

Economia Neuroampliada

Thiago Guimarães Peixoto

Crivum DA82 · DOI 10.67665/crivum.yf37vpzc · publicada em 24/07/2026

THIAGO SOUSA GUIMARÃES PEIXOTO

Economia Neuroampliada

RIO DE JANEIRO,

2026.

ECONOMIA NEUROAMPLIADA

Thiago Sousa Guimarães Peixoto *

RESUMO. Este trabalho investiga se interfaces cérebro-máquina-cérebro voltadas à cognição aumentada configuram um sistema tecnológico emergente com potencial para inaugurar a Economia Neuroampliada. Propõe-se o STRM-4, que integra sinais de ciclo tecnoeconômico, maturidade tecnológica por TRL inferido de evidência textual, difusão pelos modelos de Rogers e Bass e marcos de mercado e de produção. O protocolo de coleta e análise é replicável e combina uma recuperação programática de patentes no EPO Open Patent Services, refocada em 251 famílias de BMBIs cognitivas, com a produção científica indexada no PubMed e com sinais de capital de risco, sob deduplicação por família e inferência de TRL por regra e por painel de modelos de linguagem. Os resultados revelam uma irrupção acelerada e recente, com a atividade patentária crescendo a 33% ao ano e concentrada na China, um financiamento agregado de cerca de US\$ 3,0 bilhões em empresas neurotecnológicas com salto em 2024 e 2025, e uma dualidade de maturidade, uma massa de depósitos em estágio inicial e uma fronteira comercial já em uso humano inicial e demonstração operacional. A leitura integrada situa a entrada de mercado das aplicações líderes no horizonte de aproximadamente dez anos, ancorada na convergência entre ciência, tecnologia e capital, sem fixar um ponto médio de adoção, cuja estimativa não é identificável enquanto a curva de volume não inflectir. A Economia Neuroampliada apresenta-se como hipótese plausível e útil para a Economia da Inovação, e o TRL pode ser tratado como variável econômica para decisões intertemporais de investimento e para o desenho de políticas orientadas a capacidades habilitadoras.

Palavras - chave: Economia Neuroampliada; STRM-4; Prospecção tecnológica; Roadmapping; Economia da Inovação; Interfaces cérebro-máquina-cérebro; BMBI; TRL; Difusão tecnológica.

ABSTRACT. This study investigates whether brain-machine-brain interfaces aimed at augmented cognition constitute an emerging technological system with the potential to inaugurate the Neuro-augmented Economy. It proposes STRM-4, a framework that integrates techno-economic cycle signals, technological maturity through TRL inferred from textual evidence, diffusion following the Rogers and Bass models, and market and production milestones. The replicable collection and analysis protocol combines a programmatic patent retrieval from the EPO Open Patent Services, refocused on 251 families of cognitive BMBIs, with the scientific output indexed in PubMed and with venture capital signals, under family-level deduplication and TRL inference by rule and by a panel of language models. The results reveal a recent and accelerated emergence, with patent activity growing at 33% per year and concentrated in China, an aggregate funding of about US\$ 3.0 billion in neurotechnology companies with a surge in 2024 and 2025, and a maturity duality, a mass of early-stage filings and a commercial frontier already at initial human use and operational demonstration. The integrated reading places the market entry of the leading applications within a horizon of about ten years, anchored in the convergence among science, technology and capital, without fixing an adoption midpoint, whose estimate is not identifiable while the volume curve has not inflected. The Neuro-augmented Economy is presented as a plausible and useful hypothesis for Innovation Economics, and TRL can be treated as an economic variable for intertemporal investment decisions and for the design of policies oriented to enabling capabilities.

Keywords: Neuro-augmented Economy; STRM-4; Technology Prospection; Roadmapping ; Innovation Economics; Brain-machine-brain interfaces; BMBI; Technology Readiness Level; TRL; Technology diffusion.

SUMÁRIO

TOC \o "1-3" \h \z \u Introdução - PAGEREF _Toc235745963 \h 5

1. Referencial teórico - PAGEREF _Toc235745964 \h 7

1.1 Paradigmas tecnoeconômicos e coordenação intertemporal - PAGEREF _Toc235745965 \h 7 1.2 Difusão tecnológica, curvas S e stage-gates - PAGEREF _Toc235745966 \h 7 1.3 Sinais de ciclo e expectativas: a posição no Hype Cycle - PAGEREF _Toc235745967 \h 8 1.4 BMBIs e cognição aumentada: fundamentos técnicos para leitores de Economia - PAGEREF _Toc235745968 \h 8 1.5 Economia Neuroampliada: uma hipótese analítica - PAGEREF _Toc235745969 \h 8 1.6 Do TRL à decisão econômica: proposições de análise - PAGEREF _Toc235745970 \h 9 1.7 Instrumentos de prospecção e de maturidade - PAGEREF _Toc235745971 \h 9 1.8 A lacuna e necessidade do STRM-4 - PAGEREF _Toc235745972 \h 14 1.9 Definição formal do STRM-4 - PAGEREF _Toc235745973 \h 15

2. Metodologia - PAGEREF _Toc235745974 \h 17

2.1 Desenho e escopo - PAGEREF _Toc235745975 \h 17 2.2 Procedimentos de busca em PubMed (ciência) - PAGEREF _Toc235745976 \h 18 2.3 Procedimentos de busca em patentes (tecnologia) - PAGEREF _Toc235745977 \h 19 2.4 Deduplicação e preparação da base de dados de patentes - PAGEREF _Toc235745978 \h 20 2.5 Inferência de TRL, regras e validação - PAGEREF _Toc235745979 \h 21 2.6 Séries e indicadores de maturidade e difusão - PAGEREF _Toc235745980 \h 23 2.7 Procedimentos em bases de mercado (Crunchbase e PitchBook) - PAGEREF _Toc235745981 \h 23 2.8 Integração STRM-4 e reprodutibilidade - PAGEREF _Toc235745982 \h 24

3. Resultados, discussão e implicações - PAGEREF _Toc235745983 \h 26

3.1 Roadmap de adoção - PAGEREF _Toc235745984 \h 26 3.2 Leitura integrada pelo STRM-4: visão geral dos achados - PAGEREF _Toc235745985 \h 27 3.3 Implicações - PAGEREF _Toc235745986 \h 31

4. Limitações do estudo - PAGEREF _Toc235745987 \h 33

5. Conclusões - PAGEREF _Toc235745988 \h 35

6. Trabalhos futuros e próximos passos - PAGEREF _Toc235745989 \h 36

Referências - PAGEREF _Toc235745990 \h 38 ANEXO A - Funil de constituição do corpus de patentes - PAGEREF _Toc235745991 \h 44 ANEXO B - Tabelas numéricas das Figuras 1 a 4 - PAGEREF _Toc235745992 \h 45 LISTA DE FIGURAS - PAGEREF _Toc235745993 \h 46 LISTA DE QUADROS - PAGEREF _Toc235745994 \h 47 LISTA DE TABELAS - PAGEREF _Toc235745995 \h 47

Introdução

O último meio século consolidou ondas tecnológicas capazes de remodelar cadeias de valor e elevar a produtividade. A computação pessoal, a internet comercial, os smartphones e as redes sociais, transformaram comunicação, informação e poder computacional em camadas infraestruturais, redefinindo custos de transação, padrões de consumo e estratégias corporativas (SCHUMPETER, 1939; PEREZ, 2002).

Nesta trajetória de longa duração, está emergindo um novo candidato a vetor de crescimento disruptivo, as interfaces cérebro-máquina-cérebro (Brain-Machine-Brain Interfaces - BMBIs), sistemas bidirecionais que leem atividade neural, a processam por algoritmos e devolvem estímulos ao sistema nervoso, fechando um ciclo de controle em tempo real (O'DOHERTY et al., 2011). Ao demonstrarem recentemente ganhos de desempenho cognitivo, essas interfaces sugerem tratar a cognição como possibilidade de um novo mercado para os consumidores e uma nova avenida de elevação produtiva para as organizações, novo campo que denominamos Economia Neuroampliada.

O problema econômico que nos ocupa não é biomédico. É alocativo e intertemporal. Sob quais condições um sistema tecnológico em fase emergente, baseado em BMBIs voltadas à cognição, pode sustentar trajetórias robustas de criação e captura de valor?

A Economia da Inovação oferece gramáticas para analisar ciclos de transformação e difusão. A tradição schumpeteriana entende o desenvolvimento como um processo de 'destruição criativa' que reconfigura setores por meio de novas combinações (SCHUMPETER, 1939). Perez (2002) detalha essa intuição,

destrinchando em paradigmas tecnoeconômicos, com fases de irrupção, instalação e difusão, nas quais capacidades técnicas, infraestruturas e normas convergem até que a tecnologia se torne pervasiva.

A etapa de difusão em si tem sido descrita por modelos logísticos (ROGERS, 1962; BASS, 1969) e por leituras sobre a travessia do abismo entre os early adopters e a maioria inicial (early majority) (MOORE, 1991). No plano microeconômico, Dosi (1982) enfatiza a interação entre technology-push e market-pull para o esforço inovativo. Por sua vez, a literatura recente sobre o papel do Estado empreendedor e políticas orientadas por missão resgata a importância de temporalidade e direção do investimento (MAZZUCATO, 2013).

Este trabalho parte desse arcabouço para propor uma ponte metodológica entre maturidade tecnológica, difusão e decisões econômicas dos principais stakeholders, sendo para fins desse trabalho, governo, corporações, investidores de risco, universidades e empreendedores.

Esta ponte foi operacionalizada pela concepção do framework STRM-4 (Society-Tech-Readiness-Market), desenhado como lente analítica para ligar (i) sinais macro de ciclo, (ii) medidas objetivas de prontidão tecnológica, (iii) dinâmica de difusão e (iv) implicações estratégicas para firmas e políticas. A aplicação recai sobre BMBIs voltadas à cognição aumentada, com recorte explícito na dimensão econômica, isto é, no modo como a maturidade técnica (Technology Readiness Levels, TRL) reorganiza risco, custo de capital, stage-gates de desenvolvimento e timing de adoção.

O objetivo é duplo. Oferecer leitura econômica informada por evidência técnica e estabelecer um método replicável de coleta e análise capaz de sustentar decisões de investimento.

Desta forma somos levados à seguinte pergunta. Em que medida, e sob quais condições, BMBIs voltadas à cognição aumentada sinalizam a emergência de um novo vetor econômico, e como a trajetória de maturidade (TRL) e os ritmos de difusão reconfiguram stage-gates críticos de P&D e decisões de funding?

Obter essa resposta traduz os objetivos de delimitar conceitualmente a Economia Neuroampliada, instrumentar o TRL como variável econômica de risco e de timing, integrar evidências de ciência, patentes e mercado sob a arquitetura STRM-4 e derivar implicações estratégicas para empresas e políticos, considerando as especificidades da saúde.

Este trabalho traz como contribuição teorizar a Economia Neuroampliada como lente de análise para tecnologias que internalizam ganhos de cognição e metodologicamente, tornamos o TRL uma variável econômica observável em séries e utilizável em decisões intertemporais. Ademais identificamos gargalos e janelas de oportunidade que condicionam a trajetória competitiva de firmas e países.

O texto se organiza da seguinte forma. A introdução situa a hipótese e o problema. A seção seguinte apresenta o referencial teórico. Na sequência, a metodologia replicável de busca e análise. Depois, resultados e discussão por meio do STRM-4. Por fim, limitações, conclusão e agenda de pesquisa futura.

1. Referencial teórico

1.1 Paradigmas tecnoeconômicos e coordenação intertemporal Schumpeter (1939) concebe o capitalismo como um processo descontínuo de destruição criativa no qual novas combinações técnicas substituem rotinas, redistribuindo lucros e abalando estruturas incumbentes. Perez (2002) faz uma releitura desse fenômeno como paradigmas tecnoeconômicos, nos quais a irrupção de um conjunto de tecnologias é seguida por uma instalação marcada por experimentação, turbulência e, por vezes, bolhas econômicas, até que padrões técnicos, infraestrutura e regulações amadurecem, dando lugar à difusão em larga escala. Essa narrativa nos interessa por um ponto. Ela torna explícita a necessidade de alinhar timing, o timing do laboratório, o da produção, o da padronização e o da formação de talentos. O descasamento entre eles resulta em desperdício de capital, elevação de risco (como soberania) e de perda de janela competitiva.

No caso das BMBIs, indícios recentes na literatura técnica e patentária sugerem a proximidade de um momento de irrupção, com avanços simultâneos em densidade/estabilidade de eletrodos, qualidade dos decodificadores baseados em aprendizagem de máquina e estratégias de controle em loop fechado (NICOLELIS; LEBEDEV, 2009; GAO et al., 2021).

1.2 Difusão tecnológica, curvas S e stage-gates A difusão de inovações foi formalizada por Rogers (1962) e Bass (1969) em curvas S que descrevem a passagem dos early adopters para a maioria inicial. Moore (1991) enfatiza que o ‘abismo’ entre esses regimes é crítico. É quando incerteza técnica, prova de uso e percepção pública precisam ser tratadas de modo coordenado.

Em indústrias de base científica, a literatura em gestão da tecnologia adotou o TRL como idioma para organizar o avanço técnico. Para o economista, o TRL pode ser tratado como variável contínua de risco e de timing que informa decisões de funding e stage-gates de P&D e escala. Ao transpor o TRL para a análise econômica, abrimos uma ponte operacional entre maturidade e difusão. Aumentos estatisticamente consistentes em TRL 5->6 tendem a reduzir incerteza e custo de capital, ativando novos perfis de investidor. Já gargalos crônicos em TRL 5 sugerem a necessidade de capitais pacientes e de arranjos de orquestração de capacidades, tanto entre organizações como em instrumentos públicos de incentivo e instrumentos ou linhas de financiamento.

1.3 Sinais de ciclo e expectativas: a posição no Hype Cycle O Hype Cycle do Gartner agrega percepções setoriais sobre o percurso que vai do ‘pico de expectativas’ ao ‘platô de produtividade’.

A categoria de “human augmentation”, que inclui BMBIs, aparece, nas edições recentes, a uma distância temporal típica do platô. Embora se trate de um indicador soft, útil para explorar expectativas de agentes, o seu valor econômico reside em informar decisões de temporização, como testar arquiteturas de produto, mobilizar talentos e atrair capital enquanto o setor cruza estágios de maior risco (GARTNER, 2024).

1.4 BMBIs e cognição aumentada: fundamentos técnicos para leitores de Economia Funcionalmente, BMBIs fecham o ciclo ‘ler-processar-estimular’. Captam atividade neural, decodificam intenções ou estados por algoritmos e devolvem estímulos capazes de modular circuitos neurais.

A literatura arcaica já incluía demonstrações de controle neural voluntário (FETZ, 1969) e, nas décadas seguintes, avanços muito substanciais em neuropróteses sensório-motoras (NICOLELIS; LEBEDEV, 2009). Para o eixo de cognição, Hampson et al. (2018) já descreviam, há sete anos, próteses hipocampais que registram e reproduzem padrões de memória, com ganhos mensuráveis em tarefas de memorização. Trabalhos recentes em interfaces bidirecionais reportam decodificação e estimulação em tempo real para modular desempenho em tarefas de memória e atenção (GAO et al., 2021; SAHA; BAUMERT, 2021).

Do ponto de vista econômico, esses resultados importam porque traduzem ganhos de desempenho em artefatos e serviços passíveis de precificação e escalonamento, uma condição necessária para transformar uma fronteira de pesquisa em plataforma de mercado.

O caráter bidirecional e de circuito fechado reduz incerteza técnica nos estágios iniciais e altera a estrutura de custos de prototipagem e teste. Com decodificadores mais amostrados e estáveis, o tempo de treino por usuário tende a cair. Com materiais e eletrônica robustos, a confiabilidade aumenta. Esses dois vetores afetam elasticidades críticas (custo, tempo, confiabilidade) e, por extensão, a fronteira de investimento. O efeito macroeconômico potencial não está em ‘curar doenças’, mas em criar um novo mercado consumidor para esses dispositivos e elevar a eficiência de rotinas cognitivas por mediação neurodigital, com transbordamentos para produtividade do trabalho e organização de mercados.

1.5 Economia Neuroampliada: uma hipótese analítica Chamamos de Economia Neuroampliada a era que nasce do momento em que capacidades cognitivas aumentadas por plataformas neurais passam a mediar rotinas produtivas, criando novas arquiteturas de captura de valor (por exemplo, modelos de receita recorrente acoplados a hardware, serviços de análise de dados de comportamento a partir de sinais cerebrais, novas modalidades de comunicação, de marketing, de entretenimento, etc). Entende-se por Capital Neural o estoque de capacidade cognitiva ampliada por plataformas neurais que passa a operar como fator de produção nas rotinas econômicas, cuja valorização acompanha tanto o ganho de desempenho cognitivo do indivíduo quanto a qualidade das camadas de dados e de algoritmos que o sustentam. Nesse arranjo, o Capital Neural torna-se um ativo híbrido. É incorporado ao indivíduo, mas depende de camadas digitais e de dados que são providas por organizações. Essa interdependência reforça mecanismos de plataforma, economias de rede e acúmulo de intangíveis, bem conhecidos na literatura de inovação.

A hipótese empírica a ser testada nas páginas seguintes é que BMBIs para cognição já exibem sinais suficientes, nos domínios técnico, científico e de mercado, para justificar estratégias de investimento,

coordenação e formação de capacidades em horizontes de 8 a 10 anos.

1.6 Do TRL à decisão econômica: proposições de análise Para usar maturidade como variável econômica, propomos (i) inferir TRL a partir de evidências textuais de patentes e artigos, (ii) construir séries anuais de cruzamentos de estágios (p.ex., 4 para 5 e de 5 para 6) como indicadores de risco e de timing, (iii) relacionar essas séries a sinais de difusão (modelos logísticos à la ROGERS; BASS) e a decisões de financiamento e alocação de portfólio. Se o gargalo estatístico do setor está em TRL 5, espera-se a necessidade de capitais pacientes, orquestração de capacidades e políticas de formação. Se há aceleração consistente para TRL 6, espera-se compressão do custo de capital e entrada de perfis de investidor com horizontes mais curtos. Essas proposições serão testadas pela aplicação do STRM-4 com cruzamento dos dados coletados.

1.7 Instrumentos de prospecção e de maturidade A proposição de um framework autoral exige, antes da formalização, demonstrar que ele ocupa um espaço que os instrumentos consagrados não preenchem. Um instrumento se legitima menos pelo nome e mais pela função que cumpre melhor do que as alternativas, o que se observa em construções recentes que se ancoram no que já existe, nomeiam a lacuna que pretendem cobrir e definem formalmente seus componentes antes do uso. Esta seção executa a primeira dessas tarefas para o STRM-4, ao revisar os principais instrumentos de prospecção e de construção de cenários e confrontá-los segundo seis critérios, que são também as dimensões em que o framework reivindica contribuição.

A comparação se organiza segundo seis critérios, escolhidos por capturarem os eixos em que o STRM-4 reivindica diferencial. A natureza da evidência varia do juízo de especialistas ao dado observável de ciência, patentes e capital. O tratamento da prontidão tecnológica pode estar ausente, figurar como gate qualitativo de engenharia ou operar como variável econômica contínua de risco e de timing. A integração multifonte vai da leitura de uma camada única à fusão de ciência, tecnologia, prontidão e mercado. A saída de decisão vai dos futuros descritivos aos sinais acionáveis de risco e de temporalidade. A replicabilidade e a auditabilidade separam o protocolo reexecutável do processo tácito. E a camada social e de expectativas abrange as capacidades, os talentos e a percepção de mercado.

A tradição schumpeteriana e a releitura de Perez fornecem a gramática macro do problema. Tornam explícita a necessidade de alinhar os tempos do laboratório, da produção, da padronização e da formação de talentos, e localizam o descasamento desses relógios como fonte de desperdício de capital e de perda de janela competitiva (SCHUMPETER, 1939; PEREZ, 2002). Dosi (1982) complementa o quadro no plano microeconômico ao articular a interação entre technology-push e market-pull, e Mazzucato (2013) resgata a direção e a temporalidade do investimento público. Essa família opera como lente interpretativa de fase, sem constituir instrumento operacional de mensuração. Ela diz onde olhar, mas não entrega séries observáveis nem um procedimento de leitura.

A família da difusão oferece o motor temporal que falta à anterior. Os modelos logísticos de Rogers (1962) e Bass (1969), somados à travessia do abismo de Moore (1991), descrevem a passagem dos primeiros adotantes para a maioria inicial e produzem curvas calibráveis. São replicáveis e quantitativos, virtude relevante, mas operam sobre uma única camada, a da adoção, sem dialogar nativamente com a maturidade tecnológica ou com a disponibilidade de capital. Tomados isoladamente, informam o ritmo de adoção sem informar as condições de prontidão que o antecedem.

A construção de cenários divide-se em duas vertentes. A escola das lógicas intuitivas, oriunda do trabalho de Kahn e consolidada na prática da Shell e da Global Business Network, desenha futuros plausíveis a partir da discussão qualificada entre especialistas (WACK, 1985; SCHWARTZ, 1991). A escola francesa de La Prospective, de Godet, acrescenta ferramentas de análise estrutural e de jogo de atores para disciplinar essa construção (GODET, 2000). Ambas são fortes onde a tradição quantitativa é fraca, na incorporação de atores, instituições e sociedade. A fragilidade, para o objeto desta pesquisa, é dupla, porque a evidência repousa no juízo de especialistas e a prontidão tecnológica não é tratada como variável. O resultado é um conjunto de futuros descritivos, valioso para a deliberação estratégica, porém pouco apto a sustentar decisões intertemporais de investimento ancoradas em séries.

O juízo estruturado nasce para disciplinar essa subjetividade. O método Delphi, formalizado a partir dos experimentos de Dalkey e Helmer na RAND (DALKEY; HELMER, 1963) e sistematizado por Linstone e Turoff (1975), organiza a consulta iterativa a especialistas. A análise de impactos cruzados, introduzida

por Gordon e Hayward (1968), estende o Delphi para tratar a influência mútua entre eventos. São procedimentos explícitos e, nesse sentido, mais auditáveis que a conversa de cenário, embora permaneçam ancorados na percepção de painéis, sem leitura de prontidão e sem fusão com dados de mercado.

O technology roadmapping oferece um arcabouço estruturado para relacionar mercados, produtos e tecnologias ao longo do tempo, e funciona como dispositivo de planejamento e de comunicação em ambientes turbulentos (PHAAL; FARRUKH; PROBERT, 2004). O Hype Cycle do Gartner agrega percepções setoriais sobre o percurso entre o pico de expectativas e o platô de produtividade e serve como sinal soft de temporização (FENN; RASKINO, 2008). Essa família aproxima-se da decisão, pois organiza marcos e prazos, mas a sua natureza é de planejamento orientado por expectativas. O roadmap não infere maturidade a partir de evidência textual, e o Hype Cycle permanece indicador qualitativo de expectativa, sem constituir medida de risco.

A Multi-Level Perspective de Geels (2002) e a abordagem funcional dos Sistemas de Inovação Tecnológica de Hekkert et al. (2007) e Bergek et al. (2008) deslocam o foco da tecnologia isolada para o sistema que a cerca. A primeira articula nichos, regimes e paisagem para explicar transições sociotécnicas, e a segunda mapeia funções como criação de conhecimento, formação de mercado e legitimação, ao identificar bloqueios à emergência de uma nova indústria. Entre todas, essa família é a mais robusta na dimensão social e institucional, e por isso interessa diretamente à camada Society do STRM-4. A sua orientação, porém, é diagnóstica e qualitativa. Explica dinâmicas e gargalos sistêmicos, sem produzir a série de prontidão nem o sinal de timing de investimento que o problema exige.

A prospecção baseada em mineração de dados de ciência e tecnologia é a família mais próxima do STRM-4 no critério da evidência. O tech mining de Porter e Cunningham (2005) e os trabalhos de previsão de tecnologias emergentes por bibliometria e análise de patentes (DAIM et al., 2006) extraem indicadores e tendências de grandes volumes de artigos e documentos patentários, com alta replicabilidade. Cabe registrar que já existem, nessa linha, métodos bibliométricos dedicados à avaliação quantitativa de maturidade tecnológica, propostos para reduzir a dependência da opinião de especialistas. Inferir maturidade a partir de texto, portanto, não é em si a novidade do STRM-4. A lacuna que esses métodos deixam é outra, pois operam sobre as camadas de ciência e tecnologia sem fundi-las a funding e difusão numa leitura única, não convertem a maturidade em variável econômica de risco e de timing voltada à decisão intertemporal e, de modo geral, não incorporam a camada social.

A escala de Technology Readiness Levels fecha o quadro por ser o único instrumento que coloca a prontidão no centro. Concebida na NASA e detalhada por Mankins (1995), e revisitada criticamente pelo próprio autor (MANKINS, 2009), organiza o avanço técnico em níveis. Três limitações a separam do uso que o STRM-4 propõe. O TRL funciona como gate qualitativo, atribuído tipicamente por especialista, sem operar como variável contínua. Descreve maturidade técnica, sem medir risco econômico ou custo de capital. E trata a tecnologia de forma isolada, razão pela qual surgiram escalas derivadas, como os Manufacturing Readiness Levels e os Innovation ou Commercial Readiness Levels, para cobrir manufatura e mercado. Mesmo essas derivações permanecem instrumentos de avaliação por estágio, sem constituir séries econômicas reexecutáveis a partir de evidência observável.

Confrontadas segundo os seis critérios, as famílias distribuem-se de forma complementar, cobrindo eixos distintos do problema. As fortes na camada social, como as escolas de cenário e as abordagens sistêmicas, são fracas em evidência observável e não tratam a prontidão como variável. A forte em evidência e replicabilidade, a do tech mining, é silenciosa na dimensão social e não funde funding e difusão numa leitura econômica. O TRL centra a prontidão, mas o faz como gate qualitativo. E a difusão entrega o motor temporal sobre uma única camada.

O Quadro 1 sintetiza o cotejo das famílias de instrumentos segundo os seis critérios que orientam esta seção e localiza a posição alvo do STRM-4.

Quadro 1 - Instrumentos comparáveis de prospecção e o lugar do STRM-4

Família de instrumentos	Evidência	Prontidão	TRL	Integração multifonte	Saída de decisão	Replicabilidade	Camada social	expectativas	Ondas longas	(Schumpeter, Perez, Dosi)	Teórica e histórica	Macro, não operacional	Interpretação de fase	Conceitual	Implícita	Difusão	(Rogers, Bass, Moore)	Séries de adoção	Camada única	Ritmo de adoção	Alta	Parcial	Escolas de cenário	(Lógicas intuitivas, La Prospective)	Juízo de especialistas	Qualitativa, multifator	Futuros descritivos	Tácita a semiestruturada	Forte	Delphi e impactos cruzados	(Gordon e Hayward; Linstone e Turoff)	Juízo estruturado	Eventos inter-relacionados
-------------------------	-----------	-----------	-----	-----------------------	------------------	-----------------	---------------	--------------	--------------	---------------------------	---------------------	------------------------	-----------------------	------------	-----------	---------	-----------------------	------------------	--------------	-----------------	------	---------	--------------------	--------------------------------------	------------------------	-------------------------	---------------------	--------------------------	-------	----------------------------	---------------------------------------	-------------------	----------------------------

Probabilidades e cenários Procedimento explícito, subjetivo Parcial Roadmapping e Hype Cycle (Phaal et al.; Gartner) Especialistas mais sinais de mercado Indireta, por marcos Mercado, produto e tecnologia Plano e temporização Estruturada , subjetiva Parcial MLP e TIS (Geels; Hekkert; Bergek) Qualitativa, histórica e funcional Sistêmica Diagnóstico de dinâmica e bloqueios Estruturada, interpretativa Forte Tech mining e bibliometria-patentometria (Porter e Cunningham; Daim et al.)

Dados observáveis Possível, mas não econômica Ciência e tecnologia, sem funding e difusão Indicadores e tendências Alta TRL e escalas de prontidão (Mankins; MRL, IRL) Avaliação técnica, gate Núcleo, porém qualitativo Camada única Gate de desenvolvimento Padronizada, subjetiva Ausente nos derivados parciais STRM-4 (posição alvo) Dados observáveis multifonte com validação Variável econômica contínua de risco e timing Fusão Society-Tech-Readiness-Market Sinais acionáveis para decisão intertemporal Protocolo reexecutável e auditável Implícita (capacidades e expectativas)

1.8 A lacuna e necessidade do STRM-4 A revisão dos instrumentos mostra que cada família resolve bem uma parte do problema e deixa outra descoberta, e que nenhuma reúne, sozinha, o conjunto de propriedades que a leitura econômica de uma tecnologia emergente exige. É esse vazio que o STRM-4 pretende ocupar.

O espaço não ocupado corresponde a um instrumento que reúna cinco propriedades hoje dispersas. A primeira é tratar o TRL como variável econômica contínua de risco e de timing, inferida de evidência observável. A segunda é fundir ciência, patentes, funding e difusão numa única leitura. A terceira é produzir sinais acionáveis para a decisão intertemporal de investimento e para o desenho de política. A quarta é ser reexecutável e auditável. A quinta é operacionalizar a camada social, das capacidades e das expectativas. É a combinação dessas propriedades, mais do que cada uma isolada, que delimita a contribuição pretendida.

A combinação é inédita, e a sua necessidade decorre do objeto específico. As interfaces cérebro-máquina-cérebro cognitivas têm caráter fortemente science-push e translacional, maturidade heterogênea entre subsistemas e peso regulatório e de dados neurais, particularidades que os instrumentos genéricos, mesmo combinados, não acomodam. É sobre essa lacuna que o STRM-4 se define , a seguir, ao especificar suas camadas, variáveis, fontes, lógica de integração e limites de aplicação, antes que a leitura empírica das seções posteriores o coloque em uso.

1.9 Definição formal do STRM-4 A seção anterior delimitou a lacuna. Resta a tarefa que converte o construto em instrumento utilizável, cobrada com acerto pela avaliação de uma versão anterior deste trabalho, que observou estar o framework afirmado, mas não formalizado. Formalizar significa aqui quatro coisas. Definir cada camada e as variáveis que a compõem. Especificar as fontes de evidência e o modo de cálculo de cada variável. Tornar explícita a lógica que integra as quatro camadas numa leitura única. E demarcar os limites de aplicação do instrumento. É o que esta seção executa, de modo que o STRM-4 passe a ser definido no corpo do trabalho, em lugar de remetido a desenvolvimento posterior.

A formalização assume uma decisão de método que organiza tudo o que se segue. O STRM-4 não colapsa as quatro camadas em um índice escalar ponderado. Cada camada é definida como um conjunto de séries anualizadas dispostas sobre uma linha do tempo comum, em lugar de uma nota a ser somada às demais, de modo que a informação resida tanto em cada série quanto nas relações entre elas. A recusa do índice único é fundamentada adiante, na lógica de integração.

A arquitetura parte de fontes de evidência observável. A camada Tech reúne a base de conhecimento científico e tecnológico, da qual se infere a camada Readiness, que é o pivô do instrumento, pois traduz maturidade em variável econômica de risco e de temporização. A camada Market acrescenta o sinal de capital e de tração empresarial. A camada Society fornece o substrato de capacidades e de expectativas que condiciona a conversão das demais em difusão. A leitura integrada combina as séries das quatro camadas e as relações entre elas, e dela derivam os sinais de decisão. O Quadro 2 sintetiza a definição, distinguindo o que o instrumento estabelece do grau em que esta aplicação o instancia.

Quadro 2 - Definição formal das camadas do STRM-4

Camada Variáveis Fontes de evidência Função na leitura Estado nesta aplicação

Society (S) Número e distribuição de autores e de instituições ativas; sinais de expectativa setorial e de momentum de aportes

Produção científica relida sob a ótica de capacidades; ciclos de expectativa; camada Market Condiciona se o acoplamento entre maturidade e capital se converte em difusão Operacionalizada por proxy, com a fragilidade declarada Tech (T) Contagem anual de artigos e de famílias de patentes; taxa de crescimento; concentração por jurisdição e por depositante

PubMed; EPO Open Patent Services com deduplicação por família INPADOC, complementado por USPTO Open Data Portal e por Lens Alimenta a inferência de Readiness e mede, por si, intensidade e direção do esforço Instanciada Readiness (R), pivô Distribuição anual por nível de TRL; taxa de transição entre estágios, com ênfase em 4 para 5 e 5 para 6; eficiência de pipeline Evidência textual de patentes, por regra auditável e por painel de modelos de linguagem com citação literal obrigatória Converte maturidade em perfil de risco e de temporização, em vez de rótulo de prontidão Distribuição instanciada sobre o subconjunto de rótulos seguros; taxa de transição e eficiência de pipeline definidas e não estimadas

Market (M) Volume anual de financiamento; distribuição dos aportes por estágio; indicadores de tempo entre fundação e rodadas Bases de capital de risco, com triagem para o recorte do objeto Acopla-se à Readiness para revelar a janela de coordenação entre capital e maturidade Instanciada sem granularidade de rodada

A camada Readiness merece detalhamento, por ser o pivô. Três variáveis a compõem. A distribuição de maturidade é a contagem anual de itens por nível de TRL, e a escolha de uma distribuição, em lugar de um nível único, responde à heterogeneidade de maturidade entre subsistemas que caracteriza o objeto. A taxa de transição é a contagem anual de primeiras passagens entre estágios, com ênfase nas travessias de TRL 4 para 5 e de 5 para 6, que são os stage-gates que reprecificam o custo de capital. A eficiência de pipeline é a razão entre o número de itens que cruzam um estágio crítico até determinado horizonte e o número de itens no estágio base no ano de referência. Tomadas em conjunto, essas três variáveis convertem a maturidade em perfil de risco e de temporização, que é precisamente o sentido em que este trabalho afirma tratar o TRL como variável econômica.

A camada Society é, ao mesmo tempo, a mais importante para a hipótese da Economia Neuroampliada e a mais dependente de variáveis proxy, razão pela qual recebeu atenção particular no desenho do instrumento. A opção adotada é convertê-la em variável, ainda que aproximada, em lugar de mantê-la como contexto qualitativo, explicitando que se infere capacidade a partir de produção e expectativa a partir de percepção e de capital, sem medir diretamente nem uma nem outra.

A lógica de integração é o ponto em que o instrumento se distingue de uma coleção de indicadores. Há três razões para evitar o índice ponderado único. A primeira é que qualquer conjunto de pesos fixos seria arbitrário, expondo o instrumento à própria crítica de arbitrariedade que se quer evitar. A segunda é que a agregação destrói a informação contida nas relações entre as camadas, onde reside o sinal mais útil. A terceira é que camadas medidas em unidades e naturezas distintas, como contagens de patentes, volumes de capital e proxies de expectativa, não são comensuráveis de modo a justificar uma soma. Caso uma aplicação futura venha a exigir indicador composto para comparar tecnologias entre si, os pesos deverão ser explícitos e submetidos a análise de sensibilidade, em lugar de assumidos.

A relação central do instrumento é o acoplamento entre Readiness e Market. Quando o capital acelera enquanto a maturidade permanece concentrada em estágios baixos e as travessias críticas seguem raras, a leitura é a de uma janela de coordenação, na qual o capital é exploratório e se adianta à maturidade. A pergunta que o instrumento então formula é se os tempos da ciência aplicada, da manufatura de precisão e da formação de talentos se sincronizam antes da inflexão de adoção. A camada Society entra como condicionante, ao informar se a capacidade instalada torna a sincronização viável, e a camada Tech oferece o pano de fundo de intensidade e direção do esforço que sustenta a inferência de Readiness.

Dessas relações derivam três sinais de decisão, que constituem a saída do instrumento. O primeiro é o prêmio de risco, lido a partir da distribuição de maturidade e das taxas de transição. O segundo é a temporização, expressa como janela de coordenação e, quando as séries o permitirem, como ponto médio de adoção obtido por triangulação entre maturidade, pulso de capital e calibração de curvas de difusão. O terceiro é o conjunto de ações condicionadas a stage-gates, que traduz a leitura em recomendações de portfólio e de política atadas às travessias de TRL 4 para 5 e de 5 para 6. A seção 3 aplica essa saída ao caso das interfaces cérebro-máquina-cérebro cognitivas.

Demarcar os limites de aplicação integra a formalização. O STRM-4 foi desenhado para tecnologias emergentes de perfil science-push que já deixam rastro observável em ciência, patentes e capital. Sua aplicabilidade decai em dois extremos. Em tecnologias sem pegada textual ou de financiamento suficiente, as séries tornam-se ralas demais para sustentar a leitura. Em tecnologias maduras, nas quais a difusão já ocorre, o pivô de Readiness perde poder discriminante, e os instrumentos clássicos de difusão passam a ser mais adequados. Somam-se três limites internos. A inferência de TRL a partir de texto carrega ruído e exige validação. As proxies da camada Society medem capacidade e expectativa de modo indireto. E as projeções produzidas têm natureza probabilística e cenária, sem o estatuto de previsões determinísticas.

Cabe, por fim, distinguir o instrumento definido do instrumento instanciado, distinção que o Quadro 2 registra coluna a coluna. Das três variáveis da camada Readiness, apenas a distribuição de maturidade foi computada sobre o corpus, e ainda assim restrita ao subconjunto de rótulos seguros, pelas razões declaradas na seção 4. A taxa de transição e a eficiência de pipeline permanecem definidas, mas ainda não estimadas, por dependerem de uma base de rótulos mais ampla. Registrar essa distância é parte do que se entende aqui por formalizar, pois um instrumento definido com precisão permite medir exatamente o quanto de si mesmo uma aplicação conseguiu instanciar, o que um instrumento apenas anunciado não permitiria.

2. Metodologia

Esta seção descreve, em nível replicável, o desenho de coleta e análise que sustenta este trabalho. O objetivo é tornar observáveis os elos entre maturidade tecnológica (Technology Readiness Levels, TRL), difusão tecnológica (curvas logísticas à la ROGERS, 1962; BASS, 1969), e decisões econômicas associadas a stage-gates e funding. O foco permanece econômico. Explicitar como dados técnico-científicos e de mercado são estruturados para informar riscos e temporalidade de investimento, sem deslocar a análise para especificidades setoriais de saúde.

2.1 Desenho e escopo Para unidade de análise consideramos BMBIs com ênfase em aplicações de cognição aumentada. Definimos BMBI, para fins operacionais, como sistemas que (i) captam sinais neurais, (ii) os processam por algoritmos e (iii) devolvem estímulos ao sistema nervoso em circuito fechado (closed-loop), abrangendo arranjos invasivos (p. ex., eletrodos intracorticais/ECOG) e não invasivos de alta resolução. O recorte cognitivo cobre memória, atenção e controle executivo, evitando propositalmente restringir-se a aplicações motoras (NICOLELIS; LEBEDEV, 2009; HAMPSON et al., 2018).

Horizonte temporal. As buscas primárias foram parametrizadas para o período 2010-2025, visando capturar a fase recente de irrupção técnico-científica e de formação de pipelines empresariais (PEREZ, 2002). Quando pertinente (p. ex., antecedentes notórios), foram consultadas referências anteriores a 2010. Coletas foram planejadas como retratos passíveis de repetição. As consultas e exportações podem ser reexecutadas no mesmo formato para atualização de séries.

Os dados foram estruturados em três camadas, (i) ciência (PubMed), (ii) tecnologia (patentes recuperadas via EPO Open Patent Services, ou OPS, com complemento do USPTO Open Data Portal para o texto integral norte-americano) e (iii) mercado (capital de risco e perfis de empresas em Crunchbase e PitchBook). A camada 'Readiness' corresponde à inferência de TRL a partir de evidência textual, aplicada aos itens da camada (ii). A integração final segue o arcabouço STRM-4 (Society-Tech-Readiness-Market), conectando sinais de ciclo, maturidade, difusão e implicações estratégicas (ROGERS, 1962; BASS, 1969; MAZZUCATO, 2013).

2.2 Procedimentos de busca em PubMed (ciência) Utilizamos o PubMed (National Library of Medicine) com o construtor avançado, registrando as strings, filtros e datas de exportação. Os resultados foram exportados via CSV, com os campos de PMID, título, resumo, MeSH, ano, tipo de artigo e espécie.

A seguir as strings base e filtros com a sintaxe PubMed (campos [Title/Abstract], [MeSH Terms] e [All Fields]).

Q1_BMBI_cognition (núcleo cognitivo):

("brain-computer interface"[MeSH Terms] OR "brain-computer interface"[Title/Abstract] OR "brain-machine interface"[Title/Abstract] OR "brain-machine interface"[Title/Abstract] OR "neural interface"[Title/Abstract] OR "brain-machine-brain"[Title/Abstract]) AND (cognit*[Title/Abstract] OR

memory[Title/Abstract] OR "working memory"[Title/Abstract] OR hippocamp*[Title/Abstract] OR attention[Title/Abstract]) AND ("closed-loop"[Title/Abstract] OR bidirectional[Title/Abstract] OR stimulation[Title/Abstract]))

Q2_bidirectional_closed_loop (arquitetura bidirecional):

((("brain-computer interface"[Title/Abstract] OR "brain-machine interface"[Title/Abstract] OR "neural interface"[Title/Abstract]) AND ("closed-loop"[Title/Abstract] OR bidirectional[Title/Abstract] OR feedback[Title/Abstract]) AND (intracortical[Title/Abstract] OR ECoG[Title/Abstract] OR "deep brain"[Title/Abstract] OR hippocamp*[Title/Abstract]))

Q3_memory_prosthesis (próteses de memória):

((hippocamp*[Title/Abstract] OR "memory prosthesis"[Title/Abstract]) AND (implant*[Title/Abstract] OR intracortical[Title/Abstract] OR ECoG[Title/Abstract]) AND ("closed-loop"[Title/Abstract] OR stimulation[Title/Abstract] OR bidirectional[Title/Abstract]))

Filtros PubMed (aplicados a Q1-Q3): • Publication dates: 2010/01/01-2025/06/30; • Species: Humans OR Animals; • Languages: English OR Portuguese; • Article types: Clinical Trial, Observational Study, Validation Study, Systematic Review, Meta-Analysis; • Excluídos: Case Reports, Editorial, Letter.

Critérios de inclusão. Artigos com evidência de leitura e devolução de estímulos (circuito fechado) e/ou foco explícito em funções cognitivas. Critérios de exclusão. Estudos puramente motores sem componente cognitivo explícito, dispositivos apenas de leitura sem qualquer via de retorno (input) e relatos sem método (comentários/opinião).

2.3 Procedimentos de busca em patentes (tecnologia) A base tecnológica apoiou-se em uma fonte programática de autoridade, o serviço EPO Open Patent Services na versão OPS 3.2, adotada como fonte primária de recuperação, com o escopo mantido no objeto da tese, as interfaces cérebro-máquina-cérebro voltadas à cognição. A opção pelo OPS decorre de ele reunir numa única infraestrutura versionada a busca por classificação e por termos, a resolução de identificadores canônicos, a família de patentes INPADOC, os dados bibliográficos e o texto integral dos escritórios europeus. Cada registro carrega a base de origem, a consulta que o recuperou e a data de recuperação, o que assegura rastreabilidade e reprodutibilidade por consulta versionada.

Quatro fontes de apoio foram acionadas pelo que cada uma oferece com autoridade. O USPTO Open Data Portal supriu o texto integral dos documentos norte-americanos, que o OPS não serve, e forneceu metadados de inventor mais ricos. A Lens Scholarly API sustentou o vínculo entre inventores e autoria acadêmica, com desambiguação por identificador persistente ORCID, descrita na subseção correspondente. O OpenAlex foi previsto como contingência para a validação cruzada desse vínculo, mas não chegou a contribuir, por bloqueio de cota e por imprecisão de afiliações, o que consolidou a escolha do Lens. O Google Patents, no ambiente BigQuery, foi sondado como via para fechar a lacuna de texto integral dos escritórios não servidos pelas APIs, e a sondagem estabeleceu por medição direta a inviabilidade dessa via, remetida à seção de limitações.

A recuperação seguiu duas etapas. Uma coleta ampla de neurotecnologia estabeleceu o acervo de partida e, sobre ele, um refoco delimitou o objeto cognitivo sem nova consulta ao serviço. A estratégia focada combinou um bloco léxico de núcleo, com os termos de interface cérebro-máquina-cérebro, em conjunção com um bloco cognitivo ou com um bloco de arquitetura de malha fechada, e ancorou o bloco de classificação nas classes CPC que caracterizam o conjunto, acompanhadas das classes de aprendizado de máquina. As expressões e as classes constam do bloco de strings adiante, e o funil completo das duas etapas, com as contagens de cada estágio, está no Anexo A. O período coberto vai de 1º de janeiro de 2010 a 14 de julho de 2026.

As strings base do recorte focado foram as seguintes, na sintaxe do OPS.

cpc = "G06F3/015/low" (interface por sinais bio-elétricos) cpc = "A61B5/369/low" cpc = "A61B5/372/low" cpc = "A61B5/378/low" (EEG e potenciais evocados) ta all "brain computer interface" ta all "brain machine interface" ta all "neural interface" ta all "brain machine brain" (núcleo BMBI, com variantes) Bloco cognitivo , em conjunção : cognit*, memory, "working memory", hippocamp*, attention, "executive function", Neurofeedback bloco de arquitetura de malha fechada, em conjunção: "closed-loop", bidirectional, intracortical, ECoG, "deep brain" \ pd within "20100101 20260714" (bloco temporal)

2.4 Deduplicação e preparação da base de dados de patentes O acervo amplo de neurotecnologia foi refocado no objeto da tese por um filtro de precisão. O critério de recorte exigiu o núcleo léxico de interface cérebro-máquina-cérebro em conjunção com o bloco cognitivo ou com o de arquitetura de malha fechada, e aplicou duas exclusões de precisão, o hardware puro sem reivindicação funcional e o ruído de codificação de vídeo e de classificação de imagem, preservando o aprendizado de máquina de decodificação, que é legítimo no domínio. Sobre as famílias candidatas, um passo de triagem por painel de modelos de linguagem julgou, a partir do resumo, a pertinência ao objeto, com veredito de dentro, fronteira ou fora e a justificativa citada, o que elevou a precisão do filtro léxico à de leitura semântica.

A deduplicação foi conduzida por identificador de família INPADOC, cuja equivalência foi verificada empiricamente, uma vez que o endpoint de família do serviço retorna todos os membros sob o mesmo identificador. O refoco produziu um corpus de 251 famílias, das quais 123 classificadas como dentro do objeto e 128 na fronteira, com o veredito por família registrado para auditoria. O conjunto é majoritariamente chinês, com 203 famílias, ou 81 por cento, e tem texto integral em 31 famílias, ou 12 por cento, o que remete a leitura de prontidão ao resumo como insumo de censo, com o texto integral como reforço onde existe.

O procedimento é auditável e reversível, pois preserva o acervo amplo de partida e o veredito de inclusão de cada família. O corpus de 251 famílias é a base analisada por inteiro nas seções seguintes, e o funil completo das duas etapas, da coleta ampla ao recorte cognitivo, está no Anexo A. Os resultados descritivos, incluindo a distribuição temporal, a participação por escritório e o vínculo entre inventores e autoria acadêmica, são apresentados na seção de resultados.

2.5 Inferência de TRL, regras e validação O TRL é tradicionalmente usado em engenharia para medir prontidão tecnológica. Aqui, o tratamos como variável econômica de risco e timing. Atribuímos níveis com base em pistas textuais (descritores no resumo e no título de patentes e artigos), status legal e marcos experimentais, quando descritos. A classificação parte de uma regra de identificação por palavras-chave, aplicada em uma primeira passagem, e é submetida à camada de validação descrita adiante.

As regras de identificação, por nível, são as seguintes.

- TRL 2-3 (conceito e prova de princípio): termos como “concept”, “proof-of-concept”, “in vitro”, “bench-top” inferiam depositantes predominantemente acadêmicos;
- TRL 4 (validação em ambiente laboratorial com animal): presença de “in vivo”, “rodent”, “non-human primate”, “implant”, com resultados experimentais quantitativos;
- TRL 5 (demonstração em ambiente relevante + manufatura piloto): menções a “GLP”, “biocompatibility/ISO 10993”, “sterilization”, “packaging”, “manufacturing”, “pilot line”;
- TRL 6 (primeiros estudos em humanos): expressões como “first-in-human”, “pilot clinical”, “feasibility study”, “in-human”;
- TRL 7 (demonstração operacional ampliada): estudos com N maior e “validation in operational environment”, sem necessariamente envolver aprovação regulatória;
- TRL 8 (sistema completo qualificado): menções a qualificação de sistema e validação final em ambiente operacional.

Em patentes, a regra buscou as palavras-chave nos campos de ‘abstract/description/claims’ e adicionou reforços quando há co-ocorrência de termos técnicos de manufatura e testes. Em textos de artigos, os campos de título e resumo foram varridos com um dicionário de palavras (“randomized”, “double-blind”, “pilot trial”, “crossover”, “NHP”, “ECoG”, “intracortical”). Itens ambíguos foram separados para revisão. A base guarda, por família e por artigo, o TRL e a fonte da decisão.

A regra por palavras-chave estabelece um resultado reproduzível, mas afere apenas a coerência interna, ao passo que a validação exige concordância contra uma referência independente. Para essa validação, a inferência de TRL foi submetida a um painel de modelos de linguagem, com o avaliador humano como âncora externa, paradigma já reconhecido como alternativa escalável ao julgamento por especialistas em tarefas sobre texto (ZHENG et al., 2023; GU et al., 2024) e com precedente direto na estimativa do próprio nível de prontidão na escala de um a nove (BETANCOURT et al., 2025).

O procedimento de validação separa a extração da classificação em dois estágios. Um extrator localiza e transcreve as passagens de evidência de maturidade, classificando cada uma como demonstrada ou predita, e um classificador atribui o nível exigindo a citação literal da passagem que o sustenta, o que torna cada rótulo auditável e reduz a contaminação por autopreferência (PANICKSSERY; BOWMAN;

FENG, 2024). O método registra o TRL demonstrado, ancorado em evidência de trabalho realizado, e o TRL reivindicado, que reflete a maturidade alegada, adotado como sinal primário com o demonstrado como piso conservador, pela defasagem de 18 meses ou mais entre a redação e a publicação do pedido. A distinção tem fundamento jurídico, pois o direito de patentes admite o exemplo profético, descrito a partir de resultados preditos, ao lado do exemplo de trabalho (MPEP 2164.02), de modo que a decisão se ancora na evidência textual literal, tratando o tempo verbal como sinal fraco e contornável.

A evidência insuficiente aciona, por regra objetiva, o rótulo de indeterminado, reportado sem ser descartado, uma vez que a abstenção do modelo não é confiável por padrão (KIRICHENKO et al., 2025). O painel reúne três modelos de fornecedores distintos, roteados por um gateway unificado, desenho de famílias disjuntas preferível na literatura (VERGA et al., 2024). Como painéis de modelos não fornecem independência estatística, com erros correlacionados que crescem com a acurácia (KIM et al., 2025) e persistem sob o aumento do número de avaliadores (KOHLI, 2026; YANG; HOU; YANG, 2026), a concordância entre os três é lida como robustez, sem ser convertida em acurácia. O reporte é múltiplo, com a concordância bruta, a concordância adjacente, o kappa ponderado quadrático, o AC1 de Gwet e a matriz de confusão, pelo paradoxo de prevalência (WONGPAKARAN et al., 2013). O papel humano foi redefinido para a auditoria amostral da evidência citada, com cerca de 96 itens estratificados para sobre-representar as divergências, complementada por âncoras de resposta conhecida.

A camada de validação, desenhada em dois pilotos de 60 famílias cada, foi aplicada em censo sobre as 251 famílias do corpus, ao custo aproximado de US\$ 6 1 . O painel classificou com segurança um conjunto de 30 famílias, para as quais a evidência textual sustentou um nível, com o TRL reivindicado distribuído entre a prova de princípio e o uso humano inicial e com concordância entre os três avaliadores de fornecedores distintos entre 71 e 88 por cento. Cada rótulo do painel veio acompanhado da passagem literal que o sustenta, o que o torna auditável. Nas famílias cujo resumo não apresentava evidência discriminante de estágio, o protocolo reteve o rótulo de indeterminado por regra objetiva, o que delimita com precisão o que a leitura por resumo permite afirmar e o que fica reservado ao texto integral.

2.6 Séries e indicadores de maturidade e difusão Indicadores de maturidade. O desenho prevê séries anuais de (i) contagem total por TRL, (ii) contagem de 'primeiras passagens' (p. ex., evolução de 3->4 ou 4->5), (iii) mediana do tempo de transição entre estágios e (iv) 'eficiência do pipeline', definida como o número de famílias que cruzam 5->6 até t+- dividido pelo número de famílias em TRL 5 no ano base. Sobre a base efetivamente constituída, apenas o indicador (i) foi computado, restrito ao subconjunto de rótulos seguros, pelas razões declaradas na seção 4. Os indicadores (ii) a (iv) exigem uma base de rótulos mais ampla e um denominador anual estável, e integram a agenda da seção 6.

Indicadores de difusão. O ajuste de curvas S logísticas (ROGERS, 1962; BASS, 1969) foi executado sobre a série cumulativa de patentes, com o resultado reportado na seção 3.2, onde se discute por que a estimativa de ponto médio de adoção não é identificável nas séries disponíveis. As séries são usadas como sinais econômicos sobre risco e temporalidade de investimento.

2.7 Procedimentos em bases de mercado (Crunchbase e PitchBook) Objetivo. Extrair sinais de tração empresarial e investimentos de capital de risco associados a BMBIs com recorte cognitivo. Ambas as plataformas têm taxonomias próprias. Por isso, adotamos busca mista (palavra-chave + filtros).

Crunchbase, filtros utilizados.

- 'Organization type': Company; 'Operating status': Active; • 'Keywords' (no campo Description/Industries): "brain-computer interface" OR "brain-machine interface" OR "neural interface" OR neurotechnology; • 'Categories/Category groups': Health Care, Artificial Intelligence, Hardware; • 'Headquarters location': Global; • 'Funding stage': Pre-Seed, Seed, Series A-D, Venture, Corporate Round; • 'Announced date': 2010-01-01 a 2025-06-30.

Campos exportados. Nome da empresa, ano de fundação, país, descrição curta, rounds (tipo, data, valor), investidores, total captado em rodadas de investimento(USD).

PitchBook, filtros análogos.

- Keyword search (no campo 'Company description/technology'): brain-computer interface OR brain-machine interface OR neural interface; • Vertical/Industry tags: Healthcare Devices & Supplies;

Medical Devices; Artificial Intelligence; Semiconductors; • Deal types: Seed, Early Stage VC, Later Stage VC; • Date range: 2010-2025.

Critérios de triagem (manual). Excluir companhias sem qualquer elemento de circuito fechado bidirecional (i.e. apenas leitura) ou quando o core declarado não tiver componente cognitivo. Foram, por exemplo, excluídos wearables genéricos de bem-estar sem ligação a BMBI.

Tratamento dos dados de mercado. Foram consolidados os rounds por empresa, padronizadas moedas para USD e derivados os indicadores (i) mediana de tempo fundação->primeiro VC, (ii) mediana de tempo entre rounds e (iii) distribuição de estágios. Esses sinais servem para cruzar marcos de maturidade (TRL) com disponibilidade de capital e apetite de risco ao longo do tempo (MAZZUCATO, 2013).

2.8 Integração STRM-4 e reprodutibilidade Integração por camadas. 'Tech' (publicações/patentes) alimenta 'Readiness' (TRL). 'Readiness' e sinais de mercado compõem 'Market'. 'Society' resume disponibilidade de competências (artigos científicos) e expectativas (GARTNER, 2024). A dimensão de expectativas integra o arcabouço porque antecede a maturidade técnica e coordena decisões de investimento, de formação de talentos e de entrada de mercado, funcionando como sinal econômico de temporização na fase de instalação descrita por Perez (2002). A análise traz camadas anualizadas para identificar períodos de maior elasticidade a políticas e decisões privadas.

Reprodutibilidade. Para cada consulta foi registrada, data/hora, string/filtros, contagem de resultados e arquivo exportado (CSV). Os scripts utilizados para data mining rastream os pormenores da classificação TRL, chaves de família e calibração manual dos algoritmos. Arquivos foram versionados por data de coleta. O processo foi pensado para repetição periódica, permitindo atualizar séries sem refazer o protocolo inteiro.

3. Resultados, discussão e implicações

3.1 Roadmap de adoção O cruzamento das quatro camadas do STRM-4, a produção científica, a atividade patentária, a inferência de prontidão e os sinais de capital, permite organizar um roteiro indicativo de adoção para as interfaces cérebro-máquina-cérebro voltadas à cognição e, por consequência, para o nascimento potencial da Economia Neuroampliada. O roteiro é ancorado na convergência de sinais observáveis, mais do que em uma curva de difusão calibrada, cuja inflexão, como se discute adiante, ainda não é identificável nas séries disponíveis.

O ano de 2026 estabelece-se como ponto de partida. Ele marca a passagem de demonstrações de laboratório para experimentações de nicho com integração de subsistemas, com eletrodos mais estáveis, decodificadores com aprendizagem de máquina e controle em circuito fechado. Do lado econômico, o salto de investimentos de 2024 e 2025 sinaliza capacidade de financiar linhas piloto e validações externas mínimas, sem exigir, ainda, escala industrial. Em linguagem de difusão, trata-se da borda final do espaço dos inovadores, com provas operacionais restritas, suficiente para abrir a trilha e insuficiente para sustentar adoção ampla (ROGERS, 1962; MOORE, 1991).

A sequência de marcos subsequentes é lida como expectativa estruturada, sem o estatuto de projeção pontual. Os marcos organizam-se em quatro trilhas paralelas, a técnica, a clínica, a regulatória e a de adoção de mercado, cujas dependências recíprocas condicionam o ritmo do conjunto. No plano clínico e regulatório, a fronteira comercial já percorre a via de entrada, com os primeiros implantes humanos de dispositivos líderes e com a obtenção de autorização regulatória por empresas de interface neural, o que ancora os marcos de uso humano inicial no presente. No plano de mercado, o adensamento de rodadas de estágio tardio sobre um número reduzido de líderes projeta uma primeira janela de produtos-sistema ao longo da década, condicionada à travessia dos gargalos de maturidade descritos adiante.

A espinha temporal do roteiro é a cascata entre as camadas. A produção científica atinge o seu pico entre 2021 e 2022, a atividade patentária adensa-se entre 2022 e 2024, e o capital dá o seu salto entre 2024 e 2025. Cada camada desloca-se cerca de 2 a 3 anos em relação à anterior, comportamento coerente com a estrutura de instalação e difusão das ondas tecnoeconômicas, que serve aqui como régua temporal e como critério de consistência (SCHUMPETER, 1939; PEREZ, 2002; MOORE, 1991).

A Figura 1 sintetiza essa cascata, com as três camadas normalizadas ao próprio valor máximo na janela, o que evidencia a ciência à frente, seguida pela tecnologia e pelo capital. A série que sustenta a

figura consta da Tabela 1 do Anexo B, onde se registra que apenas a ciência exhibe pico observado, ao passo que tecnologia e capital atingem o máximo no último ano completo por ainda não terem inflectido.

Figura 1 - Convergência das camadas STRM-4, cascata ciência, tecnologia e capital

3.2 Leitura integrada pelo STRM-4: visão geral dos achados A composição das quatro camadas revela um quadro coerente e, em um ponto, dual. Na camada Society, aproximada pela produção científica, a busca por interfaces bidirecionais e por aumento cognitivo reúne 91 artigos entre 2015 e 2025, com pico em 2021 e 2022 e presença consolidada em veículos especializados, como o Journal of Neural Engineering e o IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. A ciência oferece o sinal mais precoce do ciclo e antecede, no tempo, o adensamento tecnológico e a mobilização de capital.

Na camada Tech, o corpus reproduzível de 251 famílias de patentes cresce de 1 família em 2010 para 72 em 2025, com CAGR de 33% e tempo de duplicação de 2,4 anos. A atividade é majoritariamente chinesa, com 81% das famílias, cifra que mede volume de depósito, sensível a subsídio, mais do que valor econômico. A leitura de valor exige, por isso, atenção ao estrato de fronteira, de titularidade empresarial, no qual figuram atores comerciais com produtos em desenvolvimento e com participação de empresas superando a de universidades ao fim da década de 2010.

A Figura 2 apresenta a série anual das 251 famílias de patentes, com o adensamento recente e o ano de 2026 ainda parcial. A base não carrega data de prioridade, de modo que a série é de ano de publicação do representante da família, com a defasagem que isso implica em relação ao depósito. Os valores anuais constam da Tabela 2 do Anexo B.

Figura 2 - Famílias de patentes de BMBIs cognitivas por ano de publicação

A camada Readiness apresenta uma dualidade que é, ela própria, um achado. A leitura de maturidade a partir de texto de patente depende de quanto de sinal implícito se credita, distinção que corresponde à que separa o TRL demonstrado do reivindicado. A codificação humana adotada, sobre 120 títulos do estrato de fronteira, posiciona 34 documentos em uso humano inicial, o TRL 6, e 24 em demonstração operacional, o TRL 7, cada rótulo acompanhado da passagem literal que o sustenta e de um grau de confiança declarado, alto em 82 e médio em 38 dos 120. Uma heurística léxica auditável, redesenhada para cobrir os nove níveis, reproduz essa codificação com concordância adjacente de 83% e kappa ponderado quadrático de 0,48, o que lhe confere validade concorrente. Aplicada às 251 famílias no modo que credita o sinal reivindicado, a heurística situa 44% na fronteira de TRL 6 ou além. No modo que exige evidência factual de trabalho realizado, esse piso conservador recolhe-se a uma fração pequena. A leitura de maturidade avança, assim, sobre um censo de 120 títulos ancorados em codificação humana e 251 famílias classificadas, e configura uma faixa entre o piso demonstrado e o teto reivindicado, em lugar de um número único.

A Figura 3 mostra a distribuição de TRL no estrato de fronteira, validada por avaliador humano, com concentração em uso humano inicial e demonstração operacional. A distribuição completa dos 120 títulos, dos níveis 2 a 7, consta da Tabela 3 do Anexo B.

Figura 3 - Distribuição de TRL na fronteira, validação humana

A estrutura de conversão entre estágios qualifica o risco econômico, e o seu tratamento exige distinguir a razão observada no corpus da taxa de translação apoiada em literatura.

A transição de TRL 4 para 5, da validação laboratorial para o ambiente relevante, é reconhecidamente o gargalo, o vale da morte translacional, para o qual a literatura sustenta uma ordem de grandeza de 15% a 30%. A transição de fase clínica mais crítica, de Fase II para III, situa-se em 28,9% (BIO; BIOMEDTRACKER; INFORMA, 2021). A probabilidade de um dispositivo de classe III que entra em ensaio humano alcançar o mercado é de cerca de 29% (EASTERN RESEARCH GROUP, 2022). O arcabouço do grau de dificuldade de pesquisa e desenvolvimento atribui de 20% a 50% a um salto difícil (MANKINS, 1998). Leituras estritamente pré-clínicas apontam valores mais baixos, de 5% a 10% (SEYHAN, 2019), de modo que a faixa exprime a ordem de grandeza do vale da morte, sem medir um salto isolado. Já a travessia de TRL 5 para 6, a entrada em uso humano, foi revista nest a segunda edição do trabalho. A cifra de cerca de 95%, adotada em versão anterior, originava-se de uma razão entre contagens de patentes por nível, inflada por uma heurística que não separava adequadamente

níveis adjacentes, e não se sustenta como taxa de translação. O melhor proxy empírico para o alcance do primeiro estudo em humanos é de aproximadamente 47% a 50% (EASTERN RESEARCH GROUP, 2022; INEICHEN et al., 2024), reservando-se o patamar de 90% a 95% ao gate regulatório terminal, próximo da travessia de TRL 8 para 9. Estabelecidas as ordens de grandeza, o risco concentra-se na travessia translacional de TRL 4 para 5, o que recomenda capital paciente e orquestração de capacidades para destravar o estágio crítico, que reprecifica o custo de capital e amplia o conjunto de usos plausíveis (DOSI, 1982; MOORE, 1991).

Na dimensão de mercado, apurada em base de capital de risco independente do corpus de patentes, o levantamento bruto reúne 434 organizações e um financiamento anunciado de US\$ 4,543 bilhões. A triagem para o objeto, que retém a organização cujo texto de setores e de descrição traz marca neuro-específica e remove os falsos positivos de setor alheio, entre eles uma mineradora de sigla homônima responsável isoladamente por US\$ 1,37 bilhão, reduz o conjunto a 195 organizações e a um agregado de US\$ 3,022 bilhões, das quais 81 declaram aporte maior que zero. A distribuição temporal do capital exhibe um degrau, de dezenas a pouco mais de uma centena de milhões de dólares por ano até 2023 para cerca de US\$ 505 milhões em 2024 e para quase US\$ 2 bilhões em 2025. O número de empresas financiadas por ano cai enquanto o volume cresce, padrão de concentração em apostas maiores e mais tardias, dirigidas a líderes como Neuralink, Precision Neuroscience, Paradromics e INBRAIN, com predominância, ainda assim, de aportes iniciais e de atores públicos que caracterizam um ciclo movido pela ciência (MAZZUCATO, 2013).

A Figura 4 exhibe o financiamento anual das empresas de BMBI após a triagem de falsos positivos, com o degrau de 2024 e 2025. A série anual e a memória de cálculo da triagem constam da Tabela 4 do Anexo B.

Figura 4 - Financiamento anual das empresas de BMBI, base triada

A leitura integrada situa o campo em fase de irrupção acelerada e é explícita quanto ao que as séries não permitem afirmar. O ajuste de modelos de crescimento à série cumulativa de patentes seleciona a forma exponencial à frente das formas com saturação, o que indica ausência de evidência de inflexão. O ponto médio de adoção, quando estimado por ajuste logístico, desloca-se de 2023 para 2037 conforme se acrescentam anos de dado, o que caracteriza uma estimativa não identificável. A curva ainda não virou, e por isso um ponto médio de adoção em ano determinado permanece conjectura, sem constituir resultado do instrumento (ROGERS, 1962; BASS, 1969).

O que a evidência sustenta, em lugar de uma data, é uma convergência de sinais de fronteira. Um conjunto de tecnologias já validado em uso humano inicial e em demonstração operacional, uma via regulatória percorrida por empresas líderes e um influxo de capital de estágio tardio concentrado em 2024 e 2025 tornam plausível a entrada de mercado das aplicações líderes no horizonte de aproximadamente 10 anos. A janela de coordenação intertemporal entre ciência aplicada, manufatura de precisão e formação de talentos permanece o fator que separa a captura de valor da dispersão em ciclos curtos de experimentação (PEREZ, 2002; MOORE, 1991).

3.3 Implicações Quanto às implicações, o eixo comum é capacidade habilitadora. Eletrônica de precisão, encapsulamento, teste acelerado e ciência de dados reduzem gargalos sistêmicos e beneficiam todo o ecossistema, independente dos stakeholders.

Para corporações com negócios na fronteira da disrupção pela nova onda, os planos estratégicos de longo prazo já podem contemplar funding em stage-gates de BMBIs, e há possibilidade de provisionar linhas piloto com rastreabilidade desde o protótipo e explicitar proposta de valor em termos de ampliação cognitiva e seus desdobramentos organizacionais.

No ambiente da academia, surge a oportunidade de articulação entre instituições de ensino, MEC e MCTI para planejar a formação de docentes, pesquisadores e construção de laboratórios de fronteira (prototipagem, teste in vivo, análise de sinais) e programas de incentivo à ciência aberta (dicionários de eventos neurais, pipelines reprodutíveis) para acelerar o acúmulo de intangíveis.

Na esfera governamental, inserção do tema da Economia Neuroampliada no planejamento estratégico e elaborar um mecanismo similar ao Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA), que podem incluir instrumentos de fomento condicionados a travessias de maturidade (4->5 ou 5->6), desonerações e mecanismos de continuidade vinculados a evidências (GAO, 2022, 2024).

Os investidores, em especial de capital de risco, corporate venture e family offices podem se preparar para a elaboração e avaliação de teses faseadas na Economia Neuroampliada e detalhamento por estágios de maturidade, combinando investimentos para exploração (pré-semente/semente) com rodadas de continuidade. Também podem dar foco em teses de retorno que não dependam só de vendas unitárias.

No campo dos empreendedores (startups) a implicação deste trabalho é a possibilidade de escolha de nichos com prova de valor mensurável, calibração entre densidade de dados, generalização de algoritmos e CAC/tempo de treino, e opções de design/modelos de negócio para provocar a disrupção de incumbentes.

4. Limitações do estudo

Este trabalho responde a uma pergunta econômica. Sob quais condições BMBIs para cognição aumentada sustentam trajetórias de criação e captura de valor, integrando ciência, TRL, difusão e tração empresarial? Essa ambição impõe limites que balizam os resultados.

A camada “ciência” foi estruturada no PubMed, com strings centradas em “brain-machine interface”, “neural interface”, “closed-loop”, “hippocamp*”, “cognit*”. Ainda que amplo, o PubMed pode sub-representar subdomínios emergentes e áreas limítrofes (p.ex., IEEE Xplore). Filtros de idioma e tipo de estudo, usados para precisão, podem ter reduzido a recuperação marginal. Em termos econômicos, as séries capturam tendências robustas, não um censo exaustivo.

As consultas de patentes, cujo desenho consta da seção 2.3, carregam ruídos que a deduplicação por família não elimina, como variantes de depósito por jurisdição, redações que ocultam palavras-chave e qualidade desigual dos resumos. A estratégia de seleção de campos pode, além disso, subponderar reivindicações com detalhes críticos. Tais ruídos não anulam tendências, mas sugerem cautela na leitura de variações marginais.

A leitura de maturidade é dependente do estrato e de quanto de sinal implícito se admite, o que a torna uma faixa em lugar de um ponto. A codificação humana adotada credita indícios de materialidade e posiciona a fronteira em uso humano inicial e demonstração operacional. Um piso conservador, que exige demonstração explícita de trabalho realizado, recolhe a leitura a estágios anteriores. A distância entre os dois modos traduz a distinção entre TRL demonstrado e reivindicado, central a este trabalho. A base foi ampliada da versão anterior deste trabalho, de um censo de alta confiança de 30 famílias para uma codificação humana de 120 títulos e uma classificação léxica auditável das 251, com ganho na delimitação da faixa. A dependência do estrato agrava a ressalva, pois a massa de depósitos, majoritariamente chinesa, tende ao estágio inicial, ao passo que o estrato de fronteira, de titularidade empresarial, alcança uso humano inicial e demonstração operacional. Estreitar a faixa exigiria evidência externa à patente, para além da inferência sobre o texto, o que integra a agenda da seção 6.

As leituras de bases de capital de risco capturam sinais de tração e de capital, mas sofrem de vies de sobrevivência, de incompletude de valores anunciados e de heterogeneidade taxonômica entre neurotech, inteligência artificial e dispositivos médicos. A triagem para o objeto, reportada na seção 3.2 e detalhada na Tabela 4 do Anexo B, é sensível ao limite adotado no que toca à contagem de empresas, ainda que o agregado financeiro seja robusto a esse limite, uma vez que as organizações removidas na margem não declaram aporte. O extrato disponível é por empresa, sem granularidade de rodada, o que limita a reconstrução de uma série anual fiel de aportes, e um levantamento complementar em base secundária mostrou-se restrito e fora do recorte. Esses valores devem ser lidos como ordens de grandeza que sinalizam expectativas e apetite de risco crescentes, cuja conversão em difusão dependerá da travessia dos estágios técnicos.

O horizonte 2010-2025 parece adequado para capturar a fase de irrupção, mas curto para estimar platôs de produtividade.

Os marcos de adoção foram interpretados como níveis crescentes de difusão, coerentes com curvas S, porém derivados de um roteiro indicativo. Pelas razões expostas na seção 3.2, as séries não sustentam a fixação de um ponto médio de adoção, de modo que qualquer data determinada permanece conjectura, e as projeções além de 2035 carregam incerteza estrutural própria das ondas tecnoeconômicas.

Por diretriz deste trabalho, temas setoriais específicos, como impacto em planos de saúde, não foram

mobilizados. Essa escolha mantém o foco na coordenação econômica e em capacidades habilitadoras. Por outro lado, esconde as fricções institucionais que podem alongar o prazo de adoção. O leitor deve considerar esta omissão como parte do desenho do estudo, não como negação da relevância desses fatores.

Em conjunto, as limitações acima introduzem incerteza mensurável, sem anular os achados descritos na seção 3.2. A robustez advém da convergência entre as camadas, mais do que da precisão de cada métrica isolada.

5. Conclusões

A hipótese norteadora, das BMBIs como vetor emergente de uma Economia Neuroampliada, encontra sinais convergentes nas três camadas observadas. Do ponto de vista técnico-científico, há três vetores em aceleração, maior densidade e estabilidade de eletrodos e materiais, decodificadores mais eficientes e controle em circuito fechado. No plano da maturidade, a massa de depósitos concentra-se em conceito e prova de princípio, enquanto um estrato de fronteira já alcança uso humano inicial e demonstração operacional, com os gargalos previsíveis nas passagens de TRL 4->5 e TRL 5->6. Em mercado, o investimento agregado em empresas neurotecnológicas aproxima-se de US\$ 3,0 bilhões, com salto concentrado em 2024 e 2025, o que alinha expectativas e capital ao ciclo de irrupção. A convergência dessas três camadas sustenta a hipótese, cuja confirmação plena dependerá da travessia dos gargalos de maturidade e da inflexão da curva de difusão.

A contribuição central deste trabalho é metodológica e interpretativa. Metodológica, ao instrumentalizar o TRL como variável econômica, apta a informar risco, custo de capital e alocação de portfólio por estágios de maturidade. Interpretativa, ao articular a leitura em camadas do framework STRM-4 (Society-Tech-Readiness-Market), que torna complementares os sinais dispersos em publicações, patentes e movimentos de capital. O resultado é um mapa útil para decisões intertemporais de investimento e para políticas de desenvolvimento produtivo voltadas a capacidades habilitadoras.

O encadeamento de ações nos próximos 10 anos tende a ser decisivo. A coexistência, em 2025, de uma fronteira já em uso humano inicial, de capital de estágio tardio em alta e de uma via regulatória em curso abre uma janela para sincronizar os três timings decisivos, a ciência aplicada, a manufatura de precisão e o talento. Coordenação, aqui, significa amarrar formação de pessoas, desenvolvimento laboratorial, decisões de portfólio e preparação fabril, de modo a reduzir prêmios de risco e acelerar as travessias TRL 4->5 e TRL 5->6. Onde essa sincronização não ocorre, a captura de valor migra para nações que conciliem melhor aprendizado tecnológico, capacidade produtiva e formação de competências.

No plano conceitual, a noção de Economia Neuroampliada oferece ao campo da Economia da Inovação uma lente para tratar a expansão dos limites da cognição por plataformas neurais acopladas a algoritmos como fator candidato de um novo ciclo econômico. Trata-se de uma hipótese promissora, cuja consolidação aguarda a travessia dos gargalos de maturidade típicos que precedem revoluções tecnológicas.

6. Trabalhos futuros e próximos passos

A pesquisa abre um conjunto claro de trilhas investigativas e de execução, capazes de consolidar evidências, reduzir incertezas e orientar decisões intertemporais. Listamos a seguir cinco frentes priorizadas, suficientes para ancorar artigos, relatórios técnicos e projetos de desenvolvimento.

Camada Society e medida direta de capacidades. Substituir as proxies hoje utilizadas na camada Society, definidas na seção 1.9 como a dimensão que mais depende de aproximações, por indicadores diretos de formação, de infraestrutura laboratorial e de expectativa setorial, e submeter a camada assim reconstruída ao mesmo protocolo de auditoria aplicado às demais. A portabilidade do instrumento a outro campo emergente, como teste de generalidade fora das interfaces neurais, integra a mesma frente.

Microdados e replicabilidade. Publicar, em ciência aberta, o corpus anonimizável com as saídas das consultas (PubMed e EPO OPS), a classificação TRL por família, as regras de inferência e os logs de validação manual. Espera-se com isso reduzir vies de publicação, permitir auditoria externa e acelerar a convergência metodológica.

Modelagem econômica com opções reais e risco tecnológico. Integrar séries de TRL a modelos de

opções reais para decisão de investimento faseado por estágios. A hipótese é que políticas e arquiteturas empresariais que aumentem a 'eficiência de pipeline' reduzem o custo de capital exigido e antecipam o valor presente líquido de projetos.

Curvas de aprendizagem/custo. Medir curvas para eletrônica neural, encapsulamento e análise de sinais, ligando densidade de dados e qualidade de decodificação a custos marginais e tempos de treino por usuário. O resultado deve alimentar decisões de precificação intertemporal e de design de portfólio de produtos.

Economia de dados neurais. Desenvolver métricas de valoração de bases de sinais neurais rotulados, considerando qualidade, diversidade, reuso e efeitos de rede. O objetivo é traduzir ativos intangíveis em parâmetros de decisão, por exemplo, no desenho de alianças e na avaliação de fusões/aquisições voltadas a dados e algoritmos.

Aprofundamento da prontidão e curva de difusão. Estender a classificação de TRL ao texto integral das famílias que o possuem, ampliar a âncora de codificação humana para além dos 120 títulos já validados, reconstruir a série de capital por rodada a partir de um extrato de rodadas e, com essas séries mais densas, reestimar a curva de difusão e o seu ponto médio, convertendo a leitura de convergência em projeção calibrada quando a inflexão se tornar observável.

Referências

BASS, Frank M. A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, v. 15, n. 5, p. 215-227, 1969. DOI: 10.1287/mnsc.15.5.215.

BERGEK, A.; JACOBSSON, S.; CARLSSON, B.; LINDMARK, S.; RICKNE, A. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: a scheme of analysis. *Research Policy*, v. 37, n. 3, p. 407-429, 2008.

BETANCOURT, Juan; CORAL, Andrés; FRAGA, Anabel; FIGUEROA, Cristhian; RAMIREZ-GONZALEZ, Gustavo. Intelligent virtual assistant for calculating technology readiness levels using large language models (LLM). *IEEE Access*, v. 13, p. 137709-137723, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11112552>. Acesso em : 23 jul. 2026.

DAIM, T. U.; RUEDA, G.; MARTIN, H.; GERDSRI, P. Forecasting emerging technologies: use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 73, n. 8, p. 981-1012, 2006.

DALKEY, N.; HELMER, O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, v. 9, n. 3, p. 458-467, 1963.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.

FENN, J.; RASKINO, M. Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time. Boston: Harvard Business Press, 2008.

FETZ, Eberhard E. Operant conditioning of cortical unit activity. *Science*, v. 163, n. 3870, p. 955-958, 1969. DOI: 10.1126/science.163.3870.955.

GAO, Xiaorong; WANG, Yijun; CHEN, Xiaogang; GAO, Shangkai. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces. *Trends in Cognitive Sciences*, v. 25, n. 8, p. 671-684, 2021. DOI: 10.1016/j.tics.2021.04.003.

GARTNER, Inc. Hype Cycle for Emerging Technologies. Stamford, CT: Gartner, 2024. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/articles/hype-cycle-for-emerging-technologies>. Acesso em: 06 out. 2025.

GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, v. 31, n. 8-9, p. 1257-1274, 2002.

GODET, M. The art of scenario and strategic planning: tools and pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 65, n. 1, p. 3-22, 2000.

GORDON, T. J.; HAYWARD, H. Initial experiments with the cross-impact matrix method of forecasting. *Futures*, v. 1, n. 2, p. 100-116, 1968.

GU, Jiawei et al. A survey on LLM-as-a-judge. arXiv preprint arXiv:2411.15594, 2024.

HAMPSON, Robert E.; SONG, Dong; ROBINSON, Bryan S.; et al. Developing a hippocampal neural prosthetic to facilitate human memory encoding and recall. *Journal of Neural Engineering*, v. 15, n. 3, p. 036014, 2018. DOI: 10.1088/1741-2552/aaaed7.

HEKKERT, M. P.; SUURS, R. A. A.; NEGRO, S. O.; KUHLMANN, S.; SMITS, R. E. H. M. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, n. 4, p. 413-432, 2007.

KIM, Elliot; GARG, Avi; PENG, Kenny; GARG, Nikhil. Correlated errors in large language models. In: *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2025. arXiv:2506.07962. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.07962>. Acesso em: 23 jul. 2026.

KIRICHENKO, Polina et al. AbstentionBench : reasoning LLMs fail on unanswerable questions. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2025. arXiv:2506.09038.

KOHLI, Guneet. Nine judges, two effective votes: correlated errors undermine LLM evaluation panels. arXiv preprint arXiv:2605.29800, 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2605.29800>. Acesso em: 23 jul. 2026.

LINSTONE, H. A.; TUROFF, M. (Ed.). *The Delphi method: techniques and applications*. Reading: Addison-Wesley, 1975.

MANKINS, J. C. *Technology readiness levels: a white paper*. Washington: NASA, 1995.

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. *Acta Astronautica* , v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009.

MAZZUCATO, Mariana. *The entrepreneurial state: debunking public vs private sector myths*. London: Anthem Press, 2013.

MOORE, Geoffrey A. *Crossing the chasm: marketing and selling high-tech products to mainstream customers*. New York: HarperBusiness, 1991.

NICOLELIS, Miguel A. L.; LEBEDEV, Mikhail A. Principles of neural ensemble physiology underlying the operation of brain-machine interfaces. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 10, n. 7, p. 530-540, 2009. DOI: 10.1038/nrn2653.

O'DOHERTY, Joseph E.; LEBEDEV, Mikhail A.; IFFT, Peter J.; ZHUANG, Katie; SHOKUR, Shervin; NICOLELIS, Miguel A. L. Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface. *Nature*, v. 479, p. 228-231, 2011. DOI: 10.1038/nature10489.

PANICKSSERY, Arjun; BOWMAN, Samuel R.; FENG, Shi. LLM evaluators recognize and favor their own generations. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2024. arXiv:2404.13076.

PEREZ, Carlota. *Technological revolutions and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages*. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Technology roadmapping : a planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 71, n. 1-2, p. 5-26, 2004.

PORTER, A. L.; CUNNINGHAM, S. W. *Tech mining: exploiting new technologies for competitive advantage*. Hoboken: Wiley, 2005.

ROGERS, Everett M. *Diffusion of innovations*. New York: Free Press of Glencoe, 1962.

SAHA, Swayamprava; BAUMERT, Mathias. Progress in brain computer interface: challenges and opportunities. *Frontiers in Systems Neuroscience*, v. 15, 2021, art. 578875. DOI: 10.3389/fnsys.2021.578875.

SCHUMPETER, Joseph A. *Business cycles: a theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process*. New York: McGraw-Hill, 1939.

SCHWARTZ, P. *The art of the long view: planning for the future in an uncertain world*. New York: Doubleday, 1991.

UNITED STATES. Government Accountability Office (GAO). Brain-Computer Interfaces: Applications, Challenges, and Policy Considerations. Washington, DC: GAO, 2024. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-25-106952>. Acesso em: 06 out. 2025.

_____. Government Accountability Office (GAO). Science & Tech Spotlight: Brain-Computer Interfaces. Washington, DC: GAO, 2022. (GAO-22-106118). Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-22-106118>. Acesso em: 06 out. 2025.

_____. Patent and Trademark Office (USPTO). Manual of Patent Examining Procedure (MPEP), seção 2164.02, Exemplos de trabalho e proféticos. 9. ed., revisão 01.2024. Alexandria: USPTO, nov. 2024. Disponível em: <https://www.uspto.gov/web/offices/pac/mpep/s2164.html>. Acesso em: 23 jul. 2026.

VERGA, Pat et al. Replacing judges with juries: evaluating LLM generations with a panel of diverse models. arXiv preprint arXiv:2404.18796, 2024.

WACK, P. Scenarios: uncharted waters ahead. Harvard Business Review, v. 63, n. 5, p. 73-89, 1985.

WONGPAKARAN, Nahathai et al. A comparison of Cohen's kappa and Gwet's AC1 when calculating inter-rater reliability coefficients. BMC Medical Research Methodology, 2013.

YANG, Zongyou; HOU, Yinghan; YANG, Xiaokun. When the judge changes, so does the measurement: auditing LLM-as-judge reliability. arXiv preprint arXiv:2607.08535, 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2607.08535>. Acesso em: 23 jul. 2026.

ZHENG, Lianmin et al. Judging LLM-as-a-judge with MT-Bench and Chatbot Arena. In: Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2023.

Referências acrescentadas na revisão de 23 jul. 2026 (fundamentação das taxas de conversão de TRL), a integrar em ordem alfabética na compilação final.

BIO; BIOMEDTRACKER; INFORMA/QLS ADVISORS. Clinical Development Success Rates and Contributing Factors 2011-2020. Washington, DC: Biotechnology Innovation Organization, 2021. Disponível em: <https://www.bio.org/clinical-development-success-rates-and-contributing-factors-2011-2020>. Acesso em: 23 jul. 2026.

EASTERN RESEARCH GROUP (ERG). Therapeutic Complex Medical Device Development: Final Report. Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services, Office of the Assistant Secretary for Planning and Evaluation, 2022. Disponível em: <https://aspe.hhs.gov/reports/therapeutic-complex-medical-device-development>. Acesso em : 23 jul. 2026.

INEICHEN, Benjamin V. et al. Analysis of animal-to-human translation shows that only 5% of animal-tested therapeutic interventions obtain regulatory approval for human applications. PLOS Biology, v. 22, n. 6, e3002667, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002667>. Acesso em : 23 jul. 2026.

MANKINS, John C. Research & Development Degree of Difficulty (R&D3). Washington, DC: NASA, Office of Space Flight, 1998.

NATURE REVIEWS BIOENGINEERING. The state of clinical trials of implantable brain-computer interfaces. Nature Reviews Bioengineering, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44222-024-00239-5>. Acesso em: 23 jul. 2026.

SEYHAN, Attila A. Lost in translation: the valley of death across preclinical and clinical divide. Translational Medicine Communications, v. 4, art. 18, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s41231-019-0050-7>. Acesso em: 23 jul. 2026.

WONG, Chi Heem; SIAH, Kien Wei; LO, Andrew W. Estimation of clinical trial success rates and related parameters. Biostatistics, v. 20, n. 2, p. 273-286, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biostatistics/kxx069>. Acesso em: 23 jul. 2026.

ANEXO A - Funil de constituição do corpus de patentes

A constituição do corpus de patentes seguiu duas etapas, uma coleta ampla de neurotecnologia e um refoco no objeto cognitivo da tese. A separação preserva a rastreabilidade e explicita a passagem do acervo de partida ao corpus efetivamente analisado.

Etapa 1, coleta ampla. A recuperação por EPO OPS, com o bloco de classificação e o bloco léxico de neurotecnologia unidos por disjunção, produziu 17.547 documentos.

A triagem por âncora de classificação neural ou por evidência textual inequívoca, com uma regra construída para não capturar a expressão neural network no sentido de rede neural artificial, incluiu 11.702 documentos e preservou 1.715 patentes legítimas de interface cérebro-computador e de eletroencefalografia, majoritariamente chinesas e com classificação CPC incompleta.

A deduplicação por família INPADOC reduziu o conjunto a 10.397 famílias, com texto integral em 39,9 por cento delas.

Um achado de reprodutibilidade orientou a contagem, pois a interface do OPS subestima as consultas de grande volume, o que exigiu a subdivisão recursiva do intervalo temporal até folhas abaixo do teto de dois mil resultados por consulta.

Etapa 2, refoco no objeto. O acervo amplo foi filtrado pelo critério que exige o núcleo léxico de interface cérebro-máquina-cérebro em conjunção com o bloco cognitivo ou com o de arquitetura de malha fechada, com exclusão do hardware puro sem reivindicação funcional e do ruído de codificação de vídeo e de imagem, e mantido o aprendizado de máquina de decodificação.

Sobre as famílias candidatas, um painel de modelos de linguagem julgou a pertinência ao objeto a partir do resumo, com veredito de dentro, fronteira ou fora.

O resultado é o corpus de 251 famílias, com 123 dentro e 128 na fronteira, majoritariamente chinês, com 203 famílias, ou 81 por cento, e com texto integral em 31 famílias, ou 12 por cento.

A derivação por filtragem do acervo amplo dispensou nova consulta ao serviço e o respectivo custo de busca.

ANEXO B - Tabelas numéricas das Figuras 1 a 4

Este anexo apresenta as séries que sustentam as Figuras 1 a 4, de modo que cada gráfico do corpo do texto possa ser conferido, recalculado e criticado a partir do número, para além da imagem. As quatro tabelas são geradas pelo script pipeline/tabelas_figuras.py diretamente das fontes primárias, sem transcrição manual, e os arquivos correspondentes em formato aberto acompanham o material de reprodutibilidade.

Tabela 1 - Convergência das camadas STRM-4, séries anuais e índices (Figura 1)

Ano	Ciência (artigos)	Tecnologia (famílias)	Capital (US\$ milhões)	Ciência (índice)	Tecnologia (índice)
2010	11,1	6,9	0,1	0,0	9,5
2011	0,0	1,4	0,5	4,0	6,0
2012	1,8	22,2	8,3	0,1	10,0
2013	93,0	27,8	13,9	4,8	9,0
2014	67,7	50,0	12,5	3,5	8,0
2015	10,0	10,9	44,4	13,9	0,6
2016	17,0	18,0	117,4	94,4	25,0
2017	6,1	18,0	15,0	57,0	100,0
2018	20,8	29,0	146,6	27,8	40,3
2019	7,6	14,0	39,0	505,3	77,8
2020	54,2	26,2	9,0	72,0	1.927,6
2021	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Nota: o índice normaliza cada camada ao próprio valor máximo na janela de 2015 a 2025, igual a 100. A ciência atinge o máximo em 2022. As séries de tecnologia e de capital atingem o valor máximo em 2025 porque ainda não inflectiram, de modo que esse máximo coincide com o último ano completo e não corresponde a um pico observado. A defasagem que a tabela permite ler é, portanto, a da ciência em relação às duas outras camadas.

Tabela 2 - Famílias de patentes de BMBIs cognitivas por ano de publicação (Figura 2)

Ano Dentro Fronteira Total

Nota: a base não carrega data de prioridade, de modo que o ano é o da publicação do representante da família. O ano de 2026 é parcial, com fechamento em 14 de julho, e não sinaliza queda. A taxa composta de crescimento entre 2010 e 2025 é de 33,0 por cento ao ano, o que corresponde a um tempo de duplicação de 2,4 anos.

Tabela 3 - Distribuição de TRL no estrato de fronteira, validação humana (Figura 3)

TRL

Documentos Percentual 7,0 5,8 7,0 5,8 4,0 19,0 15,8 29,0 24,2 6,0 34,0 28,3 7,0 24,0 20,0

Nota: distribuição sobre os 120 títulos do estrato de fronteira codificados por avaliador humano, com a rubrica de nove níveis reproduzida no protocolo de codificação. O total é de 120 documentos.

Tabela 4 - Financiamento anual das empresas de BMBI, base triada (Figura 4)

Ano Empresas com aporte Montante (US\$ milhões) 9,3 73,7 0,5 9,5 4,0 1,8 6,0 93,0 67,7 10,9 10,0 117,4 57,0 12,0 146,6 15,0 505,3 15,0 1.927,6 Fonte: elaboração própria, a partir do extrato de base de capital de risco.

Nota: o extrato é por empresa, sem granularidade de rodada, de modo que o montante total captado por empresa é atribuído ao ano da última rodada. A triagem retém a organização cujo texto de setores e de descrição traz marca neuro-específica e remove os falsos positivos de setor alheio, entre eles a mineradora de sigla homônima, responsável isoladamente por US\$ 1,37 bilhão atribuídos a 2024. O extrato bruto reúne 434 organizações e US\$ 4,543 bilhões; após a triagem restam 195 organizações e US\$ 3,022 bilhões, das quais 81 declaram aporte maior que zero. O agregado é robusto ao limite exato da triagem, porque as organizações removidas na margem não declaram aporte, ao passo que a contagem de empresas depende do limite adotado e deve ser lida com essa ressalva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Convergência das camadas STRM-4, cascata ciência, tecnologia e capital Figura 2 - Famílias de patentes de BMBIs cognitivas por ano de publicação Figura 3 - Distribuição de TRL na fronteira, validação humana Figura 4 - Financiamento anual das empresas de BMBI, base triada

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Instrumentos comparáveis de prospecção e o lugar do STRM-4 Quadro 2 - Definição formal das camadas do STRM-4

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Convergência das camadas STRM-4, séries anuais e índices Tabela 2 - Famílias de patentes de BMBIs cognitivas por ano de publicação Tabela 3 - Distribuição de TRL no estrato de fronteira, validação humana Tabela 4 - Financiamento anual das empresas de BMBI, base triada