ARTÍCULO ORIGINAL

MindNet: la mejor red es humana.

Bienvenido a Internet Neuronal: una arquitectura multimodal de circuito cerrado que integra telecomunicaciones, resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI), resonancia magnética con HP-^{13}C, radiofrecuencia (RF), Pyneal, TCP/IP e inteligencia artificial para adquirir, codificar, transmitir, modular y sincronizar estados neuronales entre individuos.

Juliana Lourenço Lopes Demasi[1], ESTUDIANTE DE MEDICINA (3er semestre)

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

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

Acerca del artículo:

MindNet se propone como una arquitectura de comunicación neuronal multimodal de bucle cerrado, diseñada para la adquisición, el procesamiento, la modulación, la transmisión y la sincronización de estados neuronales entre individuos. La arquitectura propuesta integra imágenes de resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI), imágenes de resonancia magnética metabólica con carbono-13 hiperpolarizado (HP-13C MRI), radiofrecuencia (RF), Pyneal, TCP/IP e inteligencia artificial para crear una representación computacional de los estados neuronales y transmitir esta información digitalmente del emisor al receptor.

La propuesta se basa en avances ya demostrados en diferentes campos, y la hipótesis central de MindNet es que estos componentes, actualmente distribuidos entre diferentes líneas de investigación, pueden integrarse en una arquitectura computacional en la que cada ciclo de adquisición, transmisión, recepción y sincronización produce nueva información utilizada para determinar el siguiente ciclo.

Palabras clave: MindNet; cerebro a cerebro; fMRI; rt-fMRI; HP-1^{3}C MRI; inteligencia artificial; decodificación neuronal; hiperalineación; hiperescaneo; neurofeedback; comunicación neuronal; sistema de bucle cerrado.

RESUMEN

Este estudio explica la solución propuesta, denominada MindNet , como una arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales multimodales de circuito cerrado diseñada para la adquisición, el procesamiento, la representación, la transmisión y la sincronización de información derivada de estados neuronales entre individuos. La propuesta integra principios de neurociencia, inteligencia artificial, teoría de la información e ingeniería de telecomunicaciones, considerando la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y la radiofrecuencia (RF) como mecanismos de adquisición funcional, y la resonancia magnética de HP-^{13}C como modalidad complementaria para la caracterización metabólica en tiempo real, así como algoritmos computacionales para la reducción de ruido, la extracción de características, la decodificación neuronal y la construcción de representaciones digitales de estados cerebrales. Tras la conversión neuronal a digital, estas representaciones pueden codificarse, empaquetarse y transmitirse a través de redes de telecomunicaciones convencionales, incluyendo infraestructuras basadas en TCP/IP, eliminando la necesidad de propagación directa de campos cerebrales o resonancia magnética entre individuos geográficamente separados. Se consideran métodos de alineación interindividual, como la hiperalineación, como posibles mecanismos para establecer espacios de representación compartidos y permitir la comparación de información entre cerebros con organizaciones funcionales individu

El estudio también propone la implementación de MindNet basada en precedentes experimentales existentes respecto a sus principales componentes funcionales, incluyendo el procesamiento de fMRI en tiempo real, la decodificación neuronal no invasiva , la comunicación cerebro a cerebro, Brainets, la transmisión digital de información derivada de la actividad cerebral (DICOM), el hiperescaneo y la alineación de representaciones neuronales entre individuos. La arquitectura propuesta se vuelve bidireccional al incorporar la readquisición del estado cerebral del receptor y su uso concomitante durante el pulso de MRI/RF. Después de recibir la información, la respuesta neuronal se mide, representa y compara con el estado de referencia del emisor, lo que permite calcular los parámetros que mejor traducen sus estados neuronales. Así, el estudio explica la solución y analiza la implementabilidad técnica de la arquitectura MindNet , sugiriendo que variables como la fidelidad, la latencia de extremo a extremo, el ancho de banda neuronal, la tasa de error y la ganancia de bucle cerrado se utilicen para caracterizar el funcionamiento, la eficiencia y la optimización progresiva de MindNet como un sistema de telecomunicaciones neurodigital.

ABSTRACTO

El presente estudio describe la solución propuesta, denominada MindNet, como una arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales multimodal de circuito cerrado diseñada para la adquisición, el procesamiento, la representación, la transmisión y la sincronización de información derivada de estados neuronales entre individuos. La arquitectura propuesta integra principios de neurociencia, inteligencia artificial, teoría de la información e ingeniería de telecomunicaciones, considerando la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y la radiofrecuencia (RF) como mecanismos para la adquisición funcional, la resonancia magnética de carbono-13 hiperpolarizado (HP-^{13}C MRI) como una modalidad complementaria para la caracterización metabólica en tiempo real, y algoritmos computacionales para la reducción de ruido, la extracción de características, la decodificación neuronal y la construcción de representaciones digitales de estados cerebrales. Tras la conversión neuronal a digital, estas representaciones pueden codificarse, empaquetarse y transmitirse a través de redes de telecomunicaciones convencionales, incluyendo infraestructuras basadas en TCP/IP, eliminando la necesidad de la propagación directa de campos generados por el cerebro o por resonancia magnética entre individuos geográficamente separados. Los métodos de alineación interindividual, como la hiperalineación, se consideran mecanismos potenciales para establecer espacios de representación compartidos y permitir la comparación de información entre cerebros con organizaciones funcionales individuales.

El estudio también propone la implementación de MindNet basándose en precedentes existentes para sus componentes funcionales principales, incluyendo el procesamiento de fMRI en tiempo real, la decodificación neuronal no invasiva, la comunicación cerebro a cerebro, Brainets, la transmisión digital de información derivada de la actividad cerebral, incluso a través de infraestructura de imágenes basada en DICOM, el hiperescaneo y la alineación de representaciones neuronales entre individuos. La arquitectura propuesta se vuelve bidireccional al incorporar la readquisición del estado cerebral del receptor y su uso concomitante durante la secuencia de pulsos de MRI/RF. Tras la recepción de la información, la respuesta neuronal se mide, representa y compara con el estado de referencia del emisor, lo que permite el cálculo de parámetros que caracterizan con mayor precisión sus respectivos estados neuronales. De esta manera, el estudio explica la solución propuesta y analiza la implementabilidad técnica de la arquitectura MindNet, proponiendo que variables como la fidelidad, la latencia de extremo a extremo, el ancho de banda neuronal, la tasa de error y la ganancia de bucle cerrado se utilicen como métricas cuantitativas para caracterizar el funcionamiento del sistema, evaluar la eficiencia y guiar la optimización progresiva de MindNet como un sistema de telecomunicaciones neurodigitales.

PERFIL DEL AUTOR



Ju Lourenço es estudiante de tercer año de medicina y cursa Fundamentos de Neurociencia a través del programa HarvardX/edX. Su experiencia profesional incluye trabajar en el sector de las telecomunicaciones y productos avanzados de internet, participando en la creación, implementación, promoción y descontinuación de productos, así como en el desarrollo de servicios de valor añadido e iniciativas digitales. Su trabajo abarcó no solo aspectos comerciales y de marketing, sino también la interacción con equipos multidisciplinarios y la participación en la toma de decisiones sobre la implementación técnica y estratégica de productos avanzados de internet y telecomunicaciones. Su experiencia profesional también incluye trabajar en empresas de Business Intelligence, ingeniería y TI.

Su formación académica refleja la misma característica interdisciplinaria mencionada anteriormente e incluye un MBA en Finanzas del IBMEC (Instituto Brasileño de Mercados de Capitales), un MBA en Marketing de la FGV (Fundación Getulio Vargas), una maestría en Comunicación de Masas de la PUC-Rio (Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro) y una licenciatura en Publicidad y Relaciones Públicas. Ju fue becaria de la FAPERJ y su investigación se centró en la clasificación.

y el consumo.

Esta combinación de comunicación, análisis de mercado, finanzas, tecnología e investigación ha contribuido a una trayectoria profesional marcada por la convergencia del conocimiento técnico, el comportamiento humano y el desarrollo de nuevos productos. Ju también es periodista de profesión e inventor por vocación.

Vivió doce años en el Área de la Bahía de San Francisco, en el ecosistema tecnológico de Silicon Valley, una experiencia que reforzó su afinidad con la cultura de la innovación y la tecnología. Paralelamente, desarrolló una carrera artística y literaria, publicando obras artísticas y académicas en distintos momentos. Esta coexistencia entre tecnología y creación culminó en una definición que resume a la perfección su trayectoria: «demasiado técnico para ser solo artista y demasiado artista para ser solo técnico».

Ju regresó a Brasil tras sufrir una negligencia médica que la dejó discapacitada.
Ahora confinada a una silla de ruedas, la experiencia de vivir constantemente con dolor y la dificultad de encontrar un tratamiento adecuado la llevaron a retomar sus estudios, lo que dio como resultado la solución MindNet.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

De la experiencia a la solución: Arquitectura neurodigital de distancia cero

Tras quedar discapacitada durante el parto, comencé a usar silla de ruedas o muletas para desplazarme, y mi propio cuerpo se convirtió, en cierto modo, en objeto de estudio para mí, una forma de supervivencia. A partir de la experiencia de vivir con dolor crónico durante cinco años, descubrí cómo adaptarme y sobrellevar esta condición que, en algunos casos —y particularmente en el mío— puede incluso asemejarse a una forma de tortura, debido a su intensidad y persistencia. La OMS estima que una parte significativa de la población mundial, alrededor del 30%, también vive con dolor crónico, generalmente definido como dolor que persiste o reaparece durante más de tres meses. Por lo tanto, a nivel personal, este estudio nace, como una flor de loto en el barro, de una gran necesidad personal y global.

Mi hijo y yo seguimos esperando que el tribunal haga efectivo nuestro derecho a la restitutio in integrum, el principio jurídico de reparación completa, que busca restablecer, en la medida de lo posible, la situación que habría existido si el daño no se hubiera producido, mediante una compensación total por las pérdidas sufridas. (CGC-23-11182, CGC-25-622102) Con recursos limitados por la situación descrita anteriormente, y mientras buscamos la compensación correspondiente por los daños sufridos, he comenzado los tratamientos disponibles para mí, aunque estos presentan riesgos y efectos secundarios, sin que necesariamente proporcionen una recuperación completa. Después de desarrollar fibromialgia como consecuencia de la lesión medular, entonces me propuse el objetivo de encontrar una alternativa.

Fue a causa de la fibromialgia que comprendí que, para estudiar el dolor, necesitaba entender mejor el cerebro. Ahí comenzó mi interés por la neurociencia. Y, como no podía abandonar mi trayectoria profesional, mi formación técnica en telecomunicaciones e informática integró naturalmente la tecnología en esta investigación.

Fue a partir de este encuentro entre mi experiencia personal, la neurociencia y la tecnología que surgió la propuesta MindNet, objeto de solicitudes de patente ante el INPI (Instituto Nacional de la Propiedad Industrial de Brasil) y la USPTO (Universidad Estatal de Tocantins), y que utiliza diferentes tecnologías al unísono para investigar la posibilidad de ayudar al cerebro en una de las tareas que se han vuelto centrales para mi investigación: modular el dolor a través de la sincronización de estados neuronales.

Este estudio surge, por lo tanto, de la necesidad de establecer un puente técnicamente definido entre campos que tradicionalmente se han investigado de forma relativamente independiente en la lucha contra el dolor crónico: la neurociencia de los procesos de transducción y representación neuronal y la ingeniería de telecomunicaciones responsable de la transmisión de información a larga distancia. De este modo, MindNet representa la unión entre dos campos que marcan mi propia trayectoria: desde la perspectiva de la neurociencia, una comprensión aún más profunda de nuestra mente y, a través de las telecomunicaciones, una conexión aún más sólida con Internet.

Índice

1 Introducción 1.1

De la adquisición neuronal a la comunicación cerebro a cerebro

1.2 Contextualización y problema de investigación 1.3 El dolor crónico como motivación clínica y científica 1.4 De la neurociencia a las telecomunicaciones neurodigitales 1.5 Objetivo y alcance del estudio

2. Seguridad ética y protección de los participantes

2.1 "…hacer el bien o no hacer el mal." - Hipócrates1

3 Concepto y arquitectura general de MindNet 3.1

Definición de MindNet 3.2

Transducción digital-física-biológica 3.3 Arquitectura multimodal de bucle cerrado 3.4 Flujo general de información

4 Fundamentos neurocientíficos de MindNet

4.1 El cerebro como sistema de transducción 4.2 Nuestro primer estado neuronal: el dolor en el emisor 4.3 De la electricidad a la química, y de vuelta a la electricidad 4.4 Metabolismo cerebral y demanda de energía 4.5 Cómo se produce la lectura del estado neuronal

4.6 La contribución metabólica de MindNet 4.7 La interacción biofísica de la tecnología y el cerebro 4.8 Del cerebro del emisor a una representación digital 4.9 "Más amor, por favor…" (dicho brasileño)

5. El estado neuronal se convierte en datos.

5.1 Los orígenes de MindNet 5.2

Infraestructura de telecomunicaciones urbanas y adquisición remota en MindNet 5.3 IA de MindNet: inteligencia artificial como capa para la traducción, reconstrucción y sincronización neurodigital 5.4 Pyneal y DICOM en la arquitectura de MindNet 5.5 RMN de HP-^{13}C en MindNet: lectura metabólica nuclear, adquisición dinámica y mayor sensibilidad

6. La epidemia silenciosa del dolor crónico 6.1 Un desafío para la salud mundial

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

7. Conclusión y perspectivas de implementación de MindNet 7.1 Uniendo la ciencia, la salud y el futuro

8. Los orígenes personales de MindNet

8.1 Mi peregrinación hasta ahora

9. Referencias bibliográficas

"Nadie es libre hasta que todos sean libres." — Fannie Lou Hamer, 1971.

1. Introducción

1.1 De la adquisición neuronal a la comunicación cerebro a cerebro

Al mismo tiempo que recopila información derivada de la actividad cerebral del emisor/
El receptor, una red neuronal MindNet, procesa esta información, convirtiéndola en representaciones digitales y transmitiéndola a través de su arquitectura tecnológica, que es objeto de solicitudes de patente en el INPI y la USPTO. En esta arquitectura, la RF, la rt-fMRI y la HP-^{13}C MRI actúan como modalidades de adquisición y caracterización de señales funcionales y metabólicas, mientras que la inteligencia artificial, integrada con herramientas de procesamiento en tiempo real como el software Pyneal, participa en el procesamiento, la reducción de ruido, la extracción de características y la conversión de los datos adquiridos de un estado neuronal. Una vez digitalizada y codificada, esta información puede transportarse a través de Internet, lo que permite a las personas conectadas en diferentes regiones intercambiar información derivada de sus estados neuronales.

Los diversos componentes tecnológicos necesarios para la construcción de esta arquitectura ya cuentan con precedentes científicos y técnicos, como se demostrará a lo largo de este artículo. Tecnologías como la resonancia magnética (RM), la resonancia magnética funcional en tiempo real (RMf-RT) y la RM con HP-^{13}C demuestran que los fenómenos físicos y fisiológicos del organismo pueden obtenerse, detectarse y convertirse en señales medibles, que posteriormente se reconstruyen y procesan como información digital. Durante la adquisición de imágenes por resonancia magnética, los campos magnéticos y los pulsos de radiofrecuencia interactúan con las propiedades físicas de los tejidos, y las señales resultantes son detectadas por el equipo y convertidas computacionalmente en datos e imágenes capaces de proporcionar información sobre las estructuras, funciones o procesos metabólicos del organismo humano.

Durante décadas, los sistemas de resonancia magnética (RM) han implementado una cadena tecnológica de interacción física, adquisición y procesamiento de información sobre estados neuronales: el equipo establece condiciones electromagnéticas controladas, aplica secuencias de pulsos, detecta las señales producidas por el sistema físico bajo estudio y las transforma en representaciones digitales interpretables. Una vez generada, esta información puede almacenarse, compartirse y transmitirse entre equipos, hospitales, médicos y sistemas de salud mediante infraestructuras y estándares digitales como DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). De esta forma, la información proveniente de un examen realizado en un lugar específico puede convertirse en datos digitales y ser analizada por profesionales o sistemas informáticos ubicados geográficamente distantes.

La arquitectura MindNet, por lo tanto, extiende la cadena de adquisición-digitalización-transmisión al tratar la información derivada de los estados neuronales como elementos de un sistema de telecomunicaciones neurodigital. En lugar de limitar el flujo a la adquisición de datos de un individuo y la posterior visualización de sus imágenes por un profesional, MindNet propone procesar la información derivada del estado neuronal del emisor, convertirla en representaciones digitales transmisibles, transportarla a través de Internet a otro punto final y utilizar una interfaz receptora para convertirla en una entrada biológicamente procesable para el receptor. Simultáneamente, la respuesta neuronal del receptor puede ser readquirida, procesada y transmitida a través del canal de retorno. El factor diferenciador

Por lo tanto, el enfoque propuesto no consiste simplemente en utilizar la resonancia magnética para enviar datos —algo que los sistemas médicos digitales ya hacen—, sino en integrar la radiofrecuencia como sistema de telecomunicaciones, la adquisición neuronal, el procesamiento computacional, la inteligencia artificial, las telecomunicaciones, la interfaz del receptor y la retroalimentación en una arquitectura bidireccional diseñada para el intercambio de información derivada de estados neuronales entre individuos geográficamente separados.

Por lo tanto, el argumento central no radica en que las distintas funciones necesarias para la arquitectura —adquisición de señales neuronales, procesamiento en tiempo real, representación digital, transmisión de datos a través de redes, procesamiento remoto y retroalimentación— ya cuenten con precedentes tecnológicos independientes. La cuestión científica y de ingeniería que plantea MindNet consiste en cómo integrar estos componentes en una arquitectura integral y determinar mentalmente su rendimiento, fidelidad, latencia, capacidad de información y ganancia en bucle cerrado.

De esta forma, MindNet establece una cadena de transducción bidireccional en la que la información del emisor, tras ser convertida en una representación digital y transportada a través de la infraestructura de telecomunicaciones, llega físicamente al sistema receptor conectado a MindNet. En este punto final, la información recibida se decodifica y se convierte, mediante la interfaz de recepción, en una modalidad biológicamente procesable por el sistema nervioso del receptor. La respuesta neuronal resultante puede ser adquirida y analizada por la propia arquitectura, lo que permite verificar si el estado neuronal producido en el receptor muestra correspondencia, similitud o convergencia con la representación de referencia derivada del emisor. Cuando se cumplen los criterios de sincronización previamente establecidos por el sistema, el emisor y el receptor pueden considerarse sincronizados operativamente dentro de MindNet. En este sentido, la sincronización no significa que ambos cerebros se vuelvan neurológicamente idénticos, sino que sus representaciones neuronales relevantes han alcanzado un grado de convergencia medible y previamente definido dentro del espacio representacional utilizado por el sistema.

Mientras el receptor recibe y procesa esta información, MindNet puede adquirir simultáneamente la respuesta cerebral mediante resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI), convirtiendo las señales medibles asociadas al estado neuronal en nuevos datos digitales. Estos datos pueden procesarse, codificarse y transmitirse a través de la infraestructura de telecomunicaciones al punto final del emisor, constituyendo un canal de retorno. De este modo, la distancia geográfica entre individuos deja de ser, en principio, una limitación determinada por el alcance físico de las señales cerebrales o los campos magnéticos producidos por los equipos de resonancia magnética. Tras la transducción neurodigital, la comunicación a larga distancia depende principalmente de aspectos específicos de los sistemas de telecomunicaciones y el procesamiento distribuido, como la conectividad, el ancho de banda, la latencia, la fluctuación, la integridad de los datos, la seguridad y la sincronización temporal. Por lo tanto, la representación digital derivada de la actividad neuronal puede transportarse entre personas conectadas a la red, independientemente de la distancia física que las separe, siempre que cada una disponga de los componentes de adquisición, procesamiento e interfaz necesarios para el funcionamiento de la arquitectura.

Por lo tanto, MindNet establece un circuito en el que la información digital derivada del estado cerebral del emisor se transporta al receptor y se convierte en una entrada.

La información es biológicamente procesable, mientras que la respuesta neuronal producida en el receptor se adquiere, se convierte en una nueva representación digital y se transmite en sentido contrario. De este modo, el receptor deja de ser simplemente el destino final de la comunicación y, simultáneamente, funciona como una nueva fuente de información para el circuito. Esta reciprocidad permite que la adquisición, la transmisión, la recepción, la respuesta neuronal, la verificación y la retroalimentación se produzcan de forma continua y potencialmente simultánea, estableciendo la base para una comunicación neurodigital bidireccional de bucle cerrado. Por consiguiente, en la arquitectura propuesta, la comunicación cerebro a cerebro a larga distancia no depende de la transmisión directa de la actividad neuronal a través del espacio entre individuos, sino de la transducción sucesiva entre estados biológicos y representaciones digitales, utilizando la infraestructura de telecomunicaciones como canal de conexión entre los dos sistemas neuronales.

1.2 Contextualización y problema de investigación

La neuroimagen funcional, la computación en tiempo real y las interfaces cerebro-computadora han hecho posible adquirir señales cerebrales, extraer características y transformar algunas de estas mediciones en información digital. El contraste BOLD estableció la base de la resonancia magnética funcional moderna, mientras que los estudios neurofisiológicos aclararon su relación indirecta con la actividad neuronal, el flujo sanguíneo y el metabolismo (Ogawa et al., 1992; Kwong et al., 1992; Logothetis et al., 2001; Hillman, 2014). Los sistemas de resonancia magnética funcional en tiempo real y Pyneal han reducido el intervalo entre la adquisición y el análisis, lo que permite utilizar los resultados derivados de volúmenes recientes durante la propia sesión (Sitaram et al., 2017; MacInnes et al., 2020). El HP-13C permitió la adquisición en tiempo real de datos metabólicos. El problema de investigación de MindNet es determinar si estos y otros componentes actualmente dispersos pueden operar como una arquitectura única centrada en permitir la adquisición, el transporte y la modulación de estados neuronales. La cuestión central no es si las señales cerebrales pueden generar datos transmisibles, sino si la adquisición, decodificación, transmisión, recepción, modulación y retroalimentación pueden formar un circuito cerrado seguro.

1.3 El dolor crónico como motivación clínica y científica Según la OMS,

el dolor crónico, como condición clínica independiente, afecta actualmente al 30% de la población mundial. Esta condición repercute en la movilidad, el sueño, la autonomía, el trabajo y la vida social (Treede et al., 2015; Nicholas et al., 2019). Los estudios de resonancia magnética funcional (RMf) en este ámbito ya han identificado patrones multivariados relacionados con la nocicepción y los componentes no nociceptivos, mientras que los registros intracraneales prolongados han permitido estimar las variaciones espontáneas del dolor crónico en entornos cotidianos (Wager et al., 2013; Woo et al., 2017; Shirvalkar et al., 2023). En la fibromialgia, las alteraciones en la conectividad funcional y las respuestas neuronales amplificadas a los estímulos demuestran que la afección implica la reorganización de redes distribuidas, y no la disfunción aislada de un único centro cerebral (Cook et al., 2004; Napadow et al., 2010; Cifre et al., 2012). MindNet se basa en estos avances para investigar la representación, la comparación y la modulación adaptativa de los estados neuronales asociados al dolor, con el objetivo de establecer una vía alternativa para su control y tratamiento.

1.4 De la neurociencia a las telecomunicaciones neurodigitales

Las estaciones base de radio de las redes celulares son las candidatas más obvias para contribuir a la infraestructura física distribuida de MindNet. Las redes 4G y 5G ya constituyen una extensa infraestructura urbana de transmisión y recepción, compuesta por antenas, amplificadores de radiofrecuencia, procesamiento digital de señales, sistemas de sincronización y computación en red. En 5G, tecnologías como Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) y la formación de haces añaden capacidades de control espacial a la transmisión, utilizando múltiples elementos de antena coordinados para formar y dirigir dinámicamente haces de radiofrecuencia.

Por lo tanto, en las ciudades contemporáneas ya existe una infraestructura capaz de generar, modular, transmitir, recibir y procesar señales de radiofrecuencia en diferentes bandas de frecuencia.
Las ondas en el rango de decenas o cientos de MHz y en frecuencias más altas pertenecen al mismo dominio físico de la ingeniería de radiofrecuencia que se utiliza en diferentes aplicaciones de telecomunicaciones e imágenes por resonancia magnética, cada una con sus propias características específicas.

Desde el punto de vista arquitectónico, la infraestructura celular 5G/6G y los sistemas de radiofrecuencia definidos por software representan un importante precedente tecnológico para MindNet. La tecnología existente demuestra que una ciudad ya posee una parte sustancial de una "estructura de radiofrecuencia" capaz de generar, controlar, dirigir, recibir y transportar señales electromagnéticas de forma distribuida. Estas capacidades no constituyen, por sí solas, un sistema de neuroimagen, pero proporcionan recursos de ingeniería que pueden incorporarse y adaptarse a la capa física de MindNet.

La principal dificultad en la adquisición neuronal remota, sin embargo, no reside únicamente en la producción o transmisión de radiofrecuencia. El desafío fundamental radica en detectar una respuesta cerebral suficientemente específica y con una relación señal-ruido adecuada que permita su identificación, procesamiento y reconstrucción computacional. En los sistemas de resonancia magnética convencionales, las bobinas receptoras se colocan cerca del cuerpo precisamente porque su geometría y proximidad influyen directamente en la sensibilidad y la relación señal-ruido de la señal adquirida.

MindNet propone solucionar este problema mediante una arquitectura distinta a la de la resonancia magnética convencional. En lugar de depender de un escáner y una bobina receptora colocadas directamente alrededor de la cabeza, el sistema combina una infraestructura de radiofrecuencia distribuida con procesamiento computacional e inteligencia artificial MindNet para la detección e identificación de señales, la reducción de ruido, la corrección de interferencias y la reconstrucción de representaciones neurodigitales. En este modelo, la inteligencia artificial mejora la capacidad computacional para separar, identificar y procesar la información presente en las señales detectadas, lo que contribuye a una mayor sensibilidad y selectividad del procesamiento.

La propuesta encuentra precedentes tecnológicos relevantes en la resonancia magnética de campo bajo, la resonancia magnética de campo ultrabajo, los magnetómetros atómicos, la detección remota por RMN, las bobinas de radiofrecuencia inalámbricas y los sistemas de acoplamiento inductivo. Estos avances demuestran que ciertos elementos de la arquitectura física de la resonancia magnética pueden reorganizarse en configuraciones diferentes a las de un escáner clínico convencional.

La infraestructura de telecomunicaciones urbanas puede proporcionar a MindNet una capa de radiofrecuencia distribuida, mientras que la arquitectura de MindNet añade la capa específica de adquisición neurodigital, que incluye el control de parámetros físicos, la detección, la reducción de ruido, el procesamiento computacional y la extracción de información relevante. El objetivo es integrar principios y tecnologías ya empleados por separado en telecomunicaciones, resonancia magnética y procesamiento computacional para desarrollar un sistema específico de adquisición neuronal remota.

La resonancia magnética con HP-^{13}C añade una dimensión metabólica a esta arquitectura. La hiperpolarización aumenta sustancialmente la magnetización detectable de los núcleos de ^{13}C, lo que permite la monitorización dinámica del metabolismo de sustratos marcados, como el [1-^{13}C]piruvato, y sus productos metabólicos.

Un ejemplo importante utiliza piruvato marcado con carbono-13 e hiperpolarizado.
Tras su administración, este sustrato participa en procesos metabólicos y permite monitorizar productos como el lactato y el bicarbonato marcado. Park et al. demostraron la aplicación de la resonancia magnética cerebral con HP-^{13}C en pacientes utilizando [1-^{13}C]piruvato. Los datos dinámicos permitieron observar la llegada del piruvato y las señales correspondientes de sus productos metabólicos, incluyendo lactato y bicarbonato. El estudio demostró la viabilidad de utilizar este método para la evaluación dinámica del metabolismo en el cerebro humano.

Esto proporciona a MindNet dos clases complementarias de información fisiológica: una dimensión funcional y hemodinámica obtenida mediante resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y una dimensión metabólica obtenida mediante resonancia magnética de protón-1^{3}C (HP-1^{3}C MRI). La integración de estas modalidades permite estructurar una representación multimodal del estado cerebral, combinando información asociada a la actividad funcional con información relacionada con el metabolismo cerebral.

La posibilidad de ampliar la distancia de detección mediante esta combinación es un aspecto fundamental de la ingeniería de MindNet. La hiperpolarización aumenta considerablemente la magnetización y, por consiguiente, la detectabilidad del ^{13}C. Este incremento en la sensibilidad es una característica relevante para investigar estrategias de adquisición a distancias mayores que las utilizadas en configuraciones convencionales. Por lo tanto, la hiperpolarización proporciona ventajas en la detectabilidad y la adquisición a larga distancia.

En este sentido, MindNet establece un puente tecnológico entre infraestructuras que actualmente existen de forma independiente: por un lado, redes urbanas capaces de producir, controlar, dirigir, recibir y transportar señales de radiofrecuencia (RF); por otro, técnicas de resonancia magnética (RM) capaces de extraer información funcional y metabólica del organismo. La brecha tecnológica reside en la conexión entre estos dos ámbitos: establecer una cadena de adquisición remota con la sensibilidad, selectividad y relación señal-ruido suficientes para detectar información cerebral útil sin reproducir la configuración física de un escáner convencional. MindNet se centra precisamente en esta integración, combinando infraestructura de RF distribuida, métodos de adquisición de RM, hiperpolarización, procesamiento computacional e inteligencia artificial en una arquitectura diseñada para la adquisición neurodigital remota.

1.5 Objetivo y alcance del estudio

El objetivo es definir MindNet como una arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales y establecer una agenda estructurada para su validación técnica, que se implementará tan pronto como la autora obtenga la financiación necesaria para el desarrollo de su tecnología. En cuanto a MindNet, la premisa es su aplicación terapéutica en la modulación de estados neuronales entre dos individuos, con el fin de alterar la percepción y la sensación de dolor crónico en el receptor. La arquitectura no se basa en tecnologías completamente nuevas, sino en la integración de fenómenos, métodos y sistemas que ya han sido demostrados de forma independiente. La literatura científica proporciona precedentes para la adquisición de actividad cerebral, el procesamiento de neuroimágenes en tiempo real, la decodificación computacional de estados neuronales, la alineación de representaciones entre individuos, la transmisión digital de información derivada del cerebro, las interfaces cerebro-cerebro y la producción de una respuesta medible en el receptor. MindNet organiza estos componentes en una única cadena de telecomunicaciones neurodigitales y añade sus propios mecanismos para la adquisición remota, la integración multimodal y el funcionamiento en bucle cerrado.

El proceso comienza con la adquisición de datos. La resonancia magnética funcional (RMf) es una tecnología consolidada para registrar indirectamente los cambios en la actividad cerebral mediante la señal BOLD. Los trabajos pioneros de Ogawa et al. y Kwong et al. sentaron las bases de la RMf-BOLD, mientras que Logothetis et al. investigaron su relación con la actividad neuronal. Estos estudios establecen la primera relación necesaria para la arquitectura: los cambios en la actividad neuronal pueden producir cambios fisiológicos medibles mediante resonancia magnética. MindNet utiliza esta información funcional como una de las fuentes para construir la representación del estado cerebral.

La adquisición se puede procesar en tiempo real. MacInnes et al. desarrollaron Pyneal específicamente para el procesamiento de rt-fMRI, demostrando una arquitectura modular capaz de recibir datos del sistema de resonancia magnética, procesarlos durante la adquisición y poner los resultados a disposición de otros componentes computacionales. Pyneal también emplea comunicación en red entre sus componentes. De este modo, la conversión de las neuroimágenes adquiridas en información computacional útil en tiempo real ya cuenta con una implementación independiente.

La resonancia magnética con [1-^{13}C] hiperpolarizado añade una segunda dimensión. Park et al. demostraron en el cerebro humano el uso de piruvato [1-^{13}C] hiperpolarizado y la adquisición dinámica de información relacionada con el piruvato y sus productos metabólicos, como el lactato y el bicarbonato. La hiperpolarización aumenta considerablemente la magnetización detectable del ^{13}C, lo que permite monitorizar procesos metabólicos que serían mucho más difíciles de observar mediante resonancia magnética convencional. De este modo, MindNet puede estructurar su adquisición multimodal a partir de dos clases diferentes de información: resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) para características funcionales y hemodinámicas, y resonancia magnética con [1-^{13}C] hiperpolarizado para características metabólicas.

La literatura también demuestra que la organización física de un experimento de RMN no tiene por qué limitarse a la configuración de un escáner clínico convencional. Estudios de

---

2 Artículo 16

La detección remota por RMN ha separado espacialmente las etapas de polarización, codificación y detección. Ledbetter et al., por ejemplo, demostraron la detección remota por RMN utilizando un magnetómetro atómico microfabricado, mientras que Verpillat et al. realizaron la detección con un sensor magnetoresistivo. Estos experimentos son particularmente relevantes como precedente físico, ya que demuestran que los componentes de la RMN pueden reorganizarse espacialmente y que se pueden emplear diferentes tecnologías para la detección. Sin embargo, aún no demuestran la adquisición de datos del cerebro humano a través de una ciudad; esta extensión de distancia, sin el transporte físico de la muestra magnetizada, constituye precisamente uno de los pasos específicos que MindNet debe validar.

Tras la adquisición, la señal cerebral se transforma en una representación computacional. Este paso cuenta con un sólido precedente. Tang et al. demostraron que los modelos computacionales pueden utilizar registros de fMRI no invasivos para reconstruir información semántica continua a partir de representaciones corticales. Este resultado es particularmente relevante, ya que muestra que los patrones distribuidos de fMRI pueden convertirse en una representación computacional que contiene información discriminable sobre los estados cerebrales, si bien el rendimiento depende del individuo y del entrenamiento del modelo.

Dos cerebros no presentan exactamente la misma organización funcional espacial. El trabajo de Haxby y sus colegas sobre la hiperalineación estableció una solución computacional a este problema al demostrar que los patrones funcionales individuales pueden transformarse en un espacio de representación compartido de alta dimensión. En lugar de requerir que un vóxel emisor se corresponda físicamente con el mismo vóxel receptor, la comparación puede realizarse entre representaciones funcionalmente alineadas. En MindNet, este principio proporciona la base para convertir las representaciones individuales del emisor y del receptor en un espacio en el que se puede calcular su similitud y convergencia.

Una vez convertida en información digital, la representación neuronal puede utilizar sistemas de telecomunicaciones TCP/IP convencionales para recorrer la distancia entre individuos. En esta etapa, la distancia física ya no depende de la propagación de la señal de resonancia magnética entre los dos cerebros: lo que viaja a través de la red es una representación digital del estado adquirido. La literatura sobre interfaces cerebro-cerebro ya ha demostrado que las señales derivadas de la actividad cerebral pueden procesarse, codificarse y enviarse a través de redes digitales a otra ubicación.

Pais-Vieira et al. demostraron en 2013 una interfaz cerebro-cerebro en tiempo real en la que la información sensoriomotora obtenida de un animal codificador se procesaba y utilizaba para influir en un segundo animal decodificador. El estudio demostró la transferencia de información conductualmente relevante entre dos cerebros y constituye uno de los precedentes experimentales más importantes para la idea de una cadena codificadora.
transmisión → decodificador.

Esta demostración se extendió posteriormente a humanos. Grau et al. realizaron una comunicación cerebro a cerebro no invasiva entre individuos geográficamente separados, combinando adquisición cerebral, codificación binaria, transmisión por internet y estimulación del receptor. El estudio es especialmente relevante para MindNet porque

Esto demuestra que la distancia geográfica puede superarse mediante la capa digital de comunicación, en lugar de requerir que la señal cerebral física original recorra toda esa distancia.

Rao et al. también demostraron una interfaz cerebro-cerebro humana no invasiva. La actividad cerebral del emisor fue adquirida e interpretada por dicha interfaz.
Una computadora, transmitida a través de una red y utilizada para producir una respuesta en el sistema motor del receptor a través de estimulación magnética transcraneal. Los autores caracterizaron el resultado como una forma rudimentaria de transmisión directa cerebro a cerebro. La importancia de este experimento para MindNet radica en la demostración completa de la secuencia adquisición → interpretación → transmisión digital →

Interfaz del receptor → respuesta neural/conductual.

Stocco et al. desarrollaron este principio mediante una interfaz cerebro-cerebro en una tarea colaborativa de preguntas y respuestas. Cinco parejas de participantes utilizaron la interfaz para identificar un objeto mediante respuestas verdaderas o falsas, y el estudio incluyó una condición de control. El rendimiento fue significativamente superior al del grupo de control. Este resultado es particularmente importante para la agenda de MindNet, ya que demuestra no solo la comunicación entre dos individuos, sino también una metodología que permite comparar el efecto de la interfaz con una condición de control.

Posteriormente, Jiang y colaboradores ampliaron el concepto con BrainNet, una interfaz cerebro-cerebro.
Un cerebro que involucra a varias personas realizando una tarea conjuntamente. El sistema integró la adquisición, el procesamiento, la transmisión y la recepción de información neuronal, demostrando que una arquitectura de comunicación cerebral puede funcionar como una red y no solo como una conexión aislada entre dos individuos.

Estos experimentos también aclaran la etapa final de MindNet: recibir datos digitales en una computadora no equivale a que el cerebro del receptor reciba esa información. Es necesario un paso de transducción entre la representación digital y el sistema nervioso. En los experimentos con humanos realizados por Rao, Grau, Stocco y Jiang, esta función se llevó a cabo mediante interfaces de estimulación, principalmente TMS, lo que demostró que una representación derivada del emisor puede determinar una intervención aplicada al receptor y producir una respuesta observable.

Es en esta etapa donde MindNet presenta una importante diferencia arquitectónica. El objetivo no es simplemente reproducir EEG → Internet → TMS, sino integrar la adquisición mediante resonancia magnética de radiofrecuencia, la caracterización funcional y metabólica, el procesamiento de inteligencia artificial, la representación neurodigital, las telecomunicaciones y una capa de interacción con el receptor. Trabajos previos demuestran que las interfaces físicas pueden cerrar la cadena cerebro-computadora-cerebro.

Finalmente, MindNet transforma esta secuencia en un bucle cerrado. Tras interactuar con el receptor, su actividad cerebral se adquiere, procesa y convierte en una representación \(Z_R\), que se compara con la representación \(Z_S\) del emisor. Por lo tanto, el receptor deja de ser simplemente el destino final de la información: su respuesta regresa al sistema y comienza a determinar la siguiente operación. El trabajo sobre resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y neurofeedback sienta precedentes para la adquisición y el procesamiento de la actividad cerebral.

En tiempo real, mientras que los experimentos de comunicación cerebro a cerebro demuestran que la información neuronal puede viajar a través de una cadena digital y producir respuestas medibles en otro individuo, MindNet combina estas dos líneas en un ciclo de emisor → adquisición → adquisición. representación → transmisión → receptor → nueva adquisición → comparación → retroalimentación.

La aplicación terapéutica propuesta centra este circuito en la víctima de dolor crónico. La premisa es que el sistema puede adquirir y representar el estado neuronal del emisor y utilizarlo como referencia para promover y medir la modulación del estado neuronal del receptor, con el fin de modificar su experiencia dolorosa. La bibliografía citada establece precedentes experimentales para varios componentes necesarios para esta cadena, pero la eficacia analgésica de la integración de MindNet constituye una innovación disruptiva.

Así, la contribución de MindNet radica en reunir todas estas funcionalidades en una arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales de circuito cerrado. La resonancia magnética funcional (fMRI) basada en la señal BOLD demuestra la adquisición funcional; la resonancia magnética con HP-^{13}C añade la caracterización metabólica; Pyneal demuestra el procesamiento de fMRI en tiempo real; la decodificación neuronal demuestra la transformación de patrones cerebrales en representaciones computacionales; la hiperalineación ofrece un mecanismo para la comparación entre individuos; la resonancia magnética nuclear remota demuestra que las funciones de RMN pueden desacoplarse espacialmente; las interfaces de Pais-Vieira, Grau, Rao, Stocco y Jiang demuestran diferentes formas de adquisición, transmisión digital y recepción de información derivada del cerebro. El siguiente paso es determinar el rendimiento de la integración específica realizada por MindNet y, finalmente, establecer su seguridad y beneficio clínico en la modulación del dolor crónico.

2. Seguridad, ética y protección de los participantes

2.1 “…hacer el bien o no hacer el mal.” - Hipócrates3

La seguridad durante el uso de la tecnología MindNet debe analizarse dentro del contexto tecnológico en el que se inserta su arquitectura. Las sociedades contemporáneas ya operan continuamente con infraestructuras eléctricas, magnéticas, digitales y de radiofrecuencia utilizadas por redes eléctricas, radio, televisión, telefonía móvil, Wi-Fi y otros sistemas de telecomunicaciones. Por lo tanto, MindNet no introduce la radiofrecuencia ni las telecomunicaciones como fenómenos físicos sin precedentes en el entorno humano, sino que integra tecnologías de adquisición, procesamiento, transmisión e interacción en una arquitectura de telecomunicaciones neurodigital. La existencia previa de estas infraestructuras y sus respectivos estándares de exposición constituyen un importante precedente técnico y normativo para la definición cuantitativa de los parámetros de seguridad operativa de MindNet.

Por lo tanto, la implementación humana de MindNet debe regirse por los principios de seguridad desde el diseño y minimización de riesgos, con la definición previa de los límites de exposición y otras variables físicas relevantes para la configuración utilizada. El sistema debe incorporar mecanismos de interrupción independientes, y la seguridad debe determinarse por la exposición incremental atribuible a MindNet y las características específicas de su uso, y no por la mera presencia de infraestructura electromagnética en el entorno.

---

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

Desde una perspectiva legal y bioética, la participación inicial debe ser estrictamente voluntaria y estar condicionada a los criterios de elegibilidad definidos en el protocolo, la evaluación médica y neurológica, los exámenes de imagen pertinentes y la obtención de un consentimiento informado legalmente válido. La mera presencia de una persona dentro del área de cobertura física de una infraestructura de telecomunicaciones no constituye consentimiento, autorización ni renuncia a ningún derecho. La conectividad técnica no equivale a autorización para la interacción neuronal. La activación individual de la tecnología debe depender de una expresión afirmativa de voluntad, autenticación, autorización y consentimiento específico, preservando permanentemente el derecho a rechazar, retirarse y desconectarse.

En las investigaciones con sujetos humanos, el protocolo debe cumplir con las normas de protección de participantes aplicables y someterse a la correspondiente revisión ética y regulatoria antes de su implementación. La validación técnica debe incluir una evaluación formal, una valoración médica y neurológica estandarizada, estudios de imagen cuando sea pertinente, una evaluación de la seguridad del sistema y de la ingeniería, el consentimiento informado y el registro sistemático de eventos adversos, incidentes y cuasi accidentes. Cuando se utilicen sistemas de resonancia magnética, deben observarse las mejores prácticas y los requisitos técnicos aplicables a la configuración empleada.

De este modo, la seguridad de MindNet se basa en cuatro elementos acumulativos: tecnologías físicas con precedentes de uso humano y parámetros de seguridad conocidos para condiciones de uso específicas; control cuantitativo de la exposición incremental producida por la configuración específica de MindNet; supervisión médica, científica, ética, técnica y regulatoria durante su validación; y autonomía individual protegida por el consentimiento informado, la opción de participación, el derecho a retirarse y el derecho a desconectarse.

3. Concepto y arquitectura general de MindNet

3.1 Definición de MindNet En la

arquitectura MindNet, el emisor y el receptor participan continuamente en el mismo circuito de transducción. En el emisor, la actividad neuronal produce cambios electrofisiológicos, metabólicos y hemodinámicos que pueden caracterizarse mediante diferentes modalidades de adquisición y neuroimagen, incluyendo rt-fMRI y HP-^{13}C MRI. Durante la adquisición de MRI, los pulsos de radiofrecuencia interactúan físicamente con los núcleos presentes en el tejido cerebral, mientras que la magnetización nuclear resultante produce señales de resonancia detectables por el sistema. Estas señales se adquieren, reconstruyen y procesan computacionalmente para obtener una representación digital del estado neuronal.

MindNet propone extender esta relación a una arquitectura bidireccional: la representación neuronal del emisor se convierte en parámetros físicos de una interfaz de radiofrecuencia diseñada para interactuar con el cerebro del receptor, mientras que la respuesta neuronal, metabólica y hemodinámica resultante es readquirida por el sistema de forma simultánea o inmediata. De esta manera, la interacción con el receptor y la adquisición de su respuesta se integran en un mismo ciclo operativo. La nueva información obtenida se procesa y compara con la representación del emisor, generando una medida de respuesta, similitud o convergencia que regresa al sistema y guía el ciclo subsiguiente. Así, la recepción, la transducción, la adquisición, la comparación y la retroalimentación constituyen un proceso continuo de bucle cerrado.

con el objetivo terapéutico de promover la neuromodulación capaz de interferir con los circuitos neuronales asociados al mantenimiento del dolor en el receptor y, en este contexto, interrumpir o reducir progresivamente el ciclo de dolor crónico del otro participante en la comunicación.

MindNet también incluye otros componentes, mecanismos, etapas y posibilidades de aplicación que no se pueden explorar en este artículo sin extenderlo excesivamente. En trabajos futuros, cada una de estas tecnologías y sus respectivas funciones dentro de la arquitectura se presentarán y analizarán en detalle de forma individual.

3.2 Transducción digital-física-biológica

En la arquitectura MindNet, el emisor y el receptor integran un circuito continuo de transducción neurobiológica, física y digital. En el emisor, los estados neuronales emergen de la actividad electroquímica de las poblaciones neuronales —incluidos los flujos iónicos, los potenciales de membrana, la transmisión sináptica y la señalización dependiente de Ca^{2}— y se asocian con cambios metabólicos y hemodinámicos mediados, entre otros mecanismos, por el acoplamiento neurovascular. Estos cambios proporcionan variables fisiológicas medibles mediante neuroimagen: la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) caracteriza dinámicamente los cambios relacionados con el contraste BOLD, mientras que la resonancia magnética con HP-^{13}C añade información sobre procesos metabólicos específicos. Durante la adquisición de la resonancia magnética, los campos de radiofrecuencia interactúan con la magnetización nuclear, y la señal de resonancia resultante se detecta, reconstruye y procesa computacionalmente. Los algoritmos de Pyneal y MindNet transforman estos datos en una representación neurodigital $Z_S(t)$, que puede codificarse y transmitirse a través de una infraestructura de telecomunicaciones.

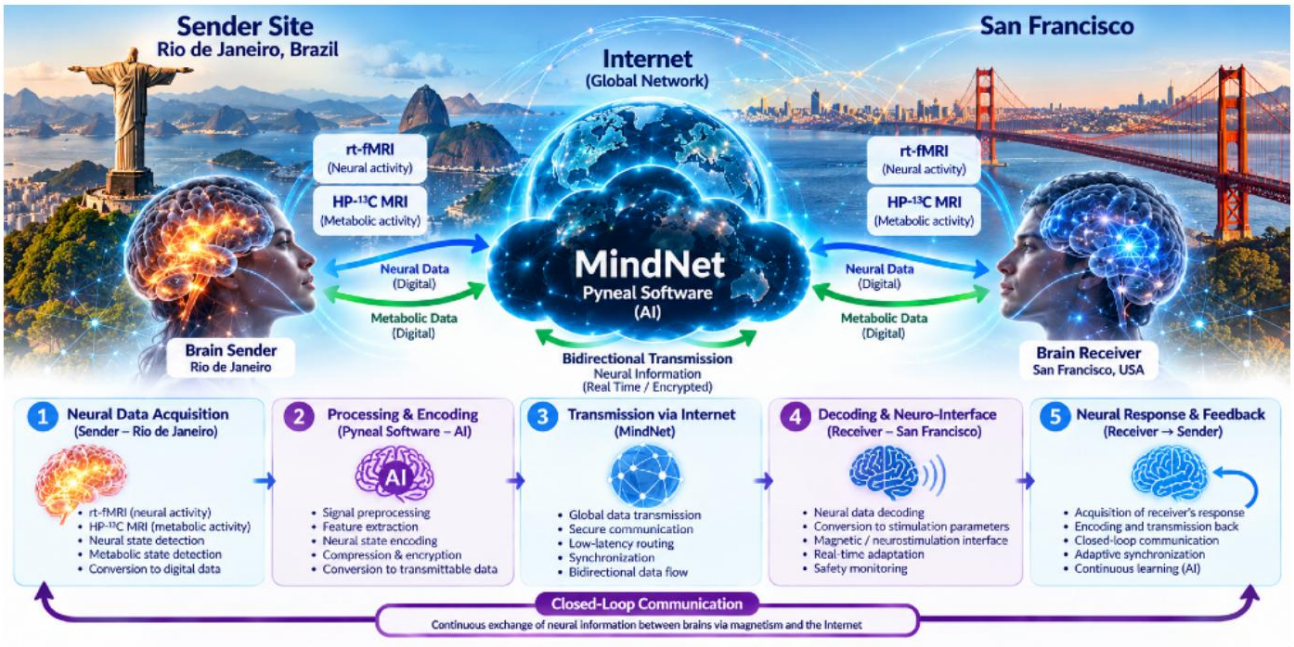
En el receptor, MindNet propone complementar esta cadena con una transducción en la dirección digital-física-biológica. La representación $Z_S(t)$, recibida por la red, se convierte en parámetros físicos de una interfaz RF diseñada para producir una interacción neuronal selectiva, mientras que la respuesta electrofisiológica, metabólica y hemodinámica resultante se readquiere continuamente y se convierte en $Z_R(t)$. La comparación entre $Z_S(t)$ y $Z_R(t)$ proporciona una señal de convergencia o error que alimenta el ciclo subsiguiente. De esta manera, la adquisición, la transmisión, la transducción, la readquisición, la comparación y la retroalimentación no son eventos aislados, sino componentes acoplados temporalmente del mismo circuito cerrado. En la aplicación terapéutica propuesta, este circuito tiene como objetivo promover la neuromodulación en el receptor y modificar progresivamente los estados neuronales asociados con el mantenimiento del dolor crónico, permitiendo que la respuesta producida se mida continuamente y se utilice para ajustar la interacción subsiguiente.

3.3 Arquitectura de bucle múltiple cerrado

El pulso de radiofrecuencia utilizado en la resonancia magnética mediada por radiofrecuencia (RM-RF) establece una relación física de transmisión-recepción con el sistema de espín: la RF interactúa con la magnetización nuclear y, tras la excitación, la evolución de esta magnetización genera la señal de resonancia detectada por el sistema receptor. En la arquitectura MindNet, esta relación bidireccional entre la RF y el tejido cerebral se aprovecha como base física para una transducción neurodigital bidireccional. Con la ayuda de la RM-RF en tiempo real para la caracterización funcional y la RM-HP-1^{3}C para...

Mediante la caracterización metabólica en tiempo real y la inteligencia artificial para la codificación y decodificación, la información derivada del estado neuronal del emisor se representa digitalmente, se convierte en parámetros físicos de una interfaz de radiofrecuencia y se utiliza para producir una respuesta neuronal correspondiente en el receptor. Simultáneamente, o inmediatamente después de esta interacción, se adquiere y procesa el nuevo estado funcional y metabólico del receptor, lo que permite compararlo con el estado de referencia del emisor y cerrar el ciclo de comunicación y retroalimentación.

3.4 Flujo general de información



MindNet puede entenderse como una cadena bidireccional de transducción neurobiológica, física y digital, en la que los estados neuronales se convierten en representaciones neurodigitales transmisibles y, a la inversa, estas representaciones se convierten en parámetros físicos destinados a interactuar con el sistema neuronal del receptor, cuya respuesta se adquiere de nuevo y se incorpora al circuito cerrado.

O, para decirlo aún más sucintamente:

Neural → Físico → Digital → Telecomunicaciones → Digital → Físico → Neural

4 Fundamentos neurocientíficos de MindNet

4.1 El cerebro como sistema de transducción En

términos de neurociencia, la cadena comienza con la actividad electroquímica neuronal, pasa por el metabolismo cerebral y el acoplamiento neurovascular, se convierte en una señal física medible mediante técnicas de neuroimagen y posteriormente se convierte en un

representación computacional. En el receptor, MindNet propone recorrer parte de esta cadena en sentido inverso, estableciendo una secuencia integrada de transducciones.

La transducción es el proceso mediante el cual una forma de energía, estímulo, señal o información se convierte en otra forma que un sistema biológico o físico puede reconocer, procesar o transmitir. En el sistema nervioso humano, los procesos de transducción ocurren continuamente y constituyen principios fundamentales de la neurofisiología.

Por ejemplo, cuando la luz llega a la retina, los fotorreceptores convierten la energía lumínica en cambios electroquímicos. Cuando la piel se somete a presión, los mecanorreceptores convierten el tacto mecánico en señales eléctricas. Cuando un neurotransmisor se une a ciertos receptores neuronales, un evento químico altera la conductancia iónica de la membrana y, en consecuencia, la actividad eléctrica de la célula. Por lo tanto, el cerebro puede entenderse como un complejo sistema de transducción biológica, en el que los fenómenos químicos, eléctricos, metabólicos, hemodinámicos y físicos permanecen interconectados.

En la arquitectura MindNet, el emisor y el receptor participan continuamente en una cadena de transducción que añade a estos procesos biológicos etapas de adquisición mediante neuroimagen, procesamiento computacional y telecomunicaciones. En el emisor, la información se origina en un estado fisiológico del cerebro, se convierte en señales medibles, se procesa y codifica como una representación neurodigital y se transmite a través de la infraestructura de telecomunicaciones. En el receptor, MindNet propone realizar la ruta complementaria, convirtiendo la representación neurodigital recibida en parámetros de una interfaz destinada a la interacción con el sistema neuronal. La respuesta cerebral resultante se readquiere, procesa y compara continuamente con el estado de referencia, cerrando el circuito mediante retroalimentación.

Esta organización puede resumirse como una cadena continua:

Neural → fisiológico/metabólico → magnético → digital → telecomunicaciones →
digital → magnético → neuronal → nueva adquisición → retroalimentación

Rao et al. demostraron una interfaz cerebro-cerebro humana no invasiva en la que la información cerebral de un emisor se adquiría mediante EEG, se procesaba y se transmitía por internet, y posteriormente se utilizaba para producir una respuesta motora en el receptor mediante estimulación magnética transcraneal (EMT). Este experimento estableció una cadena funcional de adquisición, procesamiento, telecomunicación, transducción física y respuesta del receptor.

Stocco et al. impulsaron este principio demostrando la comunicación interactiva cerebro a cerebro en una tarea de preguntas y respuestas. La información de un participante se adquiría, transmitía y convertía en estimulación para el otro, lo que permitía que las respuestas cerebrales influyeran en la interacción posterior. El estudio también empleó una condición simulada, lo que les permitió distinguir el rendimiento asociado con la interfaz del observado en la condición de control.

Jiang et al., a través de BrainNet, expandieron esta organización a una red que involucra a múltiples participantes. El sistema combinó el registro cerebral y la transmisión.

La estimulación digital y del receptor permitió utilizar información de diferentes cerebros en una tarea colaborativa. Estos experimentos proporcionan precedentes para el principio más general de un cerebro → adquisición →

procesamiento → telecomunicaciones → procesamiento → nueva adquisición → cerebro.

MindNet amplía esta organización proponiendo una cadena multimodal y continuamente cerrada, que incorpora resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) para la caracterización funcional, resonancia magnética de HP-1³C para la caracterización metabólica, inteligencia artificial para el procesamiento, codificación y decodificación, telecomunicaciones para la transmisión de la representación neurodigital y una interfaz física de radiofrecuencia (RF) para la etapa digital-física-biológica en el receptor. La respuesta producida en el receptor regresa inmediatamente al sistema para su nueva adquisición y procesamiento, transformando la comunicación en un circuito continuo de transducción, readquisición, comparación y retroalimentación. En la aplicación terapéutica propuesta, este circuito se dirige a la neuromodulación de estados neuronales asociados con el mantenimiento del dolor crónico en el receptor.

4.2 Nuestro primer estado neural: dolor en el emisor

Supongamos que quien lo experimenta siente dolor. El dolor no se corresponde con una sola onda, molécula o región cerebral. Es una experiencia multidimensional que resulta de la actividad coordinada de múltiples componentes del sistema nervioso, incluyendo mecanismos nociceptivos periféricos, la médula espinal, el tálamo y diferentes regiones corticales y subcorticales involucradas en las dimensiones sensorial-discriminativa, afectiva, cognitiva y autonómica de la experiencia dolorosa.

En el cerebro, este estado corresponde a patrones distribuidos y dinámicamente organizados de actividad neuronal y glial. En lugar de una única "señal de dolor", diferentes poblaciones celulares y circuitos participan en la construcción y el mantenimiento del estado neural asociado a la experiencia dolorosa.

A nivel neuronal, existe una distribución desigual de iones entre los ambientes intracelular y extracelular. El sodio (Na^+), el potasio (K^+), el calcio (Ca^{2+}) y el cloruro (Cl^-) atraviesan selectivamente la membrana celular a través de diferentes canales, bombas y transportadores, contribuyendo al establecimiento y modificación del potencial de membrana.

Cuando los estímulos excitatorios producen una despolarización suficiente para alcanzar el umbral, los canales de Na^+ dependientes de voltaje se abren rápidamente. Entrada de Na^+
Modifica el potencial eléctrico de la membrana y produce la fase ascendente del potencial de acción. Posteriormente, la inactivación de los canales de Na^+ y la apertura de los canales de K^+ favorecen la salida de K^+, promoviendo la repolarización de la membrana. La transmisión de esta actividad a lo largo de los circuitos neuronales también implica la liberación de neurotransmisores, la entrada de Ca^{2+} en las terminales presinápticas y la generación de respuestas postsinápticas.

El estado neuronal relacionado con el dolor se asocia, por lo tanto, con patrones de actividad electroquímica organizados espacial y temporalmente, distribuidos entre poblaciones neuronales y sus redes. El mantenimiento de estos procesos requiere energía para preservar y restaurar los gradientes iónicos, sostener la transmisión sináptica y mantener la homeostasis celular.

Attwell y Laughlin analizaron cuantitativamente la relación entre los potenciales de acción, la actividad sináptica y el consumo de energía cerebral. Los autores estimaron el presupuesto energético para la señalización en la sustancia gris cerebral y demostraron que una parte sustancial de la energía se destina a la señalización neuronal, incluyendo los potenciales de acción y los procesos postsinápticos relacionados con el glutamato. Este principio establece un vínculo particularmente importante para la arquitectura MindNet.

Estado neuronal → actividad electroquímica → demanda de energía → metabolismo cerebral → cambios hemodinámicos/metabólicos medibles

Es precisamente en esta transición donde el estado electroquímico distribuido comienza a producir consecuencias fisiológicas que pueden contribuir a su caracterización mediante modalidades como la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y, en otra dimensión, la resonancia magnética de HP-1^3C. La neuroimagen no mide directamente cada potencial de acción individual; permite acceder a consecuencias fisiológicas agregadas relacionadas con la actividad de estas poblaciones celulares.

4.3 De la electricidad a la química, y de vuelta a la electricidad

Cuando un potencial de acción llega al terminal presináptico de una neurona, se produce otro paso fundamental de transducción. La despolarización de la membrana abre los canales de Ca^{2} dependientes de voltaje, lo que permite la entrada de calcio al terminal presináptico.
El aumento de la concentración intracelular de Ca^{2} participa en el mecanismo molecular que desencadena la fusión de las vesículas sinápticas con la membrana presináptica y la consiguiente liberación de neurotransmisores en la hendidura sináptica.

Dependiendo del circuito implicado, esta comunicación puede utilizar glutamato, GABA, dopamina, noradrenalina, serotonina, acetilcolina, neuropéptidos y diversas moléculas de señalización. Tras su liberación, los neurotransmisores se unen a los receptores presentes en la célula postsináptica y modifican su actividad.

En los receptores ionotrópicos, la unión del neurotransmisor controla directamente la apertura o el cierre de los canales iónicos, modificando la conductancia de la membrana y su potencial eléctrico. En los receptores metabotrópicos, la unión activa mecanismos intracelulares que pueden involucrar proteínas G, segundos mensajeros y cascadas bioquímicas capaces de modular canales iónicos, enzimas, el metabolismo celular y otras funciones neuronales.

Por lo tanto, la información sufre transformaciones sucesivas:

Actividad eléctrica → entrada de Ca^{2} → liberación química → receptor postsináptico → cambio iónico/bioquímico → nueva actividad eléctrica

Esta conversión entre fenómenos eléctricos, iónicos y químicos constituye una de las formas fundamentales de transducción en el sistema nervioso.

La importancia energética de este proceso también es consistente con el análisis de Attwell y Laughlin, quien elaboró un presupuesto energético para la señalización neuronal en la materia gris, atribuyó una parte sustancial del consumo de energía a dicha señalización.

neuronal, incluyendo potenciales de acción y procesos postsinápticos asociados al glutamato.

La actividad electroquímica y sináptica requiere energía, y esta demanda metabólica está relacionada con el metabolismo cerebral y el acoplamiento neurovascular, creando el puente fisiológico entre la actividad neuronal y las variables que se pueden observar mediante BOLD-fMRI y, a través de mecanismos distintos, mediante HP-1^3C MRI.

4.4 Metabolismo cerebral y demanda de energía

La actividad cerebral requiere energía. La transmisión sináptica, la restauración de los gradientes iónicos, el transporte celular, el reciclaje de neurotransmisores y muchos otros procesos necesarios para la señalización neuronal aumentan la demanda metabólica de las regiones funcionalmente activas.

La relación entre la señalización neuronal y el consumo de energía fue analizada cuantitativamente por Attwell y Laughlin, quienes elaboraron un balance energético para la señalización en la sustancia gris cerebral. El estudio demostró que los potenciales de acción y, en particular, los procesos relacionados con la transmisión sináptica y las corrientes postsinápticas representan componentes importantes de este consumo de energía.

Esta actividad involucra no solo a las neuronas, sino también a los astrocitos, las células endoteliales, los pericitos y otros componentes de la unidad neurovascular. El glutamato, el Ca^{2} , el ATP, la adenosina, el óxido nítrico y diversos mediadores vasoactivos participan en una compleja comunicación entre la actividad neuronal, el metabolismo celular y la circulación cerebral.

La participación del pericito en este proceso tiene un respaldo particularmente relevante.
Hall et al. demostraron que la actividad neuronal y la señalización glutamatérgica están asociadas con mecanismos capaces de promover la dilatación capilar a través de la relajación de los pericitos, lo que proporciona evidencia de su participación en la regulación local del flujo sanguíneo cerebral y en los mecanismos relacionados con las señales utilizadas por la neuroimagen funcional.

Cuando aumenta la actividad en una región cerebral específica, el acoplamiento neurovascular produce una respuesta vascular local. El flujo sanguíneo cerebral regional se modifica y, en este contexto, no se trata simplemente de un "aumento del volumen sanguíneo en el cerebro", sino de cambios regionales en el flujo sanguíneo, el volumen y la oxigenación asociados con la actividad neuronal.

El aumento regional del flujo sanguíneo puede compensar proporcionalmente el aumento local del consumo de oxígeno, modificando la proporción entre oxihemoglobina y desoxihemoglobina. Esta alteración es particularmente importante para la resonancia magnética, ya que la desoxihemoglobina es paramagnética y produce cambios locales en la susceptibilidad magnética que influyen en la señal de resonancia.

Es en este punto donde la cadena de transducción alcanza una variable física detectable mediante resonancia magnética funcional (fMRI):

actividad electroquímica → actividad sináptica → demanda de energía → metabolismo → acoplamiento neurovascular → flujo sanguíneo/oxigenación → HbO/HbR → alteración magnética local → señal BOLD

Esta relación tiene una base sólida. En 1992, Kwong et al. demostraron cambios en la señal mediante resonancia magnética asociados a la estimulación sensorial humana y a cambios fisiológicos locales relacionados con la actividad cerebral. Casi al mismo tiempo, Ogawa et al. demostraron cambios en el contraste dependientes de la oxigenación sanguínea durante la estimulación visual humana, estableciendo las bases fundamentales de lo que más tarde se conocería como resonancia magnética funcional con contraste (BOLD-fMRI). Posteriormente, Hillman revisó los mecanismos celulares, metabólicos y vasculares que conectan la actividad neuronal con la respuesta hemodinámica.

Para la construcción de MindNet, este paso es fundamental: la resonancia magnética funcional (RMf) no necesita detectar directamente cada potencial de acción. La actividad neuronal desencadena una sucesión de transducciones electroquímicas, metabólicas, vasculares y magnéticas que producen una huella física medible. La RMf en tiempo real permite la monitorización dinámica de esta huella funcional, mientras que la RM con HP-1^3C puede añadir una dimensión metabólica complementaria a la caracterización del estado cerebral.

4.5 ¿Cómo se lee el estado neuronal?

La resonancia magnética funcional BOLD con contraste no detecta directamente cada potencial de acción de cada neurona. Detecta cambios hemodinámicos relacionados con la oxigenación sanguínea que acompañan indirectamente a los cambios en la actividad neuronal.

Uno de los experimentos fundamentales para establecer esta relación fue realizado por Logothetis et al., quienes registraron simultáneamente señales neuronales intracorticales y respuestas BOLD en la corteza visual. El estudio comparó potenciales de campo locales (PCL), actividad multiunitaria y respuestas BOLD, demostrando una relación particularmente estrecha entre BOLD y potenciales de campo locales. Este resultado proporcionó una base neurofisiológica importante para interpretar la resonancia magnética funcional (RMf) como una medida indirecta de la actividad de poblaciones neuronales, fuertemente relacionada con el procesamiento sináptico e intracortical.

Hillman describe esta relación dentro del acoplamiento neurovascular: los cambios en la actividad neuronal desencadenan respuestas celulares y vasculares que modifican localmente el flujo sanguíneo, el volumen y la oxigenación. Dado que la desoxihemoglobina (HbR) es paramagnética, los cambios en su concentración modifican la susceptibilidad magnética local y, por consiguiente, la señal BOLD.

Por lo tanto, cuando MindNet utiliza resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI), existe una cadena fisiológica intermedia entre la actividad neuronal y los datos adquiridos. La actividad neuronal modifica la demanda de energía; las neuronas, los astrocitos y los componentes vasculares participan en el acoplamiento neurovascular; se modifican el flujo sanguíneo y la oxigenación; cambia la relación HbO /HbR; estos cambios modifican las propiedades magnéticas locales; y la adquisición de fMRI transforma estas variaciones en datos que pueden procesarse computacionalmente.

La secuencia se puede representar directamente de la siguiente manera:

Actividad electroquímica y sináptica → demanda de energía → acoplamiento neurovascular → CBF/CBV/oxigenación → HbO /HbR → susceptibilidad magnética → BOLD → rt-fMRI → datos digitales

La información expresada originalmente en la dinámica electroquímica distribuida de las redes neuronales adquiere así una representación hemodinámica medible.
Esta representación no es una copia directa de los potenciales de acción: es una consecuencia fisiológica relacionada espacial y temporalmente con la actividad de las poblaciones neuronales que la originaron.

El trabajo de Ogawa et al., Kwong et al., Logothetis et al., Hall et al. y Hillman, en conjunto, constituye una base particularmente sólida para esta etapa de la arquitectura MindNet: Ogawa y Kwong establecieron fundamentos experimentales para el contraste dependiente de la oxigenación; Logothetis vinculó la actividad cerebral BOLD y la actividad neuronal; Hall demostró mecanismos microvasculares que involucran pericitos; y Hillman integró los mecanismos celulares, metabólicos y vasculares del acoplamiento neurovascular.

4.6 La contribución metabólica de MindNet HP-1³C MRI

añade otro nivel a la formación fisiológica de la arquitectura de MindNet.
Si bien el contraste BOLD de la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) proporciona principalmente información relacionada con los cambios hemodinámicos y de oxigenación asociados con la actividad cerebral, la obtención de imágenes de carbono-13 hiperpolarizado permite monitorizar ciertas transformaciones metabólicas con una sensibilidad sustancialmente mayor.

Uno de los ejemplos principales utiliza piruvato [1-¹³C] hiperpolarizado. El piruvato participa en vías metabólicas cuyos productos marcados pueden ser rastreados dinámicamente.
Entre ellos se encuentra el [1-¹³C]lactato, producido por intercambio metabólico catalizado por la lactato deshidrogenasa (LDH). También se puede detectar el ¹³C-bicarbonato, relacionado con el metabolismo oxidativo del piruvato a través de la piruvato deshidrogenasa (PDH).

Park et al. demostraron la viabilidad de la obtención de imágenes metabólicas cerebrales con piruvato [1-¹³C] hiperpolarizado en humanos. La adquisición dinámica permitió observar la llegada del piruvato al cerebro y las señales correspondientes de sus productos metabólicos, incluidos el lactato y el bicarbonato, lo que demuestra la posibilidad de caracterizar espacial y temporalmente aspectos del metabolismo cerebral mediante resonancia magnética con HP-¹³C.

MindNet llega así a tener conceptualmente dos clases de información complementarias:

rt-fMRI/BOLD → actividad neuronal → acoplamiento neurovascular → CBF/CBV → HbO /HbR → Símbolo en negrita

HP-[1-¹³C]piruvato → distribución/metabolismo → lactato + bicarbonato → información metabólica

Esta combinación resulta relevante porque una modalidad caracteriza principalmente las consecuencias hemodinámicas de la actividad neuronal, mientras que la otra aporta información dinámica sobre el metabolismo. En MindNet, estos datos pueden integrarse.

mediante computación para construir una representación multimodal del estado fisiológico del cerebro.

La resonancia magnética HP-1³C constituye un canal de caracterización metabólica dentro de la arquitectura. Actualmente no es una tecnología consolidada para la transmisión de contenido neuronal entre individuos. Sin embargo, en MindNet, su función es complementar la caracterización del estado cerebral y permitir el seguimiento de la evolución metabólica a lo largo del circuito cerrado.

4.7 La interacción biofísica entre la tecnología y el cerebro

Aquí pasamos de la neurofisiología a la biofísica de la resonancia magnética. El cerebro contiene una gran cantidad de agua y, por lo tanto, una alta concentración de núcleos de hidrógeno (^1H). Estos núcleos poseen espín y momento magnético. Cuando el individuo se somete al campo magnético estático principal de la resonancia magnética, denominado B_0, se produce una pequeña diferencia entre las poblaciones de posibles estados de energía, generando una magnetización macroscópica resultante orientada predominantemente en la dirección de B_0.

Al mismo tiempo, los momentos magnéticos nucleares exhiben precesión alrededor de la dirección de B_0. La frecuencia de esta precesión depende de la intensidad del campo magnético y de la relación giromagnética del núcleo, y está determinada por la relación de Larmor:

$$f = (\gamma/2\pi) B$$

Para el hidrógeno, $\gamma/2\pi$ es aproximadamente 42,58 MHz/T. Por lo tanto, en un instrumento de 3 T, por ejemplo, la frecuencia de Larmor de los protones es cercana a 127,7 MHz.

El sistema de resonancia magnética genera un campo magnético de radiofrecuencia, denominado B_1, aplicado transversalmente a B_0 con una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia de los núcleos que se van a excitar. Cuando se cumplen las condiciones de resonancia, se produce una transferencia de energía del campo de radiofrecuencia al sistema de espines, modificando la orientación de la magnetización macroscópica.

La amplitud y la duración del pulso de radiofrecuencia, junto con otros parámetros de la secuencia, determinan el ángulo de rotación de la magnetización, denominado ángulo de inversión.
De esta forma, se pueden producir pulsos correspondientes a 90°, 180° u otros ángulos utilizados en diferentes secuencias de resonancia magnética, por ejemplo.

Por lo tanto, en esta etapa existe una transducción física bien establecida:

Energía electromagnética de radiofrecuencia → interacción resonante con espines nucleares → cambio de magnetización

Tras finalizar el pulso, esta magnetización evoluciona y regresa progresivamente al equilibrio mediante procesos de relajación. La magnetización transversal precesiva genera un flujo magnético variable e induce un voltaje eléctrico en la bobina receptora, lo que permite la detección de la señal de RM. La cadena puede entonces extenderse:

RF (B_1) → espines → magnetización → precesión/relajación → señal de RM → recepción (B_1) → señal eléctrica → digitalización

Este aspecto es especialmente importante para describir MindNet, ya que demuestra que, dentro de la resonancia magnética, existe una cadena física bidireccional de transmisión y recepción: el equipo transmite radiofrecuencia para interactuar con el sistema de espín y, posteriormente, recibe la señal producida por la evolución de esta magnetización. Esto no implica, en sí mismo, la transmisión de información neuronal de un cerebro a otro; sin embargo, establece la base física de la transducción de señales de radiofrecuencia en el tejido, sobre la cual la arquitectura MindNet propone añadir adquisición funcional, procesamiento neurodigital, telecomunicaciones y conectividad de bucle cerrado.

Los trabajos clásicos de Ogawa et al. y Kwong et al. demostraron que esta física de la resonancia magnética se puede utilizar para detectar cambios de señal asociados con la activación del cerebro humano, estableciendo bases experimentales para la resonancia magnética funcional basada en el contraste BOLD.

4.8 Del cerebro del emisor a una representación digital

Aquí pasamos de la neurofisiología a la biofísica de la resonancia magnética. El cerebro contiene una gran cantidad de agua y, por lo tanto, una alta concentración de núcleos de hidrógeno (^1H). Estos núcleos poseen espín y momento magnético. Cuando el individuo se somete al campo magnético estático principal de la resonancia magnética, denominado B_0, se produce una magnetización macroscópica resultante orientada predominantemente en la dirección de B_0.

Además, los espines precesan alrededor de la dirección de B_0. La frecuencia de esta precesión depende de la intensidad del campo magnético y de la relación giromagnética del núcleo, y está determinada por la relación de Larmor:

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

Para el hidrógeno, $\gamma/2\pi$ es aproximadamente 42,58 MHz/T. Por lo tanto, en un instrumento de 3 T, por ejemplo, la frecuencia de Larmor de los protones es cercana a 127,7 MHz.

El sistema de resonancia magnética genera un campo magnético de radiofrecuencia, denominado B_1, aplicado transversalmente a B_0 con una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia de los núcleos que se van a excitar. Cuando se cumplen las condiciones de resonancia, se produce una transferencia de energía del campo de radiofrecuencia al sistema de espines, modificando la orientación de la magnetización macroscópica.

La amplitud y la duración del pulso de radiofrecuencia, junto con otros parámetros de la secuencia, determinan el ángulo de rotación de la magnetización, denominado ángulo de inversión.
De esta forma, se pueden producir pulsos correspondientes a 90°, 180° u otros ángulos utilizados en diferentes secuencias de resonancia magnética, por ejemplo.

Por lo tanto, en esta etapa existe una transducción física bien establecida:

Energía electromagnética de radiofrecuencia → interacción resonante con espines nucleares → cambio de magnetización

Tras finalizar el pulso, esta magnetización evoluciona y regresa progresivamente al equilibrio mediante procesos de relajación. La magnetización transversal precesiva genera un flujo magnético variable e induce un voltaje eléctrico en la bobina receptora, lo que permite la detección de la señal de resonancia magnética.

Este factor es especialmente importante para describir MindNet, ya que demuestra que, dentro de la resonancia magnética, existe una cadena física bidireccional de transmisión y recepción: el equipo transmite radiofrecuencia para interactuar con el sistema de espín y, posteriormente, recibe la señal producida por la evolución de esta magnetización. Esto, en sí mismo, establece la base física de la transducción de señales de radiofrecuencia en el tejido, sobre la cual la arquitectura MindNet propone añadir adquisición funcional, procesamiento neurodigital, telecomunicaciones y conectividad de circuito cerrado.

Los trabajos clásicos de Ogawa et al. y Kwong et al. demostraron que esta física de la resonancia magnética se puede utilizar para detectar cambios de señal asociados con la activación del cerebro humano, estableciendo bases experimentales para la resonancia magnética funcional basada en el contraste BOLD.

4.9 “Más amor, por favor…” (Dicho brasileño)

Desde este punto, los datos de las diferentes modalidades de MindNet pueden someterse a procesamiento computacional. En rt-fMRI, este procesamiento puede incluir corrección de movimiento, reducción de ruido, normalización, extracción de características, identificación de patrones espaciales y temporales y decodificación neuronal. En HP-
Es posible utilizar resonancia magnética de 1³C para procesar datos metabólicos, separar las señales de piruvato y sus productos, y extraer características metabólicas. Es importante distinguir entre estos dos flujos de trabajo, ya que Pyneal se desarrolló específicamente para resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI), y no como software de procesamiento de HP-1³C.

Pyneal se integra en este ámbito como una infraestructura abierta para la adquisición y el procesamiento de imágenes fMRI en tiempo real. MacInnes et al. desarrollaron el sistema en Python con una arquitectura modular, flujos de análisis personalizables y comunicación entre sus componentes computacionales, lo que permite que los resultados obtenidos durante la adquisición estén disponibles en tiempo real para aplicaciones externas, incluidos paradigmas de neurofeedback.

El siguiente paso consiste en transformar los datos adquiridos en representaciones computacionales del estado cerebral. Tang et al. sentaron un precedente particularmente importante al demostrar un decodificador no invasivo capaz de reconstruir el lenguaje continuo a partir de representaciones semánticas corticales registradas mediante resonancia magnética funcional (RMf). El resultado demuestra que los patrones distribuidos de RMf pueden contener información suficientemente estructurada como para permitir una reconstrucción computacional del contenido semántico.

De este modo, el estado fisiológico del emisor atraviesa sucesivamente diferentes dominios:

neural → electroquímico → sináptico → metabólico/hemodinámico → magnético → Señal de RM → digital → características → representación neurodigital

A partir de este punto, se produce un cambio conceptual importante: la distancia ya no se considera necesariamente como la propagación de la señal fisiológica original. Una vez construida una representación digital, esta puede codificarse, empaquetarse y transportarse a través de redes convencionales basadas en TCP/IP.

En el ejemplo citado anteriormente, en el que el remitente padece dolor crónico, su estado inicial es una experiencia dolorosa. MindNet busca adquirir características medibles del estado cerebral asociado a esta experiencia y convertirlas en una representación neurodigital. Esto no significa que exista un único "código del dolor"; la representación puede integrar múltiples características funcionales y metabólicas distribuidas.

dolor en el emisor → estado neural distribuido → adquisición multimodal → procesamiento → Z_S(t) → transmisión digital

El cerebro del receptor no recibe literalmente los iones, neurotransmisores, moléculas metabólicas, potenciales de acción ni la experiencia personal del cerebro del emisor. Lo que viaja a través de la red de telecomunicaciones es una representación digital derivada del estado cerebral. La arquitectura MindNet propone que el sistema del receptor utilice esta representación como información de referencia para generar una respuesta neuronal posterior.

Tang et al. sientan un precedente para parte de esta operación al demostrar que incluso las representaciones semánticas distribuidas registradas mediante resonancia magnética funcional (fMRI) pueden utilizarse computacionalmente para reconstruir un lenguaje continuo. Haxby et al. añaden otro componente fundamental: dos personas pueden tener topografías corticales distintas y, sin embargo, sus patrones pueden transformarse en un espacio representacional común en el que se puede comparar la información compartida.

A partir de esta interacción, el receptor genera su propia respuesta cerebral. Si esta respuesta se relaciona, por ejemplo, con la percepción y evaluación del sufrimiento ajeno, pueden activarse circuitos asociados al procesamiento afectivo, la cognición social y componentes de la empatía. Este nuevo estado es biológicamente único para el receptor y, por lo tanto, no tiene por qué ser idéntico al estado adquirido originalmente por el emisor.

El receptor no "siente" dolor.

En la arquitectura de circuito cerrado de MindNet, sin embargo, la comunicación no termina ahí. El nuevo estado neuronal del receptor se adquiere, procesa y convierte en una representación neurodigital. En ese momento, se produce una inversión de roles: el receptor se convierte en el emisor. La información que regresa representa un estado neuronal transformado por la respuesta del segundo cerebro; en este ejemplo, una respuesta asociada a la empatía y útil para modular el dolor del emisor.

dolor → adquisición → representación → transmisión → receptor → respuesta neuronal → modulación → nueva adquisición → nueva representación → retorno

De esta forma, el circuito deja de ser una mera transmisión unidireccional de información cerebral y se convierte en una interacción recursiva entre dos sistemas neuronales. El primer cerebro proporciona el estado inicial; el segundo produce su propia respuesta; esta respuesta regresa como nueva información al circuito. En el ejemplo propuesto, lo que regresa no es simplemente el dolor transmitido originalmente, sino un estado neuronal diferente: una respuesta empática. Humano.

5. Adquisición y caracterización de estados neuronales

5.1 Los orígenes de MindNet La

radiofrecuencia ha sido ampliamente estudiada y utilizada para el tratamiento del dolor.
Sin embargo, el término radiofrecuencia abarca muchas modalidades distintas, con diferentes mecanismos, parámetros de aplicación y objetivos terapéuticos.

En la radiofrecuencia continua o térmica, por ejemplo, la energía de radiofrecuencia se aplica mediante un electrodo situado cerca de la estructura neural seleccionada, produciendo un calentamiento controlado y permitiendo la ablación de las estructuras implicadas en la transmisión nociceptiva del dolor. El uso de la radiofrecuencia para el dolor crónico cuenta con una amplia bibliografía clínica, incluyendo aplicaciones en el dolor de las articulaciones facetarias y otras afecciones musculoesqueléticas. Fue en este ámbito donde la autora inició su investigación, motivada por sus conocimientos en el campo de las telecomunicaciones.

Otros análisis aportan evidencia complementaria; por ejemplo, Shi et al. (2016), en un metaanálisis de 12 ensayos clínicos aleatorizados con 592 pacientes, evaluaron la eficacia y seguridad de la radiofrecuencia pulsada (PRF) en diferentes afecciones de dolor neuropático y hallaron resultados favorables en ciertas indicaciones, especialmente en la neuralgia postherpética. Estos resultados refuerzan la idea de que la exposición controlada a la radiofrecuencia pulsada puede producir efectos clínicamente medibles sobre el dolor de naturaleza nociceptiva.

La radiofrecuencia pulsada transcutánea (TcPRF) resulta particularmente relevante para la propuesta de un enfoque no invasivo contra el dolor crónico. Asimakopoulos, Tsaroucha y Rekatsina (2026) realizaron una revisión sistemática de ocho ensayos clínicos aleatorizados sobre afecciones musculoesqueléticas y neuropáticas de dolor crónico. La mayoría de los estudios analizados hallaron una reducción en la intensidad del dolor, con resultados especialmente consistentes en algunos grupos de control con placebo.

Estos estudios establecen un precedente particularmente importante para la arquitectura MindNet. Vanneste et al. (2020), Shi et al. (2016) y los ensayos sintetizados en sus respectivas revisiones sobre PRF demuestran que la aplicación de radiofrecuencia a estructuras del sistema nervioso ya se ha investigado ampliamente como herramienta de neuromodulación analgésica. Asimakopoulos, Tsaroucha y Rekatsina (2026) añaden un elemento particularmente relevante al demostrar que la aplicación transcutánea y no invasiva de PRF también se ha evaluado en ensayos clínicos aleatorizados.

Por lo tanto, la relación es:

Radiofrecuencia → interacción con el sistema nervioso → neuromodulación → modificación de la nocicepción → alteración del dolor.

Tiene precedentes experimentales y clínicos independientes.

En la arquitectura MindNet, este principio se extiende a una función diferente. La propuesta consiste en integrar la adquisición de RF en una arquitectura neurodigital, donde se adquiere información relacionada con el estado cerebral del emisor, se procesa, se convierte en representaciones computacionales, se transmite a través de la infraestructura de telecomunicaciones y se utiliza como referencia para la interacción con el sistema neuronal del receptor. La respuesta resultante se adquiere y procesa nuevamente, lo que permite compararla con el estado de referencia y verificar la continuidad del circuito.

En este contexto, la secuencia propuesta por MindNet puede representarse como:

estado neural del emisor → adquisición → decodificación neural → representación neurodigital → telecomunicaciones → interfaz RF → neuromodulación del receptor → nueva adquisición → nueva representación → comparación → retroalimentación

La posibilidad de utilizar la radiofrecuencia para producir efectos neuromoduladores asociados con la reducción del dolor tiene fundamento; Vanneste et al. (2020) documentan este precedente en diferentes afecciones neuropáticas; Shi et al. (2016) presentan evidencia de ensayos aleatorios; y Asimakopoulos, Tsaroucha y Rekatsina (2026) extienden un vasto cuerpo de evidencia a la aplicación transcutánea no invasiva.

Esta bibliografía converge con otros componentes independientes que sustentan la arquitectura de MindNet. Ogawa et al. (1992), en sus experimentos fundamentales sobre el contraste dependiente de la oxigenación sanguínea, y Kwong et al. (1992), al demostrar cambios funcionales detectables en el cerebro humano mediante resonancia magnética, establecieron las bases experimentales para la adquisición funcional basada en el contraste BOLD.

Logothetis et al. (2001), mediante registros simultáneos de la actividad neuronal intracortical y BOLD, proporcionaron una base neurofisiológica para relacionar las actividades neuronales con la señal medida por fMRI.

MacInnes et al. (2020), por su parte, desarrollaron Pyneal como una infraestructura computacional de código abierto para el procesamiento de fMRI en tiempo real, demostrando la posibilidad de integrar la adquisición, el procesamiento y la difusión de resultados durante el experimento. Tang et al. (2023) demostraron que las representaciones semánticas distribuidas registradas mediante fMRI pueden ser utilizadas por un decodificador no invasivo para reconstruir el lenguaje continuo. Haxby et al. (2020) demostraron, mediante hiperalineación, que los patrones funcionales de diferentes individuos pueden transformarse en un espacio compartido, preservando la información común entre ellos.

Además, Rao et al. (2014) demostraron una interfaz cerebro a cerebro humana no invasiva en la que la información derivada del EEG se transmitía a través de Internet y se utilizaba, junto con la estimulación magnética transcraneal (EMT), para producir una respuesta en el participante receptor. Grau et al. (2014) demostraron la comunicación cerebro a cerebro no invasiva.

Interacción invasiva entre participantes geográficamente separados, combinando adquisición cerebral, transmisión digital y estimulación en el receptor. Stocco et al. (2015) avanzaron a la interacción cerebro a cerebro en una tarea colaborativa, incluyendo una condición de control. Jiang et al. (2019), por su parte, demostraron BrainNet, una interfaz cerebro a cerebro que permitió la colaboración entre participantes. Estos experimentos constituyen precedentes independientes para la integración entre la adquisición de señales cerebrales, la transmisión digital remota y la interacción con otro participante.

Es precisamente en la convergencia de estos precedentes donde se sitúa la propuesta de MindNet. El objetivo que motivó la investigación de la autora, iniciada en radiofrecuencia (RF), fue investigar una alternativa no invasiva para la modulación del dolor, diseñada para minimizar los efectos adversos, a partir de la integración de tecnologías y principios que ya cuentan con precedentes independientes en medicina, neurociencia, neuroimagen, radiofrecuencia, procesamiento computacional y telecomunicaciones. La experiencia previa de la autora en el campo de las telecomunicaciones contribuyó a ampliar esta investigación, que comenzó hace seis años cuando ella y su hijo salieron de la sala de partos con secuelas. MindNet, en lugar de considerar la adquisición, el procesamiento, la transmisión y la neuromodulación cerebral como elementos aislados, los organiza como componentes de una misma arquitectura. Incluso esta inspiración provino del campo de las telecomunicaciones, cuya arquitectura es, en la mayoría de los casos, el resultado de un conjunto de numerosas plataformas, tecnologías y soluciones integradas mediante software.

Por lo tanto, la innovación propuesta no radica en la afirmación de que cada fenómeno físico o neurobiológico utilizado por MindNet sea nuevo. Por el contrario, su fundamento se deriva precisamente de la existencia de precedentes independientes para diferentes componentes. Ogawa et al. (1992), Kwong et al. (1992) y Logothetis et al. (2001) corroboran la relación entre la actividad cerebral y la adquisición funcional mediante resonancia magnética; MacInnes et al. (2020) proporciona un precedente para el procesamiento de resonancia magnética funcional en tiempo real; Haxby et al. (2020) para la alineación computacional de representaciones entre individuos; Tang et al. (2023) para la decodificación neuronal de información distribuida registrada por resonancia magnética (2014), Grau et al. (2014), Stocco et al. (2015) y Jiang et al. (2019) para diferentes formas de comunicación cerebro a cerebro mediada por sistemas digitales; y Vanneste et al. (2020), Shi et al. (2016) y Asimakopoulos, Tsaroucha y Rekatsina (2026) para el uso de radiofrecuencia como herramienta de neuromodulación asociada con el dolor.

Una de las innovaciones de MindNet reside en la integración de estos componentes en una arquitectura diseñada para adquirir, representar, transmitir, comparar y modular estados neuronales entre individuos, siendo el dolor crónico una de sus principales motivaciones terapéuticas.

5.2 Infraestructura de telecomunicaciones urbanas y adquisición remota en MindNet

Las estaciones base de radio de las redes celulares son las candidatas más obvias para contribuir a la infraestructura física distribuida de MindNet. Las redes 4G y 5G ya constituyen una extensa infraestructura urbana de transmisión y recepción, compuesta por antenas, amplificadores de radiofrecuencia, procesamiento digital de señales, sistemas de sincronización, fibra óptica, backhaul y computación de red. En 5G, tecnologías como Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) y beamforming añaden capacidades de control espacial a la transmisión, utilizando múltiples elementos de antena coordinados para formar y dirigir haces de señal.

radiofrecuencia dinámica. Khwandah et al. (2021), por ejemplo, describen Massive MIMO y la formación de haces 3D como tecnologías capaces de utilizar múltiples antenas para concentrar la radiación hacia los usuarios y mejorar la eficiencia espacial y espectral de las redes 5G.

Por lo tanto, en las ciudades contemporáneas ya existe una infraestructura capaz de generar, modular, transmitir, recibir y procesar señales de radiofrecuencia en diferentes bandas de frecuencia.
Las ondas en el rango de decenas o cientos de MHz y frecuencias más altas pertenecen al mismo dominio físico de la ingeniería de radiofrecuencia, utilizado en diversas aplicaciones de telecomunicaciones y resonancia magnética, cada una con sus particularidades. Darnell et al. (2019), por ejemplo, demostraron una bobina integrada capaz de operar simultáneamente con corrientes a la frecuencia de Larmor para resonancia magnética y en una banda de comunicación inalámbrica, estableciendo un precedente concreto para la coexistencia de funciones de resonancia magnética y comunicación inalámbrica en una arquitectura de radiofrecuencia.

Desde el punto de vista arquitectónico, la infraestructura celular 5G/6G y los sistemas de radiofrecuencia definidos por software representan un importante precedente tecnológico para MindNet. La tecnología existente demuestra que una ciudad ya posee una parte sustancial de una "estructura de radiofrecuencia" capaz de capturar y transportar señales electromagnéticas de forma distribuida. En el caso de 5G, Khwandah et al. (2021) muestran que los sistemas Massive MIMO permiten la coordinación de numerosos elementos de antena y el control espacial de la transmisión mediante la formación de haces.

La principal dificultad en la adquisición neuronal remota, sin embargo, no reside únicamente en la producción o transmisión de radiofrecuencia. El desafío fundamental radica en detectar una respuesta cerebral suficientemente específica y con una relación señal-ruido adecuada que permita su identificación, procesamiento y reconstrucción computacional. En los sistemas de resonancia magnética convencionales, las bobinas receptoras se colocan cerca del cuerpo precisamente porque su geometría y proximidad influyen directamente en la sensibilidad y la relación señal-ruido de la señal adquirida.

MindNet propone solucionar este problema mediante una arquitectura distinta a la de la resonancia magnética convencional. En lugar de depender de un escáner y una bobina receptora colocadas directamente alrededor de la cabeza, el sistema combina una infraestructura de radiofrecuencia distribuida que, junto con la resonancia magnética en tiempo real (rt-MRI), el HP-13C y la IA de MindNet, detecta e identifica la señal, reduce el ruido, corrige las interferencias y reconstruye las representaciones neurodigitales. En este modelo, la inteligencia artificial aumenta la capacidad computacional para separar, identificar y procesar eficazmente la información presente en las señales detectadas, lo que contribuye a una mayor sensibilidad y selectividad. El software mejora y perfecciona el resultado que la simple conexión entre las tecnologías no podría ofrecer.

La propuesta encuentra precedentes tecnológicos relevantes en la resonancia magnética de campo bajo, la resonancia magnética de campo ultrabajo, los magnetómetros atómicos, la detección remota de RMN, las bobinas de RF inalámbricas y los sistemas de acoplamiento inductivo. Savukov y Romalis (2005), por ejemplo, demostraron la detección de señales de RMN utilizando un magnetómetro atómico y analizaron su posible uso en sistemas multicanal para resonancia magnética tridimensional. La señal y el principio

Por lo tanto, se han demostrado avances tecnológicos y científicos. Ledbetter et al. (2008), a su vez, demostraron la detección remota de RMN mediante un magnetómetro atómico, estableciendo un precedente para la separación espacial de las funciones de codificación y detección de RMN.

Darnell et al. (2019) aportaron otro precedente particularmente relevante al desarrollar una bobina integrada de RF/ inalámbrica capaz de realizar simultáneamente la adquisición de imágenes de RM y la comunicación inalámbrica. Esta misma arquitectura permitió la circulación de corriente a la frecuencia de Larmor y en una banda de comunicación inalámbrica, manteniendo la relación señal-ruido de la bobina. Los autores demostraron además la adquisición de imágenes y la transferencia inalámbrica de datos desde un campo magnético B localizado en una configuración integrada.

Estos avances demuestran, por lo tanto, que el principio científico de reorganizar e integrar diferentes componentes de radiofrecuencia, adquisición, codificación y telecomunicaciones tiene precedentes experimentales. La infraestructura de telecomunicaciones urbanas ya puede contar con parte de la capa de transporte digital y de radiofrecuencia distribuida, mientras que MindNet AI podría añadir el software necesario para obtener, con mayor sensibilidad y selectividad computacional, información que antes podría haber pasado desapercibida, incluyendo el control de parámetros físicos, la detección, la reducción de ruido y la extracción de información relevante.

El objetivo es integrar sistemas que ya se utilizan por separado, una característica bastante común en las telecomunicaciones, que frecuentemente emplean diferentes plataformas, sistemas y tecnologías para desarrollar productos específicos, conectando sus componentes en torno a un único propósito operativo. En este sentido, la experiencia del autor en la creación e implementación de productos de telecomunicaciones contribuyó a que el diseño arquitectónico de MindNet resultara intuitivo: las diferentes tecnologías no necesitan realizar la función completa del sistema de forma aislada; pueden constituir capas especializadas de la misma red.

La resonancia magnética con HP-^{13}C añade una posibilidad particularmente importante a esta arquitectura debido al gran aumento de sensibilidad que proporciona la hiperpolarización para la detección de núcleos de ^13C. La bibliografía sobre HP-^{13}C demuestra un aumento significativo de la magnetización y la detectabilidad de la señal metabólica.
La resonancia magnética con HP-1^{3}C también añade una dimensión metabólica a este sistema. Un ejemplo importante utiliza piruvato hiperpolarizado [1-1^{3}C], que participa en procesos metabólicos y permite monitorizar el lactato y el bicarbonato para obtener información relevante.

Resultados independientes de Miloushev et al. (2018) también demostraron la obtención de imágenes metabólicas del cerebro humano mediante piruvato [1-^{13}C] hiperpolarizado, incluyendo la adquisición dinámica y la producción detectable de lactato [1-^{13}C] en el cerebro, incluso en tumores cerebrales. Estos estudios refuerzan el uso de HP-^{13}C como una modalidad capaz de aportar información metabólica dinámica a la caracterización cerebral.

Esto proporciona a MindNet dos clases complementarias de información fisiológica: una dimensión funcional y hemodinámica derivada de la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y una dimensión metabólica.

derivado de HP-1³C MRI. Park et al. (2018) y Miloushev et al. (2018) proporcionan precedentes experimentales particularmente importantes para esta segunda capa de información. De manera similar, Savukov y Romalis (2005) demostraron una mayor sensibilidad de la detección de RMN mediante magnetometría, y Ledbetter et al. (2008) demostraron la detección remota de RMN.

En este sentido, MindNet establece un puente tecnológico entre dos infraestructuras que ya existen de forma independiente: por un lado, las redes urbanas capaces de producir, dirigir, recibir y transportar señales de RF y datos digitales, como lo demuestra el desarrollo de Massive MIMO y beamforming descrito por Khwandah et al. (2021) y Senger y Malik (2022); y por otro lado, las técnicas de resonancia magnética capaces de extraer información funcional y metabólica del organismo, incluidos los sistemas HP-¹³C demostrados por Park et al. (2018) y Miloushev et al. (2018). Entre estos dominios también se encuentran precedentes para la reorganización de la detección por RMN, como Savukov y Romalis (2005), Ledbetter et al. (2008) y Verpillat et al. (2008), y para la integración entre la RF de la resonancia magnética y la comunicación inalámbrica, como Darnell et al. (2019).

La brecha tecnológica que MindNet cubre radica en la conexión entre estos dominios: la creación de una cadena de adquisición remota con la sensibilidad y selectividad suficientes para detectar información cerebral útil sin la necesidad de la configuración física de un escáner convencional. Es en este contexto que MindNet propone integrar estas infraestructuras mediante software propio; la IA de MindNet trabaja para generar una representación neurodigital en un único sistema.

La brecha tecnológica que MindNet subsana reside precisamente en la conexión entre estos ámbitos: producir una cadena de adquisición neuronal remota con sensibilidad, selectividad, resolución espacial y temporal, y una relación señal-ruido lo suficientemente baja como para detectar información cerebral útil sin la configuración física de un escáner convencional.
Los estudios citados proporcionan precedentes para diferentes componentes de esta arquitectura, pero es nuestra integración —infraestructura de radiofrecuencia distribuida, adquisición física, IA MindNet, representación neurodigital y transporte a través de la red de telecomunicaciones— la que constituye la solución específica y completa para ayudarnos en la lucha contra el dolor crónico.

5.3 MindNet AI: La inteligencia artificial como capa para la traducción, reconstrucción y sincronización neurodigital.

MindNet AI constituye la capa

computacional central de la arquitectura MindNet. Tal como se definió en la arquitectura presentada anteriormente, conecta la adquisición física, la neuroimagen, el procesamiento de señales, las telecomunicaciones y la retroalimentación en un circuito cerrado. En el campo de las telecomunicaciones, es habitual crear software para integrar, corregir, decodificar y refinar datos. En términos funcionales, MindNet actúa como un códec neuronal, transformando los datos cerebrales en representaciones neurodigitales adecuadas para su análisis y transmisión y, en sentido inverso, interpretando la respuesta del receptor para compararla con el estado de referencia del emisor.

La función principal de MindNet AI es la adquisición y el preprocesamiento de datos.

Los datos de resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y resonancia magnética de HP-1³C muestran estructuras espaciales diferentes.

Temporal, hemodinámico y metabólico. La IA de MindNet participa en la corrección de artefactos, la reducción de ruido, la identificación de interferencias, el refinamiento de la señal y la reconstrucción. En la arquitectura de adquisición remota propuesta por MindNet, esta función cobra especial importancia: los algoritmos pueden buscar estructuras relevantes en señales con baja relación señal-ruido y separar los componentes informativos de las interferencias; en este caso, información que, al llegar al receptor, modula su dolor.

El estado actual de la técnica en IA aplicada a la resonancia magnética funcional (fMRI) ofrece precedentes importantes para esta función y se ha empleado para el modelado de datos cerebrales, mientras que los algoritmos de aprendizaje buscan mejorar las tareas para obtener representaciones neuronales transferibles. Yang et al. (2026) identifican cuatro paradigmas principales en el uso de arquitecturas Transformer para el análisis de datos de fMRI: modelado temporal, modelado espacial, modelado espaciotemporal conjunto y aprendizaje autosupervisado, destacando su capacidad para capturar señales de larga distancia en datos cerebrales.

Un avance particularmente significativo para MindNet es NeuroSTORM. En 2026, este modelo fundamental de resonancia magnética funcional (fMRI) se preentrenó directamente con datos volumétricos 4D, correspondientes a 28,65 millones de fotogramas de fMRI de más de 50 000 participantes, procedentes de diversos centros y con edades comprendidas entre los 5 y los 100 años. NeuroSTORM aprende representaciones espaciotemporales generalizables y, posteriormente, las adapta a diferentes tareas, demostrando un rendimiento superior al de los métodos de comparación en cinco aplicaciones posteriores (NeuroSTORM, 2026).
Este resultado sienta un importante precedente contemporáneo para el diseño de una IA MindNet capaz de aprender representaciones neuronales generalizables, en lugar de tratar los datos cerebrales de cada individuo o conjunto de datos como un problema computacional completamente independiente.

La segunda función es la decodificación neuronal propiamente dicha. Tang et al. (2023) demostraron que un decodificador no invasivo puede reconstruir el lenguaje continuo a partir de representaciones semánticas corticales obtenidas mediante resonancia magnética funcional (RMf). El experimento no representa una lectura sin restricciones de estados mentales y requirió un entrenamiento específico de los participantes, pero demuestra un principio fundamental para MindNet: la información distribuida en patrones de RMf puede ser convertida por IA en una representación informativa diferente y computacionalmente manipulable. En el caso de la aplicación al dolor, la curva de aprendizaje tiende a ser menos laboriosa, ya que la información para la modulación del dolor en el cerebro no incluye el lenguaje, aunque es una característica que se utilizará en el futuro para la comunicación y la investigación. El avance del área desde entonces ha sido rápido; Wang et al. (2025), en una revisión sobre la decodificación neuronal lingüística, describen el uso creciente del aprendizaje profundo para convertir la actividad neuronal en representaciones lingüísticas y, simultáneamente, analizan los problemas aún existentes de generalización, variabilidad interindividual e interpretación.

El mismo principio ya ha llegado al dominio visual. Takagi y Nishimoto (2023) utilizaron modelos de difusión latente para reconstruir imágenes a partir de la actividad cerebral registrada por fMRI, demostrando que las representaciones latentes de modelos generativos pueden actuar como un puente entre los patrones cerebrales y las representaciones computacionales complejas. Scotti et al. (2023), utilizando MindEye, combinaron aprendizaje contrastivo, priors de difusión y espacios latentes multimodales como CLIP para realizar la recuperación y reconstrucción de imágenes a partir de fMRI. MindEye también demostró una propiedad

Particularmente relevante para MindNet: las incrustaciones cerebrales podrían mapearse a un espacio latente multimodal previamente aprendido, preservando información suficientemente específica para distinguir imágenes similares. El vóxel y el nuevo píxel.

Otro aspecto interesante a considerar es la variabilidad entre cerebros. Haxby et al. (2020), mediante la hiperalineación, demostraron que las topografías funcionales individuales pueden transformarse en un espacio representacional común de alta dimensión. En MindNet, este principio permite diseñar transformaciones específicas para el emisor y el receptor, de modo que dos patrones anatómicamente diferentes puedan compararse en un espacio computacional compartido. El estado del arte se dirige precisamente hacia modelos capaces de aprender representaciones transferibles entre individuos; Sümer-Arpak et al. (2026) destacan los modelos base, el aprendizaje autosupervisado, los Transformers y los espacios semánticos compartidos como direcciones emergentes para la decodificación neuronal no invasiva.

MindNet AI también se convierte en un gran aliado tras la transmisión. El receptor no es un destino pasivo. Su nuevo estado se recupera y se transforma en una representación \(Z_R(t) \), que puede compararse con la representación \(Z_S(t-\Delta)\) del emisor. La IA puede estimar la naturaleza de la información teniendo en cuenta la latencia de adquisición, la red y la fisiología del cerebro. De este modo, MindNet AI deja de ser simplemente un decodificador y se convierte también en el controlador computacional del circuito.

Este concepto es compatible con un cambio más amplio en el estado del arte, desde la IA hacia la neurociencia. Mathis y Mathis (2026) describen la convergencia de modelos discriminativos para aprender conjuntamente la dinámica cerebral e inferir la lógica del comportamiento. Sümer-Arpak et al. (2026), a su vez, muestran que los modelos fundamentales están impulsando la decodificación neuronal de clasificadores específicos hacia el aprendizaje de representaciones escalables y semánticamente estructuradas, aunque persisten desafíos relacionados con el ruido, la variabilidad interindividual, el volumen de datos, la interpretabilidad, la estandarización y las expectativas. El autor cree que nunca será posible encapsular la conciencia humana, lo que hace que la neurociencia sea aún más interesante. MindNet está aquí para facilitar la comunicación y la conexión.

Por lo tanto, MindNet AI puede definirse como una arquitectura de inteligencia artificial adaptativa responsable de convertir las señales cerebrales en representaciones neurodigitales, alinear las representaciones entre individuos, preservar la información distinguible durante la transmisión, interpretar la respuesta del receptor y controlar la retroalimentación a través de las herramientas disponibles dentro de cada capa.

El estado del arte demuestra por separado capacidades cada vez más cercanas a las funciones requeridas para esta arquitectura: Tang et al. (2023) para la decodificación semántica; Takagi y Nishimoto (2023) y Scotti et al. (2023) para la reconstrucción generativa y los espacios latentes derivados de fMRI; Haxby et al. (2020) para la alineación interindividual; MacInnes et al. (2020) para el procesamiento operativo de rt-fMRI; NeuroSTORM (2026) para modelos fundamentales de fMRI a gran escala; y Sümer-Arpak et al. (2026) para la aparición de modelos fundamentales en la decodificación no invasiva. MindNet AI propone combinar estas capacidades añadiendo RF, rt-fMRI/HP-^{13}C MRI e integración con

Las telecomunicaciones y la constante comparación entre emisor y receptor en la lucha contra el dolor.

5.4 Pyneal y DICOM en la arquitectura MindNet

En la arquitectura de MindNet, Pyneal puede ocupar una posición estratégica entre la adquisición de fMRI en tiempo real y la IA de MindNet. Su función principal no sería reemplazar los algoritmos de inteligencia artificial ni realizar toda la decodificación neuronal, sino proporcionar una infraestructura computacional ya desarrollada para recibir, organizar, preprocesar y analizar los datos de fMRI durante la adquisición. De esta manera, Pyneal puede actuar como un puente entre el dominio físico de la neuroimagen y el dominio computacional de MindNet.

MacInnes et al. (2020) desarrollaron Pyneal específicamente como una plataforma de código abierto para imágenes de resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI). Su arquitectura fue diseñada para permitir el acceso a la función cerebral durante el propio examen, posibilitando la monitorización de la calidad de los datos, el análisis en tiempo real, la neuroretroalimentación, el control dinámico de los experimentos y la comunicación con dispositivos o sistemas informáticos externos.

La estructura interna de Pyneal resulta particularmente interesante para MindNet, ya que divide la operación en componentes funcionales. El escáner Pyneal monitoriza los nuevos datos generados por el sistema de adquisición, los transforma a un formato estandarizado y envía cada nuevo volumen tridimensional al módulo Pyneal. Pyneal, a su vez, consta de tres componentes principales: receptor de escaneo, módulo de procesamiento y servidor de resultados. El primero recibe los volúmenes; el segundo realiza las operaciones de preprocesamiento y análisis; y el tercero pone los resultados a disposición de otros sistemas durante el examen (MacInnes et al., 2020).

Cada nuevo volumen recibido corresponde a una matriz tridimensional de vóxeles asociada a un momento específico de la adquisición. Pyneal utiliza la información transmitida para reconstruir correctamente las dimensiones del volumen y posicionarlo temporalmente dentro de una estructura 4D que se va completando progresivamente durante el análisis. El resultado de cada análisis permanece asociado al índice temporal correspondiente, un aspecto importante para MindNet, ya que la comparación entre emisor y receptor depende no solo del contenido de las representaciones neuronales, sino también de su posición temporal.

Otra característica particularmente relevante es que el servidor de resultados de Pyneal utiliza una interfaz de socket TCP/IP. Un sistema externo puede solicitar el resultado correspondiente a un volumen específico, y el servidor responde en formato JSON.
MacInnes et al. (2020) se refieren a este componente externo como el "Usuario Final", que puede ser cualquier sistema autorizado para utilizar los resultados generados durante la adquisición. Este concepto puede extenderse a MindNet AI, que puede ocupar la posición de un sistema posterior que recibe continuamente los resultados del proceso de resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI) y los incorpora al procesamiento neurodigital.

De este modo, Pyneal proporciona una interfaz computacional particularmente interesante entre la neuroimagen y las telecomunicaciones, por lo que Mindnet no necesita realizar una decodificación neuronal avanzada por sí mismo. La arquitectura en sí se describe en MacInnes et al. (2020).

Permite realizar análisis personalizados, posibilitando la inserción de modelos computacionales o flujos de trabajo específicos. En MindNet, los resultados generados por Pyneal pueden alimentar algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo diseñados para la reducción de ruido, la extracción de características, el reconocimiento de patrones, la reducción de dimensionalidad, la decodificación neuronal y la construcción de la representación neurodigital.

Por lo tanto, Pyneal y MindNet AI no son tecnologías que compitan entre sí; pueden integrarse en capas. Pyneal gestiona la interfaz operativa con rt-fMRI y el procesamiento en tiempo real necesario; MindNet AI añade modelos especializados capaces de transformar estos datos en representaciones neurodigitales más complejas. Esta modularidad es coherente con el diseño propio de Pyneal, que permite scripts y análisis personalizados adaptados a las necesidades de cada experimento (MacInnes et al., 2020).

Pyneal puede procesar volúmenes a medida que se generan, pero en rt-fMRI, "tiempo real" no significa tiempo neuronal de milisegundos. El sistema funciona dentro de la resolución temporal de la adquisición y la respuesta hemodinámica. Por lo tanto, MindNet AI debe considerar las marcas de tiempo, el retardo hemodinámico, el tiempo de procesamiento, la latencia de la red, la interacción del receptor y la readquisición. Pyneal monitoriza el tiempo de procesamiento de cada volumen, lo que permite verificar que el análisis se mantiene al ritmo de la velocidad de adquisición (MacInnes et al., 2020). Sin embargo, para el dolor crónico, el impacto será mínimo y la solución sigue siendo una de las mejores opciones en un mercado donde los opioides son la principal alternativa.

También existe una distinción importante dentro de la arquitectura multimodal propuesta: Pyneal se desarrolló específicamente para rt-fMRI y no debe presentarse como un flujo de trabajo establecido para HP-^{13}C MRI. La información metabólica de HP-^{13}C debe tener su propio flujo de trabajo de adquisición y procesamiento. Es más adelante, en MindNet AI, donde las características derivadas de las diferentes modalidades pueden integrarse en una representación multimodal. Sin embargo, esta división fortalece la arquitectura porque asigna a cada tecnología una función técnicamente definida. Pyneal constituye la capa de procesamiento operativo de rt-fMRI en tiempo real; el flujo de trabajo de HP-^{13}C proporciona la dimensión metabólica; y MindNet AI realiza la integración multimodal, la decodificación neuronal, la representación neurodigital, la alineación y la comparación emisor-receptor. El componente de telecomunicaciones transporta la representación resultante.

Así pues, la importancia de Pyneal para MindNet no reside únicamente en que sea un software de resonancia magnética funcional (RMf). MacInnes et al. (2020) ya han demostrado una arquitectura en la que la adquisición, el procesamiento, el análisis, la comunicación TCP/IP y la transmisión de resultados a sistemas externos se producen durante la misma sesión. MindNet amplía este principio al integrar la IA de MindNet y la infraestructura de telecomunicaciones en esta interfaz, transformando el resultado del procesamiento de RMf en tiempo real en una de las entradas de una cadena neurodigital continua. Por consiguiente, Pyneal puede constituir uno de los puentes de software entre la neuroimagen en tiempo real y la arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales propuesta por MindNet.

Asimismo, en la arquitectura MindNet, DICOM y Pyneal son complementarios en la transición entre la adquisición física por resonancia magnética y la construcción de una representación.

Neurodigital, de MindNet AI. DICOM proporciona un lenguaje estandarizado para representar, identificar, almacenar e intercambiar datos de imágenes médicas; Pyneal añade una capa operativa capaz de acceder y procesar datos de resonancia magnética funcional (fMRI) durante la propia adquisición. MindNet utiliza esta combinación como parte del puente entre la neuroimagen, la inteligencia artificial y las telecomunicaciones.

DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) es un estándar internacional para la comunicación y gestión de información de imágenes médicas y datos relacionados. En la arquitectura MindNet, esto significa que la información producida por los equipos de neuroimagen se origina dentro de una estructura digital estandarizada, que contiene no solo píxeles o vóxeles, sino también metadatos necesarios para identificar el estudio, la serie, la instancia, la modalidad y los parámetros de adquisición.

DICOM conserva la estructura interoperable de la información de neuroimagen. Pyneal transforma la llegada sucesiva de estos datos en un flujo computacional de rt-fMRI. MindNet AI, a su vez, puede recibir resultados o representaciones derivadas de este procesamiento para realizar operaciones más avanzadas, como la eliminación de ruido adicional, por ejemplo, lo cual es fundamental para obtener estados neuronales. Además, los objetos DICOM permanecen como fuente, registro y referencia de la adquisición en DICOMweb. Koutelakis et al. (2018) describen DICOMweb como la extensión de la interoperabilidad de DICOM a las tecnologías web, utilizando servicios basados en estándares web para almacenar, buscar y recuperar objetos de imágenes médicas. Los autores ya señalaron que esta arquitectura redujo las barreras para el análisis de imágenes y el aprendizaje automático, precisamente porque las aplicaciones computacionales podían recuperar imágenes y datos relacionados a través de interfaces web estandarizadas.

En este diseño, DICOM funciona como lenguaje interoperable para neuroimagen, Pyneal como puente para el procesamiento de rt-fMRI en tiempo real, y MindNet AI como la capa que transforma las características relevantes de estos datos en representaciones neurodigitales destinadas al análisis, la comparación y la transmisión. Por lo tanto, la cadena deja de ser simplemente "RM → imagen" y asume una organización computacional continua. Es importante destacar que esta información se obtendría y compartiría con la autorización y el consentimiento del emisor y del receptor en cada etapa.

5.5 HP-^{13}C MRI en MindNet: lectura metabólica nuclear, adquisición dinámica y mayor sensibilidad.

La resonancia magnética de ^{13}C hiperpolarizada (HP-^{13}C MRI) añade una dimensión a la arquitectura MindNet que la resonancia magnética funcional en tiempo real (rt-fMRI BOLD), por sí sola, no proporciona: la posibilidad de monitorizar directamente las transformaciones metabólicas. Mientras que la rt-fMRI utiliza los cambios hemodinámicos y de oxigenación sanguínea como una medida indirecta relacionada con la actividad neuronal, la HP-^{13}C MRI explora las propiedades magnéticas del núcleo de ^{13}C y monitoriza dinámicamente el destino metabólico del piruvato, lactato y bicarbonato hiperpolarizados [1-^{13}C]. Li, Vigneron y Xu (2021) destacan precisamente que la HP-^{13}C MRI permite la adquisición de información metabólica dinámica en tiempo real en el cerebro humano, complementando las modalidades anatómicas y funcionales.

Por lo tanto, el primer elemento importante es la lectura metabólica del núcleo de ^{13}C.
El carbono-13 tiene un espín nuclear activo en resonancia magnética, pero su abundancia

La sensibilidad natural es pequeña y la sensibilidad convencional es baja. La hiperpolarización modifica radicalmente esta condición. Técnicas como la polarización nuclear dinámica por disolución (dDNP) aumentan la polarización nuclear antes de la adquisición, elevando la señal de RM en varios órdenes de magnitud. Khan y Laustsen (2025) describen aumentos de polarización que superan las 10 000 veces en ciertas condiciones, mientras que revisiones recientes informan ganancias en la relación señal-ruido que pueden alcanzar decenas de miles de... veces.

Esta propiedad es particularmente importante para MindNet porque transforma moléculas metabólicamente relevantes en fuentes de información física mucho más fácilmente detectables temporalmente. El ejemplo más desarrollado es el piruvato hiperpolarizado [1-^{13}C]. Tras su administración, el piruvato participa en el metabolismo, y la marca de ^{13}C puede aparecer en productos metabólicos como el lactato [1-^{13}C] y el bicarbonato marcado con ^{13}C. La conversión de piruvato a lactato está relacionada con la lactato deshidrogenasa y el estado metabólico del tejido, mientras que la formación de bicarbonato se asocia con la entrada del piruvato en el metabolismo oxidativo a través de la piruvato deshidrogenasa. Por lo tanto, la resonancia magnética de ^{13}C hiperpolarizada proporciona no solo una imagen estática, sino que también permite monitorizar el comportamiento temporal del sustrato y sus productos metabólicos.

Park et al. (2018) demostraron la viabilidad de este método en el cerebro humano utilizando piruvato hiperpolarizado marcado con [1-^{13}C]. Su trabajo mostró la adquisición dinámica de piruvato y productos metabólicos, como lactato y bicarbonato, estableciendo un precedente importante para el uso de HP-^{13}C como componente metabólico en la caracterización del cerebro humano. Posteriormente, Li y Xu (2021) revisaron las aplicaciones en el cerebro humano y destacaron que la capacidad de obtener información metabólica dinámica es una de las características fundamentales de esta tecnología.

El segundo elemento importante para MindNet es precisamente esta dimensión temporal.
En este contexto, "tiempo real" no significa rastrear cada potencial de acción en una escala de milisegundos. Significa adquirir dinámicamente la evolución del metabolismo durante la ventana relativamente corta en la que la magnetización hiperpolarizada permanece disponible. Harris et al. (2018) demostraron que el HP-[1-^{13}C]piruvato permite rastrear el metabolismo cerebral en una escala de segundos. Sin embargo, existe una diferencia en las escalas de tiempo que el algoritmo debe considerar. Los potenciales de acción y muchos eventos sinápticos ocurren en escalas de milisegundos, mientras que la respuesta BOLD evoluciona mucho más lentamente. Esta diferencia aparece directamente en el trabajo de Tang et al. (2023): los autores destacan que la lentitud de la respuesta BOLD constituye un problema para la decodificación continua del lenguaje, porque cada imagen cerebral puede reflejar información correspondiente a múltiples palabras. El decodificador entonces necesita manejar computacionalmente esta diferencia temporal (Tang et al., 2023).

Por lo tanto, "tiempo real" no significa que todos los fenómenos fisiológicos tengan la misma latencia. Significa que el sistema opera de forma continua teniendo en cuenta diferentes constantes temporales, tiempos de adquisición, procesamiento, transmisión y respuesta fisiológica. MindNet AI necesita realizar esta correspondencia temporal, asociando los estados adquiridos del emisor con las respuestas subsiguientes del receptor e incorporando estas relaciones al siguiente ciclo del bucle cerrado.

Para MindNet, esto les permite concebir dos canales de información complementarios:

rt-fMRI/BOLD → información funcional, hemodinámica y de oxigenación dinámica

RMN HP-13C → información metabólica dinámica

El valor de MindNet en este caso reside precisamente en la complementariedad de esta información. La IA de MindNet puede recibir características derivadas de ambos sistemas e integrarlas en una representación multimodal del estado cerebral.

Además, la mayor sensibilidad que proporciona la hiperpolarización resulta especialmente interesante para la adquisición remota propuesta desde la red de telecomunicaciones existente. Hsieh et al. (2024) describen con precisión la alta sensibilidad de la RMN hiperpolarizada como consecuencia del aumento de la polarización nuclear, mientras que Khan y Laustsen (2025) demuestran que la hiperpolarización permite el estudio de núcleos y moléculas cuya sensibilidad convencional sería insuficiente para diversas aplicaciones.

En la arquitectura MindNet, por lo tanto, el mayor alcance debe considerarse una consecuencia tecnológica de la radiofrecuencia (RF) y también una consecuencia de una mayor detectabilidad. El precedente ya lo establece el significativo aumento de la sensibilidad; y esta mejora puede traducirse en mayor alcance al combinarse con su infraestructura de RF distribuida, sistemas de detección e inteligencia artificial MindNet.

El problema de la adquisición remota puede entenderse como un problema conjunto de física y procesamiento: intensidad de la señal disponible, ruido, distancia, geometría de detección, sensibilidad del receptor, interferencia, resolución espacial y temporal, y capacidad computacional para identificar el componente informativo. HP-^{13}C contribuye aumentando la detectabilidad física; MindNet AI contribuye buscando extraer, separar y reconstruir información. La IA puede contribuir significativamente cuando hay señales débiles en entornos ruidosos y de alta dimensionalidad. Hsieh et al. (2024) señalan la inteligencia artificial como una de las direcciones futuras para mejorar el análisis, la reproducibilidad y las aplicaciones clínicas de la modalidad. Khan y Laustsen (2025) también describen avances simultáneos en la adquisición y el análisis de datos, mientras que la revisión “¿Quo Vadis Hyperpolarized ^{13}C MRI?” (2025) identifica explícitamente los métodos de inteligencia artificial entre las líneas de desarrollo actuales en el área.

La resonancia magnética de ^{13}C hiperpolarizada (HP-^{13}C MRI) ofrece varias contribuciones particularmente relevantes a MindNet, incluyendo la lectura de procesos metabólicos a través de núcleos de ^{13}C magnéticamente activos; adquisición dinámica capaz de rastrear transformaciones metabólicas en tiempo real dentro de su ventana de hiperpolarización; y un aumento de la sensibilidad de varios órdenes de magnitud que mejora la detectabilidad de la señal, además de la reducción del ruido. Park et al. (2018), Li y Xu (2021), Hsieh et al. (2024) y Khan y Laustsen (2025) proporcionan una base tecnológica convergente para estos tres primeros elementos.

En la arquitectura MindNet, la hiperpolarización de ^{13}C aumenta la magnetización nuclear y la detectabilidad de la señal de RMN, lo que proporciona un mayor margen de sensibilidad al sistema.

Adquisición de RF. MindNet AI cobra especial importancia a medida que aumenta la distancia. A medida que la señal se acerca al límite de detección, se pueden utilizar algoritmos de procesamiento para la reducción de ruido, la identificación de interferencias, la reconstrucción, la fusión multimodal y la extracción de características. La resonancia magnética hiperpolarizada de última generación ya considera la adquisición y el análisis como partes estrechamente relacionadas: Khan y Laustsen (2026) destacan que maximizar la información obtenida de una muestra hiperpolarizada requiere una optimización conjunta de la adquisición y el análisis, debido a que existe un presupuesto finito para la magnetización hiperpolarizada.

Por lo tanto, la IA y la hiperpolarización pueden actuar de forma complementaria. El HP-^{13}C mejora la condición física inicial del problema al aumentar la polarización y la intensidad de la señal; posteriormente, la IA de MindNet actúa sobre las mediciones obtenidas. Si la señal contiene información cerebral relevante, incluso mezclada con ruido e interferencias, las técnicas computacionales pueden aumentar la capacidad de identificarla. La adquisición de una señal nuclear mucho más detectable, combinada con receptores de alta sensibilidad, infraestructura de radiofrecuencia distribuida y procesamiento computacional avanzado, permite un avance progresivo en el límite de detección operativa.

Por lo tanto, la contribución de HP-^{13}C al logro de MindNet puede presentarse como una hipótesis de ingeniería derivada directamente de un principio ya establecido: la hiperpolarización aumenta la polarización nuclear y la sensibilidad de la resonancia magnética en varios órdenes de magnitud (Khan y Laustsen, 2026); HP-^{13}C permite la recuperación dinámica de información metabólica en el cerebro humano (Cunningham et al., 2019); las configuraciones remotas de RMN demuestran que los componentes de detección pueden reorganizarse espacialmente (Ledbetter et al., 2008; Verpillat et al., 2008); y los sistemas de RF integrados demuestran la coexistencia de la adquisición de RM y la comunicación inalámbrica (Darnell et al., 2019).

La propuesta de IA MindNet establece, por lo tanto, un puente entre la neurociencia y la ingeniería de telecomunicaciones, transformando la comunicación cerebro a cerebro en un problema de adquisición, transducción, representación, interoperabilidad, codificación, transmisión, recepción, sincronización, control y retroalimentación. La cuestión central deja de ser si un campo cerebral puede recorrer grandes distancias directamente y se convierte en cómo la información derivada de los estados neuronales puede transportarse, preservarse, distribuirse y verificarse a través de una infraestructura neurodigital distribuida.

6. La epidemia silenciosa del dolor crónico

6.1 Un desafío para la salud mundial

En Brasil, la dimensión epidemiológica del dolor crónico refuerza la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de prevención, tratamiento y neuromodulación. Una revisión sistemática y metaanálisis publicado en 2023 estimó que el 35,70% de la población adulta brasileña padece dolor crónico, mientras que entre los ancianos la prevalencia alcanza el 47,32%. Además de la alta frecuencia, aproximadamente la mitad de los afectados reportaron discapacidad asociada al dolor (Aguiar et al., 2023). Estas cifras demuestran que el dolor crónico trasciende la dimensión individual y constituye un importante problema de salud pública en Brasil, con repercusiones funcionales, sociales y económicas.

En Estados Unidos, país donde me naturalicé ciudadano, más de 50 millones de adultos estadounidenses padecen dolor crónico, y aproximadamente 17 millones sufren dolor crónico de alto impacto. En Europa, diversos estudios económicos también han demostrado que los costos de las afecciones asociadas al dolor crónico equivalen a varios puntos porcentuales del PIB en ciertos países, incluyendo gastos médicos, hospitalizaciones, bajas laborales, prestaciones sociales y jubilación anticipada. La OMS proyecta aproximadamente 843 millones de casos para 2050 e identifica el dolor lumbar como la principal causa de discapacidad a nivel mundial.

La elevada prevalencia, la persistencia en el tiempo y el impacto funcional, social y económico del dolor crónico permiten caracterizarlo, en un sentido epidemiológico amplio, como un problema de magnitud epidémica.

En este contexto, el desarrollo de MindNet como arquitectura de telecomunicaciones neurodigitales, destinada, entre sus posibles aplicaciones, a la investigación de nuevas estrategias para modular el dolor crónico, responde a una necesidad clínica que afecta a una parte significativa de la población mundial.

La dimensión económica del dolor crónico nos permite estimar la magnitud potencial del impacto económico de las tecnologías capaces de reducir significativamente la discapacidad relacionada con el dolor. En un escenario meramente ilustrativo, donde una tecnología como MindNet llegara al 10 % de la población económicamente afectada por el dolor y redujera los costos asociados en ese grupo en un 25 %, la aplicación de valores estadounidenses correspondería a aproximadamente entre 14 y 15.900 millones de dólares anuales en costos potencialmente evitados. En un escenario a mayor escala, con una cobertura del 50 % y una reducción del 50 % en la carga económica entre las personas tratadas, este valor podría alcanzar aproximadamente entre 140 y 158.800 millones de dólares anuales. Estas proyecciones demuestran la escala económica potencial de una intervención que produce reducciones clínicamente probadas en el dolor, la discapacidad y las pérdidas de productividad global.

En este modelo, la reducción del dolor y la discapacidad podría disminuir las hospitalizaciones, las consultas, los tratamientos, las ausencias laborales y otros costos asociados con la enfermedad; la recuperación funcional podría aumentar las horas de trabajo y reducir el absentismo; y la implementación de la propia arquitectura podría establecer una nueva cadena económica neurodigital.

Además, el tratamiento farmacológico prolongado del dolor crónico puede generar efectos adversos, la necesidad de monitorización y costes adicionales para los sistemas sanitarios. Algunas clases de medicamentos presentan riesgos significativos cuando se utilizan durante periodos prolongados o en poblaciones vulnerables. En el caso del autor, tras aproximadamente seis años de tratamiento, se identificaron alteraciones morfológicas renales y cerebrales, en un contexto en el que los medicamentos utilizados no proporcionaban un control completo del dolor. Los antiinflamatorios no esteroideos, por ejemplo, se asocian a riesgos gastrointestinales, cardiovasculares y renales, mientras que otros medicamentos utilizados en el tratamiento del dolor crónico pueden producir sedación, mareos y efectos cognitivos (CDC, 2022).

En lo que respecta a los opioides, si bien son medicamentos esenciales en ciertas situaciones clínicas, su uso prolongado para el dolor crónico representa un peligro inminente para muchos pacientes y se asocia con riesgos de trastorno por consumo de opioides, sobredosis y otros eventos adversos graves.

En Estados Unidos, millones de personas denuncian el uso indebido de opioides recetados o un trastorno relacionado con su consumo, mientras que en las últimas décadas se han registrado cientos de miles de muertes por sobredosis relacionadas con opioides recetados.
Este problema se suma a la carga económica que suponen los costes del dolor relacionados con el tratamiento de la adicción, la atención de urgencias, las hospitalizaciones, la pérdida de productividad y la mortalidad prematura.

En este contexto, MindNet se presenta como una opción necesaria, capaz de reducir la intensidad del dolor, la discapacidad y la necesidad de tratamiento farmacológico. Su potencial impacto económico podría incluir la reducción de la exposición prolongada a ciertos medicamentos y los costos asociados a sus efectos adversos. La reducción segura de la necesidad de opioides podría aportar beneficios adicionales relacionados con una menor exposición a los opioides recetados y, por consiguiente, una reducción de los riesgos asociados a su uso prolongado, incluyendo el trastorno por consumo de opioides y la sobredosis.

7. Conclusión y perspectivas de implementación de MindNet 7.1

Uniendo la ciencia, la salud y el futuro

MindNet puede implementarse de forma progresiva y modular, partiendo de componentes que ya tienen precedentes e incluso se utilizan actualmente, y avanzando hacia su integración en un sistema neurodigital de circuito cerrado. Como inventor, espero que esta implementación sea tan sencilla como reiniciar un sistema tras un fallo, integrando tecnologías existentes de forma coordinada para que funcionen en armonía dentro de una nueva arquitectura guiada por el principio de primum non nocere —«no hacer daño»—. El desarrollo de una alternativa para el alivio del dolor crónico puede avanzar en cuanto se disponga de los recursos necesarios y del respaldo del sistema judicial.

Como estudiante de medicina, imagino que se realizarán estudios controlados y específicos en instituciones educativas y de investigación, y que MindNet, en el futuro, conectará a personas con el propósito de contribuir al alivio del dolor de millones. Como activista (@ju4justice), me gustaría llevar el tema del dolor crónico, en su enorme dimensión de salud pública, a espacios donde la ciencia, las políticas públicas y la legislación puedan converger en el debate de soluciones de alcance global, incluyendo organizaciones internacionales que apoyan la democracia, como las Naciones Unidas (ONU) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Como madre, deseo la sanación para mi familia.

El enfoque más racional es este. Tras desarrollar una serie de proyectos de prueba de concepto basados en los estudios aquí presentados, cada etapa de la arquitectura puede evaluarse de forma objetiva, medible y reproducible. A medida que se demuestren estas pruebas, el debate irá avanzando progresivamente desde la viabilidad teórica hasta la ejecución, y cuento con más de diez años de experiencia implementando soluciones de telecomunicaciones. En esta etapa, cualquier objeción a...

La implementación de MindNet deberá evaluarse no solo con los resultados de la prueba de concepto, sino también con la bibliografía científica citada en este trabajo, que proporciona precedentes independientes para diversos componentes de la arquitectura. Precisamente una secuencia transparente de pruebas de concepto permitirá que los datos —y no las opiniones personales— determinen el alcance de la integración propuesta por MindNet. Por lo tanto, la cuestión científica no debería ser quién está a favor o en contra de MindNet, sino qué funciones se pueden demostrar y qué problemas puede ayudarnos a resolver esta tecnología, especialmente considerando la dimensión humana y social del dolor crónico.

En resumen, MindNet puede entenderse como una arquitectura de telecomunicaciones neurodigital en la que el cerebro constituye simultáneamente fuente y destino de información. Así pues, abramos el nuestro. Su lógica fundamental sigue la evolución histórica de las telecomunicaciones: fenómenos que originalmente no eran transmisibles a largas distancias en su forma física son adquiridos por transductores, convertidos en representaciones, codificados, transportados por redes y reconstruidos o utilizados en el extremo receptor. Y, con cada implementación, la economía sigue el avance, algo especialmente significativo para quienes, como yo, creen en el valor del trabajo honesto como motor de desarrollo económico y social.

Una voz no viaja a través de una fibra óptica como el sonido. Una fotografía no viaja por internet como la luz. Un vídeo no viaja por una red como el movimiento físico. Del mismo modo, en MindNet, el estado neuronal no necesita recorrer distancias como un campo cerebral.
Se adquiere, se convierte en datos y se transforma en una representación neurodigital transmisible. Es este cambio de dominio —de lo neuronal a lo físico, de lo físico a lo digital y de lo digital a las telecomunicaciones— lo que nos permite concebir la distancia no como una barrera absoluta, sino como una invitación a la conexión.

8. El origen personal de MindNet 8.1 Mi trayectoria hasta ahora

Tras quedar discapacitada durante el parto, empecé a usar silla de ruedas o muletas para desplazarme, y mi propio cuerpo se convirtió, en cierto modo, en objeto de estudio. A partir de la experiencia de vivir con dolor crónico durante seis años, descubrí cómo adaptarme y sobrellevar esta afección que, en algunos casos —y particularmente en el mío —, puede llegar a asemejarse a una forma de tortura, debido a su intensidad y persistencia.

Mi hijo y yo seguimos esperando que los tribunales hagan valer nuestro derecho a la restitución integral, el principio jurídico de reparación completa, que busca restablecer, en la medida de lo posible, la situación que habría existido de no haberse producido el daño, mediante la indemnización íntegra por las pérdidas sufridas. Con recursos limitados por la situación descrita, mientras espero la correspondiente indemnización por los daños sufridos, he comenzado los tratamientos que están a mi alcance económico, aun cuando estos presenten riesgos y efectos secundarios, y no garanticen necesariamente una recuperación total.

(CGC-23-11182, CGC-25-622102)

Tras desarrollar fibromialgia como consecuencia de una lesión medular, me propuse encontrar una alternativa. Así nació este estudio, como una flor de loto en el barro, de una gran necesidad personal y, al mismo tiempo, de un problema de alcance global.

Fue a causa de la fibromialgia que comprendí que, para estudiar el dolor, necesitaba entender mejor el cerebro. Ahí comenzó mi interés por la neurociencia. Y, como no podía abandonar mi propia trayectoria, mi formación técnica en telecomunicaciones e informática integró naturalmente la tecnología en esta investigación, y a partir de ahí, todo es historia.

Por lo tanto, este estudio surge también de la necesidad de establecer un puente técnicamente definido entre campos que tradicionalmente se han investigado de forma relativamente independiente en la lucha contra el dolor crónico: la neurociencia de los procesos de transducción y representación neuronal y la ingeniería de telecomunicaciones, que se encarga de transmitir información a largas distancias.

Esta convergencia de áreas que formaron parte de diferentes momentos de mi carrera acabó convirtiéndose en la base interdisciplinaria para pensar en una arquitectura en la que los estados neuronales pudieran sincronizarse entre individuos.

Fue a partir de este encuentro entre mi experiencia personal, la neurociencia y la tecnología que surgió la propuesta MindNet, objeto de solicitudes de patente ante el INPI (Instituto Nacional de la Propiedad Industrial de Brasil) y la USPTO (Universidad Estatal de Tocantins), y que utiliza diferentes tecnologías al unísono para investigar la posibilidad de ayudar al cerebro en una de las tareas que se han vuelto centrales para mi investigación: modular el dolor a través de la sincronización de estados neuronales.

La restitución integral no solo representa la posibilidad de reconstruir todo lo que mi familia ha perdido en los últimos seis años —al fin y al cabo, ¿cómo podría alguien reemplazar seis años de la vida de una persona?—. Para mí, también representa la oportunidad de implementar MindNet, con la esperanza de superar el dolor crónico y recuperar la vida que me impide vivir; y para mi hijo, significa algo que ningún valor económico podría medir: la posibilidad de recuperar a su madre.

9. Referencias bibliográficas

3GPP. TS 23.501: Arquitectura del sistema para el sistema 5G. [S. l.]: 3rd Generation Partnership Project, [sd].

AL-WASITY, Salim et al. Hiperalineación de áreas corticales motoras basada en la imaginería motora durante la observación de acciones. Scientific Reports, vol. 10, art. 5362, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-62071-2.

ATTWELL, David; LAUGHLIN, Simon B. Un presupuesto energético para la señalización en la materia gris del cerebro. Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, vol. 21, n.º 10, págs. 1133-1145, 2001. DOI: https://doi.org/10.1097/00004647-200110000-00001.

BERNI, Tommaso; SACHELI, Lucia Maria et al. Juntos nos sincronizamos: una revisión sistemática cualitativa y cuantitativa de estudios de hiperescaneo por resonancia magnética funcional. Social Cognitive and Affective Neuroscience, vol. 21, n.º 1, nsaf122, 2025. DOI: https://doi.org/10.1093/scan/nsaf122.

BUSCH, Elijah L. et al. Hiperalineación híbrida: un modelo único de alta dimensión de información compartida integrada en patrones corticales de respuesta y conectividad funcional. NeuroImage, vol. 233, art. 117975, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.117975.

CHEN, Hung-Tu; MANNING, Jeremy R.; VAN DER MEER, Matthijs AA La predicción entre sujetos revela una geometría representacional compartida en el hipocampo de roedores. Current Biology, vol. 31, n.º 19, págs. 4293–4304.e5, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.061.

CIFRE, Inmaculada et al. Alteración de la conectividad funcional de la red del dolor en la fibromialgia. Medicina Psicosomática, vol. 74, págs. 55-62, 2012.

CONROY, Bryan R. et al. Alineación interindividual de la anatomía cortical humana mediante conectividad funcional. NeuroImage, vol. 81, págs. 400–411, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.009.

COOK, Dane B. et al. Imágenes funcionales del dolor en pacientes con fibromialgia primaria. Journal of Rheumatology, vol. 31, págs. 364–378, 2004.

CUNNINGHAM, Charles H. et al. Cuantificación del metabolismo cerebral humano normal mediante piruvato [1-^{13}C] hiperpolarizado e imágenes por resonancia magnética. NeuroImage, 2019.

DARNELL, Dean et al. Diseño de bobina integrada de radiofrecuencia/inalámbrica para adquisición simultánea de imágenes de RM y comunicación inalámbrica. Magnetic Resonance in Medicine, vol. 81, n.º 3, pág. 2176–2183, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/mrm.27513.

DECHARMS, R. Christopher et al. Control de la activación cerebral y el dolor aprendido mediante resonancia magnética funcional en tiempo real. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, vol. 102, págs. 18626–18631, 2005. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0505210102.

DEERNING, Stephen; HINDEN, Robert. Especificación del Protocolo de Internet, versión 6 (IPv6). RFC 8200. [S. l.]: Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet, 2017.

DIAZ, RE; SEBASTIAN, T. Límites electromagnéticos de la telemetría neuronal por radiofrecuencia (RF). Scientific Reports, vol. 3, art. 3535, 2013. DOI: https://doi.org/10.1038/srep03535.

DUMAS, Guillaume et al. Sincronización intercerebral durante la interacción social. PLOS ONE, vol. 5, e12166, 2010.

ECHCGADDA, Ibtissam et al. Cambios en la excitabilidad de neuronas primarias del hipocampo tras la exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia de 3,0 GHz. Scientific Reports, vol. 12, art. 3506, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-06914-0.

EPSTEIN, Robert. El cerebro como transductor: ¿y si el cerebro no es un procesador de información autónomo? ¿Y si es simplemente un transductor? ScienceOpen Preprints, 2021. Preimpresión. DOI: https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-.PPICS3U.v1.

FARAHANI, Farzad V. et al. Efectos de la hiperalineación de conectividad (CHA) en las propiedades estimadas de la red cerebral: de la escala gruesa a la escala fina. bioRxiv, 2024. Preimpresión. DOI: https://doi.org/10.1101/2024.08.27.609817.

FEILONG, Ma et al. Diferencias individuales fiables en la arquitectura funcional cortical de grano fino. NeuroImage, vol. 183, págs. 375–386, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.08.029.

GORDON, Jeremy W. et al. Topografía del lactato en el cerebro humano mediante resonancia magnética de 13C hiperpolarizado. NeuroImage, vol. 204, art. 116202, 2019.

GRAU, Carles et al. Comunicación consciente cerebro a cerebro en humanos mediante tecnologías no invasivas. PLOS ONE, vol. 9, n.º 8, e105225, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/diario.pone.0105225.

GRIST, James T. et al. Resonancia magnética hiperpolarizada de 13C: un nuevo enfoque para investigar el metabolismo cerebral en la salud y las enfermedades neurológicas. Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, vol. 40, n.º 6, pág. 1137–1147, 2020. DOI: https://doi.org/10.1177/0271678X20909045.

GUAN, Ming et al. Autorregulación de la actividad cerebral en la neuralgia postherpética mediante neurofeedback con resonancia magnética funcional en tiempo real. PLOS ONE, vol. 10, e0123675, 2015.

GUNTUPALLI, J. Swaroop et al. Modelado de la codificación semántica en un espacio de representación neuronal común. Frontiers in Neuroscience, vol. 12, art. 437, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00437.

GUO, Jiahui et al. Predicción de la topografía selectiva de rostros individuales mediante estímulos naturalistas. NeuroImage, vol. 216, art. 116458, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116458.

HALL, Catherine N. et al. Los pericitos capilares regulan el flujo sanguíneo cerebral en la salud y la enfermedad. Naturaleza, vol. 508, pág. 55–60, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13165.

HAXBY, James V. et al. Representaciones distribuidas y superpuestas de rostros y objetos en la corteza temporal ventral. Science, vol. 293, págs. 2425–2430, 2001.

HAXBY, James V. et al. Un modelo común de alta dimensión del espacio representacional en la corteza temporal ventral humana. Neuron, vol. 72, n.º 2, págs. 404-416, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.08.026.

HAXBY, James V. et al. Hiperalineación: información de modelado compartida codificada en topografías corticales idiosincrásicas. eLife, vol. 9, e56601, 2020. DOI: https://doi.org/10.7554/eLife.56601.

HAYNES, John-Dylan; REES, Geraint. Decodificación de estados mentales a partir de la actividad cerebral en humanos. Nature Reviews Neuroscience, vol. 7, págs. 523–534, 2006.

HILLMAN, Elizabeth MC. Mecanismo de acoplamiento y significado de la señal BOLD: un informe de situación. Annual Review of Neuroscience, vol. 37, págs. 161-181, 2014. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-014111.

IENCA, Marcello; ANDORNO, Roberto. Hacia nuevos derechos humanos en la era de la neurociencia y la neurotecnología. Ciencias de la Vida, Sociedad y Política, vol. 13, art. 5, 2017.

JIANG, Linxing et al. BrainNet: una interfaz cerebro a cerebro multipersona para la colaboración directa entre cerebros. Scientific Reports, vol. 9, art. 6115, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-41895-7.

JUUTILAINEN, Jukka et al. Revisión de los posibles efectos biológicos dependientes de la modulación de los campos de radiofrecuencia. Bioelectromagnetics, vol. 32, n.º 7, págs. 511–534, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/bem.20652.

KAPUR, Arnav; KAPUR, Shreyas; MAES, Pattie. AlterEgo: una interfaz de voz silenciosa portátil y personalizada. En: CONFERENCIA INTERNACIONAL SOBRE INTERFACES DE USUARIO INTELIGENTES, 23., 2018. Actas [...]. Nueva York: Association for Computing Machinery, 2018. págs. 43-53. DOI: https://doi.org/10.1145/3172944.3172977.

KHAN, Alixander S.; LAUSTSEN, Christopher. Tecnologías y estrategias para la obtención de imágenes metabólicas y moleculares mediante resonancia magnética hiperpolarizada. Journal of Magnetic Resonance Imaging, vol. 63, n.º 2, págs. 310-327, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/jmri.70084.

KHWANDAH, Sinan A. et al. Sistemas MIMO masivos para comunicaciones 5G. Wireless Personal Communications, vol. 120, págs. 2101–2115, 2021.

KOUTELAKIS, George V. et al. DICOMweb™: antecedentes y aplicación del estándar web para imágenes médicas. Journal of Digital Imaging, 2018.

KWONG, Kenneth K. et al. Imágenes de resonancia magnética dinámica de la actividad cerebral humana durante la estimulación sensorial primaria. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, vol. 89, n.º 12, págs. 5675–5679, 1992. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.89.12.5675.

LEDBETTER, MP et al. Detección remota de RMN en campo cero con un magnetómetro atómico microfabricado. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, vol. 105, n.º 7, págs. 2286–2290, 2008. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0711505105.

LOGOTHETIS, Nikos K. et al. Investigación neurofisiológica de la base de la señal de resonancia magnética funcional. Naturaleza, vol. 412, pág. 150–157, 2001. DOI: https://doi.org/10.1038/35084005.

MACINNES, José J.; DICKERSON, Katherine C.; CHEN, Nan-kuei; ADCOCK, R. Alison.
Pyneal: software de fMRI en tiempo real de código abierto. Frontiers in Neuroscience, vol. 14, art. 900, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00900.

MATHIS, Mackenzie W.; MATHIS, Alexander. Modelado conjunto de la dinámica cerebral y conductual con inteligencia artificial. Nature Reviews Neuroscience, vol. 27, págs. 87–100, 2026.

MCFARLAND, Dennis J.; SARNACKI, William A.; WOLPAW, Jonathan R. Funcionamiento de la interfaz cerebro-computadora (BCI): optimización de las tasas de transferencia de información. Biological Psychology, vol. 63, n.º 3, págs. 237-251, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0301-0511(03)00073-5.

MONTAGUE, P. Read et al. Hiperscanning: resonancia magnética funcional simultánea durante interacciones sociales vinculadas. NeuroImage, vol. 16, págs. 1159–1164, 2002.

NAPADOW, Vitaly et al. La conectividad cerebral intrínseca en la fibromialgia se asocia con la intensidad del dolor crónico. Arthritis & Rheumatism, vol. 62, págs. 2545–2555, 2010.

NELSON, Sarah J. et al. Imágenes metabólicas de pacientes con cáncer de próstata mediante piruvato [1-^{13}C] hiperpolarizado. Science Translational Medicine, vol. 5, art. 198ra108, 2013.

NEUROSTORM. Hacia un modelo fundamental de propósito general para el análisis de resonancia magnética funcional. Nature Biomedical Engineering, 2026.

NICHOLAS, Michael et al. La clasificación IASP del dolor crónico para la CIE-11: dolor primario crónico. Pain, vol. 160, págs. 28-37, 2019.

NORMAN, Kenneth A. et al. Análisis de patrones multivoxel de datos de fMRI. Trends in Cognitive Sciences, vol. 10, págs. 424–430, 2006.

OGAWA, Seiji et al. Cambios en la señal intrínseca que acompañan a la estimulación sensorial: mapeo cerebral funcional mediante resonancia magnética. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, vol. 89, n.º 13, págs. 5951–5955, 1992. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.89.13.5951.

PAIS-VIEIRA, Miguel et al. Una interfaz cerebro a cerebro para compartir información sensoriomotora en tiempo real. Scientific Reports, vol. 3, art. 1319, 2013. DOI: https://doi.org/10.1038/srep01319.

PAIS-VIEIRA, Miguel et al. Construcción de un dispositivo informático orgánico con múltiples cerebros interconectados. Scientific Reports, vol. 5, art. 11869, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/srep11869.

PARK, Ilwoo et al. Desarrollo de métodos y viabilidad del uso de datos de imágenes de carbono-13 hiperpolarizado para evaluar el metabolismo cerebral en estudios de pacientes. Magnetic Resonance in Medicine, vol. 80, n.º 3, págs. 864-873, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/mrm.27077.

Postel, Jon. Protocolo de control de transmisión. RFC 793. [S. l.]: Grupo de trabajo de ingeniería de Internet, 1981.

RAO, Rajesh PN et al. Una interfaz directa cerebro-cerebro en humanos. PLOS ONE, vol. 9, n.º 11, e111332, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111332.

SAVUKOV, IM; ROMALIS, MV Detección de RMN con un magnetómetro atómico. Physical Review Letters, vol. 94, art. 123001, 2005. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.123001.

SCOTTI, Paul et al. Reconstrucción de la visión mental: fMRI a imagen con aprendizaje contrastivo y priors de difusión. Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 36, 2023.

SHANNON, Claude E. Una teoría matemática de la comunicación. Bell System Technical Journal, vol. 27, págs. 379–423; 623–656, 1948.

SHIRVALKAR, Prasad et al. Primera predicción en humanos del estado de dolor crónico mediante biomarcadores neuronales intracraneales. Nature Neuroscience, vol. 26, págs. 1090–1099, 2023.

SITARAM, Ranganatha et al. Entrenamiento cerebral de circuito cerrado: la ciencia del neurofeedback. Nature Reviews Neuroscience, vol. 18, págs. 86-100, 2017.

STOCCO, Andrea et al. Jugando a 20 preguntas con la mente: resolución colaborativa de problemas por humanos usando una interfaz cerebro a cerebro. PLOS ONE, vol. 10, n.º 9, e0137303, 2015. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137303.

SÜMER-ARPAK, Esra et al. Estado actual de los modelos fundamentales para la decodificación del habla interna a partir de señales cerebrales no invasivas: una breve revisión. Frontiers in Human Neuroscience, vol. 20, art. 1838064, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fnhum.2026.1838064.

SUN, Shulei; BOK, Junsoo; JANG, Yongwoo; SEO, Hyemyung. Efectos modificadores de la enfermedad cerebral de la radiofrecuencia como tecnología de estimulación neuronal sin contacto. International Journal of Molecular Sciences, vol. 26, n.º 5, art. 2268, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms26052268.

TAKAGI, Yu; NISHIMOTO, Shinji. Reconstrucción de imágenes de alta resolución con modelos de difusión latente a partir de la actividad cerebral humana. En: Conferencia IEEE/CVF sobre Visión por Computadora y Reconocimiento de Patrones, 2023. Actas [...]. 2023. págs. 14453–14463.

Tang, Jerry; LEBEL, Amanda; JAIN, Shailee; HUTH, Alexander G. Reconstrucción semántica del lenguaje continuo a partir de registros cerebrales no invasivos. Nature Neuroscience, vol. 26, págs. 858–866, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41593-023-01304-9.

TREEDE, Rolf-Detlef et al. Una clasificación del dolor crónico para la CIE-11. Pain, vol. 156, págs. 1003–1007, 2015.

VAFAEI, Shirin et al. La alineación cerebral de vectores semánticos mejora la decodificación neuronal de estímulos visuales. Communications Biology, vol. 9, art. 206, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-025-09482-x.

VERPILLAT, F. et al. Detección remota de resonancia magnética nuclear con un sensor magnetoresistivo anisotrópico. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, vol. 105, n.º 7, págs. 2271–2273, 2008. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0712129105.

VOLKOW, Nora D. et al. Efectos de la exposición a señales de radiofrecuencia de teléfonos celulares en el metabolismo de la glucosa cerebral. JAMA, vol. 305, n.° 8, págs. 808–813, 2011. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.2011.186.

WAGER, Tor D. et al. Una firma neurológica del dolor físico basada en resonancia magnética funcional. New England Journal of Medicine, vol. 368, págs. 1388–1397, 2013.

WANG, Y. et al. Avances, desafíos y futuro de la decodificación neuronal lingüística con aprendizaje profundo. Biología de las Comunicaciones, vol. 8, art. 1350, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-025-08511-z.

WANG, Zhen J. et al. Resonancia magnética de ^{13}C hiperpolarizado: estado del arte y direcciones futuras. Radiology, vol. 291, n.º 2, págs. 273–284, 2019. DOI: https://doi.org/10.1148/radiol.2019182391.

WOO, Choong-Wan et al. Cuantificación de las contribuciones cerebrales al dolor más allá de la nocicepción. Nature Communications, vol. 8, art. 14211, 2017.

YANG, X. et al. Una revisión del análisis de datos de fMRI basado en Transformer: del modelado espaciotemporal a los modelos de fundamentos cerebrales. Frontiers in Neuroinformatics, vol. 20, 2026. DOI: https://doi.org/10.3389/fninf.2026.1869687.

YUSTE, Rafael et al. Cuatro prioridades éticas para las neurotecnologías y la IA. Nature, vol. 551, pág. 159–163, 2017.

Normas, documentación técnica y fuentes institucionales

COMITÉ DE ESTÁNDARES DICOM. Imágenes digitales y comunicaciones en medicina (DICOM): PS3.1 – Introducción y descripción general. Rosslyn: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, [s.f.]. Disponible en: DICOM PS3.1 — Introducción y descripción general. Consultado el 6 de octubre de 2026.

COMITÉ DE ESTÁNDARES DICOM. Imágenes digitales y comunicaciones en medicina (DICOM): PS3.18 – Servicios web. Rosslyn: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, [s.f.]. Disponible en: DICOM PS3.18 — Servicios web. Consultado el 6 de octubre de 2026.

IEC. IEC 60601-2-33: Equipos electromédicos — Parte 2-33: Requisitos particulares para la seguridad básica y el rendimiento esencial de los equipos de resonancia magnética para diagnóstico médico. Ginebra: Comisión Electrotécnica Internacional, [s.f.].

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. ISO 12052:2026: Informática sanitaria: imágenes digitales y comunicación en medicina (DICOM), incluyendo flujo de trabajo y gestión de datos. 3.ª ed. Ginebra: ISO, 2026.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS. MIT Media Lab. AlterEgo: una interfaz de voz silenciosa portátil y personalizada. Cambridge, MA: MIT Media Lab, [s.f.]. Disponible en: MIT Media Lab — AlterEgo. Consultado el 6 de octubre de 2026.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS. MIT Media Lab. AlterEgo: preguntas frecuentes. Cambridge, MA: MIT Media Lab, [s.f.]. Disponible en: MIT Media Lab — Preguntas frecuentes sobre AlterEgo. Consultado el 6 de octubre de 2026.

OCDE. Recomendación del Consejo sobre Innovación Responsable en Neurotecnología. OCDE/LEGAL/0457. París: OCDE, 2019.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Organización Mundial de la Salud. Ginebra: OMS, [sd]. Disponible en: Organización Mundial de la Salud. Consultado el 6 de octubre de 2026.

DOWELL, Deborah et al. Guía de práctica clínica de los CDC para la prescripción de opioides para el dolor — Estados Unidos, 2022. MMWR Recommendations and Reports, Atlanta, vol. 71, n.º 3, págs. 1-95, 2022. DOI: 10.15585/mmwr.rr7103a1. Disponible en: Guía de práctica clínica de los CDC para la prescripción de opioides para el dolor. Consultado el 7 de octubre de 2026. CDC

GASKIN, Darrell J.; RICHARD, Patrick. Los costos económicos del dolor en los Estados Unidos. The Journal of Pain, vol. 13, n.° 8, págs. 715–724, 2012. DOI: 10.1016/j.jpain.2012.03.009. Disponible en: PubMed — Los costos económicos del dolor en los Estados Unidos. Consultado el 7 de octubre de 2026 en PubMed.

INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD. Oficina de Investigación en Ciencias del Comportamiento y Sociales. Investigación de los NIH sobre el manejo del dolor crónico. Bethesda, 23 de junio de 2025. Disponible en: Investigación de los NIH sobre el manejo del dolor crónico. Consultado el 7 de octubre de 2026. OBSSR

SANTIAGO, Bruno Vitor Martins et al. Prevalencia del dolor crónico en Brasil: una revisión sistemática y metaanálisis. Clinics, vol. 78, art. 100209, 2023. DOI: 10.1016/j.clinsp.2023.100209. Disponible en: PubMed — Prevalencia del dolor crónico en Brasil. Consultado el 7 de octubre de 2026 en PubMed.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Dolor lumbar. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 19 de junio. 2023. Disponible en: OMS — Dolor lumbar. Consultado el 7 de octubre de 2026. Organización Mundial de la Salud .

Nota importante para el texto: donde escribió “(Aguiar et al., 2023)” para la prevalencia brasileña del 35,70 %, debe decir “(Santiago et al., 2023)”. El estudio halló un 35,70 % en la población adulta y un 47,32 % entre las personas mayores.

אֵל נָא רְפָא נָא לָהּ (El na, refa na lah)

Libro de Números, capítulo 12, versículo 13.
Esta es la oración más breve de la Biblia:
?Oh Dios, por favor, sánala ahora?.