ARTÍGO ORIGINAL

MindNet: the best network is human

Bem-vindos à Internet Neural — uma arquitetura multimodal de circuito fechado que integra telecomunicações, rt-fMRI, HP-^{13}C MRI, RF, Pyneal, TCP/IP e inteligência artificial para adquirir, codificar, transmitir, modular e sincronizar estados neurais entre indivíduos.

Juliana Lourenço Lopes Demasi[1], *MEDICAL STUDENT (3rd semester)*

[1]Universidade Nacional Ecológica, Santa Cruz de la Sierra.

ORCID: 0009-0005-7192-0458. LATTES:8792875021530351

Sobre o artigo:

MindNet é proposta como uma arquitetura multimodal de comunicação neural em circuito fechado destinada à aquisição, processamento, modulação, transmissão e sincronização de estados neurais entre indivíduos. A arquitetura proposta integra ressonância magnética funcional em tempo real (rt-fMRI), imagem metabólica por ressonância magnética com carbono-13 hiperpolarizado (HP-^{13}C MRI), RF, Pyneal, TCP/IP e inteligência artificial para criar uma representação computacional de estados neurais e transmitir essa informação digitalmente do Emissor para o Receptor.

A proposta parte de avanços já demonstrados em diferentes campos e a hipótese central da *MindNe*t é que esses componentes, atualmente distribuídos entre diferentes linhas de pesquisa, possam ser integrados em uma arquitetura computacional na qual cada ciclo de aquisição, transmissão, recepção e sincronização produza nova informação utilizada para determinar o ciclo seguinte.

Palavras-chave: *MindNet; brain-to-brain*; fMRI; rt-fMRI; HP-^{13}C MRI; inteligência artificial; *neural decoding; hyperalignment; hyperscanning; neurofeedback*; comunicação neural; *closed-loop system*.

RESUMO

O presente estudo explica a solução proposta chamada *MindNet* como uma arquitetura multimodal de telecomunicações neurodigitais em circuito fechado, destinada à aquisição, processamento, representação, transmissão e sincronização de informação derivada de estados neurais entre indivíduos. A proposta integra princípios de neurociência, inteligência artificial, teoria da informação e engenharia de telecomunicações, considerando a rt-fMRI e RF como mecanismo de aquisição funcional, e a HP-^{13}C MRI como modalidade complementar de caracterização metabólica obtida em tempo real, e algoritmos computacionais para redução de ruído, extração de características, *neural decoding* e construção de representações digitais dos estados cerebrais. Após a conversão neural-digital, essas representações podem ser codificadas, *packetizadas* e transmitidas por redes convencionais de telecomunicações, incluindo infraestrutura baseada em TCP/IP, eliminando a necessidade de propagação direta de campos cerebrais ou de MRI entre indivíduos geograficamente separados. Métodos de alinhamento interindividual, como *hyperalignment*, são considerados como possíveis mecanismos para estabelecer espaços representacionais compartilhados e permitir a comparação de informação entre cérebros com organizações funcionais individuais.

O estudo também propõe implementação da *MindNet* a partir de precedentes experimentais ja existentes acerca de seus principais componentes funcionais, incluindo processamento de fMRI em tempo real, *neural decoding* não invasivo, comunicação cérebro–cérebro, *Brainets*, transmissão digital de informação derivada de atividade cerebral (DICOM), *hyperscanning* e alinhamento de representações neurais entre indivíduos. A arquitetura proposta se torna bidirecional ao incorporar a *reacquisição* do estado cerebral do receptor e sua utilização concomitantemente durante o pulso de MRI/RF. Após a recepção da informação, a resposta neural é medida, representada e comparada ao estado de referência do emissor, permitindo calcular parâmetros que melhor traduzam seus estados neurais. Dessa forma, o estudo explica a solução e discute a implementabilidade técnica da arquitetura proposta pela *Mindnet* propondo que variáveis como fidelidade, latência end-to-end, *neural bandwidth*, taxa de erro e *closed-loop gain* sejam utilizadas para caracterizar o funcionamento, a eficiência e a progressiva otimização da *MindNet* como sistema de telecomunicações neurodigitais.

ABSTRACT

The present study describes the proposed solution, called MindNet, as a multimodal closed-loop neurodigital telecommunications architecture designed for the acquisition, processing, representation, transmission, and synchronization of information derived from neural states between individuals. The proposed architecture integrates principles of neuroscience, artificial intelligence, information theory, and telecommunications engineering, considering real-time functional MRI (rt-fMRI) and radiofrequency (RF) as mechanisms for functional acquisition, hyperpolarized carbon-13 magnetic resonance imaging (HP-^{13}C MRI) as a complementary modality for real-time metabolic characterization, and computational algorithms for noise reduction, feature extraction, neural decoding, and the construction of digital representations of brain states. Following neural-to-digital conversion, these representations can be encoded, packetized, and transmitted through conventional telecommunications networks, including TCP/IP-based infrastructure, eliminating the need for the direct propagation of brain-generated or MRI fields between geographically separated individuals. Interindividual alignment methods, such as hyperalignment, are considered as potential mechanisms for establishing shared representational spaces and enabling the comparison of information across brains with individual functional organizations.

The study also proposes the implementation of MindNet based on existing precedents for its principal functional components, including real-time fMRI processing, non-invasive neural decoding, brain-to-brain communication, Brainets, digital transmission of information derived from brain activity, including through DICOM-based imaging infrastructure, hyperscanning, and the alignment of neural representations across individuals. The proposed architecture becomes bidirectional by incorporating reacquisition of the receiver's brain state and its concomitant use during the MRI/RF pulse sequence. Following information reception, the neural response is measured, represented, and compared with the sender's reference state, enabling the calculation of parameters that more accurately characterize their respective neural states. In this way, the study explains the proposed solution and discusses the technical implementability of the MindNet architecture, proposing that variables such as fidelity, end-to-end latency, neural bandwidth, error rate, and closed-loop gain be used as quantitative metrics to characterize system operation, evaluate efficiency, and guide the progressive optimization of MindNet as a neurodigital telecommunications system.

PERFIL DA AUTORA



Ju Lourenço estuda Medicina no terceiro período e *Fundamentals of Neuroscience* por meio do programa HarvardX/edX. Sua experiência profissional inclui atuação em telecomunicações e produtos avançados de Internet, participando da criação, implementação, promoção e descontinuação de produtos, além do desenvolvimento de serviços de valor agregado e iniciativas digitais. Sua atuação envolveu não apenas aspectos comerciais e de marketing, mas também a interação com equipes multidisciplinares e a participação na tomada de decisão acerca da implementação técnica e estratégica de produtos avançados de Internet e telecomunicações. Sua experiência profissional inclui ainda atuação em empresas de *Business Intelligence,* engenharia e informática.

Sua formação acadêmica reflete a mesma característica interdisciplinar mencionada anteriormente e inclui MBA em Finanças pelo IBMEC (Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais), MBA em Marketing pela FGV (Fundação Getulio Vargas), Mestrado Stricto Sensu em Comunicação de Massa pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) e graduação em Publicidade e Propaganda. Ju foi bolsista da FAPERJ, e sua pesquisa se concentrou em classificação e consumo.

Essa combinação entre comunicação, análise de mercado, finanças, tecnologia e pesquisa contribuiu para uma trajetória profissional marcada pela aproximação entre conhecimento técnico, comportamento humano e desenvolvimento de novos produtos. Ju também é jornalista de profissão e inventora por paixão.

Viveu durante 12 anos na região da Baía de San Francisco, no ecossistema tecnológico associado ao Silicon Valley, experiência que reforçou sua proximidade com a cultura de inovação e tecnologia. Ao mesmo tempo, mantém uma trajetória artística e literária, com trabalhos artísticos e acadêmicos publicados em diferentes períodos. Essa convivência entre tecnologia e criação acabou produzindo uma definição que sintetiza bem sua trajetória: “techie demais para ser apenas artista e artista demais para ser apenas techie.”

Ju voltou ao Brasil após sofrer um erro médico que a tornou uma pessoa com deficiência. Hoje cadeirante, a experiência de viver constantemente com dor e a dificuldade de encontrar tratamento adequado, levaram-na de volta aos estudos e resultaram na solução *MindNet.*

JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Da **E**xperiência à **S**olução: **A**rquitetura **N**eurodigital **Z**ero-Distance

Ao me tornar uma pessoa com deficiência durante o parto, passei a me locomover com o auxílio de cadeira de rodas ou muletas, e meu próprio corpo tornou-se, de certa forma, um objeto de estudo para mim, por sobrevivência. Da experiência de viver com dor crônica por cinco anos, descobri como me adaptar e lidar com essa condição que, em alguns casos — e, particularmente, no meu —, pode até se assemelhar a uma forma de tortura, por sua intensidade e persistência. A OMS estima que uma parcela significativa da população mundial, cerca de 30%, também conviva com dor crônica, definida, em geral, como aquela que persiste ou recorre por mais de três meses. Portanto, no âmbito pessoal, este estudo nasce, como uma flor de lótus em meio à lama, de uma grande necessidade pessoal e mundial.

Meu filho e eu ainda esperamos da Justiça a efetivação do nosso direito à restitutio in integrum, princípio jurídico da reparação integral, segundo o qual se busca restabelecer, tanto quanto possível, a situação que existiria caso o dano não tivesse ocorrido, mediante a reparação integral dos prejuízos sofridos. (CGC-23-11182, CGC-25-622102) Com os recursos limitados pela situação relatada a priori e enquanto buscamos a correspondente reparação pelos danos sofridos, iniciei os tratamentos disponíveis para mim, ainda que estes apresentem riscos e efeitos colaterais, sem necessariamente proporcionar uma recuperação integral. Após desenvolver fibromialgia como consequência da lesão na coluna, estabeleci, então, o propósito de encontrar uma alternativa.

Foi por causa da fibromialgia que compreendi que, para estudar a dor, eu precisava entender melhor o cérebro. Daí surgiu meu interesse pela neurociência. E, como não dava para deixar para trás minha própria trajetória, meu background técnico em telecomunicações e informática trouxe, naturalmente, a tecnologia para essa investigação.

Foi desse encontro entre minha experiência pessoal, neurociência e tecnologia que surgiu a proposta da MindNet, objeto de pedidos de patente perante o INPI e o USPTO, e que se utiliza de diferentes tecnologias em uníssono para investigar a possibilidade de auxiliar o cérebro em uma das tarefas que passaram a ocupar o centro da minha pesquisa: modular a dor por meio da sincronização de estados neurais.

Este estudo, portanto, nasce da necessidade de estabelecer uma ponte tecnicamente definida entre campos que tradicionalmente têm sido investigados de maneira relativamente independente na luta contra a dor crônica: a neurociência dos processos de transdução e representação neural e a engenharia de telecomunicações responsável pela transmissão de informação a distância. Dessa forma, a MindNet representa a união entre dois campos que marcam minha própria trajetória: pelo viés da neurociência, uma compreensão ainda mais profunda da nossa mente e, por meio das telecomunicações, nossa conexão ainda mais forte com a Internet.

Indice

1 Introdução

1.1 Da Aquisição Neural ao Brain-to-Brain

1.2 Contextualização e problema de pesquisa

1.3 Dor crônica como motivação clínica e científica

1.4 Da neurociência as telecomunicações neurodigitais

1.5 Objetivo e escopo do estudo

2 Segurança ética e proteção dos participantes

2.1 "…to do good or to do no harm." - Hippocrates[1]

3 MindNet conceito e arquitetura geral

3.1 Definição da MindNet

3.2 Transdução digital–física–biológica

3.3 Arquitetura múltimodal de circuito fechado

3.4 Fluxo geral da informação

4 Fundamentos neurocientíficos da MindNet

4.1 O cérebro como sistema de transdução

4.2 Nosso primeiro estado neural: a dor no sender

4.3 Da eletricidade para a química - e novamente para a eletricidade

4.4 Metabolismo cerebral e demanda energética

4.5 Como ocorre a leitura do estado neural

4.6 A contribuição metabólica da MindNet

4.7 A interação biofísica da tecnologia e o cérebro

4.8 Do cérebro do sender para uma representação digital

4.9 "Mais amor, por favor…" (ditado brasileiro)

5 O estado neural vira data

5.1 Onde a MindNet começou

5.2 Infraestrutura urbana de telecomunicações e aquisição remota na MindNet

5.3 MindNet AI: inteligência artificial como camada de tradução, reconstrução e sincronização neurodigital

5.4 Pyneal e DICOM na arquitetura da MindNet

5.5 HP-^{13}C MRI na MindNet: leitura metabólica nuclear, aquisição dinâmica e aumento de sensibilidade

6. A epidemia silenciosa da dor crônica

6.1 Um desafio global de saúde

[1] https://www.health.harvard.edu/blog/first-do-no-harm-201510138421

7. Conclusão e perspectivas de implementação da MindNet
7.1 **U**nindo **C**iência, **S**aúde e **F**uturo

8. A origem pessoal da MindNet

8.1 Minha peregrinação ate aqui

9. Referências bibliográficas

“Ninguém é livre até que todos sejam livres.” — Fannie Lou Hamer, 1971.

1 Introdução

1.1 Da Aquisição Neural ao Brain-to-Brain

Ao mesmo tempo em que coleta informações derivadas da atividade cerebral do Sender/ Receiver, a MindNet processa essas informações, convertidas em representações digitais e transmitidas por meio de sua arquitetura tecnológica, o que e objeto de pedidos de patente no INPI e no USPTO. Nessa arquitetura, a RF, rt-fMRI e a HP-^{13}C MRI atuam como modalidades de aquisição e caracterização de sinais funcionais e metabólicos, enquanto a inteligência artificial, integrada a ferramentas de processamento em tempo real como o software Pyneal, participa do processamento, redução de ruído, extração de características e conversão dos dados adquiridos de um estado neural. Uma vez digitalizadas e codificadas, essas informações podem ser transportadas pela Internet, permitindo que pessoas conectadas em diferentes regiões troquem informações derivadas de seus estados neurais.

Os diferentes componentes tecnológicos necessários à construção dessa arquitetura já possuem precedentes científicos e técnicos, como será demonstrado ao longo deste artigo. Tecnologias como MRI, fMRI em tempo real (rt-fMRI) e HP-^{13}C MRI demonstram que fenômenos físicos e fisiológicos do organismo podem ser obtidos, detectados e convertidos em sinais mensuráveis, posteriormente reconstruídos e processados como informação digital. Durante uma aquisição por ressonância magnética, campos magnéticos e pulsos de radiofrequência interagem com propriedades físicas dos tecidos, e os sinais resultantes são detectados pelo equipamento e convertidos computacionalmente em dados e imagens capazes de fornecer informações sobre estruturas, funções ou processos metabólicos do organismo humano.

Há décadas, portanto, sistemas de MRI realizam uma cadeia tecnológica de interação física, aquisição e processamento de informação a respeito de estados neurais: o equipamento estabelece condições eletromagnéticas controladas, aplica sequências de pulsos, detecta os sinais produzidos pelo sistema físico investigado e transforma esses sinais em representações digitais interpretáveis. Uma vez produzidas, essas informações podem ser armazenadas, compartilhadas e transmitidas entre equipamentos, hospitais, médicos e sistemas de saúde por meio de infraestruturas digitais e padrões como o DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Dessa maneira, uma informação originada durante um exame realizado em determinado local pode ser convertida em dados digitais e analisada por profissionais ou sistemas computacionais geograficamente distantes.

A arquitetura da Mindnet, portanto, amplia a cadeia aquisição–digitalização–transmissão ao tratar informações derivadas de estados neurais como elementos de um sistema de telecomunicações neurodigitais. Em vez de limitar o fluxo à aquisição de dados de um indivíduo e à posterior visualização de suas imagens por um profissional, a MindNet propõe processar informações derivadas do estado neural do sender, convertê-las em representações digitais transmissíveis, transportá-las pela Internet até outro endpoint e utilizar uma interface receptora para convertê-las em uma entrada biologicamente processável pelo receiver. Simultaneamente, a resposta neural do receiver pode ser novamente adquirida, processada e transmitida pelo canal de retorno. O diferencial

proposto, portanto, não consiste simplesmente em utilizar MRI para enviar dados — algo que sistemas médicos digitais já fazem —, mas em integrar RF como sistema de telecomunicações, aquisição neural, processamento computacional, inteligência artificial, telecomunicações, interface receptora e feedback em uma arquitetura bidirecional destinada à troca de informações derivadas de estados neurais entre indivíduos geograficamente separados.

Assim, o argumento central não é que diferentes funções necessárias à arquitetura — aquisição de sinais neurais, processamento em tempo real, representação digital, transmissão de dados por redes, processamento remoto e feedback — já possuem precedentes tecnológicos independentes. A questão científica e de engenharia proposta pela MindNet passa a ser como integrar esses componentes em uma arquitetura end-to-end e determinar mente seu desempenho, sua fidelidade, sua latência, sua capacidade informacional e seu closed-loop gain.

Dessa forma, a MindNet estabelece uma cadeia de transdução bidirecional na qual a informação proveniente do sender, após ser convertida em uma representação digital e transportada pela infraestrutura de telecomunicações, alcança fisicamente o sistema receptor conectado à MindNet. Nesse endpoint, a informação recebida é decodificada e convertida, por meio da interface receptora, em uma modalidade biologicamente processável pelo sistema nervoso do receiver. A resposta neural subsequente pode então ser adquirida e analisada pela própria arquitetura, permitindo verificar se o estado neural produzido no receiver apresenta correspondência, similaridade ou convergência com a representação de referência derivada do sender. Quando os critérios de sincronização previamente estabelecidos pelo sistema forem atingidos, sender e receiver poderão ser considerados operacionalmente synched-in dentro da MindNet. Nesse sentido, synched-in não significa que os dois cérebros se tornem neurologicamente idênticos, mas que suas representações neurais relevantes tenham alcançado um grau mensurável e previamente definido de convergência dentro do espaço representacional utilizado pelo sistema.

Enquanto o receiver recebe e processa essa informação, a MindNet pode, concomitantemente, adquirir sua resposta cerebral por meio de rt-fMRI, convertendo os sinais mensuráveis associados ao seu estado neural em novos dados digitais. Esses dados podem ser processados, codificados e transmitidos pela infraestrutura de telecomunicações ao endpoint do sender, constituindo um canal de retorno. Assim, a distância geográfica entre os indivíduos deixa de constituir, em princípio, uma limitação determinada pelo alcance físico dos sinais cerebrais ou dos campos magnéticos produzidos pelos equipamentos de MRI. Após a transdução neural-digital, a comunicação a distância passa a depender principalmente de questões próprias de sistemas de telecomunicações e processamento distribuído, como conectividade, bandwidth, latência, jitter, integridade dos dados, segurança e sincronização temporal. A representação digital derivada da atividade neural pode, portanto, ser transportada entre pessoas conectados à rede independentemente da distância física entre eles, desde que cada uma disponha dos componentes de aquisição, processamento e interface necessários à operação da arquitetura.

A MindNet estabelece, portanto, um circuito no qual a informação digital derivada do estado cerebral do sender é transportada até o receiver e convertida em uma entrada

biologicamente processável, ao mesmo tempo em que a resposta neural produzida no receiver é adquirida, convertida em uma nova representação digital e transmitida no sentido inverso. O receiver deixa, assim, de constituir apenas o destino final da comunicação e passa simultaneamente a funcionar como uma nova fonte de informação para o circuito. Essa reciprocidade permite que aquisição, transmissão, recepção, resposta neural, verificação e feedback ocorram de maneira contínua e potencialmente concomitante, estabelecendo a base de uma comunicação neurodigital bidirecional em circuito fechado. Na arquitetura proposta, portanto, a comunicação cérebro–cérebro a longa distância não depende da transmissão direta de atividade neural através do espaço entre os indivíduos, mas da sucessiva transdução entre estados biológicos e representações digitais, utilizando a infraestrutura de telecomunicações como canal de conexão entre os dois sistemas neurais.

1.2 Contextualização e problema de pesquisa

A neuroimagem funcional, a computação em tempo real e as interfaces cérebro-computador tornaram possível adquirir sinais cerebrais, extrair características e transformar parte dessas medidas em informação digital. O contraste BOLD estabeleceu a base da fMRI moderna, enquanto estudos neurofisiológicos esclareceram sua relação indireta com atividade neural, fluxo sanguíneo e metabolismo (Ogawa et al., 1992; Kwong et al., 1992; Logothetis et al., 2001; Hillman, 2014). Sistemas de real-time fMRI e o Pyneal reduziram o intervalo entre aquisição e análise, permitindo que resultados derivados de volumes recentes sejam usados durante a própria sessão (Sitaram et al., 2017; MacInnes et al., 2020). O HP-13C permitiu aquisição de dados metabólicos em tempo real. O problema de pesquisa da MindNet e determinar se esses e outros componentes hoje dispersos podem operar como uma única arquitetura focada em permitir aquisição, transporte e modulação de estados neurais. A questão central não é se sinais cerebrais podem gerar dados transmissíveis, mas se aquisição, decodificação, transmissão, recepção e modulação e feedback podem formar um circuito fechado seguro.

1.3 Dor crônica como motivação clínica e científica

De acordo com a OMS a dor crônica, como condição clinica independente, hoje afeta 30% das pessoas no mundo. Essa condição tem impacto sobre mobilidade, sono, autonomia, trabalho e vida social (Treede et al., 2015; Nicholas et al., 2019). Estudos de fMRI nesta área ja identificaram assinaturas multivariadas relacionadas a nociceção e a componentes não nociceptivos, enquanto registros intracranianos prolongados permitiram estimar variações espontâneas da dor crônica em ambiente cotidiano (Wager et al., 2013; Woo et al., 2017; Shirvalkar et al., 2023). Na fibromialgia, alterações na conectividade funcional e respostas neurais amplificadas aos estímulos demonstram que a condição envolve a reorganização de redes distribuídas, e não a disfunção isolada de um único centro cerebral (Cook et al., 2004; Napadow et al., 2010; Cifre et al., 2012). A MindNet parte desses avanços para investigar a representação, a comparação e a modulação adaptativa de estados neurais associados à dor, com o objetivo de estabelecer uma via alternativa para seu controle e tratamento.

1.4 Da neurociencia as telecomunicações neurodigitais

O candidato mais evidente para auxiliar na infraestrutura física distribuída da MindNet são as estações rádio-base das redes celulares. As redes 4G e 5G já constituem uma extensa infraestrutura urbana de transmissão e recepção, formada por antenas, amplificadores de RF, processamento digital de sinais, sistemas de sincronização e computação de rede. No 5G, tecnologias como Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) e beamforming acrescentam capacidade de controle espacial da transmissão, utilizando múltiplos elementos de antena coordenados para formar e direcionar feixes de radiofrequência dinamicamente.

Já existe, portanto, nas cidades contemporâneas, uma infraestrutura capaz de gerar, modular, transmitir, receber e processar sinais de RF em diferentes faixas de frequência. Ondas em dezenas ou centenas de MHz e em frequências mais elevadas pertencem ao mesmo domínio físico da engenharia de radiofrequência utilizado em diferentes aplicações de telecomunicações e ressonância magnética, cada uma com suas especificidades.

Do ponto de vista arquitetural, a infraestrutura celular 5G/6G e os sistemas de radiofrequência definidos por software representam um importante precedente tecnológico para a MindNet. A tecnologia existente demonstra que uma cidade já dispõe de parte substancial de um “esqueleto de RF” capaz de gerar, controlar, direcionar, receber e transportar sinais eletromagnéticos de maneira distribuída. Essas capacidades não constituem, isoladamente, um sistema de neuroimagem, mas fornecem recursos de engenharia que podem ser incorporados e adaptados à camada física da MindNet.

A dificuldade central da aquisição neural remota, entretanto, não está apenas na produção ou transmissão da radiofrequência. O desafio fundamental está na detecção de uma resposta proveniente do cérebro que seja suficientemente específica e apresente relação sinal-ruído adequada para permitir sua identificação, processamento e reconstrução computacional. Nos sistemas convencionais de MRI, as bobinas receptoras são posicionadas próximas ao corpo justamente porque sua geometria e proximidade influenciam diretamente a sensibilidade e a relação sinal-ruído do sinal adquirido.

A MindNet propõe solucionar essa questão por meio de uma arquitetura diferente da MRI convencional. Em vez de depender de um scanner e de uma bobina receptora posicionada imediatamente ao redor da cabeça, o sistema combina uma infraestrutura distribuída de RF com processamento computacional e MindNet AI para detecção e identificação do sinal, redução de ruído, correção de interferências e reconstrução de representações neurodigitais. Nesse modelo, a inteligência artificial tem como função ampliar a capacidade computacional de separar, identificar e processar informações presentes nos sinais detectados, contribuindo para aumentar a sensibilidade e a seletividade do processamento.

A proposta encontra precedentes tecnológicos relevantes em low-field MRI, ultra-low-field MRI, magnetômetro atômicos, remote NMR detection, wireless RF coils e sistemas de acoplamento indutivo. Esses desenvolvimentos demonstram que determinados elementos da arquitetura física da ressonância magnética podem ser reorganizados em configurações diferentes daquela encontrada em um scanner clínico convencional. A

infraestrutura urbana de telecomunicações pode fornecer à MindNet uma camada distribuída de RF, enquanto a arquitetura MindNet acrescenta a camada específica de aquisição neurodigital, incluindo controle de parâmetros físicos, detecção, redução de ruído, processamento computacional e extração da informação relevante. O objetivo é integrar princípios e tecnologias já empregados separadamente em telecomunicações, ressonância magnética e processamento computacional para desenvolver um sistema específico de aquisição neural remota.

A HP-^{13}C MRI acrescenta a essa arquitetura uma dimensão metabólica. A hiperpolarização aumenta substancialmente a magnetização detectável dos núcleos de ^{13}C, permitindo acompanhar dinamicamente o metabolismo de substratos marcados, como [1-^{13}C]piruvato, e seus produtos metabólicos.

Um exemplo importante utiliza piruvato marcado com carbono-13 e hiperpolarizado. Depois de administrado, esse substrato participa de processos metabólicos e permite acompanhar produtos como lactato e bicarbonato marcado. Park et al. demonstraram a aplicação de HP-^{13}C MRI cerebral em pacientes utilizando [1-^{13}C]piruvato. Os dados dinâmicos permitiram observar a chegada do piruvato e sinais correspondentes aos seus produtos metabólicos, incluindo lactato e bicarbonato. O estudo demonstrou a viabilidade da utilização dessa abordagem para avaliação dinâmica do metabolismo no cérebro humano.

Isso oferece à MindNet duas classes complementares de informação fisiológica: uma dimensão funcional e hemodinâmica proveniente da rt-fMRI e uma dimensão metabólica proveniente da HP-^{13}C MRI. A integração dessas modalidades permite estruturar uma representação multimodal do estado cerebral, combinando informações associadas à atividade funcional com informações relativas ao metabolismo cerebral.

A possibilidade de ampliar a distância de detecção por meio dessa combinação constitui uma questão central de engenharia da MindNet. A hiperpolarização aumenta substancialmente a magnetização e, consequentemente, a detectabilidade do ^{13}C. Esse ganho de sensibilidade constitui uma característica relevante para investigar estratégias de aquisição a distâncias superiores às utilizadas em configurações convencionais. Assim, a hiperpolarização fornece ganho de detectabilidade e aquisição de longa distância.

Nesse sentido, a MindNet estabelece uma ponte tecnológica entre infraestruturas que atualmente existem de forma independente: de um lado, redes urbanas capazes de produzir, controlar, direcionar, receber e transportar sinais de RF; de outro, técnicas de ressonância magnética capazes de extrair informações funcionais e metabólicas do organismo. A lacuna tecnológica encontra-se na conexão entre esses dois domínios: estabelecer uma cadeia de aquisição remota com sensibilidade, seletividade e relação sinal-ruído suficientes para detectar informação cerebral útil sem reproduzir a configuração física de um scanner convencional. A MindNet concentra-se precisamente nessa integração, combinando infraestrutura distribuída de RF, métodos de aquisição por ressonância magnética, hiperpolarização, processamento computacional e inteligência artificial em uma arquitetura destinada à aquisição neurodigital remota.

1.5 Objetivo e escopo do estudo

O objetivo é definir a MindNet como uma arquitetura de telecomunicações neurodigitais e estabelecer uma agenda estruturada de validação técnica, a ser implementada assim que a autora obtiver a restitutio in integrum financeira necessária para viabilizar o desenvolvimento da sua tecnologia[2]. Sobre a Mindnet, parte-se da premissa de sua aplicação terapêutica na modulação de estados neurais entre dois indivíduos, com o objetivo de alterar a percepção e a sensação de dor crônica no receptor. A arquitetura não parte de tecnologias inteiramente novas, mas da integração de fenômenos, métodos e sistemas que já foram demonstrados mente de forma independente. A literatura científica fornece precedentes para aquisição de atividade cerebral, processamento de neuroimagem em tempo real, decodificação computacional de estados neurais, alinhamento de representações entre indivíduos, transmissão digital de informação derivada do cérebro, interfaces cérebro–cérebro e produção de uma resposta mensurável no receptor. A MindNet organiza esses componentes em uma única cadeia de telecomunicações neurodigitais e acrescenta mecanismos próprios de aquisição remota, integração multimodal e circuito fechado.

O percurso começa pela aquisição. A fMRI constitui uma tecnologia consolidada para registrar indiretamente alterações da atividade cerebral por meio do sinal BOLD. Os trabalhos fundamentais de Ogawa et al. e Kwong et al. estabeleceram a base da BOLD-fMRI, enquanto Logothetis et al. investigaram sua relação com a atividade neural. Esses estudos permitem estabelecer a primeira relação necessária à arquitetura: alterações da atividade neural podem produzir alterações fisiológicas mensuráveis por ressonância magnética. A MindNet utiliza essa informação funcional como uma das fontes para construir a representação do estado cerebral.

A aquisição pode ser processada em tempo real. MacInnes et al. desenvolveram o Pyneal especificamente para processamento de rt-fMRI, demonstrando uma arquitetura modular capaz de receber dados provenientes do sistema de MRI, processá-los durante a aquisição e disponibilizar resultados para outros componentes computacionais. O Pyneal também emprega comunicação em rede entre seus componentes. Assim, a passagem de neuroimagem adquirida para informação computacional utilizável em tempo real já possui implementação independente.

A HP-^{13}C MRI acrescenta uma segunda dimensão. Park et al. demonstraram em cérebro humano a utilização de [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado e a aquisição dinâmica de informações relacionadas ao piruvato e a seus produtos metabólicos, incluindo lactato e bicarbonato. A hiperpolarização aumenta fortemente a magnetização detectável do ^{13}C, permitindo acompanhar processos metabólicos que seriam muito mais difíceis de observar pela ressonância convencional. Dessa forma, a MindNet pode estruturar sua aquisição multimodal a partir de duas classes diferentes de informação: rt-fMRI para características funcionais e hemodinâmicas e HP-^{13}C MRI para características metabólicas.

A literatura também demonstra que a organização física de um experimento de NMR não precisa ficar restrita à configuração de um scanner clínico convencional. Estudos de

[2] Item 16

remote NMR detection separaram espacialmente etapas de polarização, codificação e detecção. Ledbetter et al., por exemplo, demonstraram remote detection de NMR utilizando um magnetômetro atômico microfabricado, enquanto Verpillat et al. realizaram detecção com sensor magnetorresistivo. Esses experimentos são particularmente relevantes como precedente físico porque demonstram que componentes de NMR podem ser reorganizados espacialmente e que diferentes tecnologias podem ser empregadas para detecção. Eles não demonstram ainda aquisição cerebral humana através de uma cidade; essa extensão de distância, sem transporte físico da amostra magnetizada, constitui justamente uma das etapas específicas a serem validadas pela MindNet.

Depois da aquisição ocorre a transformação do sinal cerebral em uma representação computacional. Esse passo também encontra forte precedente . Tang et al. demonstraram que registros não invasivos de fMRI podem ser utilizados por modelos computacionais para reconstruir informação semântica contínua a partir de representações corticais. O resultado é particularmente relevante porque mostra que padrões distribuídos de fMRI podem ser convertidos em uma representação computacional contendo informação discriminável sobre estados cerebrais, embora o desempenho seja dependente do indivíduo e do treinamento do modelo.

Dois cérebros não apresentam exatamente a mesma organização funcional espacial. Os trabalhos de Haxby e colaboradores sobre hyperalignment estabeleceram uma solução computacional para esse problema ao demonstrar que padrões funcionais individuais podem ser transformados para um espaço representacional compartilhado de alta dimensionalidade. Em vez de exigir que um voxel do sender corresponda fisicamente ao mesmo voxel do receiver, a comparação pode ocorrer entre representações funcionalmente alinhadas. Na MindNet, esse princípio fornece uma base para converter as representações individuais do sender e do receiver em um espaço no qual sua similaridade e convergência possam ser calculadas.

Uma vez convertida em informação digital, a representação neural pode utilizar sistemas convencionais de telecomunicações TCP-IP para atravessar a distância entre os indivíduos. A distância física deixa, nessa etapa, de depender da propagação do sinal de MRI entre os dois cérebros: o que atravessa a rede é uma representação digital do estado adquirido. A própria literatura de interfaces cérebro–cérebro já demonstrou que sinais derivados da atividade cerebral podem ser processados, codificados e enviados através de redes digitais para outro local.

Pais-Vieira et al. demonstraram em 2013 uma interface cérebro–cérebro em tempo real na qual informação sensorimotora obtida de um animal encoder era processada e utilizada para influenciar um segundo animal decoder. O estudo demonstrou transferência de informação comportamentalmente relevante entre dois cérebros e constitui um dos precedentes experimentais mais importantes para a ideia de uma cadeia encoder → transmissão → decoder.

Essa demonstração foi posteriormente estendida para seres humanos. Grau et al. realizaram comunicação cérebro–cérebro não invasiva entre pessoas geograficamente separadas, combinando aquisição cerebral, codificação binária, transmissão pela Internet e estimulação do receptor. O estudo é especialmente relevante para a MindNet porque

demonstra que a distância geográfica pode ser atravessada pela camada digital da comunicação, em vez de exigir que o sinal cerebral físico original percorra toda essa distância.

Rao et al. também demonstraram uma interface cérebro–cérebro humana não invasiva. A atividade cerebral do sender foi adquirida e interpretada por uma interface cérebro–computador, transmitida por uma rede e utilizada para produzir uma resposta no sistema motor do receiver por meio de estimulação magnética transcraniana. Os autores caracterizaram o resultado como uma forma rudimentar de transmissão direta de informação entre cérebros. A importância desse experimento para a MindNet está na demonstração completa da sequência aquisição → interpretação → transmissão digital → interface receptora → resposta neural/comportamental.

Stocco et al. avançaram esse princípio utilizando uma interface cérebro–cérebro em uma tarefa colaborativa de perguntas e respostas. Cinco pares de participantes utilizaram a interface para identificar um objeto por respostas verdadeiras ou falsas, e o estudo incluiu uma condição sham. O desempenho foi significativamente superior ao controle. Esse resultado é particularmente importante para a agenda da MindNet porque demonstra não apenas comunicação entre dois indivíduos, mas também uma metodologia em que o efeito da interface pode ser comparado a uma condição simulada.

Jiang et al. ampliaram posteriormente o conceito com o BrainNet, uma interface cérebro–cérebro envolvendo várias pessoas realizando conjuntamente uma tarefa. O sistema integrou aquisição, processamento, transmissão e recepção de informação neural, mostrando que uma arquitetura de comunicação cerebral pode funcionar como uma rede e não apenas como uma conexão isolada entre dois indivíduos.

Esses experimentos também esclarecem a etapa final da MindNet: receber dados digitais em um computador não equivale a fazer com que o cérebro do receptor receba aquela informação. É necessária uma etapa de transdução entre a representação digital e o sistema nervoso. Nos experimentos humanos de Rao, Grau, Stocco e Jiang, essa função foi realizada por interfaces de estimulação, principalmente TMS, demonstrando mente que uma representação derivada do sender pode determinar uma intervenção aplicada ao receiver e produzir uma resposta observável.

É nessa etapa que a MindNet apresenta uma diferença arquitetural importante. O objetivo não é simplesmente reproduzir EEG → Internet → TMS, mas integrar aquisição por RF-ressonância magnética, caracterização funcional e metabólica, processamento por inteligência artificial, representação neurodigital, telecomunicações e uma camada de interação com o receptor. Os trabalhos anteriores demonstram que interfaces físicas podem fechar a cadeia cérebro–computador–cérebro.

Finalmente, a MindNet transforma essa sequência em circuito fechado. Após a interação com o receiver, sua atividade cerebral é novamente adquirida, processada e convertida em uma representação \(Z_R\), que pode ser comparada à representação \(Z_S\) do sender. O receiver deixa, portanto, de constituir apenas o destino final da informação: sua resposta retorna ao sistema e passa a determinar a próxima operação. Os trabalhos de rt-fMRI e neurofeedback fornecem precedentes para aquisição e processamento cerebral

em tempo real, enquanto os experimentos cérebro–cérebro demonstram que informação neural pode atravessar uma cadeia digital e produzir respostas mensuráveis em outro indivíduo. A MindNet reúne essas duas linhas em um ciclo sender → aquisição → representação → transmissão → receiver → nova aquisição → comparação → feedback.

A aplicação terapêutica proposta concentra esse circuito na vitima de dor crônica. A premissa é que um estado neural do sender possa ser adquirido e representado pelo sistema e utilizado como referência para promover e medir a modulação do estado neural do receiver, buscando modificar sua experiência dolorosa. A literatura citada estabelece precedentes experimentais para diversos componentes necessários a essa cadeia, mas a eficácia analgésica da integração MindNet se constitui em uma inovação disruptiva.

Assim, a contribuição da MindNet está em reunir todas essas funcionalidades em uma arquitetura de telecomunicações neurodigitais de circuito fechado. BOLD-fMRI demonstra aquisição funcional; HP-^{13}C MRI acrescenta caracterização metabólica; Pyneal demonstra processamento de fMRI em tempo real; neural decoding demonstra transformação de padrões cerebrais em representações computacionais; hyperalignment oferece um mecanismo para comparação entre indivíduos; remote NMR demonstra que funções de NMR podem ser espacialmente desacopladas; as interfaces de Pais-Vieira, Grau, Rao, Stocco e Jiang demonstram diferentes formas de aquisição, transmissão digital e recepção de informação derivada do cérebro. A etapa seguinte é determinar mente o desempenho da integração específica realizada pela MindNet e, finalmente, estabelecer sua segurança e seu benefício clínico na modulação da dor crônica.

2 Segurança, ética e proteção dos participantes

2.1 **“…to do good or to do no harm.”** - Hippocrates[3]

A segurança durante a utilização da tecnologia MindNet deverá ser analisada no contexto tecnológico em que sua arquitetura está inserida. As sociedades contemporâneas já operam continuamente sobre infraestruturas elétricas, magnéticas, digitais e de radiofrequência utilizadas por redes de energia, rádio, televisão, telefonia móvel, Wi-Fi e demais sistemas de telecomunicações. A MindNet não introduz, portanto, a radiofrequência ou as telecomunicações como fenômenos físicos inéditos no ambiente humano, mas integra tecnologias de aquisição, processamento, transmissão e interação em uma arquitetura de telecomunicações neurodigitais. A existência prévia dessas infraestruturas e de seus respectivos padrões de exposição constitui importante precedente técnico e regulatório para a definição quantitativa dos parâmetros de segurança operacional da MindNet.

Portanto, a implementação humana da MindNet deverá ser orientada pelos princípios de safety-by-design e risk minimization, com definição prévia de limites de exposição e das demais variáveis físicas pertinentes à configuração utilizada. O sistema deverá incorporar mecanismos independentes de interrupção e a segurança deverá ser determinada pela exposição incremental atribuível à MindNet e pelas características específicas de sua utilização, e não pela simples presença de infraestrutura eletromagnética no ambiente.

[3] https://www.health.harvard.edu/blog/first-do-no-harm-201510138421

Sob o ponto de vista jurídico e bioético, a participação inicial deverá ser estritamente voluntária e condicionada aos critérios de elegibilidade definidos no protocolo, à avaliação médica e neurológica, aos exames de imagem pertinentes e à obtenção de consentimento informado juridicamente válido. A mera presença de um indivíduo dentro da área física de cobertura de uma infraestrutura de telecomunicações não constitui consentimento, autorização ou renúncia a qualquer direito. Conectividade técnica não equivale a autorização para interação neural. A ativação individual da tecnologia deverá depender de manifestação afirmativa de vontade, autenticação, autorização e consentimento específicos, preservando-se permanentemente o direito de recusa, retirada e desconexão.

Em investigações envolvendo seres humanos, o protocolo deverá observar as normas aplicáveis à proteção dos participantes e ser submetido à revisão ética e regulatória correspondente antes de sua implementação. A validação técnica deverá incluir triagem formal, avaliação médica e neurológica padronizada, exames de imagem quando pertinentes, avaliação de engenharia e segurança do sistema, consentimento informado e registro sistemático de eventos adversos, incidentes e quase falhas. Quando houver utilização de sistemas de MRI, deverão ser observadas as boas práticas e os requisitos técnicos aplicáveis à configuração empregada.

Dessa maneira, a segurança da MindNet repousa sobre quatro elementos cumulativos: tecnologias físicas que possuem precedentes de utilização humana e parâmetros de segurança conhecidos para determinadas condições de uso; controle quantitativo da exposição incremental produzida pela configuração específica da MindNet; supervisão médica, científica, ética, técnica e regulatória durante sua validação; e autonomia individual protegida por **informed consent, opt-in, right to withdraw** e direito de desconexão.

3 MindNet conceito e arquitetura geral

3.1 Definição da MindNet

Na arquitetura MindNet, sender e receiver participam continuamente do mesmo circuito de transdução. No sender, a atividade neuronal produz alterações eletrofisiológicas, metabólicas e hemodinâmicas que podem ser caracterizadas por diferentes modalidades de aquisição e neuroimagem, incluindo rt-fMRI e HP-^{13}C MRI. Durante a aquisição por MRI, pulsos de radiofrequência interagem fisicamente com os núcleos presentes no tecido cerebral, enquanto a magnetização nuclear resultante produz sinais de ressonância detectáveis pelo sistema. Esses sinais são adquiridos, reconstruídos e processados computacionalmente para derivar uma representação digital do estado neural.

A MindNet propõe estender essa relação em uma arquitetura bidirecional: a representação neural proveniente do sender é convertida em parâmetros físicos de uma interface de RF destinada a interagir com o cérebro do receiver, enquanto a resposta neural, metabólica e hemodinâmica resultante é simultânea ou imediatamente readquirida pelo sistema. Dessa forma, a interação com o receiver e a aquisição de sua resposta integram o mesmo ciclo operacional. A nova informação obtida é processada e comparada à representação proveniente do sender, produzindo uma medida de resposta, similaridade ou convergência que retorna ao sistema e orienta o ciclo subsequente. Assim, recepção, transdução, aquisição, comparação e feedback constituem um processo contínuo de circuito fechado,

com o objetivo terapêutico de promover neuromodulação capaz de interferir nos circuitos neurais associados à manutenção da dor no receiver e, nesse contexto, interromper ou reduzir progressivamente o ciclo de dor crônica do outro participante da comunicação.

A MindNet compreende ainda diversos outros componentes, mecanismos, etapas e possibilidades de aplicação que não puderam ser explorados neste artigo sem torná-lo excessivamente extenso. Em trabalhos futuros, cada uma dessas tecnologias e suas respectivas funções dentro da arquitetura serão apresentadas e discutidas detalhada e individualmente.

3.2 Transdução digital–física–biológica

Na arquitetura MindNet, sender e receiver integram um circuito contínuo de transdução neurobiológica, física e digital. No sender, os estados neurais emergem da atividade eletroquímica de populações neuronais — incluindo fluxos iônicos, potenciais de membrana, transmissão sináptica e sinalização dependente de Ca^{2+} — e estão associados a alterações metabólicas e hemodinâmicas mediadas, entre outros mecanismos, pelo acoplamento neurovascular. Essas alterações fornecem variáveis fisiológicas mensuráveis por neuroimagem: a rt-fMRI caracteriza dinamicamente alterações relacionadas ao contraste BOLD, enquanto a HP-^{13}C MRI acrescenta informações sobre determinados processos metabólicos. Durante a aquisição por MRI, campos de radiofrequência interagem com a magnetização nuclear, e o sinal de ressonância resultante é detectado, reconstruído e processado computacionalmente. O Pyneal e os algoritmos da MindNet transformam esses dados em uma representação neurodigital $Z_S(t)$, que pode ser codificada e transmitida por uma infraestrutura de telecomunicações.

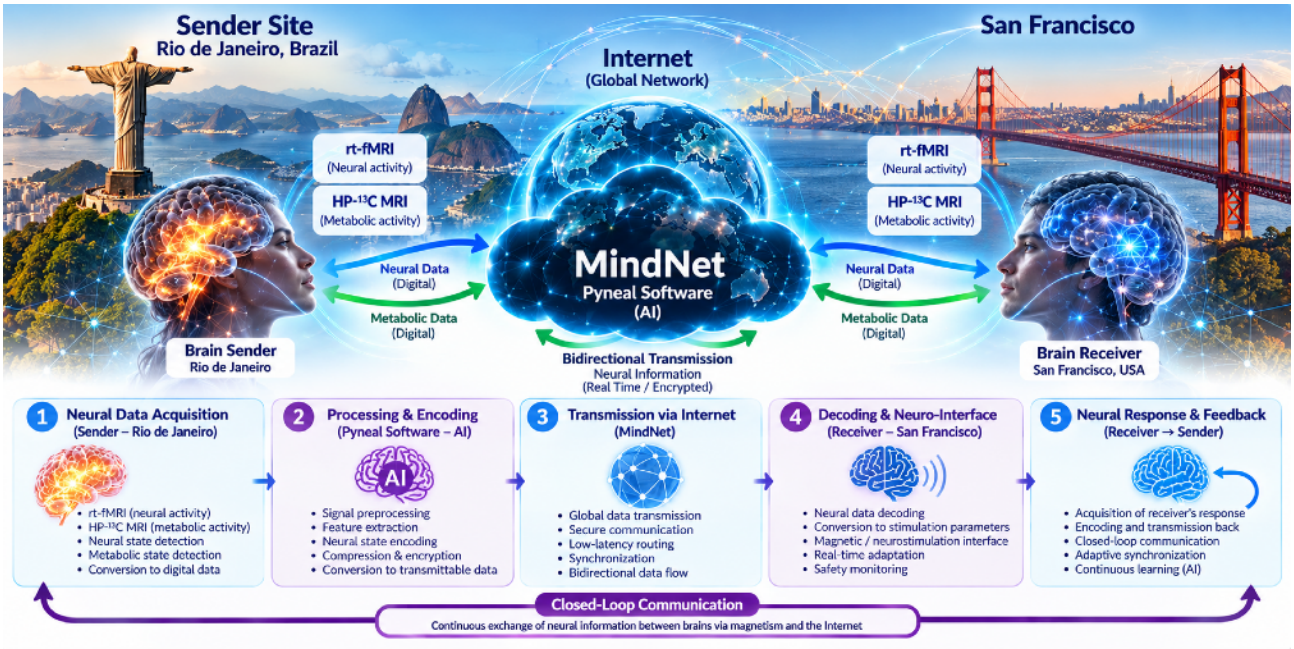
No receiver, a MindNet propõe complementar essa cadeia com uma transdução no sentido digital–físico–biológico. A representação $Z_S(t)$, recebida pela rede, é convertida em parâmetros físicos de uma interface de RF destinada a produzir uma interação neural seletiva, enquanto a resposta eletrofisiológica, metabólica e hemodinâmica resultante é continuamente readquirida e convertida em $Z_R(t)$. A comparação entre $Z_S(t)$ e $Z_R(t)$ fornece um sinal de convergência ou erro que alimenta o ciclo subsequente. Dessa maneira, aquisição, transmissão, transdução, reaquisição, comparação e feedback não constituem eventos isolados, mas componentes temporalmente acoplados de um mesmo circuito fechado. Na aplicação terapêutica proposta, esse circuito tem como objetivo promover neuromodulação no receiver e modificar progressivamente os estados neurais associados à manutenção da dor crônica, permitindo que a resposta produzida seja continuamente mensurada e utilizada para ajustar a interação subsequente.

3.3 Arquitetura múltimodal de circuito fechado

O pulso de radiofrequência utilizado na MRI via RF estabelece uma relação física de transmissão e recepção com o sistema de spins: a RF interage com a magnetização nuclear e, após a excitação, a evolução dessa magnetização gera o sinal de ressonância detectado pelo sistema receptor. Na arquitetura MindNet, essa relação bidirecional entre RF e tecido cerebral é explorada como base física para uma transdução neurodigital de ida e volta. Com o auxílio da rt-fMRI para caracterização funcional, da HP-^{13}C MRI para

caracterização metabólica em tempo real e da inteligência artificial para codificação e decodificação, a informação derivada do estado neural do sender é representada digitalmente, convertida em parâmetros físicos de uma interface de RF e utilizada para produzir uma resposta neural correspondente para o receiver. Simultaneamente, ou imediatamente após essa interação, o novo estado funcional e metabólico do receiver é novamente adquirido e processado, permitindo sua comparação com o estado de referência do sender e fechando o circuito de comunicação e feedback.

3.4 Fluxo geral da informação



A MindNet pode ser compreendida como uma cadeia bidirecional de transdução neurobiológica, física e digital, na qual estados neurais são convertidos em representações neurodigitais transmissíveis e, no sentido inverso, essas representações são convertidas em parâmetros físicos destinados à interação com o sistema neural do receiver, cuja resposta é novamente adquirida e incorporada ao circuito fechado.

Ou, de maneira ainda mais sintética:

Neural → Físico → Digital → Telecomunicações → Digital → Físico → Neural

4 Fundamentos neurocientíficos da MindNet

4.1 O cérebro como sistema de transdução

Em termos de neurociência, a cadeia começa com a atividade eletroquímica neuronal, passa pelo metabolismo cerebral e pelo acoplamento neurovascular, torna-se um sinal físico mensurável por técnicas de neuroimagem e, posteriormente, se torna uma

representação computacional. No receiver, a MindNet propõe percorrer parte dessa cadeia no sentido inverso, estabelecendo uma sequência integrada de transduções.

Transdução é o processo pelo qual uma forma de energia, estímulo, sinal ou informação é convertida em outra forma capaz de ser reconhecida, processada ou transmitida por um sistema biológico ou físico. No sistema nervoso humano, processos de transdução ocorrem continuamente e constituem princípios fundamentais da fisiologia neural.

Quando a luz atinge a retina, por exemplo, os fotorreceptores convertem energia luminosa em alterações eletroquímicas. Quando a pele sofre pressão, mecanorreceptores convertem toque mecânico em sinais elétricos. Quando um neurotransmissor se liga a determinados receptores neuronais, um evento químico altera a condutância iônica da membrana e, consequentemente, a atividade elétrica da célula. O cérebro pode, portanto, ser compreendido como um complexo sistema biológico de transdução, no qual fenômenos químicos, elétricos, metabólicos, hemodinâmicos e físicos permanecem interligados.

Na arquitetura MindNet, sender e receiver participam continuamente de uma cadeia de transdução que acrescenta a esses processos biológicos etapas de aquisição por neuroimagem, processamento computacional e telecomunicações. No sender, a informação parte de um estado fisiológico cerebral, é convertida em sinais mensuráveis, processada e codificada como uma representação neurodigital e transmitida pela infraestrutura de telecomunicações. No receiver, a MindNet propõe realizar o percurso complementar, convertendo a representação neurodigital recebida em parâmetros de uma interface destinada à interação com o sistema neural. A resposta cerebral resultante é continuamente readquirida, processada e comparada ao estado de referência, fechando o circuito por meio de feedback.

Essa organização pode ser sintetizada como uma cadeia contínua:

Neural → fisiológico/metabólico → magnético → digital → telecomunicações → digital → magnético → neural → nova aquisição → feedback

Rao et al. demonstraram uma interface cérebro–cérebro humana não invasiva na qual informação cerebral de um sender foi adquirida por EEG, processada e transmitida pela Internet, sendo posteriormente utilizada para produzir uma resposta motora no receiver por estimulação magnética transcraniana (TMS). Esse experimento estabeleceu uma cadeia funcional de aquisição cerebral, processamento, telecomunicação, transdução física e resposta do receptor.

Stocco et al. avançaram esse princípio ao demonstrar comunicação cérebro–cérebro interativa em uma tarefa de perguntas e respostas. A informação proveniente de um participante era adquirida, transmitida e convertida em estimulação no outro participante, permitindo que respostas cerebrais influenciassem a interação subsequente. O estudo também empregou condição sham, permitindo distinguir o desempenho associado à interface daquele observado na condição de controle.

Jiang et al., por meio do BrainNet, ampliaram essa organização para uma rede envolvendo múltiplos participantes. O sistema combinou registro cerebral, transmissão

digital e estimulação do receiver, permitindo que informações provenientes de diferentes cérebros fossem utilizadas em uma tarefa colaborativa. Esses experimentos fornecem precedentes para o princípio mais geral de uma cadeia cérebro → aquisição → processamento → telecomunicação → processamento → nova aquisição → cérebro.

A MindNet estende essa organização ao propor uma cadeia multimodal e continuamente fechada, incorporando rt-fMRI para caracterização funcional, HP-^{13}C MRI para caracterização metabólica, inteligência artificial para processamento, codificação e decodificação, telecomunicações para transmissão da representação neurodigital e uma interface física de RF para a etapa digital–físico–biológica no receiver. A resposta produzida no receiver retorna imediatamente ao sistema por nova aquisição e processamento, transformando a comunicação em um circuito contínuo de transdução, readquisição, comparação e feedback. Na aplicação terapêutica proposta, esse circuito é direcionado à neuromodulação dos estados neurais associados à manutenção da dor crônica no receiver.

4.2 Nosso primeiro estado neural: a dor no sender

Suponhamos que o sender esteja experimentando dor. A dor não corresponde a uma única onda, molécula ou região cerebral. Trata-se de uma experiência multidimensional resultante da atividade coordenada de múltiplos componentes do sistema nervoso, incluindo mecanismos nociceptivos periféricos, medula espinal, tálamo e diferentes regiões corticais e subcorticais envolvidas nas dimensões sensorial-discriminativa, afetiva, cognitiva e autonômica da experiência dolorosa.

No cérebro, esse estado corresponde a padrões distribuídos e dinamicamente organizados de atividade neuronal e glial. Em vez de existir um único “sinal da dor”, diferentes populações celulares e circuitos participam da construção e manutenção do estado neural associado à experiência dolorosa.

No nível neuronal, existe uma distribuição desigual de íons entre os meios intracelular e extracelular. Sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e cloreto (Cl^-) atravessam seletivamente a membrana celular por diferentes canais, bombas e transportadores, contribuindo para o estabelecimento e a modificação do potencial de membrana.

Quando estímulos excitatórios produzem despolarização suficiente para atingir o limiar, canais de Na^+ dependentes de voltagem abrem-se rapidamente. A entrada de Na^+ modifica o potencial elétrico da membrana e produz a fase ascendente do potencial de ação. Em seguida, a inativação dos canais de Na^+ e a abertura de canais de K^+ favorecem a saída de K^+, promovendo a repolarização da membrana. A transmissão dessa atividade ao longo dos circuitos neurais envolve ainda liberação de neurotransmissores, entrada de Ca^{2+} nos terminais pré-sinápticos e geração de respostas pós-sinápticas.

O estado neural relacionado à dor encontra-se, portanto, associado a padrões espacial e temporalmente organizados de atividade eletroquímica distribuídos entre populações neuronais e suas redes. A manutenção desses processos exige energia para preservar e restaurar os gradientes iônicos, sustentar a transmissão sináptica e manter a homeostase celular.

A relação entre potenciais de ação, atividade sináptica e consumo energético cerebral foi quantitativamente analisada por Attwell e Laughlin. Os autores estimaram o orçamento energético da sinalização na matéria cinzenta cerebral e mostraram que uma parcela substancial da energia é destinada à sinalização neuronal, incluindo potenciais de ação e processos pós-sinápticos relacionados ao glutamato. Esse princípio estabelece uma ligação particularmente importante para a arquitetura MindNet:

estado neural → atividade eletroquímica → demanda energética → metabolismo cerebral → alterações hemodinâmicas/metabólicas mensuráveis

É justamente nessa transição que o estado eletroquímico distribuído passa a produzir consequências fisiológicas que podem contribuir para sua caracterização por modalidades como rt-fMRI e, em outra dimensão, HP-^{13}C MRI. A neuroimagem não mede diretamente cada potencial de ação individual; ela permite acessar consequências fisiológicas agregadas relacionadas à atividade dessas populações celulares.

4.3 Da eletricidade para a química — e novamente para a eletricidade

Quando um potencial de ação alcança o terminal pré-sináptico de um neurônio, ocorre outra etapa fundamental de transdução. A despolarização da membrana abre canais de Ca^{2+} dependentes de voltagem, permitindo a entrada de cálcio no terminal pré-sináptico. O aumento da concentração intracelular de Ca^{2+} participa do mecanismo molecular que desencadeia a fusão das vesículas sinápticas com a membrana pré-sináptica e a consequente liberação de neurotransmissores na fenda sináptica.

Dependendo do circuito envolvido, essa comunicação pode utilizar glutamato, GABA, dopamina, noradrenalina, serotonina, acetilcolina, neuropeptídeos e diversas outras moléculas sinalizadoras. Após sua liberação, os neurotransmissores ligam-se a receptores presentes na célula pós-sináptica e modificam sua atividade.

Nos receptores ionotrópicos, a ligação do neurotransmissor controla diretamente a abertura ou o fechamento de canais iônicos, modificando a condutância da membrana e seu potencial elétrico. Nos receptores metabotrópicos, a ligação ativa mecanismos intracelulares que podem envolver proteínas G, segundos mensageiros e cascatas bioquímicas capazes de modular canais iônicos, enzimas, metabolismo celular e outras funções neuronais.

A informação percorre, portanto, sucessivas transformações:

atividade elétrica → entrada de Ca^{2+} → liberação química → receptor pós-sináptico → alteração iônica/bioquímica → nova atividade elétrica

Essa conversão entre fenômenos elétricos, iônicos e químicos constitui uma das formas fundamentais de transdução no sistema nervoso.

A importância energética desse processo também é consistente com a análise de Attwell e Laughlin, que construíram um orçamento energético da sinalização neural na substância cinzenta e atribuíram uma parcela substancial do consumo energético à sinalização

neuronal, incluindo potenciais de ação e processos pós-sinápticos associados ao glutamato.

A atividade eletroquímica e sináptica exige energia, e essa demanda metabólica se relaciona ao metabolismo cerebral e ao acoplamento neurovascular, criando a ponte fisiológica entre a atividade neuronal e variáveis que podem ser observadas por BOLD-fMRI e, por mecanismos distintos, por HP-^{13}C MRI

4.4 Metabolismo cerebral e demanda energética

A atividade cerebral requer energia. A transmissão sináptica, a restauração dos gradientes iônicos, o transporte celular, a reciclagem de neurotransmissores e inúmeros outros processos necessários à sinalização neural aumentam a demanda metabólica das regiões funcionalmente ativas.

A relação entre sinalização neuronal e consumo energético foi quantitativamente analisada por Attwell e Laughlin, que construíram um orçamento energético para a sinalização na substância cinzenta cerebral. O estudo mostrou que potenciais de ação e, particularmente, processos relacionados à transmissão sináptica e às correntes pós-sinápticas representam componentes importantes desse consumo energético.

Essa atividade não envolve somente neurônios, mas também astrócitos, células endoteliais, pericitos e outros componentes da unidade neurovascular. Glutamato, Ca^{2+}, ATP, adenosina, óxido nítrico e diferentes mediadores vasoativos participam de uma complexa comunicação entre atividade neuronal, metabolismo celular e circulação cerebral.

A participação dos pericitos nesse processo possui suporte particularmente relevante. Hall et al. demonstraram que a atividade neuronal e a sinalização glutamatérgica estão associadas a mecanismos capazes de promover dilatação capilar por meio do relaxamento de pericitos, fornecendo evidências de sua participação na regulação local do fluxo sanguíneo cerebral e nos mecanismos relacionados aos sinais utilizados pela neuroimagem funcional.

Quando a atividade de determinada região cerebral aumenta, o acoplamento neurovascular produz uma resposta vascular local. O fluxo sanguíneo cerebral regional é modificado e nesse contexto, não se trata simplesmente de um “aumento do volume de sangue no cérebro”, mas de alterações regionais do fluxo, do volume e da oxigenação sanguínea associadas à atividade neural.

O aumento regional do fluxo sanguíneo pode superar proporcionalmente o aumento local do consumo de oxigênio, modificando a relação entre oxi-hemoglobina e desoxi-hemoglobina. Essa alteração é particularmente importante para a MRI porque a desoxi-hemoglobina é paramagnética e produz alterações locais de susceptibilidade magnética que influenciam o sinal de ressonância.

É nesse ponto que a cadeia de transdução chega a uma variável física detectável pela fMRI:

atividade eletroquímica → atividade sináptica → demanda energética → metabolismo → acoplamento neurovascular → fluxo/oxigenação sanguínea → HbO/HbR → alteração magnética local → sinal BOLD

Essa relação possui uma extensa base . Em 1992, Kwong et al. demonstraram alterações de sinal por MRI associadas à estimulação sensorial humana e às mudanças fisiológicas locais relacionadas à atividade cerebral. No mesmo período, Ogawa et al. demonstraram alterações de contraste dependentes da oxigenação sanguínea durante estimulação visual humana, estabelecendo bases fundamentais do que posteriormente se consolidou como BOLD-fMRI. Hillman revisou posteriormente os mecanismos celulares, metabólicos e vasculares que conectam atividade neural e resposta hemodinâmica.

Para a construção da MindNet, essa etapa é central: a fMRI não precisa detectar diretamente cada potencial de ação. A atividade neuronal desencadeia uma sucessão de transduções eletroquímicas, metabólicas, vasculares e magnéticas que produz uma assinatura física mensurável. A rt-fMRI permite acompanhar dinamicamente essa assinatura funcional, enquanto a HP-^{13}C MRI pode acrescentar uma dimensão metabólica complementar à caracterização do estado cerebral.

4.5 Como ocorre a leitura do estado neural

A fMRI baseada no contraste BOLD não detecta diretamente cada potencial de ação de cada neurônio. Ela detecta alterações hemodinâmicas relacionadas à oxigenação sanguínea que acompanham, indiretamente, mudanças na atividade neural.

Um dos experimentos fundamentais para estabelecer essa relação foi realizado por Logothetis et al., que registraram simultaneamente sinais neurais intracorticais e respostas BOLD no córtex visual. O estudo comparou potenciais de campo local (LFP), atividade de múltiplas unidades e resposta BOLD, demonstrando uma relação particularmente estreita entre o BOLD e os potenciais de campo local. Esse resultado forneceu uma importante base neurofisiológica para interpretar a fMRI como uma medida indireta da atividade de populações neurais, fortemente relacionada ao processamento sináptico e intracortical.

Hillman descreve essa relação dentro do acoplamento neurovascular: mudanças na atividade neural desencadeiam respostas celulares e vasculares que modificam localmente o fluxo, o volume e a oxigenação sanguínea. Como a desoxi-hemoglobina (HbR) é paramagnética, alterações em sua concentração modificam a susceptibilidade magnética local e, consequentemente, o sinal BOLD.

Portanto, quando a MindNet utiliza rt-fMRI, existe uma cadeia fisiológica intermediária entre a atividade neural e o dado adquirido. A atividade neuronal modifica a demanda energética; neurônios, astrócitos e componentes vasculares participam do acoplamento neurovascular; o fluxo e a oxigenação sanguínea são modificados; altera-se a relação entre HbO_2 e HbR; essas mudanças modificam propriedades magnéticas locais; e a aquisição por fMRI transforma essas variações em dados que podem ser processados computacionalmente.

A sequência pode ser representada de forma direta:

atividade eletroquímica e sináptica → demanda energética → acoplamento neurovascular → CBF/CBV/oxigenação → HbO_2/HbR → susceptibilidade magnética → BOLD → rt-fMRI → dados digitais

A informação originalmente expressa na dinâmica eletroquímica distribuída das redes neurais passa, dessa maneira, a possuir uma representação hemodinâmica mensurável. Essa representação não constitui uma cópia direta dos potenciais de ação: é uma consequência fisiológica espacial e temporalmente relacionada à atividade das populações neurais que a originaram.

Os trabalhos de Ogawa et al., Kwong et al., Logothetis et al., Hall et al. e Hillman formam, em conjunto, uma base particularmente sólida para essa etapa da arquitetura MindNet: Ogawa e Kwong estabeleceram fundamentos experimentais do contraste dependente da oxigenação; Logothetis relacionou mente BOLD e atividade neural; Hall demonstrou mecanismos microvasculares envolvendo pericitos; e Hillman integrou os mecanismos celulares, metabólicos e vasculares do acoplamento neurovascular.

4.6 A contribuição metabólica da MindNet

A HP-^{13}C MRI acrescenta um outro nivel a formação fisiológica da arquitetura MindNet. Enquanto o contraste BOLD da rt-fMRI fornece principalmente informação relacionada às alterações hemodinâmicas e de oxigenação associadas à atividade cerebral, a imagem por carbono-13 hiperpolarizado permite acompanhar determinadas transformações metabólicas com sensibilidade substancialmente aumentada.

Um dos principais exemplos utiliza [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado. O piruvato participa de vias metabólicas cujos produtos marcados podem ser acompanhados dinamicamente. Entre eles encontra-se o [1-^{13}C]lactato, produzido pela troca metabólica catalisada pela lactato desidrogenase (LDH). Também pode ser detectado ^{13}C-bicarbonato, relacionado ao metabolismo oxidativo do piruvato por meio da piruvato desidrogenase (PDH).

Park et al. demonstraram a viabilidade da imagem metabólica cerebral com [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado em seres humanos. A aquisição dinâmica permitiu observar a chegada do piruvato ao cérebro e sinais correspondentes aos seus produtos metabólicos, incluindo lactato e bicarbonato, demonstrando a possibilidade de caracterizar espacial e temporalmente aspectos do metabolismo cerebral por HP-^{13}C MRI.

A MindNet passa, assim, a dispor conceitualmente de duas classes complementares de informação:

rt-fMRI/BOLD → atividade neural → acoplamento neurovascular → CBF/CBV → HbO_2/HbR → sinal BOLD

HP-[1-^{13}C]piruvato → distribuição/metabolismo → lactato + bicarbonato → informação metabólica

A combinação é relevante porque uma modalidade caracteriza predominantemente consequências hemodinâmicas da atividade neural, enquanto a outra acrescenta informação dinâmica sobre metabolismo. Na MindNet, esses dados podem ser integrados

computacionalmente para construir uma representação multimodal do estado fisiológico cerebral.

A HP-^{13}C MRI constitui um canal de caracterização metabólica dentro da arquitetura. Ela não é, atualmente, uma tecnologia estabelecida para transmitir conteúdo neural entre indivíduos. Na MindNet, no entanto, sua função é complementar a caracterização do estado cerebral e também para permitir acompanhar a evolução metabólica ao longo do circuito fechado.

4.7 A interação biofísica entre tecnologia e o cerébro

Aqui passamos da neurofisiologia para a biofísica da ressonância magnética. O cérebro contém grande quantidade de água e, portanto, uma elevada concentração de núcleos de hidrogênio (^1H). Esses núcleos possuem spin e momento magnético. Quando o indivíduo é submetido ao campo magnético estático principal da MRI, denominado B_0, ocorre uma pequena diferença entre as populações dos estados de energia possíveis, produzindo uma magnetização macroscópica resultante orientada predominantemente na direção de B_0.

Ao mesmo tempo, os momentos magnéticos nucleares apresentam movimento de precessão em torno da direção de B_0. A frequência dessa precessão depende da intensidade do campo magnético e da razão giromagnética do núcleo, sendo determinada pela relação de Larmor:

$$f_0 = (\gamma/2\pi)\, B_0$$

Para o hidrogênio, $\gamma/2\pi$ é aproximadamente 42,58 MHz/T. Assim, em um equipamento de 3 T, por exemplo, a frequência de Larmor dos prótons encontra-se próxima de 127,7 MHz.

O sistema de MRI produz então um campo magnético de radiofrequência, denominado B_1^+, aplicado transversalmente a B_0 e com frequência próxima à frequência de ressonância dos núcleos que se deseja excitar. Quando as condições de ressonância são satisfeitas, ocorre transferência de energia do campo de RF para o sistema de spins, modificando a orientação da magnetização macroscópica.

A amplitude e a duração do pulso de RF, juntamente com outros parâmetros da sequência, determinam o ângulo de rotação da magnetização, denominado flip angle. Dessa forma, podem ser produzidos, por exemplo, pulsos correspondentes a 90°, 180° ou outros ângulos empregados nas diferentes sequências de MRI.

Portanto, nessa etapa existe uma transdução física bem estabelecida:

energia eletromagnética de RF → interação ressonante com spins nucleares → alteração da magnetização

Após o término do pulso, essa magnetização evolui e retorna progressivamente ao equilíbrio por processos de relaxação. A magnetização transversal precessante gera fluxo magnético variável e induz tensão elétrica na bobina receptora, permitindo a detecção do sinal MR. A cadeia pode então ser estendida:

RF (B_1^+) → spins → magnetização → precessão/relaxação → sinal MR → recepção (B_1^-) → sinal elétrico → digitalização

Esse aspecto é especialmente importante para a descrição da MindNet porque demonstra que, dentro da MRI, já existe uma cadeia física bidirecional de transmissão e recepção: o equipamento transmite RF para interagir com o sistema de spins e posteriormente recebe o sinal produzido pela evolução dessa magnetização. Isso não significa, por si só, transmissão de informação neural de um cérebro para outro; estabelece, porém, a base física de transdução RF–tecido–sinal sobre a qual a arquitetura MindNet propõe acrescentar aquisição funcional, processamento neurodigital, telecomunicações e circuito fechado.

Os trabalhos clássicos de Ogawa et al. e Kwong et al. demonstraram que essa física da MRI pode ser utilizada para detectar alterações de sinal associadas à ativação cerebral humana, estabelecendo fundamentos experimentais para a fMRI baseada em contraste BOLD.

4.8 Do cérebro do sender para uma representação digital

Aqui passamos da neurofisiologia para a biofísica da ressonância magnética. O cérebro contém grande quantidade de água e, portanto, uma elevada concentração de núcleos de hidrogênio (^1H). Esses núcleos possuem spin e momento magnético. Quando o indivíduo é submetido ao campo magnético estático principal da MRI, denominado B_0, ocorre uma magnetização macroscópica resultante orientada predominantemente na direção de B_0 é produzida.

Além disso, os spins precessionam em torno da direção de B_0. A frequência dessa precessão depende da intensidade do campo magnético e da razão giromagnética do núcleo, sendo determinada pela relação de Larmor:

$$f_0 = (\gamma/2\pi)\, B_0$$

Para o hidrogênio, $\gamma/2\pi$ é aproximadamente 42,58 MHz/T. Assim, em um equipamento de 3 T, por exemplo, a frequência de Larmor dos prótons encontra-se próxima de 127,7 MHz.

O sistema de MRI produz então um campo magnético de radiofrequência, denominado B_1^+, aplicado transversalmente a B_0 e com frequência próxima à frequência de ressonância dos núcleos que se deseja excitar. Quando as condições de ressonância são satisfeitas, ocorre transferência de energia do campo de RF para o sistema de spins, modificando a orientação da magnetização macroscópica.

A amplitude e a duração do pulso de RF, juntamente com outros parâmetros da sequência, determinam o ângulo de rotação da magnetização, denominado flip angle. Dessa forma, podem ser produzidos, por exemplo, pulsos correspondentes a 90°, 180° ou outros ângulos empregados nas diferentes sequências de MRI.

Portanto, nessa etapa existe uma transdução física bem estabelecida:

energia eletromagnética de RF → interação ressonante com spins nucleares → alteração da magnetização

Após o término do pulso, essa magnetização evolui e retorna progressivamente ao equilíbrio por processos de relaxação. A magnetização transversal precessante gera fluxo magnético variável e induz tensão elétrica na bobina receptora, permitindo a detecção do sinal MR.

Esse fator é especialmente importante para a descrição da MindNet porque demonstra que, dentro da MRI, já existe uma cadeia física bidirecional de transmissão e recepção: o equipamento transmite RF para interagir com o sistema de spins e posteriormente recebe o sinal produzido pela evolução dessa magnetização. Isso estabelece, por si só, a base física de transdução RF–tecido–sinal sobre a qual a arquitetura MindNet propõe acrescentar aquisição funcional, processamento neurodigital, telecomunicações e circuito fechado.

Os trabalhos clássicos de Ogawa et al. e Kwong et al. demonstraram que essa física do MRI pode ser utilizada para detectar alterações de sinal associadas à ativação cerebral humana, estabelecendo fundamentos experimentais para a fMRI baseada em contraste BOLD.

4.9 “Mais amor, por favor…” (ditado brasileiro)

A partir desse ponto, os dados provenientes das diferentes modalidades da MindNet podem ser submetidos a processamento computacional. Na rt-fMRI, esse processamento pode incluir correção de movimento, redução de ruído, normalização, extração de características, identificação de padrões espaciais e temporais e neural decoding. Na HP-^{13}C MRI, e possivel processar dados metabólicos, separar sinais de piruvato e seus produtos e extrair características metabólicas. É importante distinguir esses dois pipelines, porque Pyneal foi desenvolvido especificamente para rt-fMRI, e não como software de processamento HP-^{13}C.

Pyneal entra nessa camada como uma infraestrutura aberta para aquisição e processamento de fMRI em tempo real. MacInnes et al. desenvolveram o sistema em Python com arquitetura modular, pipelines de análise personalizáveis e comunicação entre seus componentes computacionais, permitindo que resultados obtidos durante a aquisição sejam disponibilizados em tempo real para aplicações externas, incluindo paradigmas de neurofeedback.

A etapa seguinte consiste em transformar os dados adquiridos em representações computacionais do estado cerebral. Tang et al. forneceram um precedente particularmente importante ao demonstrar um decoder não invasivo capaz de reconstruir linguagem contínua a partir de representações semânticas corticais registradas por fMRI. O resultado demonstra que padrões distribuídos de fMRI podem conter informação suficientemente estruturada para permitir uma reconstrução computacional de conteúdo semântico.

Assim, o estado fisiológico do sender atravessa sucessivamente diferentes domínios:

neural → eletroquímico → sináptico → metabólico/hemodinâmico → magnético → sinal MR → digital → características → representação neurodigital

A partir desse ponto ocorre uma mudança conceitualmente importante: a distância deixa de ser necessariamente tratada como propagação do sinal fisiológico original. Uma vez construída uma representação digital, ela pode ser codificada, packetizada e transportada por redes convencionais baseadas em TCP/IP.

No exemplo citado anteriormente, no qual o Sender sofre de dor cronica, o estado inicial do sender é uma experiência dolorosa. A MindNet busca adquirir características mensuráveis do estado cerebral associado a essa experiência e convertê-las em uma representação neurodigital. Não se trata de afirmar que exista um único “código da dor” a representação pode integrar múltiplas características funcionais e metabólicas distribuídas.

dor no sender → estado neural distribuído → aquisição multimodal → processamento → Z_S(t) → transmissão digital

O cérebro do receiver não recebe literalmente os íons, neurotransmissores, moléculas metabólicas, potenciais de ação ou a experiência privada do cerebro do sender. O que atravessa a rede de telecomunicações é uma representação digital derivada do estado cerebral. A arquitetura MindNet propõe que essa representação seja utilizada pelo sistema do receiver como informação de referência para produzir uma resposta neural subsequente.

Tang et al. fornecem um precedente para uma parte dessa operação ao demonstrarem que ate representações semânticas distribuídas registradas por fMRI podem ser utilizadas computacionalmente para reconstruir linguagem contínua. Haxby et al. acrescentam outro componente fundamental: duas pessoas podem apresentar topografias corticais distintas e, ainda assim, seus padrões serem transformados para um espaço representacional comum no qual informação compartilhada possa ser comparada.

A partir dessa interação, o receiver produz sua própria resposta cerebral. Se essa resposta estiver relacionada, por exemplo, à percepção e à avaliação do sofrimento do outro, poderão ser recrutados circuitos associados ao processamento afetivo, à cognição social e a componentes da empatia. Esse novo estado é biologicamente próprio do receiver e, portanto, não precisa ser idêntico ao estado originalmente adquirido no sender. O receiver nao “sente” dor.

Na arquitetura de circuito fechado da MindNet, porém, a comunicação não termina nesse ponto. O novo estado neural do receiver é novamente adquirido, processado e convertido em uma representação neurodigital. Nesse momento ocorre uma inversão funcional dos papéis: o receiver torna-se sender. A informação que retorna representa um estado neural transformado pela resposta do segundo cérebro — neste exemplo, uma resposta associada à empatia e útil para a modulação da dor do sender.

dor → aquisição → representação → transmissão → receiver → resposta neural → modulação → nova aquisição → nova representação → retorno

Dessa forma, o circuito deixa de ser apenas uma transmissão unidirecional de informação cerebral e passa a constituir uma interação recursiva entre dois sistemas neurais. O primeiro cérebro fornece o estado inicial; o segundo produz sua própria resposta; essa resposta retorna como nova informação ao circuito. No exemplo proposto, aquilo que retorna não é simplesmente a dor originalmente transmitida, mas um estado neural diferente — uma resposta empática. Humana.

5 Aquisição e caracterização dos estados neurais

5.1 Onde a MindNet começou

A radiofrequência já foi amplamente estudada e utilizada para o tratamento da dor. Entretanto, o termo radiofrequência compreende muitas modalidades distintas, com mecanismos, parâmetros de aplicação e objetivos terapêuticos diferentes.

Na radiofrequência contínua ou térmica, por exemplo, a energia de RF é aplicada por meio de um eletrodo posicionado próximo à estrutura neural selecionada, produzindo aquecimento controlado e permitindo a ablação de estruturas envolvidas na transmissão nociceptiva da dor. A utilização da radiofrequência para dor crônica possui extensa literatura clínica, incluindo aplicações em dor de origem facetaria e outras condições musculoesqueléticas, e foi ai que a autora começou sua pesquisa, incentivada pelos seus conhecimentos na área de Telecom.

Outras análises fornecem evidências complementares, por exemplo, em Shi et al. (2016), em uma meta-análise de 12 ensaios clínicos randomizados envolvendo 592 pacientes, avaliaram a eficácia e a segurança da PRF em diferentes condições de dor neuropática e encontraram resultados favoráveis em determinadas indicações, particularmente na neuralgia pós-herpética. Esses resultados reforçam que a exposição controlada à radiofrequência pulsada pode produzir efeitos clinicamente mensuráveis sobre a dor de natureza nociceptiva.

Particularmente relevante para a proposta de uma abordagem não invasiva contra a dor crônica é a radiofrequência pulsada transcutânea (transcutaneous pulsed radiofrequency — TcPRF). Asimakopoulos, Tsaroucha e Rekatsina (2026) realizaram uma revisão sistemática de oito ensaios clínicos randomizados envolvendo condições musculoesqueléticas e neuropáticas de dor crônica. A maioria dos estudos analisados encontrou redução da intensidade da dor, com resultados particularmente consistentes em alguns eventos controlados por sham.

Esses estudos estabelecem um precedente particularmente importante para a arquitetura MindNet. Vanneste et al. (2020), Shi et al. (2016) e os ensaios sintetizados nas respectivas revisões sobre PRF demonstram que a aplicação de radiofrequência a estruturas do sistema nervoso já foi bastante investigada como instrumento de neuromodulação analgésica. Asimakopoulos, Tsaroucha e Rekatsina (2026) acrescentam um elemento especialmente relevante ao demonstrarem que a aplicação transcutânea e não invasiva de PRF também já alcançou avaliação em ensaios clínicos randomizados.

Portanto, a relação:

radiofrequência → interação com o sistema neural → neuromodulação → modificação da nocicepção → alteração da dor

possui precedentes experimentais e clínicos independentes.

Na arquitetura MindNet, esse princípio é ampliado para uma função diferente. A proposta consiste em integrar a aquisição por RF a uma arquitetura neurodigital, na qual informações relacionadas ao estado cerebral do sender são adquiridas, processadas, convertidas em representações computacionais, transmitidas pela infraestrutura de telecomunicações e utilizadas como referência para a interação com o sistema neural do receiver. A resposta resultante é novamente adquirida e processada, permitindo sua comparação com o estado de referência e a continuidade do circuito.

Nesse contexto, a sequência proposta pela MindNet pode ser representada como:

estado neural do sender → aquisição → neural decoding → representação neurodigital → telecomunicação → interface RF → neuromodulação do receiver → nova aquisição → nova representação → comparação → feedback

A possibilidade de utilizar radiofrequência para produzir efeitos neuromodulatórios associados à redução da dor possui lastro, Vanneste et al. (2020) documentam esse precedente em diferentes condições neuropáticas; Shi et al. (2016) apresentam evidências provenientes de ensaios randomizados; e Asimakopoulos, Tsaroucha e Rekatsina (2026) estendem um conjunto enorme de evidências à aplicação transcutânea não invasiva.

Essa literatura converge com outros componentes independentes que fundamentam a arquitetura MindNet. Ogawa et al. (1992), em seus experimentos fundamentais sobre contraste dependente da oxigenação sanguínea, e Kwong et al. (1992), ao demonstrarem alterações funcionais cerebrais humanas detectáveis por MRI, estabeleceram fundamentos experimentais da aquisição funcional baseada no contraste BOLD. Logothetis et al. (2001), por meio de registros simultâneos de atividade neural intracortical e BOLD, forneceram uma base neurofisiológica para relacionar atividades neurais ao sinal medido pela fMRI.

MacInnes et al. (2020), por sua vez, desenvolveram o Pyneal como uma infraestrutura computacional open-source para processamento de fMRI em tempo real, demonstrando a possibilidade de integrar aquisição, processamento e disponibilização dos resultados durante o experimento. Tang et al. (2023) demonstraram que representações semânticas distribuídas registradas por fMRI podem ser utilizadas por um decoder não invasivo para reconstruir linguagem contínua. Haxby et al. (2020) demonstraram, por meio de hyperalignment, que padrões funcionais de indivíduos diferentes podem ser transformados para um espaço compartilhado, preservando informação comum entre os indivíduos.

Além disso, Rao et al. (2014) demonstraram uma interface cérebro-cérebro humana não invasiva na qual informação derivada de EEG foi transmitida pela Internet e utilizada, em conjunto com estimulação magnética transcraniana (TMS), para produzir uma resposta no participante receptor. Grau et al. (2014) demonstraram comunicação cérebro-cérebro não

invasiva entre participantes geograficamente separados, combinando aquisição cerebral, transmissão digital e estimulação no receptor. Stocco et al. (2015) avançaram para uma interação cérebro-cérebro humana em uma tarefa colaborativa, incluindo uma condição sham. Jiang et al. (2019), por sua vez, demonstraram o BrainNet, uma interface cérebro-cérebro que permitiu colaboração entre os participantes. Esses experimentos constituem precedentes independentes para a integração entre aquisição de sinais cerebrais, transmissão digital a distância e interação com outro participante.

É justamente na convergência desses precedentes que se situa a proposta da MindNet. O objetivo que motivou as pesquisas da autora, que se iniciaram em RF, foi investigar uma alternativa não invasiva para a modulação da dor, projetada para minimizar efeitos adversos que evoluiu a partir da integração de tecnologias e princípios que já possuem precedentes independentes em medicina, neurociência, neuroimagem, radiofrequência, processamento computacional e telecomunicações. A experiência prévia da autora na área de telecomunicações contribuiu para ampliar essa investigação, que iniciou-se 6 anos atras quando ela e seu filho saíram com sequelas da sala de parto. A Mindnet, em vez de considerar aquisição cerebral, processamento, transmissão e neuromodulação como itens isolados, os organiza como componentes de uma mesma arquitetura. E ate essa inspiração também veio da área de telecomunicações, cuja arquitetura é, na maioria das vezes, resultante de um conjunto de muitas plataformas, tecnologias e soluções integradas, através de *software*.

Dessa forma, a inovação proposta não reside na afirmação de que cada fenômeno físico ou neurobiológico utilizado pela MindNet seja novo. Ao contrário, sua fundamentação deriva precisamente da existência de precedentes independentes para diferentes componentes. Ogawa et al. (1992), Kwong et al. (1992) e Logothetis et al. (2001) fundamentam a relação entre atividade cerebral e aquisição funcional por MRI; MacInnes et al. (2020) fornece um precedente para processamento de fMRI em tempo real; Haxby et al. (2020) para o alinhamento computacional de representações entre indivíduos; Tang et al. (2023) para neural decoding de informação distribuída registrada por fMRI; Rao et al. (2014), Grau et al. (2014), Stocco et al. (2015) e Jiang et al. (2019) para diferentes formas de comunicação cérebro-cérebro mediada por sistemas digitais; e Vanneste et al. (2020), Shi et al. (2016) e Asimakopoulos, Tsaroucha e Rekatsina (2026) para a utilização da radiofrequência como instrumento de neuromodulação associada à dor.

Uma das novidades da MindNet encontra-se então na integração desses componentes em uma arquitetura destinada a adquirir, representar, transmitir, comparar e modular estados neurais entre indivíduos, tendo a dor crônica como uma de suas principais motivações terapêuticas.

5.2 Infraestrutura urbana de telecomunicações e aquisição remota na MindNet

O candidato mais evidente para auxiliar na infraestrutura física distribuída da MindNet são as estações rádio-base das redes celulares. As redes 4G e 5G já constituem uma extensa infraestrutura urbana de transmissão e recepção, formada por antenas, amplificadores de RF, processamento digital de sinais, sistemas de sincronização, fibra óptica, backhaul e computação de rede. No 5G, tecnologias como Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) e beamforming acrescentam capacidade de controle espacial da transmissão, utilizando múltiplos elementos de antena coordenados para formar e direcionar feixes de

radiofrequência dinamicamente. Khwandah et al. (2021), por exemplo, descrevem o Massive MIMO e o 3D beamforming como tecnologias capazes de utilizar múltiplas antenas para concentrar a radiação na direção dos usuários e melhorar a eficiência espacial e espectral das redes 5G.

Já existe, portanto, nas cidades contemporâneas, uma infraestrutura capaz de gerar, modular, transmitir, receber e processar sinais de RF em diferentes faixas de frequência. Ondas em dezenas ou centenas de MHz e em frequências mais elevadas pertencem ao mesmo domínio físico da engenharia de radiofrequência utilizado em diferentes aplicações de telecomunicações e ressonância magnética, cada uma com suas especificidades. Darnell et al. (2019), por exemplo, demonstraram uma bobina integrada capaz de operar simultaneamente com correntes na frequência de Larmor para MRI e em uma banda de comunicação wireless, estabelecendo um precedente concreto para a coexistência de funções de ressonância magnética e comunicação sem fio em uma arquitetura de RF.

Do ponto de vista arquitetural, a infraestrutura celular 5G/6G e os sistemas de radiofrequência definidos por software representam um importante precedente tecnológico para a MindNet. A tecnologia existente hoje demonstra que uma cidade já dispõe de parte substancial de um “esqueleto de RF” capaz de captar e transportar sinais eletromagnéticos de maneira distribuída. No caso do 5G, Khwandah et al. (2021) mostram que sistemas Massive MIMO permitem coordenar numerosos elementos de antena e controlar espacialmente a transmissão por beamforming.

A dificuldade central da aquisição neural remota, entretanto, não está apenas na produção ou transmissão da radiofrequência. O desafio fundamental está na *detecção de uma resposta proveniente do cérebro que seja suficientemente específica e apresente relação sinal-ruído adequada para permitir sua identificação*, processamento e reconstrução computacional. Nos sistemas convencionais de MRI, as bobinas receptoras são posicionadas próximas ao corpo justamente porque sua geometria e proximidade influenciam diretamente a sensibilidade e a relação sinal-ruído do sinal adquirido.

A MindNet propõe solucionar essa questão por meio de uma arquitetura diferente da MRI convencional. Em vez de depender de um scanner e de uma bobina receptora posicionada imediatamente ao redor da cabeça, o sistema combina uma infraestrutura distribuída de RF, que, aliada a rt-MRI, HP-13C e a MindNet AI, trabalha para detecção e identificação do sinal, redução de ruído, correção de interferências e reconstrução de representações neurodigitais. Nesse modelo, a inteligência artificial tem como função aumentar a capacidade computacional de separar, identificar e processar informações efetivamente presentes nos sinais detectados, contribuindo para maior sensibilidade e seletividade. O software aumenta e refina o resultado que a simple conexão entre as tecnologias nao seria capaz de entregar.

A proposta encontra precedentes tecnológicos relevantes em low-field MRI, ultra-low-field MRI, magnetômetros atômicos, remote NMR detection, wireless RF coils e sistemas de acoplamento indutivo. Savukov e Romalis (2005), por exemplo, demonstraram a detecção de sinais de NMR utilizando um magnetômetro atômico e discutiram sua possível utilização em sistemas multicanais para MRI tridimensional. O *sinal* e o princípio

tecnológico e científico, foram, portanto, demonstrados. Ledbetter et al. (2008), por sua vez, demonstraram remote detection de NMR utilizando um magnetômetro atômico, estabelecendo um precedente para a separação espacial de funções de codificação e detecção de NMR.

Darnell et al. (2019) acrescentaram outro precedente particularmente relevante ao desenvolverem uma bobina RF/wireless integrada capaz de realizar aquisição de imagem MR e comunicação wireless simultaneamente. A mesma arquitetura permitiu a circulação de correntes na frequência de Larmor e em uma banda de comunicação sem fio, mantendo a relação sinal-ruído da bobina. Os autores demonstraram ainda aquisição de imagem e transferência wireless de dados localizado de B_0 em uma configuração integrada.

Esses desenvolvimentos demonstram, portanto, que o princípio científico de reorganização e integração de diferentes componentes de RF, aquisição, codificação e telecomunicação possui precedentes experimentais. A infraestrutura urbana de telecomunicações pode já possuir parte da camada distribuída de RF e de transporte digital, enquanto a MindNet AI poderia acrescentar o software necessário para obter, com maior sensibilidade e seletividade computacional, informações que antes poderiam passar despercebidas, incluindo controle de parâmetros físicos, detecção, redução de ruído e extração da informação relevante.

O objetivo é integrar sistemas já empregados separadamente, uma característica bastante comum em telecomunicações, que frequentemente utiliza plataformas, sistemas e tecnologias diferentes para desenvolver produtos específicos, conectando seus componentes em torno de uma única finalidade operacional. Nesse sentido, a experiência da autora na criação e implementação de produtos de telecomunicações contribuiu para tornar intuitiva a concepção arquitetural da MindNet: diferentes tecnologias não precisam realizar isoladamente toda a função do sistema; podem constituir camadas especializadas de uma mesma rede.

A HP-^{13}C MRI acrescenta uma possibilidade particularmente importante para essa arquitetura devido ao grande aumento de sensibilidade proporcionado pela hiperpolarização para a detecção de núcleos de ^13C. A literatura sobre HP-^{13}C demonstra aumento expressivo da magnetização e da detectabilidade do sinal metabólico. A HP-^{13}C MRI também acrescenta a esse sistema uma dimensão metabólica. Um exemplo importante utiliza [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado, que participa de processos metabólicos e permite acompanhar o lactato e o bicarbonato para recolher informações relevantes.

Resultados independentes de Miloushev et al. (2018) também demonstraram imagem metabólica do cérebro humano utilizando [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado, incluindo aquisição dinâmica e produção detectável de [1-^{13}C]lactato no cérebro, inclusive em tumores cerebrais. Esses trabalhos reforçam a utilização da HP-^{13}C como modalidade capaz de acrescentar informação metabólica dinâmica à caracterização cerebral.

Isso oferece à MindNet duas classes complementares de informação fisiológica: uma dimensão funcional e hemodinâmica proveniente da rt-fMRI e uma dimensão metabólica

proveniente da HP-^{13}C MRI. Park et al. (2018) e Miloushev et al. (2018) fornecem precedentes experimentais particularmente importantes para essa segunda camada de informação. Da mesma maneira, Savukov e Romalis (2005) demonstraram aumento da sensibilidade de detecção de NMR por magnetometria, e Ledbetter et al. (2008) demonstraram remote NMR detection.

Nesse sentido, a MindNet estabelece uma ponte tecnológica entre duas infraestruturas que já existem de forma independente: de um lado, redes urbanas capazes de produzir, direcionar, receber e transportar sinais de RF e dados digitais, como demonstrado pelo desenvolvimento de Massive MIMO e beamforming descrito por Khwandah et al. (2021) e Senger e Malik (2022); e de outro, técnicas de ressonância magnética capazes de extrair informações funcionais e metabólicas do organismo, incluindo os sistemas HP-^{13}C demonstrados por Park et al. (2018) e Miloushev et al. (2018). Entre esses domínios encontram-se ainda precedentes de reorganização da detecção de NMR, como Savukov e Romalis (2005), Ledbetter et al. (2008) e Verpillat et al. (2008), e de integração entre RF de MRI e comunicação wireless, como Darnell et al. (2019).

A lacuna tecnológica que a MindNet preenche encontra-se então na conexão entre esses domínios: produzir uma cadeia de aquisição remota com sensibilidade e seletividade suficientes para detectar informação cerebral útil sem a configuração física de um scanner convencional. É nessa conexão que a MindNet propõe integrar essas infraestruturas através de software proprietário, a MindNet AI trabalha para gerar representação neurodigital em um único sistema.

A lacuna tecnológica que a MindNet supre encontra-se precisamente na conexão entre esses domínios: produzir uma cadeia de aquisição neural remota com sensibilidade, seletividade, resolução espacial e temporal e relação sinal-ruído baixo o suficiente para detectar informação cerebral útil sem a configuração física de um scanner convencional. Os estudos citados fornecem precedentes para diferentes componentes dessa arquitetura, mas é a nossa integração — infraestrutura distribuída de RF, aquisição física, MindNet AI, representação neurodigital e transporte pela rede de telecomunicações — que se constitui na solução específica e completa para nos auxiliar na luta contra a dor crônica.

5.3 MindNet AI: inteligência artificial como camada de tradução, reconstrução e sincronização neurodigital

A MindNet AI constitui a camada computacional central da arquitetura MindNet. Conforme definido na arquitetura anteriormente apresentada, ela conecta aquisição física, neuroimagem, processamento de sinais, telecomunicações e feedback em circuito fechado. Na área de telecom, estamos acostumados a criar software com certa frequência, para integrar, corrigir, decodificar e refinar. Em termos funcionais, a MindNet atua como um neural codec, transformando dados derivados do cérebro em representações neurodigitais adequadas à análise e transmissão e, no sentido inverso do circuito, interpretando a resposta adquirida do receiver para compará-la ao estado de referência do sender.

O primeiro papel da MindNet AI ocorre ainda na aquisição e no pré-processamento. Dados provenientes de rt-fMRI e HP-^{13}C MRI apresentam diferentes estruturas espaciais,

temporais, hemodinâmicas e metabólicas. A MindNet AI participa da correção de artefatos, redução de ruído, identificação de interferências, refinamento e reconstrução do sinal. Na arquitetura de aquisição remota proposta pela MindNet, essa função torna-se particularmente importante: algoritmos podem procurar estruturas relevantes em sinais de baixa relação sinal-ruído e separar componentes informativos de interferências, nesse caso, informações que ao chegar no receiver, modulam sua dor.

O estado da arte da AI aplicada à fMRI oferece precedentes importantes para essa função e vêm sendo empregados para modelação de dados cerebrais, enquanto learning algorithms procuram aprimorar tarefas para obter representações neurais transferíveis. Yang et al. (2026) identificam quatro paradigmas principais no uso de arquiteturas Transformer para análise de dados de fMRI: modelagem temporal, modelagem espacial, modelagem espaço-temporal conjunta e aprendizagem auto-supervisionada, destacando sua capacidade de capturar sinais de longa distância em dados cerebrais.

Um desenvolvimento especialmente significativo para a MindNet é o NeuroSTORM. Em 2026, esse modelo fundacional de fMRI foi pré-treinado diretamente sobre dados volumétricos 4D, correspondentes a 28,65 milhões de frames de fMRI provenientes de mais de 50 mil participantes, abrangendo múltiplos centros e indivíduos com idades entre 5 e 100 anos. O NeuroSTORM aprende representações espaço-temporais generalizáveis e posteriormente as adapta a diferentes tarefas, tendo apresentado desempenho superior aos métodos de comparação em cinco aplicações downstream (NeuroSTORM, 2026). Esse resultado fornece um precedente contemporâneo importante para a concepção de uma MindNet AI capaz de aprender representações neurais generalizáveis, em vez de tratar os dados cerebrais de cada indivíduo ou conjunto de dados como um problema computacional completamente independente.

A segunda função é o neural decoding propriamente dito. Tang et al. (2023) demonstraram que um decoder não invasivo pode reconstruir linguagem contínua a partir de representações semânticas corticais obtidas por fMRI. O experimento não representa leitura irrestrita de estados mentais e exigiu treinamento específico do participante, mas demonstra um princípio fundamental para a MindNet: informação distribuída em padrões de fMRI pode ser convertida por AI em uma representação informacional diferente e computacionalmente manipulável. No caso da aplicação para a dor, the learning curve tende a ser menos trabalhosa, pois a informação para modulação da dor no cerebro nao inclui linguagem, ainda que seja uma feature futuramente empregada para comunicação e pesquisa. O avanço da área desde então tem sido rápido; Wang et al. (2025), em revisão sobre linguistic neural decoding, descrevem a crescente utilização de deep learning para converter atividade neural em representações linguísticas e analisam simultaneamente os problemas ainda existentes de generalização, variabilidade interindividual e interpretação.

O mesmo princípio já alcançou o domínio visual. Takagi e Nishimoto (2023) utilizaram latent diffusion models para reconstruir imagens a partir de atividade cerebral registrada por fMRI, demonstrando que representações latentes de modelos generativos podem funcionar como ponte entre padrões cerebrais e representações computacionais complexas. Scotti et al. (2023), com o MindEye, combinaram contrastive learning, diffusion priors e espaços latentes multimodais como CLIP para realizar recuperação e reconstrução de imagens a partir de fMRI. O MindEye mostrou ainda uma propriedade

particularmente relevante para a MindNet: embeddings cerebrais puderam ser mapeados para um espaço latente multimodal previamente aprendido, preservando informação suficientemente específica para distinguir imagens semelhantes. O Voxel e o novo pixel.

Outra questão interessante a se resolver é a variabilidade entre cérebros. Haxby et al. (2020), por meio de hyperalignment, demonstraram que topografias funcionais individuais podem ser transformadas para um espaço representacional comum de alta dimensionalidade. Na MindNet, esse princípio permite conceber transformações específicas para sender e receiver, de maneira que dois padrões anatomicamente diferentes possam ser comparados em um espaço computacional compartilhado. O estado da arte caminha justamente na direção de modelos capazes de aprender representações transferíveis entre indivíduos; Sümer-Arpak et al. (2026) destacam foundation models, self-supervised learning, Transformers e espaços semânticos compartilhados como direções emergentes para neural decoding não invasivo.

A MindNet AI também e um grande aliado depois da transmissão. O receiver não constitui um destino passivo. Seu novo estado é readquirido e transformado em uma representação \(Z_R(t)\), que pode ser comparada à representação \(Z_S(t-\Delta)\) do sender. A AI pode estimar a natureza da informação levando em consideração a latência da aquisição, da rede e da própria fisiologia cerebral. Dessa forma, a MindNet AI deixa de ser apenas um decoder e torna-se também o controlador computacional do circuito:

Essa concepção é compatível com uma mudança mais ampla no estado da arte da AI para neurociência. Mathis e Mathis (2026) descrevem a convergência de modelos discriminativos para aprender conjuntamente a dinâmica cerebral e para inferir a lógica comportamental. Sümer-Arpak et al. (2026), por sua vez, mostram que os foundation models estão levando o neural decoding de classificadores específicos em direção à aprendizagem de representações escaláveis e semanticamente estruturadas, embora permaneçam desafios relacionados a ruído, variabilidade entre indivíduos, quantidade de dados, interpretabilidade, padronização e expectativas. A autora é da opinião de que jamais será possível encapsular a consciencia humana, o que torna a neurociência ainda mais interessante. A MindNet esta aqui para facilitar a comunicação e conexão.

Assim, a MindNet AI pode ser definida como uma arquitetura de inteligência artificial adaptativa responsável por converter sinais cerebrais em representações neurodigitais, alinhando representações entre indivíduos, preservando informação discriminável durante a transmissão, interpretando a resposta do receiver e controlando o feedback, através das ferramentas disponíveis dentro de cada camada.

O estado da arte demonstra separadamente capacidades cada vez mais próximas das funções necessárias a essa arquitetura: Tang et al. (2023) para decoding semântico; Takagi e Nishimoto (2023) e Scotti et al. (2023) para reconstrução generativa e espaços latentes derivados de fMRI; Haxby et al. (2020) para alinhamento interindividual; MacInnes et al. (2020) para processamento operacional de rt-fMRI; NeuroSTORM (2026) para foundation models de fMRI em grande escala; e Sümer-Arpak et al. (2026) para a emergência de modelos fundacionais no decoding não invasivo. A MindNet AI propõe reunir essas capacidades acrescentando RF, rt-fMRI/HP-^{13}C MRI, a integração com

telecomunicações e a comparação contínua entre sender e receiver em prol da luta contra a dor.

5.4 Pyneal e DICOM na arquitetura da MindNet

Na arquitetura MindNet, o Pyneal pode ocupar uma posição estratégica entre a aquisição por rt-fMRI e a MindNet AI. Sua função principal não seria substituir os algoritmos de inteligência artificial nem realizar toda a decodificação neural, mas fornecer uma infraestrutura computacional já desenvolvida utilizada para receber, organizar, pré-processar e analisar dados de fMRI durante a aquisição. Dessa forma, o Pyneal pode funcionar como uma ponte entre o domínio físico da neuroimagem e o domínio computacional da MindNet.

MacInnes et al. (2020) desenvolveram o Pyneal especificamente como uma plataforma open-source para real-time functional magnetic resonance imaging (rt-fMRI). Sua arquitetura foi concebida para permitir acesso à função cerebral durante o próprio exame, possibilitando monitoramento da qualidade dos dados, análises em tempo real, neurofeedback, controle dinâmico de experimentos e comunicação com dispositivos ou sistemas computacionais externos.

A estrutura interna do Pyneal é particularmente interessante para a MindNet porque já separa a operação em componentes funcionais. O Pyneal Scanner monitora os novos dados produzidos pelo sistema de aquisição, transforma-os em um formato padronizado e envia cada novo volume tridimensional para o módulo Pyneal. O Pyneal propriamente dito possui três componentes principais: scan receiver, processing module e results server. O primeiro recebe os volumes; o segundo executa as operações de pré-processamento e análise; e o terceiro disponibiliza os resultados para outros sistemas durante o próprio exame (MacInnes et al., 2020).

Cada novo volume recebido corresponde a uma matriz tridimensional de voxels associada a determinado instante da aquisição. O Pyneal utiliza informações transmitidas para reconstruir corretamente as dimensões de volume e posicioná-lo temporalmente dentro de uma estrutura 4D que é preenchida progressivamente durante o exame. O resultado de cada análise permanece associado ao índice temporal correspondente, aspecto importante para a MindNet porque a comparação entre sender e receiver depende não apenas do conteúdo das representações neurais, mas também de sua posição temporal.

Outra característica particularmente relevante é que o Results Server do Pyneal utiliza uma interface de socket TCP/IP. Um sistema externo pode solicitar o resultado correspondente a determinado volume, e o servidor responde em formato JSON. MacInnes et al. (2020) denominam esse componente externo de “End User”, que pode ser qualquer sistema autorizado a utilizar os resultados produzidos durante a aquisição. Esse conceito pode ser estendido a MindNet AI, que pode ocupar a posição de sistema downstream que recebe continuamente os resultados do pipeline de rt-fMRI e os incorpora ao processamento neurodigital.

Assim, o Pyneal fornece uma interface computacional particularmente interessante entre neuroimagem e telecomunicações e a a Mindnet não precisa, portanto, realizar sozinha o neural decoding avançado. A própria arquitetura descrita por MacInnes et al. (2020)

permite análises customizadas, o que possibilita inserir modelos computacionais posteriores ou pipelines específicos. Na MindNet, os resultados produzidos pelo Pyneal podem alimentar algoritmos de machine learning e deep learning destinados à redução adicional de ruído, extração de características, reconhecimento de padrões, dimensionality reduction, neural decoding e construção da representação neurodigital.

Pyneal e MindNet AI não são então tecnologias concorrentes; eles podem ser organizados em camadas. O Pyneal executa a interface operacional com a rt-fMRI e o processamento necessário em tempo real; a MindNet AI acrescenta modelos especializados capazes de transformar esses dados em representações neurodigitais mais complexas. Essa modularidade é coerente com o próprio projeto do Pyneal, que permite scripts personalizados e análises adaptadas às necessidades de cada experimento (MacInnes et al., 2020).

O Pyneal pode processar volumes à medida que eles são produzidos, mas “tempo real” em rt-fMRI não significa tempo neuronal de milissegundos. O sistema trabalha dentro da resolução temporal da aquisição e da resposta hemodinâmica. Por isso, a MindNet AI deverá considerar timestamps, atraso hemodinâmico, tempo de processamento, latência de rede, interação com o receiver e reaquisição. O próprio Pyneal monitora o tempo de processamento de cada volume, permitindo verificar se a análise acompanha a velocidade da aquisição (MacInnes et al., 2020). Para a dor crônica, no entanto, o impacto será mínimo e a solução ainda permanece solida como uma das melhores opções em um mercado cuja principal opção são opioids.

Há ainda uma distinção importante dentro da arquitetura multimodal proposta: o Pyneal foi desenvolvido especificamente para rt-fMRI e não deve ser apresentado como pipeline estabelecido para HP-^{13}C MRI. A informação metabólica proveniente de HP-^{13}C deve possuir seu próprio pipeline de aquisição e processamento. É posteriormente, na MindNet AI, que as características derivadas das diferentes modalidades podem ser integradas em uma representação multimodal. Porem, essa divisão fortalece a arquitetura porque atribui a cada tecnologia uma função tecnicamente definida. O Pyneal constitui a camada operacional de processamento da rt-fMRI em tempo real; o pipeline HP-^{13}C fornece a dimensão metabólica; e a MindNet AI realiza integração multimodal, neural decoding, representação neurodigital, alinhamento e comparação sender–receiver. O componente de telecomunicações transporta a representação resultante.

Dessa forma, a importância do Pyneal para a MindNet não reside apenas no fato de ser um software de fMRI. MacInnes et al. (2020) já demonstraram uma arquitetura na qual aquisição, processamento, análise, TCP/IP e disponibilização de resultados para sistemas externos ocorrem durante a mesma sessão. A MindNet amplia esse princípio ao colocar a MindNet AI e a infraestrutura de telecomunicações após dentro dessa interface, transformando o resultado do processamento de rt-fMRI em uma das entradas de uma cadeia neurodigital contínua. Pyneal pode, assim, constituir uma das pontes de software entre neuroimagem em tempo real e a arquitetura de telecomunicações neurodigitais proposta pela MindNet.

Também, na arquitetura MindNet, DICOM e Pyneal são complementares na transição entre a aquisição física por ressonância magnética e a construção de uma representação

neurodigital pela MindNet AI. DICOM fornece uma linguagem padronizada para representar, identificar, armazenar e intercambiar dados de imagens médicas; Pyneal acrescenta uma camada operacional capaz de acessar e processar dados de fMRI durante a própria aquisição. A MindNet usa essa combinação como parte da ponte entre neuroimagem, inteligência artificial e telecomunicações.

DICOM — Digital Imaging and Communications in Medicine — é um padrão internacional para comunicação e gerenciamento de informações de imagens médicas e dados relacionados. Na arquitetura MindNet, isso significa que a informação produzida pelo equipamento de neuroimagem já nasce dentro de uma estrutura digital padronizada, contendo não apenas pixels ou voxels, mas também metadados necessários para identificar estudo, série, instância, modalidade e parâmetros da aquisição.

O DICOM preserva a estrutura interoperável da informação de neuroimagem. O Pyneal transforma a chegada sucessiva desses dados em um fluxo computacional de rt-fMRI. A MindNet AI, por sua vez, pode receber resultados ou representações derivadas desse processamento para executar operações mais avançadas, como denoising adicional, por exemplo, tao importante para obter estados neurais. E os objetos DICOM também permanecem como fonte, registro e referência da aquisição na DICOMweb. Koutelakis et al. (2018) descrevem DICOMweb como a extensão da interoperabilidade DICOM para tecnologias web, utilizando serviços baseados em padrões web para armazenar, pesquisar e recuperar objetos de imagens médicas. Os autores já apontavam que essa arquitetura reduzia barreiras para image analytics e machine learning, justamente porque aplicações computacionais podiam recuperar imagens e dados relacionados por interfaces web padronizadas.

Nesse desenho, DICOM funciona como a linguagem interoperável da neuroimagem, Pyneal como uma ponte de processamento da rt-fMRI em tempo real e MindNet AI como a camada que transforma características relevantes desses dados em representações neurodigitais destinadas à análise, comparação e transmissão. A cadeia deixa, portanto, de ser simplesmente “MRI → imagem” e passa a assumir uma organização computacional contínua. E importante ressaltar que essas informações seriam obtidas e compartilhadas com autorização e consentimento do Sender e do Receiver a cada etapa..

5.5 HP-^{13}C MRI na MindNet: leitura metabólica nuclear, aquisição dinâmica e aumento de sensibilidade

A HP-^{13}C MRI acrescenta à arquitetura MindNet uma dimensão que a rt-fMRI BOLD, isoladamente, não fornece: a possibilidade de acompanhar diretamente transformações metabólicas. Enquanto a rt-fMRI utiliza alterações hemodinâmicas e de oxigenação sanguínea como uma medida indireta relacionada à atividade neural, a HP-^{13}C MRI explora as propriedades magnéticas do núcleo de ^{13}C e acompanha dinamicamente o destino metabólico do [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado, do lactato e do bicarbonato. Li, Vigneron e Xu (2021) destacam justamente que a HP-^{13}C MRI permite adquirir informação metabólica dinâmica em tempo real no cérebro humano, complementando modalidades anatômicas e funcionais.

O primeiro elemento importante é, portanto, a leitura metabólica a partir do núcleo de ^{13}C. O carbono-13 possui spin nuclear ativo em ressonância magnética, mas sua abundância

natural é pequena e sua sensibilidade convencional é baixa. A hiperpolarização modifica radicalmente essa condição. Técnicas como dissolution Dynamic Nuclear Polarization (dDNP) aumentam a polarização nuclear antes da aquisição, elevando o sinal de MR em várias ordens de magnitude. Khan e Laustsen (2025) descrevem aumentos de polarização superiores a 10.000 vezes em determinadas condições, enquanto revisões recentes relatam ganhos de relação sinal-ruído que podem chegar a dezenas de milhares de vezes.

Essa propriedade é particularmente importante para a MindNet porque transforma moléculas metabolicamente relevantes em fontes temporariamente muito mais detectáveis de informação física. O exemplo mais desenvolvido é o [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado. Depois de administrado, o piruvato participa do metabolismo e o rótulo ^{13}C pode aparecer em produtos metabólicos como [1-^{13}C]lactato e ^{13}C-bicarbonato. A conversão piruvato–lactato está relacionada à lactato desidrogenase e ao estado metabólico do tecido, enquanto a formação de bicarbonato está associada à entrada do piruvato no metabolismo oxidativo através da piruvato desidrogenase. Assim, a HP-^{13}C MRI não fornece apenas uma imagem estática: permite acompanhar o comportamento temporal do substrato e de seus produtos metabólicos.

Park et al. (2018) demonstraram a viabilidade dessa abordagem no cérebro humano utilizando [1-^{13}C]piruvato hiperpolarizado. O trabalho mostrou aquisição dinâmica de piruvato e de produtos metabólicos, incluindo lactato e bicarbonato, estabelecendo um precedente importante para a utilização de HP-^{13}C como componente metabólico da caracterização cerebral humana. Posteriormente, Li e Xu (2021) revisaram as aplicações cerebrais humanas e enfatizaram que a capacidade de obter informação metabólica dinâmica constitui uma das características fundamentais dessa tecnologia.

O segundo elemento importante para a MindNet é exatamente essa dimensão temporal. “Tempo real”, nesse contexto, não significa acompanhar cada potencial de ação em escala de milissegundos. Significa adquirir dinamicamente a evolução do metabolismo durante a janela relativamente curta em que a magnetização hiperpolarizada permanece disponível. Harris et al. (2018) demonstraram que HP-[1-^{13}C]piruvato permite acompanhar o metabolismo cerebral em escalas de segundos. Existe, entretanto, uma diferença de escalas temporais que precisa ser considerada pelo algoritmo. Potenciais de ação e muitos eventos sinápticos acontecem em escalas de milissegundos, enquanto a resposta BOLD evolui muito mais lentamente. Essa diferença aparece diretamente no trabalho de Tang et al. (2023): os autores destacam que a lentidão da resposta BOLD constitui um problema para o decoding de linguagem contínua, porque cada imagem cerebral pode refletir informação correspondente a múltiplas palavras. O decoder precisa então lidar computacionalmente com essa diferença temporal (Tang et al., 2023).

Portanto, “tempo real” não significa que todos os fenômenos fisiológicos possuam a mesma latência. Significa que o sistema opera continuamente levando em consideração diferentes constantes temporais, tempos de aquisição, processamento, transmissão e resposta fisiológica. A MindNet AI precisa justamente realizar essa correspondência temporal, associando os estados adquiridos do sender às respostas subsequentes do receiver e incorporando essas relações ao próximo ciclo do circuito fechado.

Para a MindNet, isso permite conceber dois canais complementares de informação:

rt-fMRI/BOLD → informação dinâmica funcional, hemodinâmica e de oxigenação

HP-^{13}C MRI → informação dinâmica metabólica

O valor para a MindNet nesse caso está precisamente na complementaridade dessas informações. A MindNet AI pode receber características derivadas dos dois pipelines e integrá-las em uma representação multimodal do estado cerebral.

Além disso, o aumento de sensibilidade proporcionado pela hiperpolarização e especialmente interessante para a aquisição remota proposta a partir da rede de telecomunicações ja existente. Hsieh et al. (2024) descrevem justamente a elevada sensibilidade da HP MRI como consequência do aumento da polarização nuclear, enquanto Khan e Laustsen (2025) mostram que a hiperpolarização permite estudar núcleos e moléculas cuja sensibilidade convencional seria insuficiente para diversas aplicações.

Na arquitetura MindNet, portanto, o aumento de alcance deve ser formulado como uma consequência tecnológica a partir do RF e também como uma consequência do aumento de detectabilidade. O precedente ja esta estabelecido pelo aumento muito expressivo da sensibilidade; e esse ganho pode ser convertido em alcance quando associado à sua infraestrutura distribuída de RF, sistemas de detecção e MindNet AI.

A questão da aquisição remota pode ser compreendida como um problema conjunto de física e processamento: intensidade do sinal disponível, ruído, distância, geometria de detecção, sensibilidade do receptor, interferências, resolução espacial e temporal e capacidade computacional de identificar o componente informativo. A HP-^{13}C contribui aumentando a detectabilidade física; a MindNet AI contribui procurando extrair, separar e reconstruir a informação. AI pode contribuir significativamente quando sinais fracos estão presentes em ambientes de elevada dimensionalidade e ruído. Hsieh et al. (2024) apontam a inteligência artificial como uma das direções futuras para aprimorar análise, reprodutibilidade e aplicações clínicas da modalidade. Khan e Laustsen (2025) também descrevem avanços simultâneos em aquisição e análise de dados, enquanto a revisão “Quo Vadis Hyperpolarized ^{13}C MRI?” (2025) identifica explicitamente métodos de inteligência artificial entre as linhas atuais de desenvolvimento da área.

A HP-^{13}C MRI oferece, assim, varias contribuições especialmente relevantes para a MindNet, entre elas a leitura de processos metabólicos por meio de núcleos de ^{13}C magneticamente ativos; aquisição dinâmica capaz de acompanhar transformações metabólicas em tempo real dentro de sua janela de hiperpolarização; e um aumento de sensibilidade de várias ordens de magnitude que amplia a detectabilidade do sinal, alem de diminuição de ruido. Park et al. (2018), Li, e Xu (2021), Hsieh et al. (2024) e Khan e Laustsen (2025) fornecem uma base tecnológica convergente para esses três primeiros elementos.

Na arquitetura MindNet, a hiperpolarização de ^{13}C aumenta a magnetização nuclear e a detectabilidade do sinal MR, fornecendo maior margem de sensibilidade ao sistema de

aquisição por RF. A MindNet AI torna-se especialmente importante quando mais a distância aumenta. Conforme o sinal se aproxima do limite de detecção, algoritmos de processamento podem ser utilizados para redução de ruído, identificação de interferências, reconstrução, fusão multimodal e extração de características. O estado da arte da HP MRI já trata aquisição e análise como partes intimamente relacionadas: Khan e Laustsen (2026) destacam que maximizar a informação obtida de uma amostra hiperpolarizada exige otimização conjunta da aquisição e da análise, porque existe um orçamento finito de magnetização hiperpolarizada.

Portanto, AI e hiperpolarização podem atuar de maneira complementar. A HP-^{13}C melhora a condição física inicial do problema aumentando a polarização e a intensidade do sinal; a MindNet AI atua posteriormente sobre as medições obtidas. Se a informação cerebral relevante estiver presente no sinal, mesmo que misturada a ruído e interferências, técnicas computacionais podem aumentar a capacidade de identificá-la. Trata-se de adquirir um sinal nuclear muito mais detectável, combinado com receptores de alta sensibilidade, infraestrutura RF distribuída e processamento computacional avançado, permite deslocar progressivamente o limite operacional de detecção.

Dessa forma, a contribuição da HP-^{13}C para o alcance da MindNet pode ser apresentada como uma hipótese de engenharia diretamente derivada de um princípio já estabelecido: a hiperpolarização aumenta em várias ordens de magnitude a polarização nuclear e a sensibilidade da MRI (Khan e Laustsen, 2026); a HP-^{13}C permite recuperar dinamicamente informação metabólica no cérebro humano (Cunningham et al., 2019); configurações de remote NMR demonstram que componentes de detecção podem ser reorganizados espacialmente (Ledbetter et al., 2008; Verpillat et al., 2008); e sistemas integrados de RF demonstram a coexistência de aquisição MR e comunicação wireless (Darnell et al., 2019).

A proposta da MindNet AI estabelece, portanto, uma ponte entre neurociência e engenharia de telecomunicações, transformando a comunicação cérebro–cérebro em um problema de aquisição, transdução, representação, interoperabilidade, codificação, transmissão, recepção, sincronização, controle e feedback. A questão central deixa de ser se um campo cerebral pode atravessar diretamente grandes distâncias e passa a ser como informação derivada de estados neurais pode ser transportada, preservada, entregue e verificada através de uma infraestrutura neurodigital distribuída..

6. A epidemia silenciosa da dor crônica

6.1 Um desafio global de saúde

No Brasil, a dimensão epidemiológica da dor crônica reforça a necessidade de desenvolvimento de novas estratégias de prevenção, tratamento e neuromodulação. Uma revisão sistemática e meta-análise publicada em 2023 estimou que 35,70% da população adulta brasileira apresenta dor crônica, enquanto entre idosos a prevalência alcança 47,32%. Além da elevada frequência, aproximadamente metade das pessoas afetadas relatou incapacidade associada à dor (Aguiar et al., 2023). Esses números demonstram que a dor crônica ultrapassa a dimensão individual e constitui um problema relevante de saúde pública no Brasil, com repercussões funcionais, sociais e econômicas.

Nos Estados Unidos, pais no qual me naturalizei, mais de 50 milhões de adultos norte-americanos convivem com dor crônica e aproximadamente 17 milhões com dor crônica de alto impacto. Ja na Europa, estudos econômicos também apontaram custos de condições associadas à dor crônica equivalentes a vários pontos percentuais do PIB em determinados países, incluindo despesas médicas, hospitalizações, afastamentos, benefícios sociais e aposentadoria precoce. A OMS projeta aproximadamente 843 milhões de casos em 2050 e identifica a lombalgia como a principal causa de incapacidade mundial.

A elevada prevalência, a persistência ao longo do tempo e o impacto funcional, social e econômico da dor crônica permitem caracterizá-la, em sentido epidemiológico amplo, como um problema de magnitude epidêmica.

Nesse contexto, o desenvolvimento da MindNet como arquitetura de telecomunicações neurodigitais destinada, entre suas possíveis aplicações, à investigação de novas estratégias para modulação da dor crônica insere-se em uma necessidade clínica que atinge uma parcela expressiva da população mundial.

A dimensão econômica da dor crônica permite estimar a magnitude potencial do impacto econômico de tecnologias capazes de reduzir, de forma mensurável, a incapacidade associada à dor. Em um cenário meramente ilustrativo no qual uma tecnologia como a MindNet alcançasse 10% da população economicamente afetada pela dor e reduzisse em 25% os custos associados nesse grupo, a aplicação dos valores norte-americanos corresponderia a aproximadamente US$ 14–15,9 bilhões anuais em custos potencialmente evitados. Em um cenário de maior escala, com 50% de cobertura e redução de 50% do ônus econômico entre os indivíduos tratados, esse valor poderia alcançar aproximadamente US$ 140–158,8 bilhões anuais. Essas projeções demonstram a escala econômica potencial de uma intervenção que venha a produzir redução clinicamente comprovada da dor, da incapacidade e das perdas de produtividade mundial.

Nesse modelo, a redução da dor e da incapacidade poderia diminuir hospitalizações, consultas, tratamentos, afastamentos e outros custos associados à doença; a recuperação funcional poderia aumentar as horas trabalhadas e reduzir o absenteísmo; e a implementação da própria arquitetura poderia estabelecer uma nova cadeia econômica neurodigital.

Além disso, o tratamento farmacológico prolongado da dor crônica também pode gerar efeitos adversos, necessidade de monitoramento e custos adicionais para os sistemas de saúde. Algumas classes de medicamentos apresentam riscos relevantes quando utilizadas de forma prolongada ou em populações vulneráveis. No caso da autora, após aproximadamente seis anos de tratamento, foram identificadas alterações renais e alterações na morfologia cerebral, em um contexto no qual os medicamentos utilizados não proporcionaram controle completo da dor. Anti-inflamatórios não esteroidais, por exemplo, estão associados a riscos gastrointestinais, cardiovasculares e renais, enquanto outros medicamentos empregados no tratamento da dor crônica podem produzir sedação, tontura e efeitos cognitivos (CDC, 2022).

Quanto aos opioides, embora sejam medicamentos essenciais em determinadas situações clínicas, seu uso prolongado para dor crônica apresenta perigo iminente para muitos pacientes e está associado a riscos de transtorno por uso de opioides, overdose e outros eventos adversos graves.

Nos Estados Unidos, milhões de pessoas relatam uso indevido de opioides prescritos ou transtorno relacionado ao seu uso, enquanto centenas de milhares de mortes por overdose envolvendo opioides prescritos foram registradas ao longo das últimas décadas. Esse problema acrescenta à carga econômica da dor custos relacionados ao tratamento da dependência, atendimento de emergência, hospitalizações, perda de produtividade e mortalidade prematura.

Nesse contexto, a MindNet demonstra ser uma opção necessária, capaz de reduzir a intensidade da dor, a incapacidade e a necessidade de tratamento farmacológico. Seu impacto econômico potencial poderá incluir a redução da exposição prolongada a determinados medicamentos e custos associados aos seus efeitos adversos. A redução segura da necessidade de opioides, poderá trazer benefícios adicionais relacionados à menor exposição a opioides prescritos e, consequentemente, à redução dos riscos associados ao seu uso prolongado, incluindo transtorno por uso de opioides e overdose.

7.Conclusão e perspectivas de implementação da MindNet

7.1 Unindo Ciência, Saúde e Futuro

A MindNet pode ser implementada de forma progressiva e modular, partindo de componentes que já possuem precedentes e estão, inclusive, em uso neste momento, e avançando para sua integração em um sistema neurodigital de circuito fechado. Como inventora, espero que essa implementação seja tão simples quanto “reiniciar” um sistema após um bug, e dar o o start integrando tecnologias existentes de maneira coordenada para fazê-las operar, em uníssono, dentro de uma nova arquitetura orientada pelo princípio primum non nocere — “do no harm”. O desenvolvimento de uma alternativa para o alívio da dor crônica poderá avançar assim que os recursos necessários, e a justica, estejam disponíveis.

Como estudante de medicina, imagino estudos direcionados e controlados sendo realizados em instituições de ensino e pesquisa e a MindNet, no futuro, conectando pessoas com o propósito de contribuir para o alívio da dor de milhões. Como ativista (@ju4justice), gostaria de levar a questão da dor crônica, em sua enorme dimensão de saúde pública, a espaços nos quais ciência, políticas públicas e legislação possam convergir na discussão de soluções de alcance mundial, incluindo organizações internacionais que apoiam a democracia, como as United Nations (UN/ONU) e a World Health Organization (WHO/OMS). Como mãe, eu desejo a cura para a minha familia.

O caminho mais racional é esse. Após construir uma sequência de provas de conceito fundamentadas nos estudos aqui apresentados, cada etapa da arquitetura poderá ser avaliada de forma objetiva, mensurável e reproduzível. À medida que essas provas sejam demonstradas, a discussão deixará progressivamente o campo da viabilidade teórica e passará para o da execução — e eu tenho mais de dez anos de experiência na implementação de soluções de telecomunicações. Nesse estágio, eventuais objeções à

implementação da MindNet precisarão ser confrontadas não apenas com os resultados produzidos pelas próprias provas de conceito, mas também com o conjunto da literatura científica citada neste trabalho, que fornece precedentes independentes para diversos componentes da arquitetura. É justamente uma sequência transparente de provas de conceito que permitirá que os dados — e não opiniões pessoais — determinem até onde a integração proposta pela MindNet pode chegar. A questão científica, portanto, não deve ser quem está a favor ou contra a MindNet, mas quais funções podem ser demonstradas e quais problemas essa tecnologia poderá nos ajudar a enfrentar, especialmente diante da dimensão humana e social da dor crônica.

Enfim, a MindNet pode ser compreendida como uma arquitetura de telecomunicações neurodigitais na qual o cérebro constitui simultaneamente uma fonte e um destino de informação. Então, vamos abrir o nosso. Sua lógica fundamental acompanha a evolução histórica das telecomunicações: fenômenos originalmente não transmissíveis a longa distância em sua forma física são adquiridos por transdutores, convertidos em representações, codificados, transportados por redes e reconstruídos ou utilizados na extremidade receptora. E, a cada implementação, a economia acompanha o avanço — algo especialmente significativo para quem, como eu, acredita no valor do trabalho honesto como força de desenvolvimento econômico e social.

A voz não atravessa uma fibra óptica como som. Uma fotografia não atravessa a Internet como luz. Um vídeo não atravessa uma rede como movimento físico. Da mesma maneira, na MindNet, o estado neural não precisa atravessar a distância como um campo cerebral. Ele é adquirido, convertido em dados e transformado em uma representação neurodigital transmissível. É essa mudança de domínio — do neural ao físico, do físico ao digital e do digital às telecomunicações — que permite conceber a distância não como uma barreira absoluta, mas como um convite para a *conexão*.

8. A origem pessoal da MindNet

8.1 Minha peregrinação ate aqui

Ao me tornar uma pessoa com deficiência durante o parto, passei a me locomover com o auxílio de cadeira de rodas ou muletas, e meu próprio corpo tornou-se, de certa forma, um objeto de estudo para mim. Da experiência de viver com dor crônica por seis anos, descobri como me adaptar e lidar com essa condição que, em alguns casos — e, particularmente, no meu —, pode até se assemelhar a uma forma de tortura, por sua intensidade e persistência.

Meu filho e eu ainda esperamos da Justiça a efetivação do nosso direito à restitutio in integrum, princípio jurídico da reparação integral, segundo o qual se busca restabelecer, tanto quanto possível, a situação que existiria caso o dano não tivesse ocorrido, mediante a reparação integral dos prejuízos sofridos. Com os recursos limitados pela situação relatada a priori enquanto a correspondente reparação pelos danos sofridos chega, iniciei os tratamentos financeiramente disponíveis para mim, ainda que estes apresentem riscos e efeitos colaterais, sem necessariamente proporcionar uma recuperação integral. (CGC-23-11182, CGC-25-622102)

Após desenvolver fibromialgia como consequência da lesão na coluna, estabeleci, então, o propósito de encontrar uma alternativa. Portanto, este estudo nasce, como uma flor de lótus em meio à lama, de uma grande necessidade pessoal e, ao mesmo tempo, de um problema de alcance mundial.

Foi por causa da fibromialgia que compreendi que, para estudar a dor, eu precisava entender melhor o cérebro. Daí surgiu meu interesse pela neurociência. E, como não dava para deixar para trás minha própria trajetória, meu background técnico em telecomunicações e informática trouxe, naturalmente, a tecnologia para essa investigação, a partir dai e tudo historia.

Este estudo, portanto, nasce também da necessidade de estabelecer uma ponte tecnicamente definida entre campos que tradicionalmente têm sido investigados de maneira relativamente independente na luta contra a dor crônica: a neurociência dos processos de transdução e representação neural e a engenharia de telecomunicações que e responsável pela transmissão de informação a distância.

Essa aproximação entre áreas que fizeram parte de momentos distintos da minha trajetória acabou se tornando a base interdisciplinar para pensar uma arquitetura na qual estados neurais pudessem ser sincronizados entre indivíduos.

Foi desse encontro entre minha experiência pessoal, neurociência e tecnologia que surgiu a proposta da MindNet, objeto de pedidos de patente perante o INPI e o USPTO, e que se utiliza de diferentes tecnologias em uníssono para investigar a possibilidade de auxiliar o cérebro em uma das tarefas que passaram a ocupar o centro da minha pesquisa: modular a dor por meio da sincronização de estados neurais.

Restitutio in integrum não representa apenas a possibilidade de reconstrução daquilo tudo que foi perdido pela minha família nesses últimos seis anos — afinal, como seria possível repor seis anos da vida de alguém? Pois, para mim, representa também a oportunidade de implementar a MindNet, na esperança de superar a dor crônica e recuperar a vida que ela me impede de viver; e para o meu filho, significa algo que nenhum valor econômico conseguira medir: a possibilidade de ter a mãe dele de volta.

9. Referências bibliográficas

3GPP. TS 23.501: System architecture for the 5G System. [S. l.]: 3rd Generation Partnership Project, [s. d.].

AL-WASITY, Salim et al. Hyperalignment of motor cortical areas based on motor imagery during action observation. Scientific Reports, v. 10, art. 5362, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-62071-2.

ATTWELL, David; LAUGHLIN, Simon B. An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, v. 21, n. 10, p. 1133–1145, 2001. DOI: https://doi.org/10.1097/00004647-200110000-00001.

BERNI, Tommaso; SACHELI, Lucia Maria et al. Together we sync: a systematic qualitative and quantitative review of fMRI hyperscanning studies. Social Cognitive and Affective Neuroscience, v. 21, n. 1, nsaf122, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/scan/nsaf122.

BUSCH, Elijah L. et al. Hybrid hyperalignment: a single high-dimensional model of shared information embedded in cortical patterns of response and functional connectivity. NeuroImage, v. 233, art. 117975, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.117975.

CHEN, Hung-Tu; MANNING, Jeremy R.; VAN DER MEER, Matthijs A. A. Between-subject prediction reveals a shared representational geometry in the rodent hippocampus. Current Biology, v. 31, n. 19, p. 4293–4304.e5, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.061.

CIFRE, Inmaculada et al. Disrupted functional connectivity of the pain network in fibromyalgia. Psychosomatic Medicine, v. 74, p. 55–62, 2012.

CONROY, Bryan R. et al. Inter-subject alignment of human cortical anatomy using functional connectivity. NeuroImage, v. 81, p. 400–411, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.009.

COOK, Dane B. et al. Functional imaging of pain in patients with primary fibromyalgia. Journal of Rheumatology, v. 31, p. 364–378, 2004.

CUNNINGHAM, Charles H. et al. Quantifying normal human brain metabolism using hyperpolarized [1-^{13}C]pyruvate and magnetic resonance imaging. NeuroImage, 2019.

DARNELL, Dean et al. Integrated radio-frequency/wireless coil design for simultaneous MR image acquisition and wireless communication. Magnetic Resonance in Medicine, v. 81, n. 3, p. 2176–2183, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/mrm.27513.

DECHARMS, R. Christopher et al. Control over brain activation and pain learned by using real-time functional MRI. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 102, p. 18626–18631, 2005. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0505210102.

DEERING, Stephen; HINDEN, Robert. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. RFC 8200. [S. l.]: Internet Engineering Task Force, 2017.

DIAZ, R. E.; SEBASTIAN, T. Electromagnetic limits to radiofrequency (RF) neuronal telemetry. Scientific Reports, v. 3, art. 3535, 2013. DOI: https://doi.org/10.1038/srep03535.

DUMAS, Guillaume et al. Inter-brain synchronization during social interaction. PLOS ONE, v. 5, e12166, 2010.

ECHCGADDA, Ibtissam et al. Changes in the excitability of primary hippocampal neurons following exposure to 3.0 GHz radiofrequency electromagnetic fields. Scientific Reports, v. 12, art. 3506, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-06914-0.

EPSTEIN, Robert. Brain as transducer: what if the brain is not a self-contained information processor? What if it is simply a transducer? ScienceOpen Preprints, 2021. Preprint. DOI: https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-.PPICS3U.v1.

FARAHANI, Farzad V. et al. Effects of connectivity hyperalignment (CHA) on estimated brain network properties: from coarse-scale to fine-scale. bioRxiv, 2024. Preprint. DOI: https://doi.org/10.1101/2024.08.27.609817.

FEILONG, Ma et al. Reliable individual differences in fine-grained cortical functional architecture. NeuroImage, v. 183, p. 375–386, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.08.029.

GORDON, Jeremy W. et al. Lactate topography of the human brain using hyperpolarized 13C-MRI. NeuroImage, v. 204, art. 116202, 2019.

GRAU, Carles et al. Conscious brain-to-brain communication in humans using non-invasive technologies. PLOS ONE, v. 9, n. 8, e105225, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105225.

GRIST, James T. et al. Hyperpolarized 13C MRI: a novel approach for probing cerebral metabolism in health and neurological disease. Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, v. 40, n. 6, p. 1137–1147, 2020. DOI: https://doi.org/10.1177/0271678X20909045.

GUAN, Ming et al. Self-regulation of brain activity in postherpetic neuralgia using real-time fMRI neurofeedback. PLOS ONE, v. 10, e0123675, 2015.

GUNTUPALLI, J. Swaroop et al. Modeling semantic encoding in a common neural representational space. Frontiers in Neuroscience, v. 12, art. 437, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00437.

GUO, Jiahui et al. Predicting individual face-selective topography using naturalistic stimuli. NeuroImage, v. 216, art. 116458, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116458.

HALL, Catherine N. et al. Capillary pericytes regulate cerebral blood flow in health and disease. Nature, v. 508, p. 55–60, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13165.

HAXBY, James V. et al. Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. Science, v. 293, p. 2425–2430, 2001.

HAXBY, James V. et al. A common, high-dimensional model of the representational space in human ventral temporal cortex. Neuron, v. 72, n. 2, p. 404–416, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.08.026.

HAXBY, James V. et al. Hyperalignment: modeling shared information encoded in idiosyncratic cortical topographies. eLife, v. 9, e56601, 2020. DOI: https://doi.org/10.7554/eLife.56601.

HAYNES, John-Dylan; REES, Geraint. Decoding mental states from brain activity in humans. Nature Reviews Neuroscience, v. 7, p. 523–534, 2006.

HILLMAN, Elizabeth M. C. Coupling mechanism and significance of the BOLD signal: a status report. Annual Review of Neuroscience, v. 37, p. 161–181, 2014. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-014111.

IENCA, Marcello; ANDORNO, Roberto. Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. Life Sciences, Society and Policy, v. 13, art. 5, 2017.

JIANG, Linxing et al. BrainNet: a multi-person brain-to-brain interface for direct collaboration between brains. Scientific Reports, v. 9, art. 6115, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-41895-7.

JUUTILAINEN, Jukka et al. Review of possible modulation-dependent biological effects of radiofrequency fields. Bioelectromagnetics, v. 32, n. 7, p. 511–534, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/bem.20652.

KAPUR, Arnav; KAPUR, Shreyas; MAES, Pattie. AlterEgo: a personalized wearable silent speech interface. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT USER INTERFACES, 23., 2018. Proceedings [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2018. p. 43–53. DOI: https://doi.org/10.1145/3172944.3172977.

KHAN, Alixander S.; LAUSTSEN, Christoffer. Technologies and strategies for metabolic and molecular imaging with hyperpolarized MRI. Journal of Magnetic Resonance Imaging, v. 63, n. 2, p. 310–327, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/jmri.70084.

KHWANDAH, Sinan A. et al. Massive MIMO systems for 5G communications. Wireless Personal Communications, v. 120, p. 2101–2115, 2021.

KOUTELAKIS, George V. et al. DICOMweb™: background and application of the web standard for medical imaging. Journal of Digital Imaging, 2018.

KWONG, Kenneth K. et al. Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 89, n. 12, p. 5675–5679, 1992. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.89.12.5675.

LEDBETTER, M. P. et al. Zero-field remote detection of NMR with a microfabricated atomic magnetometer. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 105, n. 7, p. 2286–2290, 2008. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0711505105.

LOGOTHETIS, Nikos K. et al. Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. Nature, v. 412, p. 150–157, 2001. DOI: https://doi.org/10.1038/35084005.

MACINNES, Joseph J.; DICKERSON, Katherine C.; CHEN, Nan-kuei; ADCOCK, R. Alison. Pyneal: open source real-time fMRI software. Frontiers in Neuroscience, v. 14, art. 900, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00900.

MATHIS, Mackenzie W.; MATHIS, Alexander. Joint modelling of brain and behaviour dynamics with artificial intelligence. Nature Reviews Neuroscience, v. 27, p. 87–100, 2026.

MCFARLAND, Dennis J.; SARNACKI, William A.; WOLPAW, Jonathan R. Brain-computer interface (BCI) operation: optimizing information transfer rates. Biological Psychology, v. 63, n. 3, p. 237–251, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0301-0511(03)00073-5.

MONTAGUE, P. Read et al. Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions. NeuroImage, v. 16, p. 1159–1164, 2002.

NAPADOW, Vitaly et al. Intrinsic brain connectivity in fibromyalgia is associated with chronic pain intensity. Arthritis & Rheumatism, v. 62, p. 2545–2555, 2010.

NELSON, Sarah J. et al. Metabolic imaging of patients with prostate cancer using hyperpolarized [1-^{13}C]pyruvate. Science Translational Medicine, v. 5, art. 198ra108, 2013.

NEUROSTORM. Towards a general-purpose foundation model for functional MRI analysis. Nature Biomedical Engineering, 2026.

NICHOLAS, Michael et al. The IASP classification of chronic pain for ICD-11: chronic primary pain. Pain, v. 160, p. 28–37, 2019.

NORMAN, Kenneth A. et al. Multi-voxel pattern analysis of fMRI data. Trends in Cognitive Sciences, v. 10, p. 424–430, 2006.

OGAWA, Seiji et al. Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 89, n. 13, p. 5951–5955, 1992. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.89.13.5951.

PAIS-VIEIRA, Miguel et al. A brain-to-brain interface for real-time sharing of sensorimotor information. Scientific Reports, v. 3, art. 1319, 2013. DOI: https://doi.org/10.1038/srep01319.

PAIS-VIEIRA, Miguel et al. Building an organic computing device with multiple interconnected brains. Scientific Reports, v. 5, art. 11869, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/srep11869.

PARK, Ilwoo et al. Development of methods and feasibility of using hyperpolarized carbon-13 imaging data for evaluating brain metabolism in patient studies. Magnetic Resonance in Medicine, v. 80, n. 3, p. 864–873, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/mrm.27077.

POSTEL, Jon. Transmission Control Protocol. RFC 793. [S. l.]: Internet Engineering Task Force, 1981.

RAO, Rajesh P. N. et al. A direct brain-to-brain interface in humans. PLOS ONE, v. 9, n. 11, e111332, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111332.

SAVUKOV, I. M.; ROMALIS, M. V. NMR detection with an atomic magnetometer. Physical Review Letters, v. 94, art. 123001, 2005. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.123001.

SCOTTI, Paul et al. Reconstructing the Mind's Eye: fMRI-to-image with contrastive learning and diffusion priors. Advances in Neural Information Processing Systems, v. 36, 2023.

SHANNON, Claude E. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, v. 27, p. 379–423; 623–656, 1948.

SHIRVALKAR, Prasad et al. First-in-human prediction of chronic pain state using intracranial neural biomarkers. Nature Neuroscience, v. 26, p. 1090–1099, 2023.

SITARAM, Ranganatha et al. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. Nature Reviews Neuroscience, v. 18, p. 86–100, 2017.

STOCCO, Andrea et al. Playing 20 Questions with the Mind: collaborative problem solving by humans using a brain-to-brain interface. PLOS ONE, v. 10, n. 9, e0137303, 2015. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137303.

SÜMER-ARPAK, Esra et al. The current status of foundation models in decoding inner speech from non-invasive brain signals: a mini review. Frontiers in Human Neuroscience, v. 20, art. 1838064, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fnhum.2026.1838064.

SUN, Shulei; BOK, Junsoo; JANG, Yongwoo; SEO, Hyemyung. Brain disease-modifying effects of radiofrequency as a non-contact neuronal stimulation technology. International Journal of Molecular Sciences, v. 26, n. 5, art. 2268, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms26052268.

TAKAGI, Yu; NISHIMOTO, Shinji. High-resolution image reconstruction with latent diffusion models from human brain activity. In: IEEE/CVF CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2023. Proceedings [...]. 2023. p. 14453–14463.

TANG, Jerry; LEBEL, Amanda; JAIN, Shailee; HUTH, Alexander G. Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings. Nature Neuroscience, v. 26, p. 858–866, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41593-023-01304-9.

TREEDE, Rolf-Detlef et al. A classification of chronic pain for ICD-11. Pain, v. 156, p. 1003–1007, 2015.

VAFAEI, Shirin et al. Brain-aligning of semantic vectors improves neural decoding of visual stimuli. Communications Biology, v. 9, art. 206, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-025-09482-x.

VERPILLAT, F. et al. Remote detection of nuclear magnetic resonance with an anisotropic magnetoresistive sensor. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 105, n. 7, p. 2271–2273, 2008. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0712129105.

VOLKOW, Nora D. et al. Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism. JAMA, v. 305, n. 8, p. 808–813, 2011. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.2011.186.

WAGER, Tor D. et al. An fMRI-based neurologic signature of physical pain. New England Journal of Medicine, v. 368, p. 1388–1397, 2013.

WANG, Y. et al. Progress, challenges and future of linguistic neural decoding with deep learning. Communications Biology, v. 8, art. 1350, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-025-08511-z.

WANG, Zhen J. et al. Hyperpolarized ^{13}C MRI: state of the art and future directions. Radiology, v. 291, n. 2, p. 273–284, 2019. DOI: https://doi.org/10.1148/radiol.2019182391.

WOO, Choong-Wan et al. Quantifying cerebral contributions to pain beyond nociception. Nature Communications, v. 8, art. 14211, 2017.

YANG, X. et al. A review of Transformer-based fMRI data analysis: from spatiotemporal modeling to brain foundation models. Frontiers in Neuroinformatics, v. 20, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fninf.2026.1869687.

YUSTE, Rafael et al. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI. Nature, v. 551, p. 159–163, 2017.

Normas, documentação técnica e fontes institucionais

DICOM STANDARDS COMMITTEE. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM): PS3.1 – Introduction and Overview. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association, [s. d.]. Disponível em: DICOM PS3.1 — Introduction and Overview. Acesso em: 6 out. 2026.

DICOM STANDARDS COMMITTEE. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM): PS3.18 – Web Services. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association, [s. d.]. Disponível em: DICOM PS3.18 — Web Services. Acesso em: 6 out. 2026.

IEC. IEC 60601-2-33: Medical electrical equipment — Part 2-33: particular requirements for the basic safety and essential performance of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva: International Electrotechnical Commission, [s. d.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12052:2026: Health informatics — Digital imaging and communication in medicine (DICOM) including workflow and data management. 3. ed. Geneva: ISO, 2026.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. MIT Media Lab. AlterEgo: a personalized wearable silent speech interface. Cambridge, MA: MIT Media Lab, [s. d.]. Disponível em: MIT Media Lab — AlterEgo. Acesso em: 6 out. 2026.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. MIT Media Lab. AlterEgo: frequently asked questions. Cambridge, MA: MIT Media Lab, [s. d.]. Disponível em: MIT Media Lab — AlterEgo FAQ. Acesso em: 6 out. 2026.

OECD. Recommendation of the Council on Responsible Innovation in Neurotechnology. OECD/LEGAL/0457. Paris: OECD, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. World Health Organization. Geneva: WHO, [s. d.]. Disponível em: World Health Organization. Acesso em: 6 out. 2026.

DOWELL, Deborah et al. CDC clinical practice guideline for prescribing opioids for pain — United States, 2022. MMWR Recommendations and Reports, Atlanta, v. 71, n. 3, p. 1–95, 2022. DOI: 10.15585/mmwr.rr7103a1. Disponível em: CDC Clinical Practice Guideline for Prescribing Opioids for Pain. Acesso em: 7 out. 2026. CDC

GASKIN, Darrell J.; RICHARD, Patrick. The economic costs of pain in the United States. The Journal of Pain, v. 13, n. 8, p. 715–724, 2012. DOI: 10.1016/j.jpain.2012.03.009. Disponível em: PubMed — The economic costs of pain in the United States. Acesso em: 7 out. 2026. PubMed

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Office of Behavioral and Social Sciences Research. NIH research on managing chronic pain. Bethesda, 23 jun. 2025. Disponível em: NIH Research on Managing Chronic Pain. Acesso em: 7 out. 2026. OBSSR

SANTIAGO, Bruno Vitor Martins et al. Prevalence of chronic pain in Brazil: a systematic review and meta-analysis. Clinics, v. 78, art. 100209, 2023. DOI: 10.1016/j.clinsp.2023.100209. Disponível em: PubMed — Prevalence of chronic pain in Brazil. Acesso em: 7 out. 2026. PubMed

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Low back pain. Geneva: World Health Organization, 19 jun. 2023. Disponível em: WHO — Low back pain. Acesso em: 7 out. 2026. World Health Organization

Observação importante para o texto: onde você escreveu “(Aguiar et al., 2023)” para a prevalência brasileira de 35,70%, deve ficar “(Santiago et al., 2023)”. O estudo encontrou 35,70% na população adulta e 47,32% entre idosos.

אֵל נָא רְפָא נָא לָהּ (El na, refa na lah)
Libro de Números, capítulo 12, versículo 13.
Esta e a oração mais curta da biblia:
“Oh Deus, por favor, cure ela agora.”