fundación innovación bankinter.

FUTURE TRENDS FORUM

Embodied AI

Contenido

Introducción 04

01 Concepto y alcance de la IA física 07

Definición y principios fundamentales

Evolución y estado del arte de la IA física

02 Avances tecnológicos y casos de uso 16

Innovaciones clave: robótica, sensores y computación multimodal

Casos de uso avanzados

Modelos de Negocio Emergentes

03 Educación y Trabajo 47

04 Geoestrategia e inversión en IA física 53

Competencia global: dinámicas entre EE. UU., China y Europa

Inversiones globales en IA física

05 Ética y Regulación 62

Desafíos éticos en la interacción humano-máquina

Regulación responsable: equilibrio entre innovación y seguridad

06 Conclusiones 79

07 Anexo Recomendaciones para Stakeholders 89

Agentes de inversión y empresa

Agentes de investigación y educación

Agentes regulatorios

Introducción

Introducción

La inteligencia artificial está evolucionando más allá del ámbito virtual para integrarse en el mundo físico, gracias a la combinación de sensores, actuadores y modelos de aprendizaje multimodal. Esta transformación permite que las máquinas no solo procesen información, sino que también interactúen con su entorno de manera autónoma y adaptativa. Su impacto abarca sectores clave como la sanidad, la movilidad, la industria y los servicios, redefiniendo nuestra relación con la tecnología y abriendo nuevas oportunidades y desafíos en el desarrollo de sistemas inteligentes en el ámbito real.

Contexto global: IA física como tecnología transformadora

En un mundo cada vez más interconectado, donde la inteligencia artificial está redefiniendo sectores enteros, surge una nueva frontera tecnológica: la **Inteligencia Artificial física** (*Embodied AI*, en adelante, IA física). Este paradigma combina capacidades cognitivas avanzadas con una interacción física directa en el entorno, permitiendo a las máquinas no solo procesar información, sino también percibir, actuar y adaptarse en el mundo real.

La IA física se sitúa en la intersección de disciplinas como la robótica, el aprendizaje profundo y las interfaces humanas, y representa un cambio fundamental respecto a la inteligencia artificial tradicional basada en datos y algoritmos abstractos. Esta transición responde a la necesidad de sistemas más integrados y versátiles, capaces de operar en entornos dinámicos como hospitales, fábricas, hogares inteligentes y ciudades.

A nivel global, esta tecnología está atrayendo la atención de líderes empresariales, investigadores, inversores, emprendedores y gobiernos, quienes reconocen su potencial para transformar la economía y la sociedad. Desde los vehículos autónomos y los robots asistenciales hasta las plataformas de simulación avanzadas, las aplicaciones de IA física están generando oportunidades en sectores tan diversos como la sanidad, la logística, la agricultura y la educación.

Al mismo tiempo, esta revolución plantea retos considerables. **La integración de sistemas físicos y cognitivos requiere superar barreras como los sesgos en los datos de entrenamiento, los riesgos para la privacidad y la necesidad de una regulación que equilibre innovación y seguridad.** Además, la competencia geopolítica entre regiones como Estados Unidos, China y Europa añade una capa de complejidad en la carrera por liderar esta tecnología.

En este contexto, la IA física se posiciona como una tecnología revolucionaria que redefine la interacción humano-máquina. Más allá de la tecnología, **impulsa cambios profundos en la manera en que las máquinas participan en nuestra vida cotidiana, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y a replantear el papel de la inteligencia artificial en los entornos físicos.** Este informe aborda estas cuestiones desde una perspectiva global, explorando tanto las oportunidades como los riesgos asociados con esta prometedora tecnología.

Objetivo del informe

Este informe tiene como objetivo consolidar las principales ideas, conclusiones y recomendaciones derivadas del Future Trends Forum sobre IA física, organizado por la Fundación Innovación Bankinter. Se presenta como una referencia estratégica para líderes empresariales, reguladores, inversores, emprendedores, investigadores y educadores interesados en comprender y capitalizar el impacto de esta tecnología emergente.

Concretamente, el informe persigue:

01

Explorar el estado actual de la IA física analizando los avances tecnológicos, las limitaciones actuales y las tendencias previstas para los próximos 5 a 10 años.

02

Identificar oportunidades y desafíos examinando las implicaciones económicas, sociales y éticas de su adopción, incluyendo aspectos como el impacto laboral, la privacidad o la equidad.

03

Proporcionar recomendaciones accionables diseñando estrategias prácticas para maximizar los beneficios de la IA física y garantizar un desarrollo sostenible y responsable.

1

Concepto y alcance de la IA física

1

Concepto y alcance de la IA física

En el núcleo de la inteligencia artificial física se encuentra una premisa revolucionaria: la capacidad de integrar habilidades cognitivas avanzadas con interacciones físicas en el mundo real. Este paradigma, que se distingue por su énfasis en la presencia y el "embodiment", redefine la manera en que humanos y máquinas coexisten y colaboran.

La IA física es más que una extensión de la IA tradicional; es un modelo más integral **capaz de aprender, adaptarse y actuar en entornos físicos complejos**. Su desarrollo marca un punto de inflexión en cómo abordamos los desafíos del aprendizaje automático, la robótica y las interfaces inteligentes.

Esta sección profundiza en los principios fundamentales de la IA física, sus raíces en la evolución de la inteligencia artificial y las oportunidades que ofrece para consolidar nuevas dinámicas de innovación y competitividad global. Al analizar sus bases conceptuales, se sientan los pilares para entender por qué esta tecnología está siendo vista como un catalizador del cambio en la próxima década.

Definición y principios fundamentales

Los participantes del foro identifican la IA física como la intersección entre la inteligencia artificial y los sistemas robóticos, describiéndola como "IA aplicada a máquinas" o "la integración de la IA en hardware físico". Este enfoque permite combinar inteligencia computacional con un soporte físico que amplifica su utilidad y alcance.

Esto se logra mediante la integración de capacidades sensoriales, cognitivas y motoras, permitiendo que las máquinas perciban, tomen decisiones y actúen en tiempo real.

La IA física se define como un enfoque de la inteligencia artificial en el que los sistemas, además de procesar información abstracta, están diseñados para interactuar de manera directa y adaptativa con su entorno físico.

El concepto de IA física se fundamenta en varios principios clave:

1

Embodiment (Encarnación)

Los sistemas de IA física AI están intrínsecamente ligados a un cuerpo físico que les permite interactuar con el mundo de forma tangible. Este cuerpo puede adoptar múltiples formas, desde robots humanoides hasta dispositivos autónomos especializados.

2

Interacción multimodal

Las tecnologías de IA física combinan datos provenientes de varias fuentes, como visión, sonido, temperatura y tacto, para construir una representación rica y dinámica del entorno.

3

Aprendizaje adaptativo

A diferencia de los sistemas estáticos, la IA física aprende continuamente de sus interacciones con el entorno, adaptándose a cambios y mejorando su rendimiento con el tiempo.

4

Integración cognitivo-física

Estos sistemas combinan procesos de razonamiento abstracto con capacidades de acción física, permitiendo respuestas precisas y contextualizadas en situaciones complejas.

5

Consciencia espacial y temporal

La IA física, además de actuar en el espacio tridimensional, también toma decisiones sobre secuencias de eventos, anticipando consecuencias y planificando acciones a futuro.

Estos principios colocan a la IA física en la vanguardia de la tecnología, ampliando el alcance de la inteligencia artificial más allá de lo digital para abordar problemas reales en entornos físicos. Su desarrollo abre nuevas posibilidades en sectores clave y redefine las interacciones entre humanos y máquinas.

Taxonomía de la IA física

La IA física puede clasificarse en las siguientes categorías, que reflejan la diversidad de formas en las que la IA se integra en el mundo físico:

1

Integrada

IA integrada en objetos y entornos existentes, como hogares inteligentes o tecnología *wearable* (objetos que llevamos encima).

2

Aumentada

IA que amplifica las capacidades humanas mediante tecnologías como exoesqueletos o prótesis avanzadas.

3

Modular

IA contenida en módulos intercambiables, adaptables a diversas formas físicas como drones, robots o vehículos.

4

Parcialmente integrada

IA con una presencia física parcial, como interfaces holográficas o proyecciones que interactúan sin un cuerpo tangible.

5

Totalmente integrada – no antropomórfica

IA integrada en robots con formas no humanas, optimizada para tareas específicas.

6

Totalmente integrada – antropomórfica

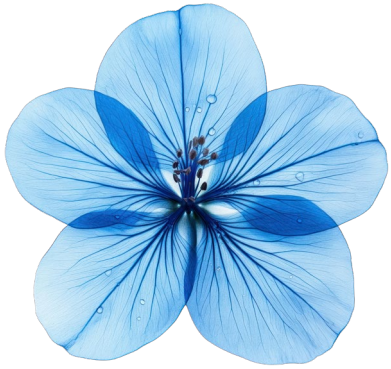
IA con apariencia y comportamiento humano, diseñada para roles específicos como asistentes o compañeros.

Esta taxonomía, propuesta por Pilar Manchón, Directora de Estrategia de Investigación en IA en Google, también incluye dimensiones transversales que definen las capacidades de la IA física:

- **Autonomía:** nivel de autonomía en la toma de decisiones.
- **Lenguaje natural:** capacidad para procesar y responder en lenguaje natural.
- **Movilidad:** grado de movimiento y desplazamiento físico.

Este enfoque estructurado permite entender cómo la IA física extiende el alcance de la inteligencia artificial, y también redefine la interacción y la colaboración entre humanos y máquinas.

Pilar Manchón



Evolución y estado del arte de la IA física

La evolución de la **IA física** refleja un cambio radical en la forma de conceptualizar la inteligencia artificial. Pasamos de modelos computacionales abstractos a sistemas profundamente integrados con el mundo físico, capaces de percibir, razonar y actuar de manera adaptativa. Este desarrollo, que combina principios biológicos y avances tecnológicos, redefine el rol de las máquinas en la sociedad y plantea preguntas esenciales sobre el futuro de la inteligencia.

La vida como fundamento de la inteligencia

La inteligencia natural, y por extensión cualquier intento de replicarla en sistemas artificiales, tiene sus raíces en la vida biológica: conceptos como la **homeostasis** -la capacidad de un organismo para regular su entorno interno- son fundamentales para que emerja la consciencia y la inteligencia consciente. Antonio Damasio, Profesor de Psicología, Neurociencia y Neurología en Universidad del Sur de California y patrono de Fundación Innovación Bankinter, explica que los **sentimientos homeostáticos** son estados subjetivos que informan continuamente sobre el estado del cuerpo, sirviendo como la base sobre la cual se construye la consciencia. Estos sentimientos, que incluyen la temperatura corporal, la respiración y la función cardíaca, proporcionan al organismo información crítica para la supervivencia. Según Damasio, "la consciencia es el resultado espontáneo de estos procesos reguladores", y agrega que la ausencia de este componente biológico representa una limitación fundamental para la inteligencia artificial actual.

"El verdadero 'moonshot' de la IA física es capturar los fundamentos biológicos de la vida y trasladarlos a máquinas."

Antonio Damasio

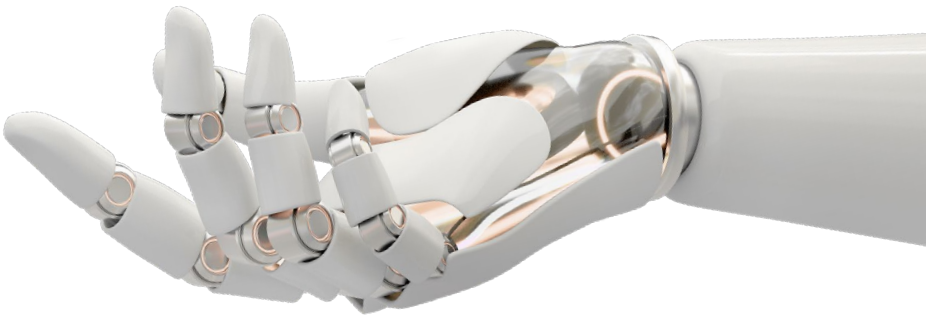
Ver vídeo

Según este análisis, la consciencia es inseparable de la biología: "No tenemos mentes desincorporadas. Nuestras mentes están conectadas a la vida a través de un cerebro que opera dentro de un cuerpo vivo".

La inteligencia artificial moderna, incluidas tecnologías avanzadas como los modelos generativos, carece de la dimensión biológica esencial para la consciencia y, por tanto, la **inteligencia consciente**. La IA actual puede simular procesos mentales, pero no puede replicar la regulación vital que define la consciencia natural. ¿Cómo podría resolverse esto? Planteando la posibilidad de desarrollar simulacros de procesos biológicos, integrando datos internos (como sensores de temperatura y presión) con datos externos en sistemas artificiales.

A medida que entendamos más sobre cómo los sistemas vivos generan consciencia, será posible aplicar estos principios a la IA física. Este enfoque podría cerrar la brecha entre la inteligencia artificial y la natural, y también proporcionar una **nueva generación de máquinas diseñadas para interactuar de manera consciente con su entorno y con los humanos**.

Para **Damasio**, este es el verdadero desafío—y la oportunidad—de la IA física; crear máquinas que sienten (*"feeling machines"*), que pudiesen **operar de manera conscientemente inteligente**.



Estado del arte de la AI física

Los ciclos de entusiasmo y desilusión han definido el desarrollo de la tecnología de IA física, desde las enormes esperanzas generadas por el DARPA Grand Challenge en 2004 hasta los recientes progresos en modelos fundacionales.

Durante años, la IA física ha quedado eclipsada por avances en áreas como el procesamiento del lenguaje natural y los modelos generativos. Sin embargo, estamos en un punto de inflexión, según **Jeremy Kahn**, Editor de IA en la revista Fortune y autor de *Mastering AI: A Survival Guide to Our Superpowered Future*: **estamos pasado de sistemas fragmentados a modelos más integrados que revolucionan tanto la percepción como la toma de decisiones en entornos físicos**.

Históricamente, la IA física se construía a partir de múltiples modelos especializados que trabajaban de manera independiente. Por ejemplo, un sistema de conducción autónoma utilizaba un modelo para la percepción, otro para el posicionamiento y un modelo centralizado para la toma de decisiones. Este enfoque era funcional, pero ineficiente, ya que cada componente requería entrenamiento individual y dificultaba la adaptación a nuevos entornos.

En la actualidad, el enfoque está cambiando hacia los **modelos fundacionales**, que unifican percepción y toma de decisiones en una única arquitectura. Estos modelos permiten que los sistemas aprendan de entornos complejos y ejecuten tareas diversas con poco o ningún entrenamiento adicional. Por su parte, y también dentro de la evolución de la **IA física**, los **modelos del mundo** ("*world models*") han surgido como herramientas fundamentales para dotar a las máquinas de una comprensión profunda y anticipativa de su entorno. Según **Jeremy Kahn**, estos modelos permiten a los sistemas generar representaciones internas del espacio tridimensional y las dinámicas físicas, facilitando la navegación, la planificación y la resolución de problemas en tiempo real.

Jeremy Kahn

Ver vídeo

¿Qué son los modelos del mundo? Un modelo del mundo es un sistema generativo que simula las condiciones y reglas del entorno físico. A través de datos sensoriales (como visión, sonido y tacto), los modelos del mundo crean una representación virtual que permite a los sistemas de IA prever cómo evolucionará su entorno ante diversas acciones. Esta capacidad es crucial para entornos complejos o dinámicos donde las condiciones pueden cambiar rápidamente.

Relación con los modelos fundacionales: los modelos del mundo y los modelos fundacionales comparten la capacidad de integrar múltiples fuentes de datos en un marco único, pero se complementan de maneras específicas:

01

Modelos del mundo como soporte a los fundacionales

Mientras que los modelos fundacionales son generalistas y están diseñados para abordar una amplia gama de tareas, los modelos del mundo actúan como una capa de contexto adicional, proporcionando información detallada y específica sobre el entorno en el que opera la IA física.

Por ejemplo, un modelo fundacional puede procesar datos visuales para identificar objetos, pero un modelo del mundo puede utilizar esa información para calcular cómo esos objetos se moverán en el tiempo y el espacio.

02

Optimización de la toma de decisiones

Los modelos del mundo mejoran la capacidad de los sistemas fundacionales para anticipar y planificar, dotándolos de una visión "predictiva" en lugar de reactiva. Esto es especialmente importante en sectores como la movilidad autónoma, donde la capacidad de prever eventos es clave para garantizar la seguridad.

03

Capacidades multimodales

Ambos enfoques comparten el uso de datos multimodales (imágenes, sonidos, texto, etc.), pero los modelos del mundo están más centrados en simular la interacción física y temporal entre elementos del entorno.

Impacto de los modelos del mundo en la IA física: los modelos del mundo, además de fortalecer las capacidades de la IA física, abren nuevas posibilidades para su aplicación en sectores clave:

- En **logística**, optimizan la gestión de almacenes al prever dinámicas complejas entre inventarios, robots y trabajadores.
- En **sanidad**, pueden simular escenarios clínicos para entrenar dispositivos médicos autónomos.
- En **robótica doméstica**, permiten que los robots anticipen las necesidades de los usuarios y adapten sus acciones al contexto cambiante de un hogar.

En palabras de **Jeremy Kahn**, los modelos del mundo representan "un puente crítico entre el mundo físico y la toma de decisiones basada en datos", marcando una nueva etapa en el desarrollo de la IA física.

Para ilustrar la relevancia actual de los **modelos del mundo**, es destacable el caso de World Labs, una startup fundada en 2024 por la reconocida investigadora en inteligencia artificial Fei-Fei Li, junto con Justin Johnson, Christoph Lassner y Ben Mildenhall, todos ellos tecnólogos de renombre en visión por computadora y gráficos. World Labs se centra en desarrollar modelos de inteligencia artificial capaces de comprender y generar datos tridimensionales del mundo físico, lo que podría revolucionar múltiples industrias y aplicaciones tecnológicas. La empresa ha logrado una valoración de más de 1.000 millones de dólares en tan solo cuatro meses desde su creación, alcanzando el estatus de "unicornio" con un equipo de apenas 18 empleados.

Otro avance crucial en la IA física es la **integración del lenguaje natural como interfaz principal**, permitiendo a los usuarios interactuar con sistemas inteligentes mediante instrucciones verbales y eliminando la necesidad de programaciones técnicas complejas. Paralelamente, el desarrollo de interfaces cerebro-computadora no invasivas amplía aún más sus posibilidades, facilitando el control de dispositivos mediante señales cerebrales. Estas innovaciones, junto con la expansión de modelos fundacionales, drones autónomos, robots humanoides y dispositivos *wearables*, están impulsando la adopción de la IA física a un nivel sin precedentes. Este progreso está redefiniendo la interacción entre humanos y máquinas, estableciendo las bases para una nueva era tecnológica.

2

Avances tecnológicos y casos de uso

2

Avances tecnológicos y casos de uso

Tras décadas de desarrollo, la IA física ha evolucionado desde experimentos aislados hasta sistemas con aplicaciones prácticas en múltiples sectores. Como vimos en el apartado anterior, los avances en modelos fundacionales y modelos del mundo han sido claves para consolidar esta transformación.

Ahora, con una infraestructura tecnológica más madura y capacidades computacionales más potentes, nos encontramos en un punto de inflexión donde la IA física está comenzando a integrarse en entornos reales.

En este capítulo, exploramos las innovaciones clave que impulsan este cambio, así como los casos de uso que demuestran su impacto en la industria, la movilidad, la salud y otros sectores estratégicos, **posicionando a la IA física como un motor de innovación y cambio social en el siglo XXI**.

Innovaciones clave: robótica, sensores y computación multimodal

Con la llegada de los modelos fundacionales y del mundo antes analizados, el desarrollo de la **IA física** está impulsado por avances disruptivos en robótica, sensores y modelos multimodales, que amplían las capacidades de las máquinas para interactuar con el mundo físico.

Robótica

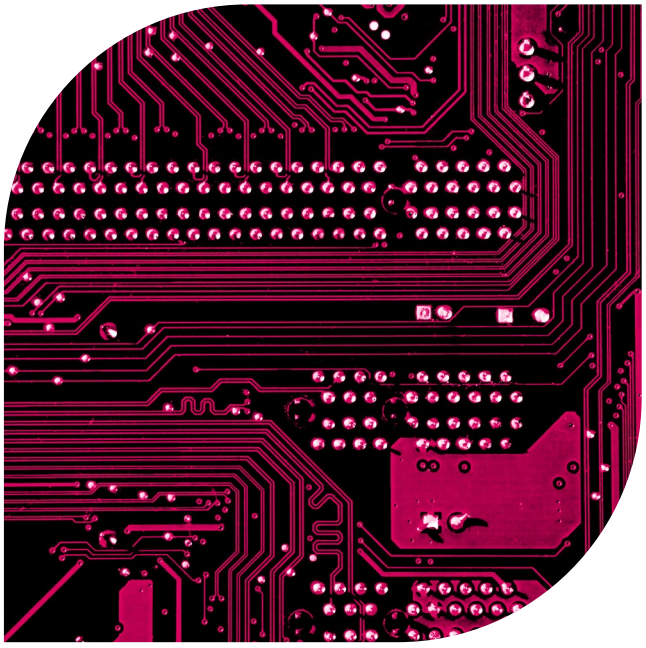
La robótica está evolucionando hacia sistemas bio-inspirados y adaptativos que mejoran la interacción con entornos humanos. **Dario Floreano**, Profesor de Sistemas Inteligentes en la EPFL y Director del Centro Nacional Suizo de Competencia en Robótica, destaca drones con alas similares a aves, que optimizan la maniobrabilidad mediante simulaciones avanzadas. **Leila Takayama**, Vicepresidenta de Diseño e Interacciones Humano-Robot en Robust.AI, enfatiza el diseño de robots que complementen las capacidades humanas, como el carrito autónomo de su empresa, que equilibra autonomía y control manual para mejorar la colaboración humano-robot. En agricultura, menciona a Farm-ng, una startup que desarrolla robots modulares con sensores avanzados y aprendizaje adaptativo, optimizando la producción y reduciendo el uso de pesticidas.

Dario Floreano

Ver vídeo

Leila Takayama

Ver vídeo



Ramón López de Mántaras

Ver vídeo

Sensores avanzados: hacia una percepción completa del entorno

La percepción precisa es clave para el funcionamiento de la IA física en entornos reales. **Ramón López de Mántaras**, Profesor de Investigación (Emérito) y ex director del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial del CSIC, destaca que la integración de datos multisensoriales —visión, sonido, tacto y sensores químicos— mejora la precisión y comprensión contextual de los sistemas. En robótica médica, los sensores hápticos permiten a los robots quirúrgicos proporcionar retroalimentación táctil en tiempo real, beneficiando también los cuidados geriátricos.

Modelos multimodales y aprendizaje contextual

Los modelos multimodales son clave en la IA física, ya que combinan datos de diversas fuentes para mejorar la comprensión del entorno. Floreano destaca los **modelos de lenguaje-visión-acción (VLA)** como un avance en el diseño de robots intuitivos, capaces de interpretar instrucciones complejas. El proyecto PLATO de DeepMind permite a los sistemas aprender relaciones causa-efecto visualmente, un enfoque que **López de Mántaras** relaciona con su propia investigación en robótica musical. Además, la *cloud robotics* facilita el aprendizaje colaborativo entre robots, acelerando su desarrollo y reduciendo costos. Sin embargo, **López de Mántaras** enfatiza que, aunque las simulaciones ayudan, la interacción física con el mundo sigue siendo insustituible. Aboga por enfoques híbridos neuro-simbólicos que combinen aprendizaje profundo con razonamiento lógico, permitiendo una mejor comprensión del tiempo, el espacio y la causalidad, esenciales para la evolución de la IA física.

Avances en sensores y modelos avanzados

La IA física está evolucionando gracias a tecnologías de alta precisión que mejoran la interacción entre máquinas y su entorno. Según **Fernando Domínguez**, Vicepresidente de SandboxAQ, los sensores magnéticos de ultra alta sensibilidad permiten recopilar y procesar datos en tiempo real, incluso en entornos extremos como la aviación y la microgravedad.

Un avance clave en este campo son los **Modelos Cuantitativos a Gran Escala (LQMs)**, que integran principios de física, biología y química para generar datos sintéticos mediante simulaciones científicas. A diferencia de los modelos de lenguaje, los LQMs permiten explorar fenómenos aún no observados y tienen aplicaciones en sanidad, navegación y la industria:

En salud, han reducido drásticamente los tiempos y costos de desarrollo de fármacos, como en la investigación del Alzheimer liderada por el Nobel Stanley Prusiner.

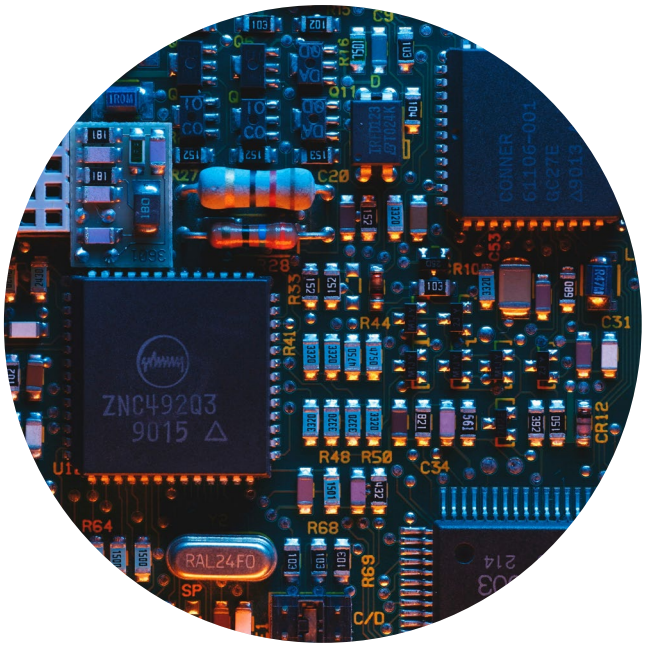
En navegación, mejoran la precisión en entornos sin GPS, esenciales para la aviación y la defensa.

En la industria, optimizan el diseño de materiales y procesos, reduciendo desperdicios y fomentando la sostenibilidad.

Los LQMs fortalecen la IA física al mejorar la toma de decisiones en tiempo real, expandiendo su impacto en sectores estratégicos. Su combinación con robótica avanzada abre nuevas oportunidades para la personalización de servicios y la resolución de problemas complejos.

Fernando Domínguez

Ver vídeo



Desafíos y futuras direcciones

A pesar de los avances, la IA física aún se enfrenta a retos clave. **Dario Floreano** señala que las simulaciones actuales no capturan por completo la complejidad de las interacciones físicas, limitando su aplicabilidad. **Ramón López de Mántaras** destaca que la combinación de enfoques neuro-simbólicos podría cerrar esta brecha al integrar razonamiento abstracto con percepción y aprendizaje automático.

Leila Takayama, por su parte, subraya el potencial de la IA física para abordar desafíos globales, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Por ejemplo, drones agrícolas para reducir pesticidas (ODS 2), sistemas como Zipline para entregar suministros médicos en zonas rurales y reducir muertes por hemorragias postparto (ODS 3), y robots autónomos de OpenOcean Robotics para proteger áreas marinas y combatir la pesca ilegal (ODS 14).

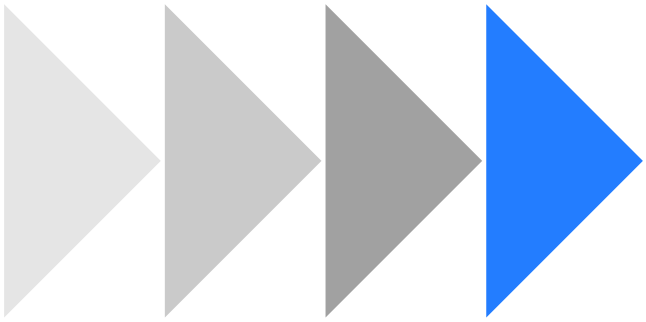
Para garantizar la sostenibilidad y escalabilidad de estas soluciones, **Takayama** enfatiza la necesidad de colaboraciones entre empresas tecnológicas, gobiernos y organizaciones filantrópicas, así como el diseño de tecnologías accesibles y fáciles de integrar en sus comunidades.

Estos desarrollos abren nuevas oportunidades para resolver problemas, destacando la importancia de diseñar soluciones útiles, accesibles y sostenibles con un impacto positivo en la sociedad.

Casos de uso avanzados

A medida que la **IA física** alcanza nuevas cotas de madurez tecnológica, su impacto se vuelve cada vez más evidente en una amplia variedad de sectores. En este apartado, exploramos ejemplos específicos donde la IA física está transformando sectores clave de la economía global, desde la sanidad hasta la industria 4.0 y la movilidad autónoma. Estos casos de uso destacan por su capacidad para abordar desafíos complejos, mejorar procesos tradicionales y redefinir cómo interactuamos con la tecnología en contextos cotidianos.

El foco de este análisis es, en primer lugar, identificar las innovaciones más impactantes que puedan inspirar al lector. En segundo lugar, comprender cómo estas aplicaciones están configurando un futuro donde la tecnología y la sociedad convergen de manera efectiva. Y, en tercer lugar, desgranar las oportunidades y retos a los que se enfrenta cada sector.



Industria

La industria es uno de los sectores donde la **IA física** está comenzando a tener un impacto con mayor potencial transformador. La combinación de tecnologías avanzadas, como robots colaborativos, gemelos digitales y sistemas autónomos, está cambiando los procesos de producción, logística y mantenimiento, a la vez que surgen retos importantes relacionados con la integración tecnológica y la confianza de los operarios.

Categorías de aplicación de la IA física en la Industria

Las soluciones de IA física en la industria pueden clasificarse según distintos criterios:

- **Por funcionalidad:** incluye ensamblaje, manejo de materiales, inspección de calidad y mantenimiento predictivo. Ejemplo: robots en líneas de ensamblaje o sistemas autónomos para monitoreo de equipos.
- **Por nivel de interacción:** van desde sistemas totalmente autónomos hasta robots colaborativos (cobots), que combinan autonomía con asistencia humana.
- **Por adaptabilidad:** pueden ser estáticos (tareas fijas), adaptativos (ajustables a cambios operativos) o con aprendizaje autónomo.
- **Por nivel de integración:** sistemas independientes, integrados en cadenas de suministro o distribuidos en enjambres coordinados.
- **Por ubicación:** robots fijos (brazos robóticos), móviles (transporte logístico) o modulares (configuraciones adaptables).
- **Por complejidad de tarea:** desde funciones específicas, como soldadura, hasta sistemas avanzados que supervisan y optimizan procesos en tiempo real.

La evolución hacia sistemas más adaptativos, integrados y colaborativos marcará la próxima fase de transformación industrial, optimizando la eficiencia y la interacción humano-máquina.

Robots colaborativos: redefiniendo el trabajo en las fábricas

Los **robots colaborativos** (también llamados **cobots**) están redefiniendo el entorno industrial al operar en espacios compartidos con los humanos, combinando autonomía y sensibilidad al contexto. Este avance tecnológico permite que las máquinas, además de realizar tareas repetitivas, **interactúen de manera segura y eficiente con las personas que trabajan a su lado**.

Leila Takayama, de Robust.AI, insiste en que **el diseño de los cobots debe enfocarse en la seguridad y el respeto hacia las personas, tanto en términos físicos como psicológicos**. Por ejemplo, un robot que comparte pasillos o áreas de trabajo con humanos debe anticipar sus movimientos y adaptar los propios. Esto incluye ralentizarse al acercarse a una persona, ceder el paso en un cruce o incluso ajustar su trayectoria para minimizar las interrupciones en la rutina del operario. Estas capacidades garantizan la seguridad y fomentan una mayor aceptación de la tecnología.

01 Control humano como prioridad

Un principio central para el éxito de los robots colaborativos es garantizar que los humanos siempre puedan recuperar el control cuando lo necesiten. **Takayama** resalta que este diseño híbrido, como el implementado en el carrito autónomo Carter, además de aumentar la confianza en los sistemas, empodera a los trabajadores al mantenerlos como la autoridad principal en el entorno laboral.

Además, los robots deben estar diseñados para adaptarse a las preferencias y habilidades del usuario. Esto puede incluir configuraciones personalizables, como ajustes de velocidad, niveles de autonomía o patrones de comunicación. Este tipo de adaptabilidad mejora la experiencia del usuario y permite que los robots sean utilizados por una mayor diversidad de personas, independientemente de su nivel de habilidad técnica.

> **"La posibilidad de alternar entre modos autónomos y manuales asegura que los robots sean percibidos como herramientas flexibles, no como sustitutos de los trabajadores."**
>
> **Leila Takayama**

02 Comunicación clara e intenciones predecibles

Otra característica clave de los cobots es su capacidad para **comunicar de manera efectiva sus intenciones**. Los robots que operan en entornos humanos deben utilizar señales visuales y auditivas que informen a los trabajadores sobre sus próximas acciones. Por ejemplo, luces que indiquen si un robot está girando, deteniéndose o cambiando de tarea, o sonidos que alerten de su proximidad. Esta comunicación transparente reduce la incertidumbre y mejora la interacción humano-robot, creando un entorno de trabajo más armonioso y seguro.

Takayama también destaca la importancia de que los robots colaborativos sean **predecibles en su comportamiento**. Esto significa que las acciones del robot deben ser consistentes y comprensibles para los humanos. Por ejemplo, un robot que sigue un patrón de trabajo estable y repetible es más fácil de integrar en flujos de trabajo existentes, ya que los operarios pueden anticipar sus movimientos y planificar sus propias tareas en consecuencia.

03 Aprendizaje por demostración - democratizando la tecnología

El avance del aprendizaje por demostración permite a los trabajadores enseñar a los robots nuevas tareas de manera intuitiva, simplemente mostrando cómo realizar una acción. Esta capacidad elimina la necesidad de conocimientos técnicos avanzados o programación, lo que democratiza el uso de la tecnología. Según **Takayama**, este enfoque acelera la implementación de los cobots, a la vez que facilita su personalización para entornos específicos, maximizando su utilidad.

Por ejemplo, en una línea de ensamblaje, un operario puede enseñar al cobot a recoger y colocar piezas en una configuración específica con solo realizar la tarea frente a sus sensores. Este proceso simplifica la incorporación de cobots en industrias con una alta variabilidad en sus procesos, como la manufactura personalizada o el ensamblaje de productos a medida.

04 Impacto en la experiencia del trabajador

Los cobots pueden encargarse de tareas pesadas, peligrosas o monótonas, permitiendo que los empleados se concentren en actividades más creativas y menos exigentes físicamente. De esta manera, se incrementa la satisfacción laboral, **contribuyendo a reducir la rotación y a mejorar la salud y seguridad en el lugar de trabajo**.

Un aspecto clave para el éxito de esta integración, según Takayama, es la formación de los trabajadores. Este es un tema que se amplía en el capítulo "Educación y Trabajo" del presente informe.

Javier del Ser, Científico Jefe de Inteligencia Artificial y Profesor de Investigación en TECNALIA, describe cómo los **robots colaborativos** han evolucionado hacia sistemas cada vez más autónomos y adaptativos gracias a la implementación de tecnologías avanzadas como el **aprendizaje por refuerzo** y el **aprendizaje por demostración**. Esta capacidad de aprendizaje continuo y personalizado convierte a los cobots en herramientas flexibles que se adaptan a la diversidad de tareas industriales y a la creciente tendencia hacia la producción personalizada.

Javier del Ser

Ver vídeo

05 Más allá de la eficiencia: un enfoque en la colaboración Humano-Robot

Del Ser enfatiza que, si bien los cobots pueden mejorar la eficiencia operativa, su valor real radica en la **colaboración humano-robot**. Este tipo de interacción permite que los robots actúen como compañeros de trabajo que amplifican las capacidades humanas en lugar de reemplazarlas. Un ejemplo práctico es el **uso de cobots en inspecciones de calidad**. Mientras que un operario evalúa características visuales o sensoriales de un producto, el robot puede analizar simultáneamente mediciones precisas como dimensiones o pesos. Esta sinergia, además de acelerar el proceso, mejora la precisión y reduce el riesgo de errores.

06 Interfaces explicativas: construyendo confianza y transparencia

Uno de los mayores desafíos para la adopción masiva de los cobots es la percepción de complejidad o falta de control por parte de los trabajadores. **Del Ser** destaca que, para superar esta barrera, es esencial que los sistemas sean capaces de explicar sus decisiones y acciones de manera clara y accesible. Por ejemplo, en un entorno de mantenimiento predictivo, un robot que señala un fallo potencial en una máquina debe poder justificar su análisis mostrando los datos relevantes, como patrones de vibración o temperatura anormales. Estas explicaciones visuales y auditivas, además de generar confianza en el sistema, ayudan a los operarios a entender mejor los procesos que los robots están monitorizando.

07 Un camino hacia la inclusión: capacitación y participación activa

La aceptación de los cobots también depende de la preparación de los trabajadores para integrarlos en sus rutinas. Esto no implica solo capacitación técnica, sino también el diseño de programas que incluyan a los operarios en el proceso de implementación. En este sentido, los expertos abogan por la idea de **co-diseño**, donde los trabajadores contribuyan con su experiencia y conocimientos prácticos al desarrollo de soluciones robóticas. Este enfoque mejora la funcionalidad de los sistemas y crea un sentido de propiedad y compromiso entre los empleados.

Además, se recomienda la adopción de enfoques de despliegue gradual, comenzando con tareas simples y aumentando progresivamente la autonomía y complejidad del robot. Este proceso incremental permite a los trabajadores familiarizarse con las capacidades del cobot y superar posibles reticencias relacionadas con su implementación.

08 Impacto en el entorno industrial

Los cobots tienen el potencial de transformar la forma en que los humanos perciben y trabajan con la tecnología. Al automatizar tareas repetitivas y peligrosas, los cobots liberan tiempo para que los trabajadores se concentren en actividades de mayor valor añadido, como el diseño, la planificación estratégica y la resolución de problemas. En última instancia, los robots colaborativos no deben verse simplemente como una herramienta de eficiencia, sino como una oportunidad para reinventar el lugar de trabajo. Si se implementan correctamente, **los cobots pueden contribuir a un entorno laboral más inclusivo, seguro y colaborativo, donde la tecnología y los humanos trabajen en armonía para alcanzar objetivos comunes.**

Automatización logística: optimización de la cadena de suministro

Dentro de la Industria, la logística es un ámbito donde la **IA física** está transformando las operaciones a través de la automatización avanzada y las simulaciones predictivas. Francesco Ferro, CEO de PAL Robotics, enfatiza que los robots móviles y manipuladores son herramientas fundamentales para la optimización de los procesos logísticos. Estos sistemas están diseñados para gestionar inventarios en tiempo real, rastrear movimientos de mercancías y reducir errores humanos en la cadena de suministro.

Un aspecto particularmente innovador que Ferro destaca es la implementación de **gemelos digitales** en logística. Un gemelo digital es una representación virtual de un proceso físico que permite simular y predecir dinámicas antes de que ocurran en el mundo real. En el contexto logístico, los gemelos digitales pueden modelar un almacén completo, simulando el flujo de materiales, la interacción entre robots y humanos, e incluso escenarios de alta demanda o interrupciones inesperadas.

Al utilizar gemelos digitales, las empresas pueden:

01

Optimizar el diseño de los almacenes: identificar cuellos de botella, rediseñar rutas de robots y mejorar la disposición de las mercancías para maximizar la eficiencia.

02

Reducir costes de implementación: simular diferentes configuraciones logísticas permite identificar problemas potenciales antes de hacer inversiones en infraestructura física.

03

Planificar la resiliencia operativa: predecir el impacto de posibles interrupciones, como fallos de equipos o picos de demanda, y diseñar estrategias de respuesta efectivas.

Francesco Ferro

Ver vídeo

Un caso práctico presentado por **Ferro** es el uso de gemelos digitales para entrenar a robots en tareas específicas sin interrumpir las operaciones diarias. Por ejemplo, los robots diseñados para inventarios pueden ser probados virtualmente en un entorno que replica las dinámicas reales de un almacén, ajustando sus algoritmos antes de ser desplegados físicamente. Esto reduce el tiempo de integración y asegura que los robots funcionen de manera óptima desde el primer día.

La integración de gemelos digitales facilita la colaboración entre humanos y máquinas. En almacenes donde los trabajadores y los robots comparten espacios, los gemelos digitales pueden mapear las rutas y movimientos óptimos para minimizar conflictos o interrupciones. Además, estas plataformas permiten realizar análisis en tiempo real para ajustar la interacción entre humanos y robots según cambien las condiciones operativas.

01 Impacto estratégico de los gemelos digitales

El impacto de los gemelos digitales se extiende más allá de la eficiencia operativa. Estas tecnologías permiten a las empresas ser más **proactivas** en la gestión de la logística. Al prever escenarios como aumentos estacionales de demanda, las empresas pueden optimizar sus recursos y reducir desperdicios, contribuyendo a una logística más sostenible y ágil.

02 Robótica humanoide: un futuro prometedor, pero no inmediato

Aunque los robots humanoides generan gran interés, los expertos son cautelosos sobre su aplicabilidad actual en entornos industriales. En muchas tareas, los manipuladores móviles ofrecen soluciones más prácticas y eficientes. Sin embargo, los humanoides pueden desempeñar un papel crucial en tareas diseñadas para humanos, como la manipulación de materiales en entornos que incluyen escaleras o terrenos irregulares.

En paralelo, la integración de humanoides podría acelerarse si se desarrollan interfaces más intuitivas y algoritmos capaces de aprender a partir de interacciones humanas naturales, reduciendo la necesidad de programación especializada.

La IA física, además de mejorar la eficiencia, puede desempeñar un papel clave en la sostenibilidad industrial. Los expertos destacan que las tecnologías basadas en IA física están ayudando a abordar problemas como el desperdicio de recursos y el uso excesivo de energía. Por ejemplo, sistemas de mantenimiento predictivo, que combinan sensores IoT y análisis de datos, permiten identificar fallos antes de que ocurran, reduciendo costes y minimizando el impacto ambiental.

03 Integración tecnológica: retos y soluciones

La integración de tecnologías de IA física en entornos industriales presenta aún retos importantes. **Del Ser** menciona la necesidad de desarrollar sistemas modulares que puedan adaptarse a equipos existentes sin requerir reemplazos completos. También subraya la importancia de las redes neuronales guiadas por leyes físicas para garantizar que los modelos respeten las restricciones técnicas del entorno.

Ferro, por otro lado, enfatiza la importancia de la **resiliencia tecnológica**. En fábricas con robots autónomos, es esencial garantizar que los sistemas puedan operar de manera independiente en caso de interrupciones en la conectividad o riesgos de ciberseguridad. Esto incluye la adopción de tecnologías híbridas que combinen procesamiento en la nube con capacidades locales.

El avance de la conectividad 5G, la integración de sensores avanzados y el desarrollo de cobots más intuitivos están marcando la pauta para la próxima ola de innovación en la industria. Estas tecnologías emergentes prometen una mayor sincronización entre sistemas autónomos, mejorando aún más la eficiencia y la adaptabilidad de los procesos industriales.

Movilidad autónoma

La movilidad autónoma representa una de las áreas de mayor impacto de la **IA física**, combinando sistemas avanzados de percepción, planificación y acción para transformar cómo las personas y las mercancías se desplazan. Desde vehículos completamente autónomos hasta drones y flotas coordinadas, estas tecnologías están revolucionando sectores como el transporte público, la logística y la movilidad urbana, con implicaciones profundas en sostenibilidad, accesibilidad y eficiencia.

Conducción Autónoma

Los vehículos autónomos están redefiniendo la movilidad, apoyándose en modelos fundacionales, simulaciones avanzadas y sistemas de aprendizaje profundo para operar de manera más segura y eficiente en entornos urbanos y rurales. Expertos en coche autónomo explican cómo esta tecnología está evolucionando para generalizarse y ser adaptable a múltiples contextos sin necesidad de reentrenamiento extensivo.

En el modelo tradicional de conducción autónoma (denominado AV 1.0), los sistemas dependían de mapas y reglas predefinidas para planificar y ejecutar acciones.

Sin embargo, algunas empresas están adoptando un enfoque radicalmente diferente:

AV 2.0

Este enfoque imita el aprendizaje humano, utilizando modelos fundacionales para procesar datos sensoriales, interpretar el entorno y decidir la trayectoria en tiempo real. Esto reduce la dependencia de mapas y permite a los vehículos adaptarse a entornos desconocidos.

Nuevos modelos

Un nuevo modelo fundacional es capaz de predecir múltiples escenarios futuros, lo que lo hace especialmente robusto frente a cambios dinámicos en el entorno, como obras viales o condiciones meteorológicas adversas. Este se inspira en sistemas como los modelos de lenguaje, prediciendo "el siguiente marco" en el contexto de la conducción autónoma.

Para entrenar y validar estos modelos, se utilizan sistemas avanzados de simulación basados en datos sintéticos. Las plataformas generan escenarios hiperrealistas para entrenar los algoritmos sin necesidad de exponerse a riesgos reales en la carretera. Esto incluye escenarios complejos como giros en carreteras mojadas, cambios de carril con múltiples obstáculos y maniobras en zonas de construcción.

Los datos sintéticos permiten entrenar modelos de manera más rápida, y también ayudan a superar las limitaciones del acceso a datos del mundo real, especialmente en mercados con restricciones regulatorias. Los expertos enfatizan que la calidad del dato es tan importante como su cantidad, y que la estandarización en la recolección de datos podría acelerar drásticamente el desarrollo del sector.

Uno de los mayores avances en los vehículos autónomos es su capacidad para interactuar con otros usuarios de la carretera de manera segura. Estos sistemas son capaces de:

- Negociar con peatones y otros vehículos en intersecciones complejas.
- Ajustarse a comportamientos humanos impredecibles, como giros repentinos o frenados inesperados.
- Incorporar modelos explicativos que permiten a los usuarios comprender las decisiones tomadas por el vehículo, lo que aumenta la confianza en el sistema.

A pesar de los avances, la transición a sistemas completamente autónomos (Nivel 4 o 5) será gradual. Los sistemas actuales de asistencia al conductor (Nivel 2) representan un puente crítico hacia tecnologías más avanzadas.

Los mayores retos para la adopción de vehículos autónomos no están en la tecnología, sino alrededor de la percepción pública y las regulaciones.

01 Fallos no humanos

Una de las promesas clave de los vehículos autónomos es su capacidad para eliminar errores humanos comunes, como el cansancio, la conducción bajo los efectos del alcohol u otras substancias o las distracciones. Sin embargo, los sistemas autónomos introducen nuevos tipos de errores que pueden resultar menos intuitivos para los humanos. Por ejemplo, un vehículo autónomo podría cometer un error al interpretar un escenario inusual, como un objeto parcialmente cubierto en la carretera o una señal de tráfico temporalmente alterada.

Aunque estos errores son raros, su imprevisibilidad genera desconfianza tanto en el público como en los reguladores. Este tipo de fallos complica la aceptación social de la tecnología y plantea preguntas éticas y legales sobre la responsabilidad en caso de accidentes.

¿Quién debería asumir la responsabilidad? ¿el fabricante del *software*, el propietario del vehículo o el operador humano (si lo hay)?

02 Marco regulatorio fragmentado

Las leyes y regulaciones en torno a los vehículos autónomos son muy distintas entre países y regiones, creando un panorama complicado para los desarrolladores y operadores de esta tecnología.

En este sentido, las empresas trabajan con OEMs y equipos internacionales de políticas públicas para avanzar hacia una estandarización global que permita a los vehículos autónomos operar de manera eficiente en múltiples geografías.

Estados Unidos

Estados como California han adoptado un enfoque más permisivo, permitiendo pruebas de vehículos autónomos en vías públicas bajo ciertas condiciones. Esto ha convertido a California en un epicentro de innovación en este sector.

Europa

En contraste, los marcos regulatorios europeos son más estrictos y burocráticos. Por ejemplo, las normativas de la Unión Europea exigen pruebas exhaustivas y múltiples aprobaciones antes de permitir la operación de vehículos autónomos en vías públicas. Además, la fragmentación a nivel de países miembros de la Unión complica aún más la escalabilidad de los sistemas.

Asia

Regiones como China están adoptando un enfoque híbrido, donde el gobierno colabora estrechamente con las empresas para fomentar el desarrollo tecnológico mientras mantiene el control regulatorio. Esto ha permitido avances rápidos en ciertas ciudades designadas como zonas de prueba.

Impacto social y económico de la movilidad autónoma

La adopción de la movilidad autónoma promete modificar profundamente las dinámicas sociales y económicas:

1

Reducción de accidentes de tráfico: se estima que el 90% de los accidentes se deben a errores humanos. Los sistemas autónomos, al eliminar esta variable, tienen el potencial de salvar millones de vidas.

2

Optimización del transporte de mercancías: la automatización de flotas y drones reduce tiempos de entrega, costos logísticos y huella de carbono, mejorando la sostenibilidad.

3

Accesibilidad y movilidad universal: los vehículos autónomos tienen el potencial de mejorar la movilidad de personas mayores o con discapacidades, proporcionando acceso a transporte personalizado.

Desafíos y futuro

A pesar de los avances, la movilidad autónoma se enfrenta a varios retos:

- **Regulaciones**

  La falta de estándares globales y las diferencias en regulaciones locales dificultan la adopción masiva de vehículos autónomos.

- **Infraestructura**

  La implementación de sistemas autónomos requiere una infraestructura adecuada, como redes 5G, estaciones de carga y sensores distribuidos en el entorno.

- **Aceptación pública**

  Los consumidores todavía tienen reservas sobre la seguridad y la confiabilidad de los vehículos autónomos, lo que subraya la necesidad de campañas de educación y pruebas públicas.

Salud

La sanidad y el bienestar representan uno de los campos donde la **IA física** está mostrando su mayor potencial innovador. Desde robots que proporcionan asistencia física y emocional hasta sistemas diseñados para mejorar la autonomía y la calidad de vida de las personas mayores, pasando por cobots cirujanos, estas tecnologías están redefiniendo cómo concebimos el cuidado de la salud.

El uso de **IA física en sanidad** no solo busca optimizar tareas repetitivas y mejorar la eficiencia operativa en hospitales y centros de salud, sino también **abordar desafíos críticos como la atención a poblaciones vulnerables, la reducción de la soledad y la personalización del cuidado**. Este enfoque, basado en modelos éticos y diseño centrado en el usuario, pone de manifiesto la importancia de integrar la tecnología de manera responsable y adaptativa.

Robots asistenciales: del laboratorio al hospital

Los **robots asistenciales** están emergiendo como una solución clave para mejorar la calidad de vida de pacientes y cuidadores en entornos hospitalarios y domésticos. Estas tecnologías, además de asistir físicamente en tareas complejas, tiene también el potencial de abordar desafíos emocionales y cognitivos asociados al cuidado prolongado.

Carme Torras, Profesora e investigadora del CSIC, ha liderado proyectos que ilustran el impacto innovador de estos sistemas. En particular, el robot desarrollado para asistir en la alimentación de pacientes en el hospital Parc Sanitari Pere Virgili es un caso emblemático. Este robot reduce la carga de trabajo de los cuidadores a la vez que aumenta la autonomía de los pacientes, permitiéndoles participar activamente en su proceso de recuperación.

Carme Torras

Ver vídeo

El robot cuenta con un sistema avanzado de cámaras y sensores de fuerza que le permite:

1

Detectar movimientos humanos: el robot identifica el momento exacto en que el paciente abre la boca, ajustando su brazo para evitar errores comunes, como golpes en los dientes o derrames de alimentos.

2

Adaptarse a preferencias personales: a través de algoritmos de aprendizaje, el sistema es capaz de ajustar la velocidad y el ángulo de alimentación según las necesidades del paciente. De esta manera, mejora la experiencia del usuario, aumentando la aceptación del sistema.

Carme Torras enfatiza que estos avances tecnológicos son el resultado de un proceso de **diseño colaborativo**, donde médicos, cuidadores y pacientes participan activamente en el desarrollo del sistema. Este enfoque asegura que la tecnología, además de ser funcional, sea aceptada cultural y emocionalmente por sus usuarios.

El éxito de este proyecto ha inspirado el desarrollo de otros robots asistenciales diseñados para abordar una variedad de necesidades en entornos de salud:

01

Asistencia a pacientes con Alzheimer: Torras menciona que los robots pueden desempeñar un papel crucial en el cuidado de personas con Alzheimer, ayudándoles a recordar tareas cotidianas como tomar medicamentos o realizar ejercicios cognitivos. Estos sistemas también pueden proporcionar apoyo emocional mediante interacciones sencillas, reduciendo la ansiedad y el estrés del paciente.

02

Fisioterapia y rehabilitación: robots equipados con sensores de fuerza y *feedback* táctil están siendo probados para guiar a los pacientes en ejercicios de rehabilitación, asegurando movimientos correctos y reduciendo el riesgo de lesiones durante el proceso.

El despliegue de robots asistenciales plantea importantes reflexiones éticas:

1. **Autonomía del usuario:** el diseño de estos sistemas debe priorizar siempre la autonomía del paciente. Por ejemplo, el robot de alimentación permite al usuario pausar o detener la acción en cualquier momento, garantizando que el control esté siempre en manos del paciente.

2. **Co-creación y empatía:** la participación de los pacientes y cuidadores en el diseño fortalece la confianza en la tecnología y facilita su adopción.

3. **Impacto en los cuidadores:** estos robots no buscan reemplazar a los cuidadores, sino aliviar su carga de trabajo, permitiéndoles concentrarse en tareas más personalizadas y complejas.

El futuro de los robots asistenciales: los avances son muy prometedores, pero todavía hay desafíos importantes que deben abordarse:

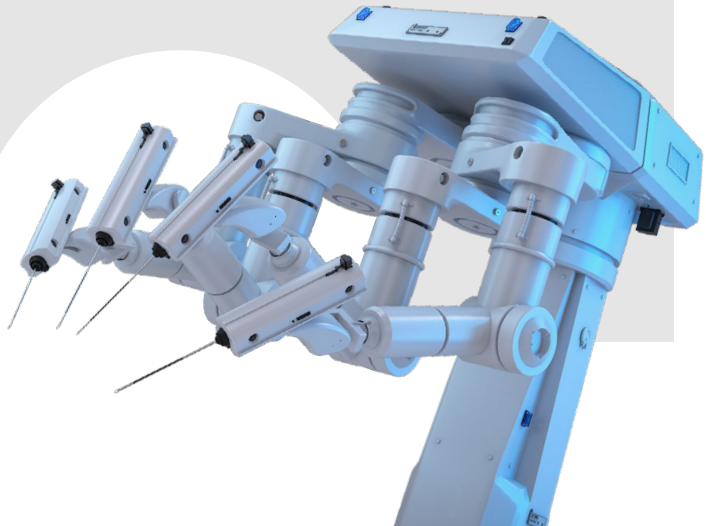
- **Coste y escalabilidad:** debe ser una prioridad hacer que estas tecnologías sean accesibles y asequibles para un mayor número de hospitales y hogares.
- **Aceptación cultural:** adaptar el diseño y las funcionalidades de los robots a diferentes contextos culturales y lingüísticos será clave para su éxito global.
- **Privacidad y seguridad de datos:** los sistemas que recopilan datos sensibles, como patrones de movimiento o interacciones personales, deben implementar medidas de seguridad robustas para proteger la información del paciente.

Robots cirujanos: transformando la precisión y la eficiencia en el quirófano

Los **robots quirúrgicos** están transformando la medicina al mejorar la precisión, la seguridad y la eficiencia en procedimientos complejos. Un ejemplo es el sistema Da Vinci, utilizado en cirugías mínimamente invasivas como prostatectomías y cirugías cardíacas, gracias a sus brazos articulados que replican con exactitud los movimientos del cirujano y su cámara 3D de alta definición.

Entre las innovaciones clave destacan la **asistencia inteligente**, con sistemas como ROSA ONE, que guía neurocirugías para evitar áreas sensibles; la **cirugía robótica remota**, facilitada por redes 5G, que ha permitido intervenciones a distancia, como una nefrectomía realizada desde España a China en 2024; y la **retroalimentación háptica**, que permite a los cirujanos sentir texturas y resistencias durante la operación.

Los beneficios incluyen menores complicaciones, recuperación más rápida y reducción de la fatiga en cirugías prolongadas. Sin embargo, persisten desafíos como el alto **coste de adquisición**, la necesidad de **formación especializada** y cuestiones de **ética y responsabilidad** ante posibles fallos técnicos. A medida que los costes disminuyan y la adopción aumente, los robots quirúrgicos se consolidarán como herramientas esenciales en la medicina del futuro.



IA física para el bienestar emocional

La soledad es uno de los problemas más acuciantes entre las personas mayores en todo el mundo: más del 25% de los mayores de 65 años en países desarrollados experimentan aislamiento social, lo que tiene un impacto directo en su salud física y emocional, aumentando el riesgo de enfermedades cardiovasculares, depresión y deterioro cognitivo. En este contexto, ElliQ, desarrollado por Intuition Robotics, se posiciona como una solución innovadora y eficaz para abordar este desafío.

Dor Skuler, Cofundador y CEO de Intuition Robotics, presenta ElliQ como un ejemplo paradigmático de cómo la **IA física** puede combinarse con un diseño centrado en el usuario para crear tecnología que mejora de manera muy notable el bienestar emocional de las personas mayores.

"La soledad se asocia a un mayor riesgo de cardiopatías, demencia (50%), ictus, depresión, ansiedad y muerte prematura. El impacto sobre la salud es comparable al de fumar 15 cigarrillos al día."

Dor Skuler

Ver vídeo

A diferencia de otros robots o asistentes virtuales, ElliQ no espera instrucciones para actuar; su enfoque es **proactivo**. Esto significa que el dispositivo puede iniciar interacciones basadas en el contexto, el historial del usuario y su estado emocional percibido. Algunas de sus características más destacadas incluyen:

01

Interacciones multimodales

ElliQ utiliza una combinación de voz, movimientos y señales visuales (como cambios en las luces) para captar la atención del usuario y comunicar emociones. Este enfoque no humanoide evita expectativas poco realistas, centrándose en crear una relación basada en confianza y empatía.

02

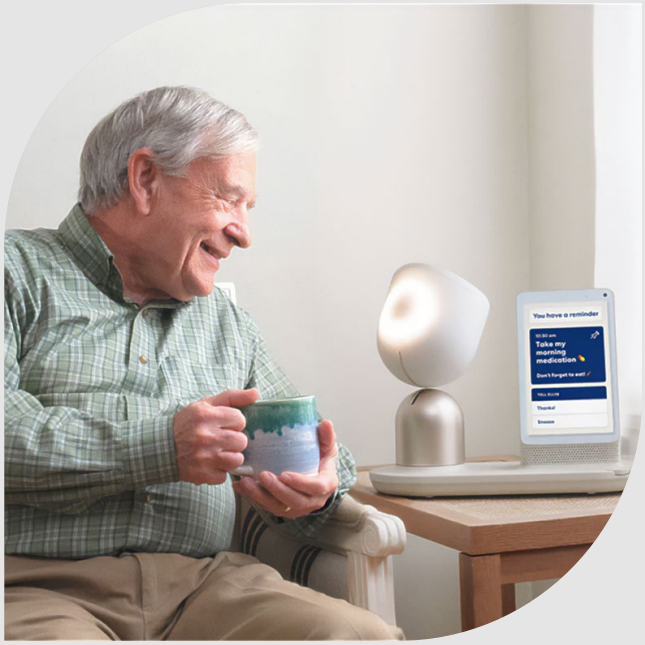
Actividades personalizadas

ElliQ ofrece una variedad de actividades diseñadas para fomentar la estimulación mental y física. Estas incluyen recordatorios para tomar medicamentos, ejercicios de relajación, conversaciones sobre temas de interés del usuario, y propuestas para escribir poesía, escuchar música o incluso planificar pequeñas caminatas.

03

Seguimiento de la Salud

El dispositivo también ayuda a monitorizar la salud de los usuarios, recordando citas médicas y animándolos a mantener rutinas saludables. Este seguimiento es especialmente útil para personas mayores que viven solas y no tienen un cuidador a tiempo completo.



Impacto en la lucha contra la soledad: estudios realizados por Intuition Robotics, en colaboración con instituciones como las universidades de Cornell y de Duke, muestran una mejora notable del bienestar emocional de los usuarios de ElliQ:

90%

Reducción del 90% en la soledad auto-percibida

Los participantes del estudio reportaron sentirse menos aislados gracias a las interacciones constantes y personalizadas con ElliQ.

94%

Incremento del 94% en indicadores clave de salud mental

Los usuarios experimentaron mejoras en su estado de ánimo, niveles de actividad y motivación para realizar actividades diarias.

Skuler destaca que ElliQ no busca sustituir las interacciones humanas, sino complementarlas. Al proporcionar compañía en momentos de soledad, el dispositivo actúa como un **puente que fomenta la interacción social**, animando a los usuarios a mantenerse conectados con sus familias, amigos y comunidades locales.

ElliQ ha sido desarrollado con un enfoque ético que prioriza la privacidad y el consentimiento del usuario:

- **Consentimiento activo:** los datos recopilados por ElliQ, como patrones de interacción o estado de salud, solo se utilizan con el permiso explícito del usuario y se almacenan bajo estrictos estándares de seguridad.
- **Diseño inclusivo:** el dispositivo está diseñado para ser accesible a personas mayores con diferentes niveles de alfabetización tecnológica. Por ejemplo, utiliza una interfaz intuitiva y comandos de voz sencillos, lo que permite su uso incluso por personas con habilidades tecnológicas limitadas.

El éxito de ElliQ, además de demostrar el potencial de la IA física para combatir la soledad en personas mayores, abre la puerta a una nueva categoría de tecnología emocionalmente inteligente. Las aplicaciones futuras podrían incluir:

1. **Adaptación a nuevas culturas y entornos:** ElliQ ya se está expandiendo a mercados internacionales, con ajustes lingüísticos y culturales que lo hacen relevante para diversas poblaciones.
2. **Integración en ecosistemas de cuidado:** en el futuro, ElliQ podría coordinarse con sistemas de salud más amplios, proporcionando datos a médicos y cuidadores en tiempo real para mejorar la atención personalizada.
3. **Interacción multigeneracional:** aunque actualmente está diseñado para personas mayores, las capacidades de ElliQ podrían adaptarse para fomentar la interacción entre generaciones, facilitando actividades conjuntas entre abuelos y nietos.

Una de las características más destacadas de ElliQ es su enfoque en la **accesibilidad económica**, lo que permite que personas mayores de diferentes niveles socioeconómicos puedan beneficiarse de esta tecnología.

Exoesqueletos y miembros biónicos: restaurando movilidad y autonomía

Los exoesqueletos y miembros biónicos están transformando la salud al devolver movilidad, fuerza e independencia a personas con discapacidades físicas. Equipados con sensores avanzados y algoritmos de aprendizaje, estos dispositivos se usan tanto en rehabilitación como en entornos industriales y militares.

Modelos como EksoNR ayudan a pacientes con lesiones medulares a caminar nuevamente, mientras que dispositivos portátiles como ReWalk mejoran la autonomía en la vida cotidiana. En prótesis biónicas, el LUKE Arm permite movimientos precisos y retroalimentación sensorial, y las piernas de Ottobock ajustan automáticamente la marcha del usuario.

Estas tecnologías mejoran la salud y reducen la dependencia de cuidadores, fomentando también la inclusión social. Sin embargo, aún deben resolverse retos como los altos costes, la personalización y la integración con otros sistemas. Con avances en materiales y algoritmos, estas soluciones están allanando el camino hacia un futuro más accesible.

LUKE Arm

Sonia Chernova

Ver vídeo

Espacios inteligentes y hogares conectados

Los **espacios inteligentes** están cambiando la forma en que las personas interactúan con sus entornos. Ya no se trata únicamente de edificios con dispositivos conectados, sino de sistemas dinámicos que utilizan inteligencia artificial, sensores avanzados y algoritmos predictivos para responder y anticiparse a las necesidades humanas. Estos espacios tienen el potencial de mejorar la comodidad, la eficiencia energética y la seguridad, al tiempo que promueven una convivencia más sostenible y adaptada a las particularidades de sus habitantes.

Sonia Chernova, Profesora asociada del Georgia Tech y experta en robótica interactiva, destaca que **los hogares inteligentes están evolucionando hacia entornos que aprenden y se adaptan al comportamiento de las personas**. En su visión, el futuro de los hogares conectados, además de responder a comandos específicos, incluyen sistemas que entienden el contexto y toman decisiones de manera autónoma. Un ejemplo de esto son los sensores distribuidos por todo el hogar, que pueden monitorizar variables como la temperatura, el nivel de iluminación o incluso el comportamiento de los ocupantes para ajustar automáticamente sistemas como la calefacción, la ventilación o la iluminación, optimizando así el consumo energético.

Además, los hogares inteligentes del futuro están integrando **interfaces multimodales** que combinan comandos de voz, gestos y dispositivos táctiles. De esta manera, se facilita su uso para personas con diferentes niveles de habilidad tecnológica y se mejora la experiencia de usuario al ofrecer interacciones más naturales. Por ejemplo, un sistema puede detectar el estado de ánimo de una persona y ajustar la iluminación o la música para crear un ambiente más relajante. Estos avances están especialmente orientados a **mejorar la calidad de vida en el hogar**, haciendo que la tecnología sea más invisible, pero más efectiva.

Los espacios inteligentes también están diseñados para **mejorar la autonomía de grupos vulnerables, como personas mayores o con discapacidades**. Los sensores de detección de caídas, los recordatorios de medicamentos y los sistemas de asistencia personal son herramientas esenciales para promover la independencia de estos colectivos. Por ejemplo, una combinación de cámaras inteligentes y dispositivos portátiles puede **monitorizar en tiempo real la salud y el bienestar de los usuarios**, notificando automáticamente a cuidadores o familiares en caso de emergencia. Estas soluciones, además de mejorar la seguridad, reducen la carga emocional de quienes asumen el cuidado de estas personas.

Sin embargo, existen también desafíos asociados a los espacios inteligentes:

La **privacidad de los datos** es uno de los principales puntos de preocupación. La recopilación masiva de información personal a través de sensores y dispositivos conectados plantea interrogantes sobre cómo se almacena y utiliza esta información, y sobre quién tiene acceso a ella.

Además, el **alto coste de implementación** sigue siendo una barrera para muchas familias y comunidades, lo que pone de relieve la necesidad de soluciones más asequibles y modelos de financiamiento público-privado que permitan democratizar estas tecnologías.

A pesar de estos retos, el avance de los espacios inteligentes está sentando las bases para un futuro en el que la tecnología, además de resolver problemas prácticos, genere **entornos más accesibles y sostenibles**.

> **La clave del éxito radica en un diseño que priorice las necesidades humanas, garantizando al mismo tiempo que los beneficios de estas innovaciones sean accesibles para todos los sectores de la sociedad.**

Modelos de Negocio Emergentes

La evolución de la IA física está generando nuevos paradigmas empresariales que, como acabamos de ver, transforman sectores como la sanidad, la movilidad y la industria. Estos modelos, además de mejorar la eficiencia operativa y la experiencia del cliente, están reconfigurando la forma en que las empresas acceden a la tecnología, optimizan procesos y generan valor.

El rol del software de código abierto y la innovación democratizada

Brian Gerkey, CTO de Intrinsic y Presidente de Open Robotics, resalta cómo el software de código abierto está redefiniendo la innovación en la IA física y la robótica. A través de plataformas como ROS (Robot Operating System), este enfoque permite a desarrolladores, startups y empresas acceder a herramientas avanzadas sin necesidad de construirlas desde cero, democratizando el acceso a la tecnología y acelerando los ciclos de innovación.

El concepto central de las plataformas abiertas es permitir que cualquier persona, independientemente de su nivel de experiencia, pueda desarrollar aplicaciones para robots utilizando componentes modulares preexistentes.

Según Gerkey, esto reduce notablemente las barreras para la entrada al mercado, facilitando la creación de ecosistemas donde tanto investigadores como empresas pueden contribuir, compartir y reutilizar tecnologías.

Un caso emblemático es un proyecto basado en ROS desarrollado por la NASA en la Estación Espacial Internacional: el sistema Astrobee de la NASA es un sistema robótico autónomo diseñado para reducir el tiempo que los astronautas dedican a tareas rutinarias, permitiéndoles concentrarse en actividades que requieren intervención humana. Estos robots cúbicos pueden operar de forma autónoma o ser controlados remotamente por astronautas, controladores de vuelo o investigadores desde la Tierra. Sus funciones incluyen tomar inventarios, documentar experimentos con cámaras integradas y colaborar para mover carga dentro de la estación espacial. Además, sirven como una plataforma de investigación adaptable para realizar experimentos en microgravedad, explorando el potencial de la robótica en el espacio.

"El *software* de código abierto está redefiniendo la innovación en IA física y robótica, democratizando el acceso a la tecnología y acelerando los ciclos de innovación."

Brian Gerkey

Ver vídeo

El sistema consta de tres robots con ventiladores eléctricos para propulsión en microgravedad, cámaras y sensores para navegación, y un brazo de agarre para sujetar rieles de la estación o manipular objetos, maximizando su eficiencia y versatilidad. Esta solución demuestra cómo un enfoque abierto puede adaptarse a problemas únicos en distintos sectores, desde el espacio hasta la agricultura.

ROS es más que un sistema operativo ya que contiene una colección de herramientas, bibliotecas y convenciones que permiten programar robots de manera eficiente.

Las claves de su éxito se encuentran en tres pilares fundamentales:

Ventajas de las plataformas abiertas frente a alternativas propietarias: aunque herramientas propietarias como las de NVIDIA pueden superar a ROS en aspectos específicos (por ejemplo, simulaciones fotorrealistas), la capacidad de integración y compatibilidad de ROS con estas tecnologías lo posiciona como una solución robusta y versátil. Además, el modelo abierto evita la dependencia de proveedores, ofreciendo a las empresas mayor libertad para personalizar y escalar sus soluciones.

01

Modularidad y flexibilidad

ROS ofrece bloques de construcción reutilizables que permiten a los desarrolladores integrar capacidades avanzadas, como navegación autónoma o reconocimiento de objetos, sin tener que programarlas desde cero. Esto ahorra tiempo y recursos, fomentando la adopción en sectores como la logística, la sanidad y la manufactura.

02

Comunidad y ecosistema global

Con miles de usuarios y colaboradores en todo el mundo, ROS ha creado una red de innovación abierta. Universidades, startups y grandes corporaciones contribuyen al desarrollo y perfeccionamiento de la plataforma, alimentando un ciclo continuo de mejora y expansión.

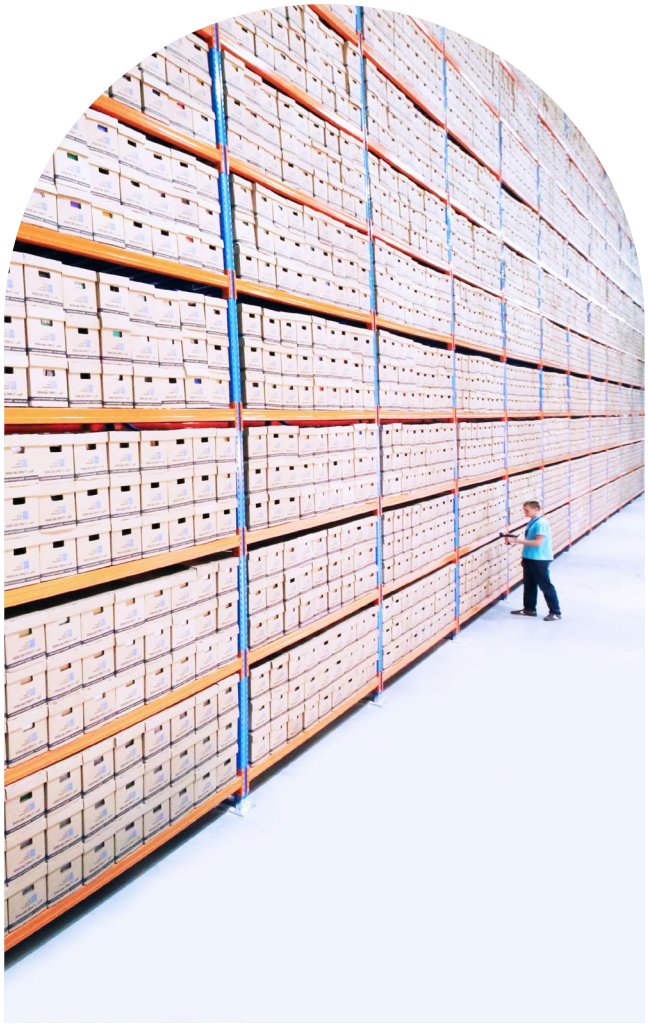
03

Accesibilidad para nuevas generaciones

ROS también se utiliza en programas educativos de educación secundaria y universitaria, formando a la próxima generación de ingenieros y desarrolladores. Iniciativas como la competición de robótica FIRST, donde estudiantes utilizan ROS para crear robots funcionales, demuestran su potencial como herramienta educativa.

Casos de uso destacados

Logística: robots como los desarrollados por Dexory utilizan ROS para escanear inventarios en almacenes de gran escala, optimizando la gestión de stock y reduciendo costes operativos.



Aviación: empresas como XYREC han creado sistemas robóticos para el mantenimiento de aviones, incluyendo la eliminación de pintura con láser, utilizando ROS como base tecnológica.

Agricultura: máquinas semiautónomas equipadas con ROS están revolucionando prácticas agrícolas, reduciendo el impacto sobre los suelos y mejorando la sostenibilidad.

Aunque el impacto del software abierto es innegable, existen dos retos importantes:

- **Curva de aprendizaje:** a pesar de su modularidad, ROS requiere habilidades avanzadas en ingeniería de software, lo que puede limitar su adopción inicial.
- **Gobernanza y sustentabilidad:** la comunidad global de ROS debe mantener un equilibrio entre la innovación continua y la estandarización para garantizar su relevancia a largo plazo.

Sin embargo, el futuro del código abierto en robótica es prometedor. **Gerkey** anima a gobiernos, empresas y filántropos a fomentar el desarrollo de plataformas abiertas mediante la financiación de proyectos colaborativos y el apoyo a la formación de nuevas generaciones de innovadores.

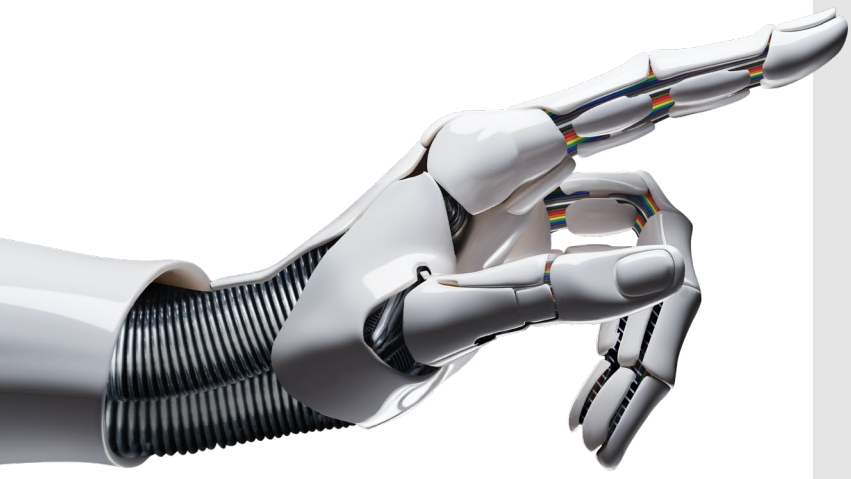
De propiedad a servicio: el modelo "*Robot as a Service*" (RaaS)

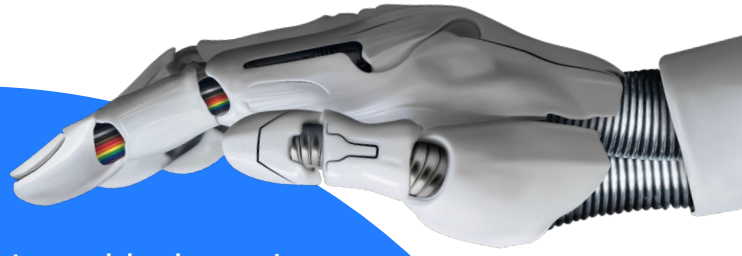
Por otra parte, el modelo "*Robot as a Service*" (RaaS) se está consolidando como un enfoque disruptivo para democratizar el acceso a la IA física. En lugar de adquirir robots o sistemas físicos, las empresas pueden "alquilar" estos servicios mediante contratos flexibles, pagando únicamente por el uso que hacen de la tecnología.

Este modelo tiene un impacto especial en áreas de logística y gestión de tareas ajenas al negocio fundamental de las compañías. Por ejemplo:

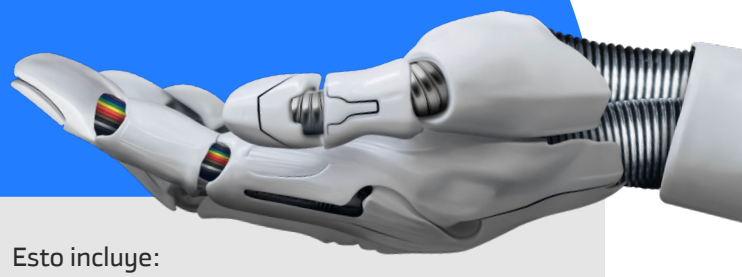
- **Logística interna:** en grandes empresas de retail o manufactura, los robots autónomos pueden ser alquilados para gestionar tareas como el transporte interno de materiales, optimizando tiempos y reduciendo costes operativos.
- **Gestión de proveedores:** sistemas de IA física pueden monitorizar y coordinar flujos de inventario, reduciendo ineficiencias y asegurando la transparencia en las cadenas de suministro.
- **Mantenimiento predictivo:** sensores y robots pueden inspeccionar y reparar maquinaria crítica sin necesidad de interrupciones prolongadas en las operaciones.

Este modelo, además de reducir los costes iniciales asociados con la compra de tecnología, también permite a las empresas centrarse en su negocio principal mientras delegan procesos auxiliares en soluciones avanzadas.





Los modelos de negocio más exitosos en IA física son aquellos que permiten a las empresas externalizar tareas de soporte, liberando recursos internos para enfocarse en sus áreas estratégicas.



Esto incluye:

- **Robots de atención al cliente:** empresas que adoptan robots de servicio en puntos de contacto físicos, como recepción o quioscos, para automatizar procesos básicos mientras mantienen un nivel de interacción personalizado.
- **Optimización de recursos humanos:** sistemas autónomos pueden gestionar el flujo de empleados en grandes instalaciones, desde asignaciones de tareas hasta la coordinación de horarios.
- **Logística externa:** servicios basados en IA física que facilitan la distribución de productos, utilizando flotas autónomas que se adaptan a la demanda estacional.

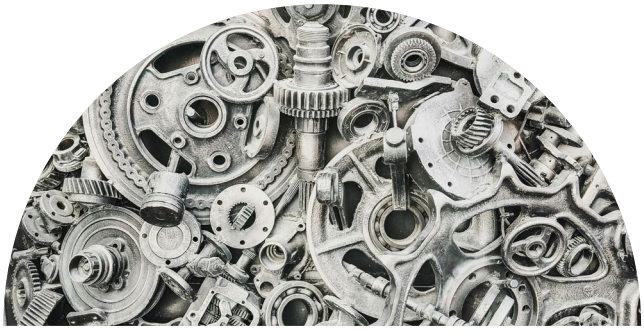
Un caso práctico de éxito son las empresas que ofrecen **flotas de robots móviles compartidos** en espacios industriales. Estas flotas, gestionadas por plataformas RaaS, permiten a múltiples empresas compartir robots para tareas específicas, optimizando costes y recursos.

Modelos como los implementados por Intuition Robotics, responsables de ElliQ, demuestran que la personalización de servicios puede escalar cuando se alinean con necesidades reales del usuario, como el acompañamiento de personas mayores o la automatización de tareas cotidianas.

Por otro lado, los modelos basados en plataformas escalables, como las impulsadas por software de código abierto, permiten que empresas de todos los tamaños accedan a tecnologías avanzadas, integrando soluciones en ecosistemas más amplios sin perder flexibilidad.

Uno de los aspectos más destacados del impacto de la IA física en la economía es la creación de **ecosistemas colaborativos** donde múltiples actores, desde startups hasta grandes corporaciones, trabajan juntos para desarrollar soluciones integradas. Estos ecosistemas, **además de fomentar la innovación, permiten una distribución más equitativa de los beneficios económicos generados por estas tecnologías**. **Pilar Manchón** señala que esta colaboración interdisciplinaria es esencial para maximizar el impacto económico y social de la IA física: la interoperabilidad empresarial está abriendo mercados a startups y pequeñas empresas que, gracias a tecnologías colaborativas, ahora pueden competir en sectores antes dominados por grandes corporaciones. Este ecosistema más inclusivo está permitiendo la creación de nuevas oportunidades económicas en áreas como la manufactura personalizada y la sanidad remota.

Un caso paradigmático es el de Intrinsic, una empresa que desarrolla software para robots industriales basado en IA física. Intrinsic colabora con fabricantes de hardware, desarrolladores de software y usuarios finales para crear herramientas interoperables que reduzcan la complejidad de las integraciones robóticas, promoviendo un acceso más amplio a estas tecnologías en sectores diversos.



Hacia una economía de servicios basada en IA física

Los modelos de negocio emergentes en IA física están marcando un cambio hacia una economía de servicios altamente adaptable, donde las empresas pueden optimizar procesos no esenciales mediante tecnología alquilada. Este enfoque democratiza el acceso a tecnologías avanzadas y también fomenta una economía más eficiente y sostenible, donde los recursos son utilizados de manera óptima para generar valor tanto económico como social.

Por último, en el sector financiero, según Sergio Gago de Moody's, la colaboración en tiempo real entre agentes especializados y expertos humanos mejora la eficiencia y precisión en la gestión de riesgos y oportunidades financieras, aunque el ámbito de los agentes queda fuera del alcance de este informe.

El futuro de estos modelos radica en su capacidad para integrar innovación, accesibilidad y sostenibilidad en un marco que responda a las demandas de un mercado global en rápida evolución.

3

Educación y Trabajo

3

Educación y Trabajo

El capítulo anterior destaca cómo la IA física está transformando sectores clave de la economía, desde la industria y la movilidad autónoma hasta la sanidad y los espacios inteligentes. Estos avances tecnológicos están impulsando la innovación, creando oportunidades de negocio y redefiniendo procesos tradicionales. Sin embargo, impacta más allá del ámbito empresarial.

David Dorn

Ver vídeo

La llegada de la IA física puede cambiar rápidamente el panorama laboral, redefiniendo las ocupaciones, automatizando tareas y creando nuevas oportunidades en sectores emergentes. Esta evolución puede generar grandes retos, como el desplazamiento de ciertos trabajadores, la desigualdad en el acceso a tecnologías avanzadas y la necesidad de formación continua. Sin embargo, también ofrece oportunidades para reconfigurar el mercado laboral de manera más inclusiva y resiliente.

Redefinición de las ocupaciones y automatización de tareas

La automatización no implica únicamente la eliminación de empleos, sino que está cambiando la naturaleza misma de muchas ocupaciones. Por ejemplo, apunta **David Dorn**, Catedrático de Globalización y Mercados Laborales de la Fundación UBS en la Universidad de Zúrich, en sectores como la banca, los sistemas automatizados han asumido tareas repetitivas, como la gestión de efectivo, mientras los empleados se concentran en actividades que requieren interacción personalizada con los clientes.

Sin embargo, no todas las tareas son igualmente automatizables. Profesiones que requieren habilidades motoras finas, adaptabilidad y empatía, como el trabajo de asistentes domiciliarios, todavía presentan grandes barreras para su automatización completa. **Dorn** enfatiza que estas áreas seguirán siendo dominadas por la interacción humana, al menos en el corto y mediano plazo. Veamos esto en detalle.

Impacto diferencial según el nivel de cualificación

La automatización tiene un impacto desigual según el nivel de cualificación de los trabajadores:

Empleos de nivel medio en el sector servicios

Estos trabajos, que incluyen funciones como contabilidad, operarios en fábricas, se enfrentan a un alto riesgo de automatización debido a la repetitividad y estructuración de sus tareas.

Empleos altamente cualificados

Tradicionalmente considerados seguros frente a la automatización, los trabajos altamente cualificados, como los de investigación, desarrollo de software y diseño avanzado, también están siendo impactados. Aunque en menor medida, herramientas como la IA generativa están comenzando a automatizar tareas analíticas complejas, liberando a los profesionales para que se concentren en funciones más estratégicas y creativas. Este segmento, sin embargo, continúa beneficiándose de la **combinación humano-máquina**, donde la IA potencia la productividad en lugar de sustituir completamente a los trabajadores.

Empleos poco cualificados

Los trabajos que requieren habilidades motoras finas, interacción social y adaptabilidad, como los de limpieza, asistentes domiciliarios o camareros, presentan barreras importantes para la automatización completa. Por ejemplo, aunque existen robots de limpieza y sistemas autónomos, estos aún no pueden replicar completamente la flexibilidad y juicio humano necesarios en estas ocupaciones. **Dorn** enfatiza que estas áreas seguirán siendo dominadas por humanos en el corto y medio plazo.

La desigualdad tecnológica y las dinámicas geográficas

Según **Thomas Hurd**, CEO y cofundador de Zeki Data, la adopción de tecnologías avanzadas como la IA física tiene el potencial de profundizar las desigualdades regionales en el mercado laboral. Las grandes empresas tecnológicas atraen talento y concentran oportunidades en zonas específicas, dejando rezagadas a regiones menos conectadas tecnológicamente.

Además, las pequeñas y medianas empresas, que representan un pilar fundamental del empleo global, se enfrentan a barreras importantes para implementar tecnologías avanzadas debido a la falta de recursos. **Hurd** propone la creación de **ecosistemas tecnológicos colaborativos**, como centros de innovación regional, que permitan a las PYMEs acceder a estas tecnologías sin requerir grandes inversiones iniciales.

Por otro lado, la proliferación de herramientas digitales y sistemas de trabajo remoto está facilitando una redistribución parcial del talento, permitiendo que trabajadores cualificados participen en mercados globales sin necesidad de reubicarse físicamente.

Thomas Hurd

Ver vídeo

El papel del reentrenamiento y la adaptabilidad

Un elemento clave para mitigar el impacto negativo de la automatización es el reentrenamiento (*upskilling y reskilling*) de trabajadores cuyas tareas están en riesgo de ser automatizadas. Según **David Dorn**, el éxito de estas iniciativas depende de varios factores:

- **Movilidad geográfica:** la capacidad de los trabajadores para trasladarse a regiones con mayor actividad tecnológica.
- **Compromiso empresarial:** la disposición de las empresas para invertir en la capacitación de su fuerza laboral y fomentar la adaptación a nuevas tecnologías.

Hurd añade que el reentrenamiento debe enfocarse en **trabajos afines** que maximicen las habilidades existentes de los empleados, reduciendo así los costes de transición y aumentando la aceptación de las nuevas tecnologías.

Nuevas oportunidades laborales y transformación positiva

La IA física también está creando nuevos roles y áreas de especialización. El desarrollo de sistemas autónomos, sensores avanzados y plataformas de trabajo colaborativo ha generado **demanda de perfiles en áreas como la robótica, el diseño de interfaces y la gestión de datos multimodales**.

Además, estas tecnologías están **democratizando el acceso a empleos mejor remunerados**, al capacitar a trabajadores menos cualificados con herramientas que amplifican sus habilidades y les permiten desempeñar funciones más avanzadas. Por ejemplo:

01

Sistemas de aprendizaje colaborativo con cobots

Los robots colaborativos (cobots), diseñados para trabajar junto a humanos, pueden actuar como "mentores" tecnológicos. Estos sistemas permiten a trabajadores sin experiencia previa en ciertos procesos industriales aprender en tiempo real observando y replicando las acciones del cobot. Esto abre la puerta a que personas menos cualificadas puedan desempeñar funciones en manufactura avanzada, donde previamente se requerían habilidades especializadas.

02

Paralelismo con plataformas digitales

Al igual que los sistemas de gestión y navegación GPS permitieron que muchas personas no cualificadas se convirtieran en conductores profesionales para plataformas como Uber, la IA física puede facilitar un fenómeno similar en otros sectores. Por ejemplo, en la logística, sistemas avanzados de planificación de rutas, combinados con interfaces intuitivas, permiten que trabajadores sin experiencia previa en transporte gestionen entregas de manera eficiente.

Inclusión tecnológica en sectores tradicionales

En sectores como la agricultura, los robots autónomos que automatizan procesos como la siembra y el riego están diseñados con interfaces accesibles, lo que permite que personas sin formación técnica participen en operaciones agrícolas avanzadas. De manera similar, en la construcción, herramientas basadas en IA están facilitando que trabajadores sin formación especialista realicen tareas como inspecciones de seguridad utilizando drones o dispositivos sensoriales.

03

Este enfoque, además de generar oportunidades laborales inclusivas, contribuye a reducir las brechas en el mercado laboral, permitiendo que personas de diferentes niveles educativos y experiencia accedan a trabajos de alto valor añadido.

Educación adaptada al futuro del trabajo

En un mercado laboral metamorfoseado por la IA física, el sistema educativo se enfrenta al reto de preparar a las próximas generaciones para trabajos que aún no existen o que requieren habilidades completamente nuevas. Según Wilfried Vanhonacker, patrono de nuestra fundación y experto en educación, los modelos educativos tradicionales deben dar un giro radical hacia un enfoque más dinámico y adaptado a las necesidades emergentes.

Basándose en su experiencia, **Vanhonacker** propone la creación de centros educativos diseñados para:

Fomentar la adaptabilidad: los programas educativos deben enfocarse menos en memorizar conocimientos estáticos y más en desarrollar habilidades críticas como el pensamiento analítico, la resolución de problemas y la capacidad de aprender de manera continua.

Incorporar la tecnología desde el principio: la integración de tecnologías como la IA física en el aula no debe limitarse a herramientas didácticas, sino que debe usarse como parte del proceso de enseñanza, permitiendo a los estudiantes interactuar con cobots, gemelos digitales y sistemas autónomos desde edades tempranas.

Preparar para la colaboración humano-máquina: en lugar de ver a las máquinas como sustitutos de la mano de obra humana, los estudiantes deben aprender cómo trabajar de manera colaborativa con ellas, maximizando las fortalezas de ambos.

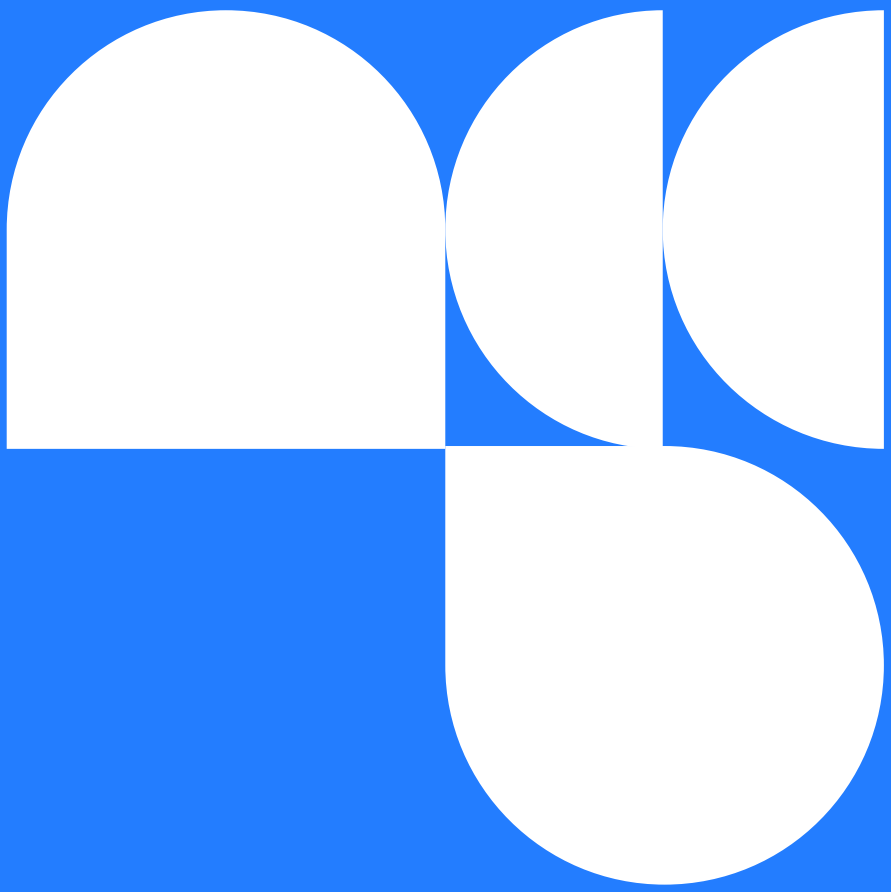
Un ejemplo que menciona es cómo en algunas instituciones educativas en China se han diseñado entornos de aprendizaje basados en simulaciones físicas, permitiendo a los estudiantes experimentar situaciones del mundo real en un entorno controlado. Este enfoque no solo acelera el aprendizaje, sino que también mejora la transferencia de habilidades hacia contextos laborales reales.

Vanhonacker subraya que el éxito de este modelo depende de la cooperación entre gobiernos, empresas y centros educativos para diseñar programas relevantes y accesibles para todos los segmentos de la sociedad.

Wilfried Vanhonacker

En definitiva, los cambios en el mercado laboral impulsada por la IA física plantean desafíos importantes, como la desigualdad regional, y la necesidad de formación continua. Sin embargo, también abre grandes oportunidades para rediseñar ocupaciones y crear ecosistemas más inclusivos. El éxito de esta transición dependerá de políticas públicas y privadas que promuevan el acceso equitativo a las tecnologías y la inversión en formación adaptativa.

4



Geoestrategia e inversión en IA física

4

Geoestrategia e inversión en IA física

Como se ha visto hasta aquí, la IA física está emergiendo como una tecnología innovadora con el potencial de remodelar industrias, redefinir interacciones humano-máquina y alterar el equilibrio geopolítico global. La competición entre Estados Unidos, China y Europa por liderar esta nueva revolución tecnológica está moldeando las dinámicas de inversión, regulación y adopción de estas tecnologías. Las estrategias de inversión adoptadas por cada región van a influir muchísimo en quién acabe liderando la IA física. Según **Eden Shochat**, patrono de nuestra fundación y Socio en Aleph VC, mientras Estados Unidos lidera con un flujo constante de capital riesgo y apoyo a startups, China moviliza recursos estatales en áreas estratégicas como la robótica y la manufactura avanzada. Europa, por su parte, apuesta por un modelo más colaborativo, aunque debe hacer frente a desafíos de fragmentación y acceso a capital privado.

La geoestrategia, además de influir en la competitividad, lo hace también en los valores que se priorizan en el desarrollo de la IA física. Esto conecta directamente con los temas clave del capítulo 6, que explora los desafíos éticos, regulatorios y de sostenibilidad.

Eden Shochat

Ver vídeo

Competencia global: dinámicas entre EE. UU., China y Europa

La competencia global por el liderazgo en IA física está configurada por estrategias distintivas adoptadas por las tres principales potencias tecnológicas: **Estados Unidos**, **China** y **Europa**. Cada región prioriza objetivos y enfoques diferentes, marcados por sus sistemas políticos, capacidades económicas y prioridades sociales. Esta rivalidad, además de influir en el desarrollo tecnológico, lo hace también en cómo se integrarán estas innovaciones en el tejido económico y social global.

Estados Unidos: innovación liderada por el sector privado

Estados Unidos se destaca por un ecosistema altamente dinámico, impulsado por la colaboración entre startups, grandes empresas tecnológicas y universidades de clase mundial. Según David Shrier, Profesor de Práctica (IA e innovación) en el Imperial College de Londres y Director General de Visionary Future, esta interacción público-privada ha permitido importantes avances en áreas como la robótica avanzada, los vehículos autónomos y los modelos fundacionales de inteligencia artificial.

Fortalezas del modelo estadounidense:

- **Liderazgo empresarial y flexibilidad:** empresas como Boston Dynamics lideran en el desarrollo de tecnologías de IA física disruptivas, gracias al apoyo de capital riesgo y la agilidad para comercializar innovaciones rápidamente.
- **Infraestructura tecnológica:** con hubs tecnológicos como Silicon Valley y Boston, Estados Unidos atrae talento global y lidera en inversiones en I+D. **Jordan Sun**, Vicepresidente de Producto de SoftBank Robotics, destaca cómo la política progresista de estados como California está facilitando la adopción responsable de la IA física.

David Shrier

Ver vídeo

Desafíos del modelo estadounidense:

- **Dependencia del sector privado**: aunque impulsa la innovación, este modelo a menudo prioriza beneficios económicos sobre cuestiones éticas y sociales.
- **Tensiones regulatorias**: la falta de marcos regulatorios nacionales unificados genera incertidumbre sobre temas como la privacidad de datos y el impacto laboral.

China: centralización estratégica impulsada por el Estado

China ha establecido un modelo centralizado para el desarrollo de la IA física, basado en un fuerte control gubernamental y una visión estratégica a largo plazo, como se refleja en el programa "Made in China 2025" lanzado en 2015. Este enfoque busca consolidar su posición como líder global en sectores estratégicos como manufactura avanzada, movilidad autónoma y robótica industrial.

Ventajas del modelo chino:

- **Inversiones masivas en I+D**: el gobierno chino invierte muchísimo dinero en centros de investigación y programas educativos especializados en inteligencia artificial.
- **Integración en sectores industriales clave**: empresas como Huawei y Baidu desempeñan un papel central en la implementación de tecnologías avanzadas en manufactura, logística y ciudades inteligentes.

Limitaciones del modelo chino:

- **Restricciones al acceso de datos**: las políticas chinas sobre censura de datos limitan la capacidad de entrenar sistemas de IA robustos. **David Shrier** señala que esta regulación puede hacer que la IA china sea menos competitiva frente a la que se desarrolla en entornos más abiertos.
- **Desafíos internacionales**: la desconfianza global sobre el uso ético de la IA y preocupaciones relacionadas con la vigilancia masiva afectan la cooperación internacional.

Europa: innovación responsable y liderazgo ético

Europa tiene el potencial de liderar el desarrollo de la IA física al integrar la innovación tecnológica con valores éticos y sostenibles. Sin embargo, el continente se enfrenta a retos importantes, tanto internos como externos, que podrían limitar su capacidad de competir con potencias como Estados Unidos y China. Este subapartado examina las fortalezas clave de Europa, los desafíos estructurales que debe superar y las oportunidades que podrían consolidar su liderazgo global.

Fortalezas de Europa: innovación responsable y colaboración transnacional

1 Regulación avanzada como ventaja estratégica

Europa ha adoptado un enfoque pionero en la creación de marcos regulatorios que equilibran innovación y responsabilidad social. El GDPR ha sido un modelo global en privacidad de datos, y la Ley de Inteligencia Artificial de la UE busca establecer estándares claros y éticos para el desarrollo y despliegue de la IA. Según **David Shrier**, estos marcos no solo protegen a los ciudadanos, sino que también pueden servir como ventaja competitiva al atraer empresas que busquen entornos estables y predecibles para la innovación.

Max Planck Institute for Empirical Aesthetics

2 Centros de investigación de excelencia

Europa alberga instituciones de vanguardia en IA y robótica, como los Institutos Max Planck en Alemania y el Instituto Italiano de Tecnología, que lideran investigaciones en robótica colaborativa, sistemas autónomos y aprendizaje adaptativo. Según los expertos del foro, estos centros fomentan la integración de la IA física en sectores como la salud, la industria y la movilidad.

3 Colaboración transnacional e iniciativas conjuntas

Programas como Horizon Europe y alianzas entre estados miembros refuerzan la capacidad de Europa para coordinar esfuerzos en investigación y desarrollo. Algunos expertos proponen la creación de un consorcio pan-europeo similar a Airbus, lo que permitiría a los países europeos consolidar sus recursos y superar las barreras de fragmentación interna.

Retos estructurales: fragmentación y competitividad

A pesar de sus fortalezas, Europa se enfrenta desafíos críticos que podrían limitar su capacidad de liderar la revolución de la IA física:

01

Fragmentación interna

Las diferencias en prioridades políticas y niveles de inversión entre los estados miembros ralentizan el desarrollo de un mercado único de IA física. Según **Jordan Sun**, esta fragmentación también dificulta la coordinación en términos de marcos regulatorios y acceso a financiación.

02

Dependencia tecnológica

Europa sigue dependiendo de actores externos para tecnologías críticas como semiconductores y plataformas de computación en la nube. Esto afecta su soberanía tecnológica y limita su capacidad para controlar el ciclo completo de desarrollo de IA.

03

Déficit en inversión privada

Europa muestra un menor dinamismo en la inversión de capital riesgo en comparación con EE. UU. y China. Este déficit limita la capacidad de las startups para escalar y competir globalmente. Según **Jordan Sun**, la falta de dinamismo en el capital riesgo europeo limita el crecimiento de startups tecnológicas, especialmente en sectores de hardware intensivo como la IA física. Modelos como RaaS (Robot-as-a-Service), que permiten a las empresas adoptar robots sin altos costes iniciales, podrían ser una solución efectiva para fomentar la escalabilidad y atraer inversores. Los expertos del foro señalaron que iniciativas como Mistral necesitan un mayor respaldo financiero para convertirse en referentes globales.

Jordan Sun

Oportunidades clave: innovación soberana y talento

1

Soberanía tecnológica a través de consorcios

Expertos como **David Shrier** abogan por modelos de *software open source* y plataformas soberanas que permitan a los países europeos mantener el control de sus infraestructuras tecnológicas clave. Esto incluye la creación de centros de datos accesibles que fomenten ecosistemas innovadores y reduzcan la dependencia de proveedores externos.

2

Educación y talento

Europa cuenta con una sólida infraestructura educativa que puede reforzarse aún más para formar la próxima generación de expertos en IA física. Programas como Erasmus+ y asociaciones entre universidades e industria pueden acelerar este proceso. Según **Jordan Sun**, una estrategia centrada en el desarrollo de talento podría dar a Europa una ventaja competitiva duradera.

3

Innovación sostenible

El alineamiento con el Pacto Verde Europeo permite a Europa liderar la integración de la sostenibilidad en el desarrollo de la IA física. De esta manera, se mejora su competitividad global y se refuerza su posición como líder ético en tecnología.

Europa en el contexto global

El liderazgo de Europa en la IA física depende de su capacidad para superar barreras internas y maximizar sus fortalezas. Según los expertos, un enfoque integrado que combine regulación avanzada, soberanía tecnológica y colaboración transnacional puede posicionar a Europa como referente global. Sin embargo, esto requerirá mayores inversiones, alianzas estratégicas y un compromiso renovado con la innovación responsable, en línea con el informe de Mario Draghi. Como señala **David Shrier**, Europa tiene la oportunidad de establecer un modelo único que priorice la ética, la sostenibilidad y la colaboración internacional, marcando una diferencia en la carrera tecnológica global.

Inversiones globales en IA física

La inversión en IA física es un motor clave en la evolución tecnológica global. Aunque la carrera por el liderazgo en IA está encabezada por regiones como Estados Unidos y China, el panorama de inversión está evolucionando hacia enfoques más estratégicos y especializados. Este apartado analiza las tendencias, los modelos de negocio emergentes y las áreas de oportunidad para startups e inversores.

Tendencias globales de inversión

1 Enfoque en aplicaciones concretas y resolución de problemas

Como señala **Jordan Sun**, las oportunidades más atractivas para startups e inversores están en **soluciones prácticas que resuelvan problemas específicos en sectores verticales**. Áreas como logística, salud y manufactura están viendo un aumento importante en financiación debido a su capacidad para generar un retorno de inversión claro y medible. **Eden Shochat** enfatiza que, a diferencia de las soluciones "horizontales", las aplicaciones especializadas son más viables comercialmente porque responden directamente a necesidades específicas del mercado.

Grace Xin Ge

2 Inversiones corporativas en China

Grace Xin Ge, patrona de nuestra fundación, Presidenta y Consejera Delegada en funciones de Hyperganic, Asesora y ex Vicepresidenta Senior y Directora Financiera de Du Xiaoman, destaca el impacto de **las grandes corporaciones chinas**, como **Baidu**, **Alibaba**, **Tencent** y **Xiaomi**, que están **invirtiendo agresivamente en startups de IA física**. Estas empresas, además de impulsar el crecimiento del ecosistema tecnológico local, establecen modelos de inversión que priorizan sectores estratégicos como la logística y la manufactura avanzada.

3 Innovación en interfaces humano-máquina

Un área subestimada, pero con gran potencial, es el diseño y desarrollo de interfaces efectivas entre personas y máquinas. Según **Eden Shochat**, los robots y sistemas de IA física deben ser, además de técnicamente robustos, accesibles y fáciles de usar para usuarios no especializados. Esto incluye desde interfaces de voz hasta sistemas intuitivos que integren datos de manera comprensible y eficiente. Las startups que desarrollan herramientas para facilitar la interacción humano-robot, como simuladores y plataformas de integración, están viendo un aumento en el interés de los inversores, como también apunta **Brian Gerkey**.

Modelos innovadores en inversión

1 ***Robots-as-a-service*** **(RaaS)**

Este modelo permite a las empresas adoptar tecnologías robóticas avanzadas sin los altos costes iniciales de compra. Como destaca **Jordan Sun**, el enfoque de suscripción ha facilitado la adopción de robots en sectores como la limpieza industrial y la agricultura, eliminando barreras de entrada para clientes y generando retornos más rápidos para los inversores.

2 **Buscar aplicaciones que generen *Flywheel Effects* (Efectos de inercia)**

Crean ciclos de retroalimentación positiva que refuerzan la ventaja competitiva de las startups de IA física, nos dice **Eden Shochat**.

Retos para los inversores

1 **Plazos largos de retorno en hardware**

Los ciclos de desarrollo más extensos de las startups de hardware en comparación con las de software siguen siendo un desafío para los fondos de capital riesgo.

2 **Infraestructuras críticas y acceso a recursos**

La concentración del mercado de GPUs y plataformas de computación en pocas empresas (como Nvidia y AWS) genera riesgos de dependencia tecnológica, especialmente para startups y países con recursos limitados.

Oportunidades en inversión

1 **Aplicaciones concretas en sectores clave**

Los inversores están priorizando soluciones que generen impacto inmediato y tangible. Como señala **Jordan Sun**, sectores como logística y salud ofrecen oportunidades para startups con modelos escalables y orientados a resultados.

2 **Innovación en interfaces persona-máquina**

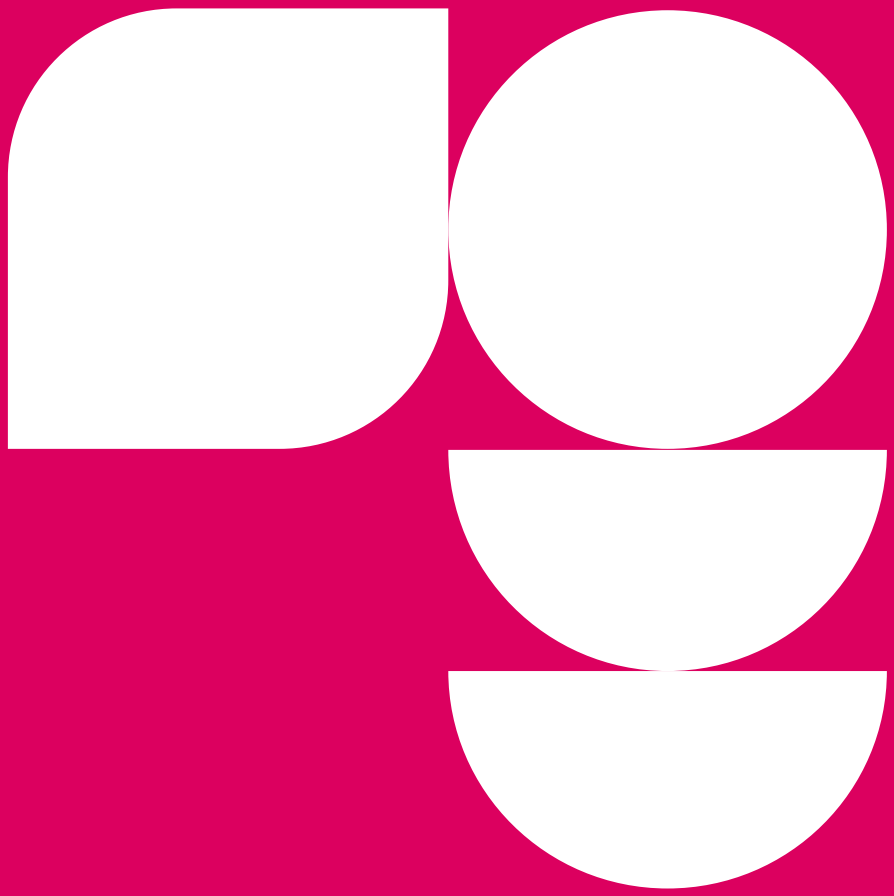
Startups que trabajen en mejorar la interacción entre humanos y sistemas de IA física tienen un gran potencial para atraer inversiones. Desde interfaces de voz hasta plataformas que simplifiquen la programación y el control de robots, esta área está emergiendo como una frontera clave para la innovación.

3 **Sostenibilidad y soberanía tecnológica**

Europa tiene la oportunidad de liderar en áreas como el desarrollo de plataformas soberanas o la sostenibilidad, lo que podría atraer flujos de inversión tanto públicos como privados.

Las inversiones en IA física se están desplazando hacia áreas con un enfoque más pragmático, centradas en resolver problemas específicos y mejorar la interacción humano-máquina. A medida que las startups logren cerrar la brecha entre tecnología y usuario, y los modelos de negocio como RaaS se consoliden, el mercado de IA física continuará expandiéndose. Como resaltaron los expertos, el verdadero éxito estará en integrar tecnología avanzada con soluciones que aporten valor real y medible.

5



Ética y Regulación

5

Ética y Regulación

El avance de la IA física plantea preguntas fundamentales sobre su impacto en la sociedad y el medio ambiente. A medida que estas tecnologías se integran en nuestra vida diaria, surge la necesidad de un enfoque que combine innovación con responsabilidad, equilibrando las oportunidades de transformación con la protección de los valores humanos y del planeta.

Este capítulo analiza dos pilares clave:

La **ética**, para garantizar un uso justo y transparente de la tecnología.

La **regulación**, como herramienta para equilibrar innovación y seguridad.

Estos ejes delinean el camino hacia un desarrollo de la IA física que promueva el desarrollo y el bienestar social y global.

Desafíos éticos en la interacción humano-máquina

El desarrollo y la adopción de la IA física ofrece un potencial innovador, pero también plantean desafíos éticos fundamentales que no pueden ser ignorados. A medida que estas tecnologías se integran en contextos críticos como la salud, la educación y el transporte, es crucial garantizar que su diseño, implementación y uso estén alineados con los valores humanos y el bienestar social.

Confianza y transparencia: pilares de la ética en IA

La confianza y la transparencia son fundamentos esenciales para garantizar que la IA física se adopte de manera responsable y eficaz. Sin ellas, los usuarios finales, las empresas y los reguladores podrían dudar en integrar estas tecnologías en sus procesos, limitando su impacto innovador.

La desconfianza hacia los sistemas de IA no surge únicamente de su complejidad técnica, sino de la percepción de que operan como "cajas negras" impenetrables. Como destaca **Pilar Manchón**, esta desconexión entre los desarrolladores y los usuarios finales genera una brecha de confianza que se agrava por la falta de transparencia en los objetivos, procesos y limitaciones de los sistemas.

¿Qué significa la transparencia en la IA física?
La transparencia en IA física implica más que la divulgación de información técnica. Según las discusiones del foro, incluye varios niveles:

Por ejemplo, en el contexto de los robots colaborativos utilizados en entornos industriales, la transparencia podría incluir informes claros para los operadores humanos sobre:

- Cómo se procesan las órdenes.
- Qué criterios utiliza el sistema para priorizar tareas.
- Cuáles son sus limitaciones en términos de seguridad o rendimiento.

01

Transparencia del propósito

Los usuarios deben comprender para qué se diseñó la tecnología y cómo se alinea con sus necesidades.

02

Transparencia del proceso

Los desarrolladores deben explicar, de manera accesible, cómo funcionan los algoritmos y cómo se toman las decisiones.

03

Transparencia de los datos

Esto implica detallar los conjuntos de datos utilizados para entrenar los sistemas, identificando posibles sesgos, representatividad de las muestras y problemas éticos en su obtención.

El rol de la explicabilidad

Un concepto relacionado con la transparencia es la **explicabilidad**, que se refiere a la capacidad de los sistemas para justificar sus decisiones y acciones. Según Nuria Oliver, Cofundadora y Directora de la Fundación ELLIS Alicante, la explicabilidad es crucial en aplicaciones críticas, como la sanidad o los vehículos autónomos, donde los usuarios y reguladores necesitan comprender el razonamiento detrás de las decisiones de la IA.

Sin embargo, la explicabilidad se encuentra con ciertas barreras:

- **Modelos complejos**: muchas tecnologías de IA, especialmente las basadas en redes neuronales profundas, operan como cajas negras, dificultando la comprensión incluso para los propios desarrolladores.
- **Compromiso entre explicabilidad y rendimiento**: a menudo, los modelos más explicables tienen un rendimiento inferior a los sistemas más complejos, lo que genera dilemas para los desarrolladores.

Nuria Oliver

Herramientas y estrategias para fomentar la transparencia:

1

Auditorías externas: algunos expertos participantes proponen que empresas independientes podrían realizar auditorías éticas y otorgar certificaciones de confianza ("*trust badges*") para garantizar que los sistemas cumplen con estándares de transparencia. Esto generaría una presión positiva en el mercado, incentivando a las empresas a priorizar la ética.

2

Diseño centrado en la transparencia: los desarrolladores deben incorporar principios de transparencia desde las primeras etapas del diseño, priorizando interfaces comprensibles para los usuarios finales. Por ejemplo:

- En un robot de asistencia doméstica, se puede incluir un panel de control visual que informe al usuario sobre las acciones actuales y futuras del sistema.
- Sistemas de realidad aumentada que expliquen en tiempo real cómo el robot interpreta su entorno y toma decisiones.

3

Estándares globales: iniciativas como la Ley de Inteligencia Artificial de la UE están estableciendo requisitos de transparencia para sistemas de IA utilizados en aplicaciones de alto riesgo, como contratación, salud y transporte. Esto incluye la obligación de detallar qué datos fueron usados para entrenar el sistema y cómo se validaron.

La conexión entre transparencia y confianza: la transparencia, cuando se implementa correctamente, fortalece la confianza de tres maneras principales:

01 **Empoderando a los usuarios**: les permite comprender las capacidades y limitaciones de los sistemas, reduciendo el temor a lo desconocido.

02 **Facilitando la rendición de cuentas**: los desarrolladores pueden ser responsabilizados por los resultados de los sistemas si estos operan de manera no deseada.

03 **Fomentando la adopción**: un sistema transparente tiene más probabilidades de ser adoptado ampliamente, especialmente en sectores críticos como la sanidad y la educación.

A pesar de sus beneficios, implementar la transparencia no está exento de desafíos:

- **Dificultades técnicas**: muchos modelos actuales, especialmente en IA física, no han sido diseñados con la explicabilidad en mente.
- **Conflictos comerciales**: la divulgación de detalles técnicos puede entrar en conflicto con la protección de la propiedad intelectual.
- **Sobrecarga de información**: es posible que los usuarios finales no deseen o no puedan procesar información excesivamente técnica, lo que requiere un enfoque balanceado.

Como concluye **Pilar Manchón**,

> **"La transparencia y la confianza no deben ser vistas como un lujo, sino como elementos esenciales para garantizar el éxito a largo plazo de la IA física."**

Pilar Manchón

Esto requiere un compromiso conjunto de desarrolladores, reguladores y usuarios para establecer estándares claros y prácticas éticas que pongan a las personas en el centro del diseño tecnológico.

Evitar el sesgo: un imperativo ético

El sesgo en los sistemas de IA física es uno de los desafíos éticos más preocupantes, ya que perpetúa desigualdades sociales existentes y puede generar resultados injustos y dañinos en aplicaciones críticas. Identificar, mitigar y evitar el sesgo debe ser una prioridad en el diseño y desarrollo de estas tecnologías.

¿Qué es el sesgo en la IA física?

El sesgo en la IA física surge cuando los datos o los algoritmos reflejan inequidades, estereotipos o prejuicios. Como explica **Nuria Oliver**, la IA se construye sobre datos históricos que, inevitablemente, contienen las desigualdades y los patrones de discriminación del mundo real. Esto significa que, si no se aborda, el sesgo no solo se reproduce, sino que se amplifica.

Ginevra Castellano

Ver vídeo

Ejemplos de sesgo en IA física:

1. **Sistemas de reconocimiento facial:** estudios han demostrado que los algoritmos de reconocimiento facial suelen ser menos precisos en identificar rostros de mujeres o personas no blancas, lo que puede llevar a exclusiones o errores en contextos como la seguridad o la contratación.

2. **Robots en atención médica:** si los datos utilizados para entrenar robots asistenciales no incluyen diversidad en género, edad o discapacidades, estos sistemas podrían no reconocer las necesidades específicas de ciertos grupos de pacientes.

3. **Robótica social y educativa:** los robots diseñados para interactuar con niños pueden perpetuar estereotipos de género si los datos de entrenamiento no son inclusivos, como apunta **Ginevra Castellano**, Catedrática y Directora del Laboratorio de Robótica Social de la Universidad de Uppsala.

Fuentes del sesgo

01

Sesgo en los datos de entrenamiento

Los sistemas de IA solo pueden ser tan justos como los datos que los alimentan. La falta de representatividad en los datos de entrenamiento puede llevar a sistemas que no reflejan la diversidad de las poblaciones a las que sirven, afirma **Iyad Rahwan**, Director del Center for Humans and Machines del Max Planck Institute for Human Development.

Por ejemplo:

- Datos extraídos de contextos mayoritariamente occidentales que excluyen realidades culturales y sociales de otras regiones.
- Subrepresentación de mujeres o minorías en los conjuntos de datos.

Iyad Rahwan

Ver vídeo

02

Sesgo algorítmico

Incluso con datos balanceados, los algoritmos pueden introducir sesgos. Esto ocurre cuando las funciones de optimización priorizan ciertos resultados sin considerar sus impactos sociales. Por ejemplo, un algoritmo que optimiza la eficiencia operativa de un robot podría ignorar consideraciones éticas como la seguridad de los trabajadores humanos.

03

Sesgo en el diseño y la implementación

La falta de diversidad en los equipos que diseñan y desarrollan sistemas de IA física también puede llevar a decisiones sesgadas. Si los desarrolladores no son conscientes de las realidades de diferentes grupos, los productos pueden ser poco inclusivos.

Impactos del sesgo en la IA física

El sesgo, además de socavar la confianza y la aceptación pública, tiene consecuencias prácticas y éticas a tener en cuenta:

- **Exclusión social**: los sistemas que no reconocen o priorizan a ciertos grupos pueden aumentar la desigualdad.
- **Ineficiencia operativa**: los robots diseñados con datos sesgados pueden fallar en adaptarse a entornos diversos, reduciendo su eficacia.
- **Daño reputacional**: empresas y desarrolladores asociados con sistemas sesgados pueden enfrentarse a sanciones legales, pérdida de confianza del consumidor y daños a su reputación.

Estrategias para evitar el sesgo

1 Auditorías y transparencia en los datos

Nuria Oliver enfatiza la importancia de auditar los conjuntos de datos para identificar y corregir desequilibrios antes de entrenar los modelos. Esto incluye:

- Analizar la representatividad de los datos.
- Identificar sesgos en las categorías, etiquetas y anotaciones utilizadas.

2 Diversidad en los equipos de desarrollo

Los equipos multidisciplinarios y diversos son esenciales para detectar y abordar sesgos que un grupo homogéneo podría pasar por alto. **Iyad Rahwan** sugiere que la incorporación de diferentes perspectivas sociales, culturales y éticas puede mejorar el diseño de los sistemas.

3 Mecanismos de control en los algoritmos

Desarrollar modelos capaces de detectar y mitigar sesgos durante el entrenamiento y la implementación. Por ejemplo:

- Algoritmos de reponderación que equilibran los datos para evitar preferencias hacia ciertos grupos.
- Sistemas adaptativos que ajustan su comportamiento en tiempo real en función de nuevos datos.

4 Certificaciones y estándares de equidad

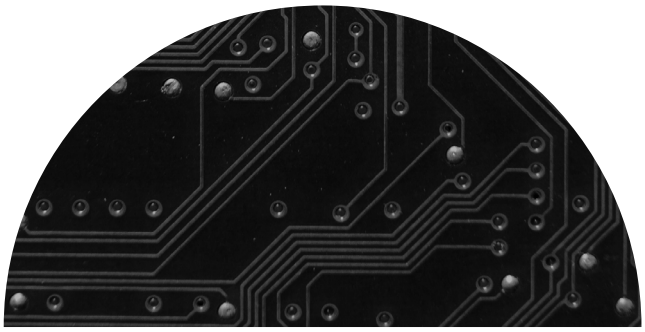
Los expertos del foro presentan la posibilidad de implementar certificaciones que garanticen que los sistemas han sido auditados en términos de equidad. Esto podría incluir sellos de confianza que aseguren que un robot o sistema de IA ha pasado pruebas de diversidad y equidad.

Al adoptar prácticas transparentes, fomentar la diversidad y aplicar controles rigurosos, los desarrolladores y reguladores pueden garantizar que la IA física sea una herramienta inclusiva y transformadora que promueva la justicia social.

Regulación como herramienta contra el sesgo

Por poner un ejemplo, la ya mencionada Ley de Inteligencia Artificial de la UE establece la obligación de evaluar y mitigar el sesgo en aplicaciones de alto riesgo, como sistemas de salud o contratación. Esto incluye:

- Garantizar que los datos de entrenamiento son representativos.
- Proporcionar documentación sobre el diseño y las pruebas realizadas para garantizar la equidad.



Hacia una IA física inclusiva y equitativa

Evitar el sesgo es un imperativo ético y también es una condición necesaria para el éxito y la sostenibilidad de la IA física. Como señala **Nuria Oliver**, construir sistemas que reflejen la diversidad y la equidad, además de beneficiar a los usuarios, aumenta la competitividad y la aceptación de estas tecnologías.

Diseño centrado en el ser humano: alianza entre tecnología y valores

El diseño centrado en el ser humano es un enfoque esencial para el desarrollo de la IA física. Este principio busca garantizar que las tecnologías sean accesibles, útiles y respetuosas con las necesidades y valores humanos, priorizando siempre el bienestar de las personas. Según **Pilar Manchón**, el verdadero éxito de la IA física no radica solo en su capacidad técnica, sino en cómo se alinea con las expectativas, los derechos y las experiencias de quienes interactúan con ella.

¿Qué significa "centrado en el ser humano"?

El enfoque centrado en el ser humano parte de la premisa de que la tecnología debe ser diseñada "para las personas y con las personas". Esto implica:

- **Resolver problemas reales**: diseñar tecnologías que aborden necesidades concretas y aporten valor tangible.
- **Fomentar interacciones positivas**: asegurar que las interacciones con los sistemas sean intuitivas, eficientes y enriquecedoras.
- **Proteger los derechos y la dignidad de las personas**: minimizar riesgos y promover la seguridad y la privacidad.

Ginevra Castellano señala que en el diseño de robots sociales, especialmente aquellos destinados a la educación y la salud, es crucial garantizar que las interacciones refuercen la confianza y la autonomía humana, evitando relaciones de dependencia o manipulación emocional.

Elementos clave del diseño centrado en el ser humano

El diseño de la IA física debe garantizar **accesibilidad y usabilidad**, con interfaces intuitivas que permitan su uso por personas de distintas edades y habilidades. Además, debe incorporar **emociones y empatía**, promoviendo interacciones que mejoren la experiencia del usuario, como en robots educativos que fomentan la curiosidad. La **supervisión y control humano** sigue siendo esencial en sectores críticos para evitar la deshumanización y garantizar la responsabilidad, como advierte **Nuria Oliver**. Por último, la diversidad cultural debe considerarse en el desarrollo de estas tecnologías para reflejar diferentes lenguajes, valores y prácticas.

Beneficios del diseño centrado en el ser humano

- **Mayor aceptación por parte de los usuarios**: las tecnologías que resuelven problemas específicos y se adaptan a las necesidades humanas tienen más probabilidades de ser adoptadas ampliamente.
- **Confianza y lealtad**: los usuarios tienden a confiar más en sistemas que entienden y que demuestran alinearse con sus valores.
- **Impacto positivo**: tecnologías diseñadas con empatía y responsabilidad tienen el potencial de mejorar la calidad de vida de las personas.

Riesgos de un mal diseño

Cuando los sistemas de IA física no se diseñan con un enfoque centrado en el ser humano, pueden surgir problemas éticos y prácticos, tales como:

- **Desconfianza**: los usuarios pueden rechazar tecnologías que perciben como complicadas o desconectadas de sus necesidades reales.
- **Manipulación emocional**: **Castellano** advierte sobre el riesgo de que los robots sociales exploten las emociones humanas para influir en decisiones o comportamientos, especialmente en niños y personas vulnerables.
- **Exclusión**: tecnologías inaccesibles o culturalmente insensibles pueden marginar a ciertos grupos.

Estrategias para un diseño centrado en el ser humano

01

Co-diseño con los usuarios finales

Involucrar a los usuarios en todas las etapas del diseño, desde la conceptualización hasta las pruebas finales. Por ejemplo, en el desarrollo de robots colaborativos industriales, los operarios deben ser parte del proceso de diseño para garantizar que los sistemas se adapten a sus necesidades y capacidades.

02

Ética incorporada desde el diseño

Los principios éticos deben integrarse desde el inicio del desarrollo tecnológico, como afirma **Pilar Manchón**. Esto incluye garantizar la privacidad, la transparencia y la seguridad en todas las etapas del diseño.

03

Medición de impacto

Implementar métricas para evaluar cómo los sistemas afectan a los usuarios, tanto a nivel práctico como emocional. Estas métricas pueden incluir:

- Niveles de satisfacción del usuario.
- Reducción de errores o frustraciones en la interacción.
- Percepción de confianza y seguridad.

Educación y regulación como facilitadores éticos

La ética en la IA física no puede surgir de forma espontánea; necesita ser integrada activamente mediante educación y regulación. Estos dos pilares permiten identificar y resolver dilemas éticos, y también garantizan que los desarrolladores, usuarios y responsables políticos trabajen con un marco común de valores y principios.

Educación ética: preparando a los futuros líderes en IA física

Como destaca **Iyad Rahwan**, "la ética debe ser tan central en la formación de los desarrolladores como lo es la programación". Esto subraya la importancia de incorporar principios éticos desde las etapas iniciales de formación de quienes diseñarán y usarán estas tecnologías.

1 Ética integrada en la educación STEM

- **Currículos**: las universidades y centros educativos deben incorporar módulos de ética en los programas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). De esta manera, se fomenta la conciencia ética y se prepara a los estudiantes para abordar los dilemas que surgirán en sus futuros trabajos.
- **Aprendizaje interdisciplinario**: según **Nuria Oliver**, es fundamental que la educación sobre IA física combine disciplinas como psicología, sociología y filosofía para abordar los problemas complejos relacionados con la interacción humano-máquina.

  Por ejemplo:

  - En robótica social, los estudiantes podrían analizar cómo las normas culturales influyen en la percepción de los robots en diferentes regiones.
  - En robótica industrial, se podrían explorar los impactos éticos de la automatización en el empleo humano.

2 Concienciación del público general

Los usuarios también deben comprender cómo interactuar de manera responsable con la IA física.

Para ello, se pueden realizar:

- **Campañas de alfabetización tecnológica**: programas públicos que expliquen conceptos clave de IA, como el sesgo y la transparencia, para fomentar la confianza y el uso informado de estas tecnologías.
- **Simulaciones y talleres**: los talleres interactivos pueden ser útiles para familiarizar a comunidades específicas, como educadores o personal sanitario, con los sistemas de IA física que implementarán en su trabajo.

3 Formación continua para profesionales

La rápida evolución de la IA física exige que los profesionales actualicen constantemente sus conocimientos. Iniciativas como programas de certificación ética y foros de discusión pueden ayudar a garantizar que los desarrolladores sigan operando dentro de un marco ético sólido.

Regulación como catalizador ético

Aunque la regulación se analizará más a fondo en el siguiente apartado, es relevante destacar cómo puede actuar como facilitador ético en el desarrollo de la IA física.

La regulación puede:

1 Establecer estándares éticos mínimos

Según **Nuria Oliver**, marcos como la Ley de Inteligencia Artificial de la UE refuerzan los principios éticos, como la equidad y la no discriminación, al exigir la evaluación de impactos sociales antes de desplegar sistemas de IA física.

2 Fomentar la transparencia y la responsabilidad

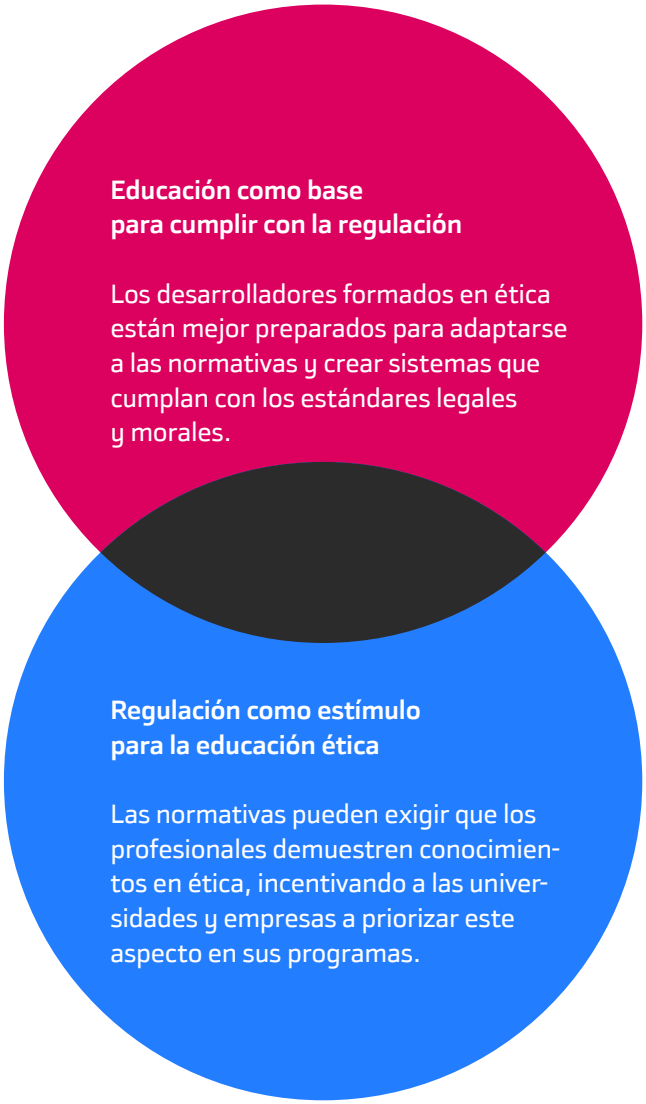
La regulación puede obligar a los desarrolladores a documentar cómo sus sistemas abordan riesgos éticos, incluyendo medidas contra el sesgo o los problemas de privacidad. Esto no solo protege a los usuarios, sino que también fomenta la confianza en la tecnología.

3 Incentivar el diseño ético mediante incentivos económicos

Las políticas públicas pueden otorgar ventajas fiscales o subvenciones a empresas que integren principios éticos en sus procesos de diseño y desarrollo.

Sinergia entre educación y regulación

Nos aseguraremos de que la IA física sea ética cuando la educación y la regulación trabajen en conjunto y se retroalimenten:



En definitiva, la ética en la IA física no puede ser una consideración opcional ni secundaria; debe estar en el núcleo del diseño, el desarrollo y el uso de estas tecnologías. La educación prepara a las personas para abordar los dilemas éticos con una perspectiva informada y multidisciplinaria, mientras que la regulación proporciona el marco necesario para garantizar que estos principios se implementen de manera efectiva.

Solo mediante la colaboración entre instituciones educativas, reguladores y la industria será posible crear un ecosistema de IA física que priorice el bienestar humano y opere como una fuerza para el progreso social.

Otras consideraciones: seguridad y soberanía tecnológica

Riesgos

Más allá de estos riesgos inherentes a la IA física, la seguridad general de este tipo de sistemas ha sido analizada en el foro por dos expertos en seguridad de IA, Gadi Evron, CEO y cofundador de Knostic, y Shahar Avin, investigador principal en el **Centro para el Estudio del Riesgo Existencial (CSER) de la Universidad de Cambridge**.

Mientras que **Evron** aborda los **riesgos inmediatos y amenazas cibernéticas concretas**, como *deepfakes* financieros y ataques a infraestructuras críticas, **Avin** presenta un marco más amplio, explorando riesgos catastróficos y existenciales relacionados con la IA física, como su potencial para la manipulación social, la militarización y la desestabilización geopolítica.

Gadi Evron

Ver vídeo

Riesgos inmediatos: ciberseguridad y ataques con IA

Gadi Evron advierte que el impacto de la IA en la seguridad **ya es una realidad**. Su capacidad para generar *deepfakes*, automatizar ataques cibernéticos y manipular la información está generando riesgos en infraestructuras críticas y procesos financieros.

Algunos ejemplos recientes incluyen:

Manipulación de información y desinformación masiva: uso de IA en redes sociales y motores de búsqueda para distorsionar la realidad y generar crisis de confianza.

Ciberataques potenciados por IA: herramientas de IA que facilitan el hackeo de sistemas de distribución energética, gubernamentales y de infraestructura crítica.

Estos riesgos se pueden trasladar a la IA física. Para mitigarlos, **Evron** recomienda **crear estándares de seguridad específicos para IA física**, desarrollar auditorías regulares y fomentar la inversión en defensa contra ataques basados en IA física.

Riesgos a gran escala: IA y amenazas catastróficas

Shahar Avin explora cómo la IA física podría generar **eventos de riesgo catastrófico o existencial**. Aunque afirma que la **IA física no es en sí misma una amenaza existencial hoy en día**, sí amplía la superficie de ataque y puede agravar problemas de seguridad global.

Entre los principales riesgos catastróficos y existenciales, **Avin** destaca:

- **Militarización de la IA y automatización de conflictos**: la tentación de integrar IA en sistemas de defensa, que podría llevar a errores catastróficos o escaladas no intencionadas de conflictos.
- **Competencia geopolítica y conflictos tecnológicos**: la IA como arma estratégica podría justificar acciones hostiles o guerras tecnológicas entre potencias.
- **Manipulación social y erosión de la democracia**: la IA generativa en dispositivos de IA física podría modificar la manera en que la información es percibida, polarizando sociedades y debilitando la cohesión social.
- **Crisis económica y desplazamiento laboral masivo**: la automatización acelerada por IA podría provocar disrupciones económicas sin precedentes.

Para abordar estos desafíos, **Avin** propone una **regulación global coordinada**, con especial énfasis en:

1. **Control sobre el hardware computacional avanzado**: regulación del acceso a GPUs y TPUs de alto rendimiento para evitar proliferación incontrolada de IA avanzada.
2. **Tratados internacionales sobre IA física en sistemas militares**: modelos similares al acuerdo entre EE. UU. y China de no integrar IA en sistemas nucleares.
3. **Verificación y auditoría de IA física de alto riesgo**: establecer mecanismos de monitorización para evitar que sistemas avanzados alcancen capacidades no supervisadas.
4. **Supervisión del impacto social de la IA física**: evaluar y mitigar efectos adversos de la IA física en la estabilidad política y social.

Ambos expertos coinciden en que la regulación debe abordar **tanto los riesgos actuales como los futuros**, con un enfoque que combine supervisión gubernamental, estándares de seguridad y cooperación internacional. Como señala **Shahar Avin**, "la principal amenaza de la IA física no es que hoy en día sea capaz de dominarnos, sino que no tenemos mecanismos sólidos para controlar su evolución ni prevenir su uso indebido a gran escala".

En este contexto, la regulación de la IA física debe ser **proactiva, global y flexible**, asegurando que la tecnología se desarrolle de manera segura, ética y en beneficio de la humanidad.

Shahar Avin

Ver vídeo

Soberanía tecnológica: un eje estratégico

David Shrier destaca la importancia de las infraestructuras soberanas y los ecosistemas locales de IA física como mecanismos para proteger la autonomía tecnológica de regiones como Europa. Países como Alemania, Dinamarca y Suecia han implementado **modelos de colaboración público-privada** para construir centros de datos y plataformas tecnológicas locales, reduciendo la dependencia de proveedores globales y creando un entorno regulatorio más seguro.

Por su parte, **Jordan Sun** añade que la soberanía tecnológica no debe entenderse solo como una cuestión de control nacional, sino también como una herramienta para equilibrar el poder entre grandes empresas tecnológicas y los gobiernos. Esto incluye normativas que limiten la concentración de datos e infraestructuras críticas en manos de pocas corporaciones globales.

Colaboración internacional: el camino hacia estándares globales

La naturaleza global de la IA física exige una cooperación internacional para evitar fragmentaciones regulatorias que dificulten la interoperabilidad. Los expertos coinciden en la necesidad de:

- **Establecer estándares éticos globales**: normativas que garanticen transparencia, seguridad y equidad, independientemente de la región.
- **Promover acuerdos de reciprocidad tecnológica**: permitiendo que tecnologías certificadas en una región puedan ser adoptadas en otras sin necesidad de procesos redundantes de validación.

Estrategias para una regulación equilibrada

1 Marcos adaptativos

Como sugiere **Iyad Rahwan**, los "sandbox regulatorios" permiten probar tecnologías de forma controlada antes de su despliegue masivo, permitiendo ajustes en las normativas sin frenar la innovación. De la misma manera que en España contamos con un sandbox regulatorio de IA, debería crearse un apéndice o una ampliación específica para la IA física.

2 Incentivos fiscales

Fomentar la innovación responsable mediante subsidios y beneficios fiscales para empresas que cumplan con altos estándares de transparencia, seguridad y sostenibilidad.

3 Transparencia obligatoria

Exigir documentación y auditorías regulares sobre el diseño y la implementación de los sistemas de IA física, incluyendo datos sobre su entrenamiento, pruebas de seguridad y posibles sesgos.

4 Supervisión y rendición de cuentas

Establecer mecanismos claros para asignar responsabilidades en caso de fallos tecnológicos o impactos negativos, promoviendo un entorno de confianza entre desarrolladores y usuarios.

Impacto positivo de una regulación bien diseñada

Cuando se implementa de forma efectiva, la regulación puede:

- **Aumentar la confianza del consumidor**: los usuarios estarán más dispuestos a adoptar tecnologías si perciben que están protegidos por normativas claras y efectivas.
- **Fomentar la competitividad global**: los estándares comunes reducen la incertidumbre y los costes asociados a la entrada en mercados internacionales.
- **Acelerar la innovación ética**: proporcionando un marco estable donde las empresas puedan desarrollar tecnologías sin miedo a regulaciones retroactivas o sanciones inesperadas.

En conclusión, la regulación no debe ser vista como un obstáculo, sino como una herramienta que garantice que la IA física opere de manera segura, ética y sostenible. Esto requiere un enfoque colaborativo entre gobiernos, empresas y la sociedad civil, donde la soberanía tecnológica y los estándares internacionales se conviertan en pilares de un ecosistema que promueva tanto la innovación como la protección de los derechos fundamentales.

6

Conclusiones

6

Conclusiones

A partir de la experiencia y las opiniones de los expertos internacionales del Future Trends Forum, compartimos en este capítulo las conclusiones más relevantes y las líneas de acción prioritarias llamadas a marcar el rumbo de esta tecnología. Y es que la inteligencia artificial física (IA física) no es una tendencia lejana, sino una realidad lista para transformar sectores clave como la sanidad, la industria y la movilidad.

La IA física ha demostrado sobradamente su capacidad de generar valor de forma inmediata: sus aplicaciones resuelven problemas reales y aportan eficiencia operativa, optimizan recursos y posibilitan servicios personalizados. Sin embargo, el ritmo de adopción varía mucho de un sector a otro. Para integrarla con éxito, cada industria necesita trazar su propia estrategia, ajustándola a sus retos y particularidades.

Ahora bien, que la tecnología sea ya funcional no implica que lo hayamos visto todo: la IA física sigue siendo terreno fértil para la innovación. Espacios como la interacción humano-máquina, el consumo eficiente de energía o la convergencia entre hardware y software son solo algunos ejemplos de oportunidades en las que el emprendimiento y la investigación pueden marcar la diferencia. Además, la evolución de modelos de negocio —por ejemplo, Robots-as-a-Service (RaaS) o sistemas basados en suscripciones— abre posibilidades para que más organizaciones y usuarios puedan acceder a estas soluciones de manera ágil y rentable.

El éxito de la IA física no dependerá únicamente de su capacidad técnica, sino también de su aceptación social y del marco regulatorio que la sustente. Construir confianza requiere transparencia en su funcionamiento, una interacción humano-máquina segura y el compromiso de diseñar sistemas y dispositivos con criterios éticos desde el principio.

Al mismo tiempo, se necesita un enfoque educativo que trascienda los límites de las disciplinas técnicas. Formar a profesionales en áreas como ética, diseño y competencias digitales avanzadas será clave para mantener un equilibrio entre la innovación y la responsabilidad. Por su parte, Europa tiene una oportunidad única para promover este desarrollo ético, con la condición de que se amplíen las inversiones y se fortalezcan los ecosistemas de innovación a nivel regional.

Es fundamental, además, impulsar la colaboración internacional. Establecer estándares globales y coordinar esfuerzos reglamentarios ayudará a que la tecnología se desarrolle de manera segura y equitativa, evitando la aparición de brechas entre países. Por último, la IA física tiene el potencial de promover una transformación social profunda si se orienta hacia la mejora de la salud, la reducción de las desigualdades y la generación de oportunidades de calidad para todos los individuos.

En definitiva, la IA física se encuentra en un punto de inflexión: está preparada para ofrecer soluciones disruptivas y mejorar la vida de las personas, pero requiere una adopción cuidadosa y visionaria.

Las conclusiones finales de este informe para un desarrollo satisfactorio de la IA física, en base al conocimiento de los expertos del Future Trends Forum, pasan por:

1 Fomentar conexiones para una innovación real

La IA física se encuentra en un punto de inflexión en el que su adopción depende, en gran medida, de la capacidad de forjar espacios de colaboración sólidos. Para lograrlo, es fundamental fomentar la creación de hubs regionales de innovación donde startups y grandes empresas puedan co-crear soluciones, compartiendo recursos y experiencias de forma ágil.

Del mismo modo, promover alianzas entre sectores estratégicos —como la sanidad, la automoción o la agricultura— resulta determinante para resolver retos específicos, potenciar el desarrollo de tecnologías disruptivas y asegurar que la innovación se extienda de manera transversal.

2 Crear marcos regulatorios dinámicos y adaptables

Para que la IA física alcance todo su potencial, es esencial contar con un marco normativo que sea seguro y transparente, pero que también se adapte a la rápida evolución de la tecnología. Establecer procesos de revisión continua en las normativas permitirá incorporar los aprendizajes de proyectos reales y, de esta forma, corregir o reforzar regulaciones de manera oportuna.

3 Educar para una IA en evolución

El crecimiento de la IA física no puede sostenerse si no hay profesionales preparados para diseñarla, implementarla y supervisarla con un enfoque ético y práctico. Para lograrlo, resulta prioritario incorporar en los programas educativos contenidos sobre interacción humano-máquina, sostenibilidad y diseño, asegurando así una formación integral que cubra los retos del presente y del futuro.

Asimismo, es clave desarrollar programas de certificación especializados en ámbitos como la sanidad y la industria, que garanticen la competencia de los profesionales y ayuden a establecer estándares de calidad y seguridad.

4 Liderar la innovación en modelos de negocio disruptivos

La democratización de la IA física y su adopción masiva requieren de esquemas de negocio que reduzcan las barreras de entrada y ofrezcan alternativas flexibles. Apostar por propuestas como *Robots-as-a-Service* (RaaS) facilita la implantación de soluciones en sectores como la logística y la agricultura, evitando grandes inversiones iniciales.

Además, incentivar la creación de marketplaces para soluciones de IA física abre un abanico de oportunidades a startups y pymes, que pueden acceder a tecnología avanzada y competir en igualdad de condiciones.

5 Convertir la sostenibilidad en un eje estratégico

Para que la IA física se convierta en una herramienta de progreso real, la sostenibilidad debe ocupar el centro de todas las decisiones, desde el diseño de los dispositivos hasta su implementación. La promoción de hardware reciclable y energéticamente eficiente no solo reduce el impacto medioambiental, sino que también contribuye a la longevidad de los proyectos y al ahorro de costes.

Invertir en iniciativas que aborden desafíos urgentes como la gestión del agua o la reducción de emisiones evidencia el compromiso de la IA física con la protección del planeta y el bienestar de las generaciones futuras.

6 Europa como referente regulatorio y ético

Gracias a su marco normativo sólido y a su compromiso con la ética y la sostenibilidad, Europa tiene ante sí la oportunidad de liderar el desarrollo global de la IA física. Impulsar la colaboración entre países europeos para consolidar un mercado unificado, eliminando barreras regulatorias internas y promoviendo sinergias entre industria, academia y startups, reforzará este liderazgo.

A nivel internacional, la definición de estándares globales de interoperabilidad y seguridad, basada en la normativa europea, situará a la región como un referente indiscutible, capaz de establecer alianzas estratégicas con regiones clave y de atraer talento e inversión responsables.

7

Anexo: Recomendaciones para Stakeholders

Recomendaciones para agentes de inversión y empresa

La IA física está revolucionando los entornos industriales, desde la manufactura hasta la logística, al optimizar procesos y mejorar la eficiencia operativa. Sin embargo, su adopción plantea desafíos como la integración de diferentes sistemas, la necesidad de formar a la fuerza laboral y el cumplimiento de marcos regulatorios cada vez más estrictos.

Para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos, es esencial que tanto las empresas consolidadas como las emergentes y los inversores adopten estrategias bien definidas, colaboren en la creación de estándares y prioricen la educación y la sostenibilidad.

Industria

Desarrollar plataformas colaborativas e interoperables

Para aprovechar al máximo la IA física, es crucial establecer un estándar común que permita la integración de robots y sistemas de diferentes fabricantes sin generar altos costes ni duplicidades. Una forma de lograrlo es impulsando consorcios industriales que definan estándares de interoperabilidad y *frameworks* abiertos para sistemas robóticos. De este modo, las máquinas pueden compartir datos a lo largo de distintas líneas de producción con mayor facilidad, lo que reduce los costes operativos. Colaborar con competidores, aunque parezca paradójico, puede acelerar el desarrollo y la escalabilidad de estas soluciones, beneficiando sobre todo a las pymes, que así acceden a tecnologías punteras sin tener que crear soluciones completamente desde cero.

Anticiparse a la regulación

La rápida evolución de la IA física exige que las empresas se preparen para cumplir con normativas locales e internacionales desde la fase inicial de los proyectos. Para ello, es aconsejable formar equipos multidisciplinares que incluyan ingenieros, expertos legales y analistas de impacto social. Estos equipos pueden llevar a cabo auditorías legales que se anticipen a posibles cambios normativos, como los previstos en la Ley de Inteligencia Artificial de la UE. Con esta estrategia, se evitan bloqueos regulatorios y se minimizan riesgos legales a largo plazo.

Fomentar la educación y la experiencia de usuario

La plena adopción de la IA física requiere no solo de soluciones tecnológicas avanzadas, sino también de un personal capacitado para utilizarlas e integrarlas sin fricciones. Por ello, es recomendable diseñar programas de formación específicos para operarios industriales, apoyándose en simulaciones virtuales y contenidos interactivos que faciliten el aprendizaje. Además, los robots colaborativos (cobots) deben contar con interfaces intuitivas que muestren la información de forma clara, como indicadores de estado o alertas visuales. Esta combinación de educación y diseño centrado en el usuario reduce errores operativos, genera confianza en la plantilla y aumenta la eficiencia global.

Empresas

Desarrollar estrategias integradas de IA física

La implementación de la IA física no debe limitarse a proyectos aislados. En su lugar, conviene trazar planes a medio y largo plazo que alineen esta tecnología con los objetivos estratégicos de la empresa, ya sea para reducir costes, mejorar la eficiencia o explorar nuevos modelos de negocio. Una forma de lograrlo consiste en establecer unidades especializadas en IA física formadas por equipos multidisciplinares con expertos en datos, ingenieros de hardware y especialistas en diseño. Así se garantiza una visión completa y coherente de los proyectos.

Impulsar aplicaciones que minimicen la huella de carbono

Cada vez es más urgente que las empresas adopten prácticas sostenibles. La IA física puede contribuir a este propósito optimizando procesos y reduciendo consumos de agua y energía. Esto implica analizar los eslabones de la cadena de valor más intensivos en recursos, como líneas de producción o transporte logístico, para luego aplicar soluciones robóticas que ajusten en tiempo real el uso de energía o detecten fugas de agua. Por ejemplo, instalar sensores inteligentes que midan y regulen el consumo de cada máquina permite alcanzar objetivos de sostenibilidad —como el Net Zero— y refuerza la reputación de la compañía ante reguladores, consumidores y socios.

Invertir en la capacitación del personal

Para que los empleados estén preparados ante los cambios tecnológicos, se recomienda promover programas de formación continua (*reskilling* y *upskilling*), en colaboración con universidades y centros de formación técnica. De este modo, se crea una cultura de aprendizaje permanente que posibilita la integración progresiva de la IA física sin generar fricciones ni temores.

Startups e Inversores

Enfocarse en soluciones que resuelvan problemas concretos

El éxito de las startups de IA física pasa por identificar necesidades claras y proponer soluciones aplicables a sectores clave, como la sanidad, la logística o la agricultura. Antes de desarrollar prototipos, es esencial realizar estudios de mercado que determinen nichos de alto impacto, orientando así la innovación hacia áreas con una demanda real.

Explorar modelos de negocio escalables, como RaaS (*Robots-as-a-Service*)

Para facilitar la adopción de tecnologías robóticas entre pymes, los modelos basados en suscripciones pueden resultar altamente atractivos. La idea es ofrecer servicios de robótica bajo demanda, de modo que las empresas paguen solo por lo que utilizan, sin afrontar grandes inversiones iniciales. Realizar pilotos con potenciales clientes, antes de lanzar definitivamente el producto, ayuda a validar la sostenibilidad y rentabilidad de este enfoque.

Promover la financiación sostenible

Los inversores pueden impulsar la IA física de forma responsable priorizando proyectos con un enfoque claro en la sostenibilidad y la responsabilidad. Para ello, es útil contar con fondos especializados en IA física que incluyan métricas ESG (ambientales, sociales y de gobernanza) dentro de los criterios de inversión. Este tipo de apoyo económico acelera la maduración de soluciones tecnológicas que, además de rentables, contribuyen positivamente al entorno.

Recomendaciones para agentes de investigación y educación

La formación y la investigación son el corazón de la evolución tecnológica. En el caso de la IA física, la colaboración entre instituciones académicas, centros de investigación y empresas es vital para generar avances significativos con un enfoque responsable.

Además, las futuras generaciones de profesionales deben adquirir competencias técnicas pero también habilidades en humanidades, ética y sostenibilidad para entender el impacto de las innovaciones.

Centros Educativos

Actualizar los currículos académicos

Los programas de ingeniería, ciencias y tecnología deben incorporar módulos específicos sobre IA física, ética aplicada y sostenibilidad para reflejar los retos del mundo real. Para ello, conviene establecer acuerdos con empresas y expertos de la industria, de modo que los estudiantes se formen mediante proyectos prácticos y becas que conecten teoría y aplicación.

Fomentar competencias interdisciplinarias

Es crucial diseñar cursos que combinen habilidades técnicas con perspectivas de las humanidades. Así, los futuros profesionales podrán abordar los dilemas éticos y las implicaciones sociales que surgen del uso de la IA física. Una opción interesante es crear dobles titulaciones que unan ciencias técnicas con estudios sociales, contribuyendo a una formación más holística.

Promover iniciativas de divulgación

El conocimiento sobre la IA física no debería limitarse a las aulas universitarias. Organizar talleres y charlas abiertos al público aumenta la alfabetización tecnológica e involucra a diferentes comunidades.

Centros de Investigación

Establecer alianzas internacionales

La cooperación entre centros de investigación de diferentes países permite compartir recursos, conocimientos y experiencias. Participar en consorcios internacionales enfocados en desarrollar estándares globales favorece una visión más amplia y coordinada de la IA física, acelerando el progreso y armonizando criterios éticos y técnicos en distintas regiones.

Priorizar proyectos de alto impacto social y medioambiental

La investigación en IA física puede enfocarse hacia soluciones que respondan a los objetivos de sostenibilidad, como la reducción de emisiones o la mejora de la calidad de vida. Conseguir financiación específica para este tipo de proyectos no solo impulsa la innovación, sino que también refuerza la relevancia y la aceptación social de los avances tecnológicos.

Garantizar la ética en la investigación

Para evitar posibles impactos negativos, es fundamental contar con comités éticos que evalúen los proyectos desde sus fases iniciales. Además, publicar informes periódicos sobre los efectos sociales y éticos de la investigación en IA física fomenta la transparencia y la confianza, tanto dentro de la comunidad científica como en la sociedad en general.

Recomendaciones para agentes regulatorios

La acción de los reguladores es esencial para equilibrar la innovación con la protección de los ciudadanos. En un contexto en el que la IA física avanza a gran velocidad, los marcos normativos deben ser lo suficientemente sólidos para garantizar la seguridad y la transparencia, pero también flexibles para no frenar el progreso tecnológico. Asimismo, la colaboración internacional resulta clave para establecer reglas comunes y promover la adopción de estándares éticos y técnicos a escala global.

Desarrollar estándares de seguridad y transparencia

Con el objetivo de proteger a los usuarios finales, es imprescindible definir requisitos de seguridad y protocolos de transparencia que regulen la IA física. Una buena práctica consiste en introducir sellos de calidad que certifiquen la fiabilidad de los dispositivos en diversos sectores, generando así mayor confianza en el mercado.

Establecer sandbox regulatorios

Para probar nuevas tecnologías de IA física en un entorno controlado, se recomienda la creación de espacios o programas piloto donde las empresas puedan experimentar, mientras los reguladores supervisan el impacto y evalúan posibles riesgos. Colaborar con universidades y centros de investigación amplía la capacidad de análisis y acelera la identificación de mejores prácticas.

Fomentar la colaboración internacional

La IA física tiene un alcance global, de modo que promover acuerdos bilaterales y multilaterales contribuye a armonizar los marcos regulatorios y facilita la exportación de tecnologías. Especialmente en sectores de alto riesgo, como la sanidad o el transporte, establecer normas comunes acelera la adopción de soluciones seguras y eficaces.

Introducir inversiones y subvenciones estratégicas

Además de regular, los poderes públicos pueden actuar como catalizadores de la innovación. Crear fondos de subvención específicos para startups y pymes enfocadas en IA física, especialmente en sectores clave como la movilidad sostenible o la agricultura de precisión, ayuda a repartir el riesgo y a promover la competitividad. También resultan valiosos los programas de coinversión público-privada para atraer capital y multiplicar el impacto de las iniciativas emergentes.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todos los miembros del Future Trends Forum (FTF) asistentes a la reunión, y a los colaboradores en la organización de la reunión:

A Frances Stead Sellers, por su liderazgo y moderación en las sesiones del foro, a Leila Takayama y Sonia Chernova por su experta ayuda en el proceso de organización del foro, a Antonio Gálvez, autor de este informe, y al equipo de Prodigioso Volcán por su contribución innovadora.

Y por último, agradecer el compromiso del equipo de la Fundación Innovación Bankinter en que la innovación ayude a adelantarnos al futuro.

Las opiniones expresadas en este informe son del autor y no reflejan la opinión de los expertos que participaron en la reunión del Future Trends Forum.

Participantes

Ángel Cabrera
Presidente del Georgia Institute of Technology y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. España/ EE.UU.

Antonio Damasio
Profesor Dornsife de Neurociencia, Psicología y Filosofía, y Director del Instituto de Cerebro y Creatividad en la Universidad del Sur de California en Los Ángeles. Fideicomisario de la Fundación de Innovación Bankinter. EE.UU.

Brian Gerkey
Director de Tecnología en Intrinsic y Presidente de la Junta de Open Robotics. EE.UU.

Carme Torras
Profesor investigador en el CSIC. España.

Charles Bolden
Ex administrador de la NASA, fundador y consejero delegado emérito de The Charles F. Bolden Group LLC y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. EE.UU.

Dario Floreano
Profesor de Sistemas Inteligentes en la EPFL. Suiza.

David Dorn
Profesor de la Fundación UBS de Globalización y Mercados Laborales en la Universidad de Zúrich. Suiza.

David Shrier
Profesor en Práctica (IA e innovación) en el Imperial College London y Director General de Visionary Future. Reino Unido.

Dongmin Chen
Decano/Profesor de la Escuela de Innovación y Emprendimiento de la Universidad de Pekín y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. China.

Dor Skuler
Fundador y CEO de Intuition Robotics. Israel.

Eden Shochat
Socio igualitario en Alephl. Fideicomisario de la Fundación de Innovación Bankinter. Israel.

Emilio Méndez
Asesor Senior en el Departamento de Ciencia y Tecnología Energéticas del Brookhaven National Laboratory y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. España/ EE.UU.

Fernando Domínguez
Vicepresidente de SandboxAQ AI & Quantum. España/EE.UU.

Francesco Ferro
CEO de Pal Robotics. Italia/España.

Gadi Evron
CEO y Co-Fundador de Knostic. Israel.

Ginevra Castellano
Profesor y Director del Laboratorio de Robótica Social de Uppsala. Suecia.

Grace Xin Ge
Presidenta y CEO en funciones de Hyperganic y Patrono de Fundación Innovación Bankinter. China/Reino Unido.

Hanna Damasio
Profesor. Cátedra Dana Dornsife de Neurociencia y Director del Centro Dana y David Dornsife de Neurociencia Cognitiva de la Universidad del Sur de California. EE.UU.

Iyad Rahwan
Director de Max Planck y ex profesor del MIT. Alemania.

Javier del Ser
Científico jefe de Inteligencia Artificial y Profesor Investigador en TECNALIA Investigación e Innovación. España.

Jens Schulte-Bockum
Presidente del Consejo de Administración de Zayo Europe y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. Alemania.

Jeremy Kahn
Editor de IA en Fortune Magazine, autor de "Mastering AI: A Survival Guide to Our Superpowered Future". Reino Unido.

Jordan Sun
Vicepresidente de Producto en SoftBank Robotics. EE.UU.

Juan Antonio Zufiria
Presidente de la Fundación Innovación Bankinter. Ex Vicepresidente Senior de IBM/ Vicepresidente de la Real Academia de Ingeniería. España.

Julia Li
Fundadora y Directora General de HCD. China

Leila Takayama
Vicepresidente de Diseño e HRI en Robust.AI. EE.UU.

Nuria Oliver
Co-Fundador de la Fundación ELLIS Alicante. España.

Pablo Castellanos
Vicepresidente de Ingeniería en Wayve. España/Reino Unido.

Philip Lader
Ex embajador de EE.UU. ante la Corte de St. James's y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. EE.UU.

Pilar Manchón
Director Senior de Ingeniería, Estrategia de Investigación en IA en Google. España/EE.UU.

Ramón López de Mántaras
Profesor Investigador (Emérito) y ex director del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial del CSIC. España

Richard Kivel
Director General de GrayBella Capital y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. EE.UU.

Scott Simon
Escritor y locutor de radio en la NPR y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. EE.UU.

Sergio Gago
Director General de IA y Computación Cuántica en Moody's. España/Alemania.

Shahar Avin
Investigador Senior Asociado en CSER. Israel/Reino Unido.

Sheila Stamps
Experta financiera y profesional de la gestión de riesgos y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. EE.UU

Sonia Chernova
Profesor Asociado en el Georgia Institute of Technology. EE.UU.

Tan Chin Nam
Ex Secretario Permanente del Servicio Público de Singapur y Asesor Corporativo y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. Singapur.

Thomas Hurd
Fundador de Zeki Data. Reino Unido.

Wilfried Vanhonacker
Cofundador y exdecano de CEIBS (Shanghái) y MSM Skolkovo (Moscú) y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter. Bélgica/China.

fundación
innovación
bankinter.