaliação contínua dos riscos. A busca por capacidades computacionais aprimoradas não deve obscurecer a necessidade de proteger e cultivar a resiliência cognitiva humana. Em um mundo cada vez mais mediado pela IA, a capacidade de pensamento crítico, de discernimento e de auto-reflexão torna-se não apenas uma habilidade valiosa, mas uma salvaguarda essencial para a autonomia individual e coletiva.

### **6.3. O Futuro da Interação Humano-IA e a Coevolução da Inteligência**

A IA bio-híbrida tem o potencial de redefinir profundamente a relação entre humanos e máquinas, talvez até mesmo de catalisar uma "reengenharia de nós mesmos" e uma "evolução do que significa ser humano".<sup>1</sup> Esta trajetória pode representar um ponto de inflexão onde a humanidade transita de criar ferramentas que meramente *imitam* a inteligência para desenvolver sistemas que *incorporam* aspectos fundamentais da biologia e da cognição humanas.<sup>1</sup> Tal transição forçaria uma reavaliação fundamental do nosso lugar no espectro da inteligência e da própria vida. Diferentemente da IA tradicional, que permanece uma criação "externa", a IA bio-híbrida envolve a internalização de componentes biológicos na própria máquina, desafiando a dicotomia entre o natural e o artificial.

A questão final, "Estamos prontos?"<sup>1</sup>, permanece em aberto e ecoa com crescente urgência. A resposta não reside em uma aceitação passiva da inevitabilidade tecnológica, nem em uma rejeição ludita do progresso. Pelo contrário, reside na capacidade da sociedade de se engajar em um diálogo contínuo, informado, multidisciplinar e adaptativo. É através deste diálogo que poderemos aspirar a moldar um futuro onde a inteligência – seja ela biológica, artificial ou uma fusão complexa de ambas – sirva genuinamente ao florescimento humano, à dignidade e ao bem-estar coletivo. A coevolução da inteligência humana e artificial exige não apenas brilhantismo técnico, mas, acima de tudo, sabedoria, prudência e um compromisso inabalável com os princípios éticos que definem a nossa humanidade.

### **Referências citadas**

1. First AI Took Our Jobs, Now It Wants Our Brains? | by Tony Scherba ..., acessado em maio 27, 2025, <https://www.yeti.co/blog/ai-wants-our-brains>
2. (PDF) Brain on a Chip: Exploring the Potential of Wetware Computing, acessado em maio 27, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/377357208\\_Brain\\_on\\_a\\_Chip\\_Exploring\\_the\\_Potential\\_of\\_Wetware\\_Computing](https://www.researchgate.net/publication/377357208_Brain_on_a_Chip_Exploring_the_Potential_of_Wetware_Computing)
3. How Can Computing for AI and Other Demands Be More Energy ..., acessado em



maio 27, 2025,

<https://viterbischool.usc.edu/news/2025/04/how-can-computing-for-ai-and-other-demands-be-more-energy-efficient/>

4. Primeiro PC biológico com neurônios humanos: impactos futuros no ..., acessado em maio 27, 2025,  
<https://www.insurtalks.com.br/posts/primeiro-pc-biologico-com-neuronios-humanos-impactos-futuros-no-setor-de-seguros>
5. (PDF) Organoid intelligence: training lab-grown mini-brains to learn ..., acessado em maio 27, 2025,  
[https://www.researchgate.net/publication/388575454\\_Organoid\\_intelligence\\_training\\_lab-grown\\_mini-brains\\_to\\_learn\\_and\\_compute\\_with\\_AI](https://www.researchgate.net/publication/388575454_Organoid_intelligence_training_lab-grown_mini-brains_to_learn_and_compute_with_AI)
6. Organoide - Jump, acessado em maio 27, 2025,  
<https://jump.tec.br/blog/inteligencia-organoide/>
7. Advances in the Development and Application of Human Organoids ..., acessado em maio 27, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11775963/>
8. sevenpublicacoes.com.br, acessado em maio 27, 2025,  
<https://sevenpublicacoes.com.br/editora/article/download/5732/10654/23294>
9. Organoid Intelligence | International Neuroethics Society, acessado em maio 27, 2025,  
<https://neuroethicssociety.org/posts/organoid-intelligence-theoretical-and-ethical-frontiers-of-merging-synthetic-biology-and-artificial-intelligence/>
10. We Are All Creators: Generative AI, Collective Knowledge, and the Path Towards Human-AI Synergy - arXiv, acessado em maio 27, 2025,  
<https://arxiv.org/html/2504.07936v1>
11. arxiv.org, acessado em maio 27, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2504.07936>
12. Neuromorphic Computing and Energy-Efficient AI: The Future of ..., acessado em maio 27, 2025,  
<https://www.gsdfs.com/post/neuromorphic-computing-and-energy-efficient-ai-the-future-of-sustainable-ai>
13. (PDF) Brain organoids and organoid intelligence from ethical, legal ..., acessado em maio 27, 2025,  
[https://www.researchgate.net/publication/377383104\\_Brain\\_organoids\\_and\\_organoid\\_intelligence\\_from\\_ethical\\_legal\\_and\\_social\\_points\\_of\\_view](https://www.researchgate.net/publication/377383104_Brain_organoids_and_organoid_intelligence_from_ethical_legal_and_social_points_of_view)
14. Estudo Aponta Que a IA Está Reduzindo a Capacidade Cognitiva ..., acessado em maio 27, 2025,  
<https://forbes.com.br/forbes-tech/2025/01/estudo-aponta-que-a-ia-esta-reduzindo-a-capacidade-cognitiva-das-pessoas/>
15. Impactos da Inteligência Artificial na cognição humana, acessado em maio 27, 2025,  
<https://dotgroup.com.br/educacao/impactos-da-inteligencia-artificial-na-cognicao-humana/>
16. Inteligência Artificial e o Futuro da Cognição Humana ... - I2AI, acessado em maio 27, 2025,  
<https://www.i2ai.org/content/blog/2025/4/inteligencia-artificial-e-o-futuro-da-cognicao-hum/>

17. Inteligência artificial já pode ter consciência? O que dizem os ... - BBC, acessado em maio 27, 2025, <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cvgn98l6jmeo>
18. A revolução dos mini-cérebros: como um cientista brasileiro está ..., acessado em maio 27, 2025, <https://revistahsm.com.br/a-revolucao-dos-mini-cerebros-como-um-cientista-brasileiro-esta-redefinindo-a-neurociencia/>
19. Experimentos de neurociência são considerados éticos e morais ..., acessado em maio 27, 2025, <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/215374-experimentos-neurociencia-considerados-eticos-morais.htm>
20. Ethical Issues Related to Brain Organoid Research - PMC, acessado em maio 27, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7140135/>
21. pmc.ncbi.nlm.nih.gov, acessado em maio 27, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7140135/#:~:text=The%20main%20ethical%20concern%20here,specifically%20in%20brain%20organoid%20research.>
22. The Ethics of Brain Organoids | Eurostemcell, acessado em maio 27, 2025, <https://www.eurostemcell.org/ethics-brain-organoids>
23. "Ethical Issues in Human Stem Cell Research: Executive Summary ..., acessado em maio 27, 2025, <https://embryo.asu.edu/pages/ethical-issues-human-stem-cell-research-executive-summary-1999-us-national-bioethics-advisory>
24. Stem Cell Report - Bioethics Research Library, acessado em maio 27, 2025, <https://bioethicsarchive.georgetown.edu/nbac/stemcell.pdf>
25. Manipulação de pensamentos por meio da tecnologia é tema de ..., acessado em maio 27, 2025, <https://news.un.org/pt/story/2025/04/1846946>
26. Neurotecnologia avança; cientistas pedem proteção à privacidade ..., acessado em maio 27, 2025, <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-03/neurotecnologia-avanca-cientistas-pedem-protecao-privacidade-mental>
27. Neurotecnologia: o que é, aplicações - Iberdrola, acessado em maio 27, 2025, <https://www.iberdrola.com/inovacao/neurotecnologia>
28. Final report on the draft Recommendation on the Ethics of ..., acessado em maio 27, 2025, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000393266>
29. rm.coe.int, acessado em maio 27, 2025, <https://rm.coe.int/round-table-report-en/1680a969ed>
30. estudogeral.uc.pt, acessado em maio 27, 2025, [https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/114840/1/Transhumanismo\\_ebook.pdf](https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/114840/1/Transhumanismo_ebook.pdf)
31. www.cneqv.pt, acessado em maio 27, 2025, [https://www.cneqv.pt/files/1715104301\\_c3ad59f003de091ee280b6c153182c6b\\_cneqv-livro-branco-ia-maio-2024.pdf](https://www.cneqv.pt/files/1715104301_c3ad59f003de091ee280b6c153182c6b_cneqv-livro-branco-ia-maio-2024.pdf)
32. Working Party on Artificial Intelligence Governance ... - O.N.E - OECD, acessado em maio 27, 2025, [https://one.oecd.org/document/DSTI/DPC/AIGO\(2024\)10/FINAL/en/pdf](https://one.oecd.org/document/DSTI/DPC/AIGO(2024)10/FINAL/en/pdf)
33. Steering AI's future - OECD, acessado em maio 27, 2025, [https://www.oecd.org/en/publications/steering-ai-s-future\\_5480ff0a-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/steering-ai-s-future_5480ff0a-en.html)

34. hai-production.s3.amazonaws.com, acessado em maio 27, 2025,  
<https://hai-production.s3.amazonaws.com/files/2021-02/hai-2020-annual-report-1.pdf>
35. Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence (HAI ..., acessado em maio 27, 2025,  
<https://online.stanford.edu/schools-centers/stanford-institute-human-centered-artificial-intelligence-hai>
36. Diretrizes para o uso ético e responsável da Inteligência Artificial ..., acessado em maio 27, 2025,  
<https://prpg.unicamp.br/noticias/lancamento-diretrizes-para-o-uso-etico-e-responsavel-da-inteligencia-artificial-generativa-um-guia-pratico-para-pesquisadores/>