

Capítulo cuarto

Inteligencia artificial: el catalizador estratégico para un futuro energético resiliente y descarbonizado

Inmaculada Martínez Rubio

Resumen

La inteligencia artificial en 2026, abriendo brecha hacia 2030, ha pasado de ser una herramienta tecnológica a convertirse en el catalizador estratégico indispensable para responder a los retos del sector energético. Desde los primeros logros en optimizar la eficiencia energética, la IA está llevando a escenarios de innovación exponencial que van a permitir una hoja de ruta sostenible. La IA va a contribuir a producir, gestionar y distribuir la energía de forma superior a otras tecnologías, convirtiendo el sector energético en un entorno descentralizado. Su potencialidad es capaz de abarcar soluciones sólidas y escalables en donde la IA avanzada del siglo XXI —IA generativa, de modelos fundacionales y agéntica— va a crear un nuevo paradigma en cómo la energía responde al reto de la digitalización mundial. La IA de estos próximos cinco años no solo va a estar regulada, sino que va a adoptar estándares industriales y a rodearse de una ciberseguridad muy superior a lo que se ha planteado en el pasado, combinando IA con cifrado cuántico para proteger infraestructuras clave y sostener operaciones de valor crítico. Así, la IA en 2026 se presenta como una capacidad fundamental a largo plazo, inte-

grando tecnología, talento y una gobernanza sólida para aprovechar al máximo su potencial de forma responsable.

Palabras clave

Descarbonización, Sostenibilidad energética, Ciberseguridad, Eficiencia energética, Gobernanza crítica.

Artificial intelligence: the strategic catalyst for a resilient and decarbonized energy future

Abstract

Artificial Intelligence in 2026, paving the way to 2030, has evolved from a technological tool to an indispensable strategic catalyst for addressing the challenges of the energy sector. From its initial achievements in optimizing energy efficiency, AI is propelling us toward scenarios of exponential innovation that will enable a sustainable roadmap. AI will contribute to producing, managing, and distributing energy more effectively than other technologies, transforming the energy sector into a decentralized environment. Its potential encompasses robust and scalable solutions where 21st-century Advanced AI—Generative, Foundational Model, and Agentic AI—will create a new paradigm in how energy responds to the challenge of global digitalization. AI in the next five years will not only be regulated, but will also adopt industry standards and be surrounded by cybersecurity far superior to anything seen in the past, combining AI with quantum encryption to protect critical infrastructure and sustain mission-critical operations. AI in 2026 is thus presented as a fundamental long-term capability, integrating technology, talent and solid governance to make the most of its potential in a responsible manner.

Keywords

Decarbonization, Energy sustainability, Cybersecurity, Energy efficiency, Critical governance.

ENERGÍA Y ESTRATEGIA

CIBERSEGURIDAD Y RESILIENCIA DEL SISTEMA



CONTRARRESTANDO LA INGENIERÍA SOCIAL IMPULSADA POR LA IA



PREVENCIÓN DEL "MOVIMIENTO LATERAL" CON MICROSEGMENTACIÓN



DEFENSA CONTRA EL "ENVENENAMIENTO DE DATOS"

BENEFICIOS PARA LAS PLANTAS DE ENERGÍA (2025)

CARACTERÍSTICA	IMPACTO EN LA SEGURIDAD	ESTADO DE LA INDUSTRIA EN 2025
CENTRADO EN LA IDENTIDAD	EVITA QUE LAS CONTRASEÑAS ROBADAS PROVOQUEN APAGONES	ESTÁNDAR PARA TODOS LOS NUEVOS PROYECTOS DE RED DE LA UE Y EE.UU.
MONITOREO CONTINUO	DETECTA "AMENAZAS INTERNAS" O IA COMPROMETIDA EN TIEMPO REAL	INTEGRADO CON MONITORES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL ESTILO DEEPMIND
SUPONER UNA BRECHA EN LA CIBERSEGURIDAD	EL SISTEMA PERMANECE FUNCIONAL INCLUSO DURANTE UN ATAQUE ACTIVO	REQUERIDO POR LAS REGULACIONES NERC CIP Y NIS2
MÍNIMO PRIVILEGIO	LOS EMPLEADOS SÓLO VEN LO QUE NECESITAN PARA HACER SU TRABAJO	REDUCE LAS INTERRUPCIONES RELACIONADAS CON ERRORES HUMANOS EN APROXIMADAMENTE UN 40%

LA HUELLA AMBIENTAL DE LA IA



TÉCNICAS DE "ADELGAZAMIENTO" ALGORÍTMICO



HARDWARE; LA TRANSICIÓN AL BORDE



PROGRAMACIÓN CONSCIENTE DE LA HUELLA DE CARBONO



EL IMPUESTO ENERGÉTICO DEL "RAZONAMIENTO"



EL DESPLIEGUE DE LA IA VERDE

RESUMEN

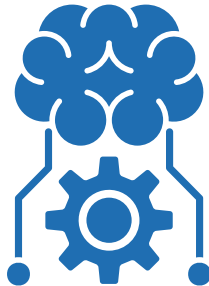
TÉCNICA	POTENCIAL AHORRO ENERGÉTICO	ESTADO (FINALES DE 2025)
MEZCLA DE EXPERTOS (MOE)	~90% REDUCCIÓN	ESTÁNDAR EN LOS NUEVOS MODELOS FRONTERIZOS
CUANTIZACIÓN (1 BIT / 2 BITS)	4X - 8X REDUCCIÓN	SE ESTÁ ADOPTANDO RÁPIDAMENTE PARA LA IA MÓVIL
IA EN EL DISPOSITIVO (DE BORDE)	100X - 1,000X	INTEGRADO EN LA MAYORÍA DE LOS NUEVOS PRODUCTOS ELECTRÓNICOS DE CONSUMO
PROGRAMACIÓN CONSCIENTE DEL CARBONO	~30% CARBON REDUCCIÓN	OBLIGATORIO SEGÚN MUCHAS POLÍTICAS ESG CORPORATIVAS

IMPACTO DEL MODELO GRANDE VS. PEQUEÑO (2025)

MÉTRICA	MODELO GENERAL GRANDE (P. EJ.: GPT-4)	MODELO ESPECÍFICO PARA TAREAS PEQUEÑAS (P. EJ.: MISTRAL/SLM)
CONSUMO ENERGÉTICO	ALTO	90% MÁS BAJO
REFRIGERACIÓN POR AGUA	~500 ML POR CADA 10-50 CONSULTAS	ESCASO
INFRAESTRUCTURA	CENTROS DE DATOS MASIVOS A HIPERESCALA	DISPOSITIVOS LOCALES DE "BORDE" / NPU
LATENCIA	SUPERIOR (DEPENDIENTE DE LA NUBE)	TIEMPO REAL

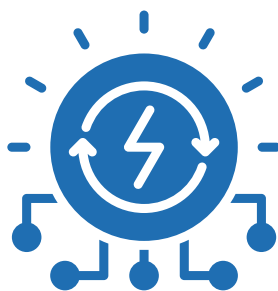
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

EVOLUCIONANDO DESDE LA COMPUTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO HACIA LA IA



HPC COMPARADO CON LA IA

HPC	IA
SE BASA EN LA VELOCIDAD Y EL CÁLCULO DE FUERZA BRUTA	SE CENTRA EN LA SIMULACIÓN DE INTELIGENCIA Y PATRONES DE APRENDIZAJE
SE CENTRA EN RESOLVER PROBLEMAS COMPUTACIONALES GRANDES Y COMPLEJOS LO MÁS RÁPIDO POSIBLE	SIMULA LA INTELIGENCIA HUMANA, PERMITIENDO QUE LAS MÁQUINAS RAZONEN, APRENDAN, PERCIBAN Y TOMEN DECISIONES
ALGORITMOS <i>DETERMINISTAS PREDEFINIDOS</i> QUE EJECUTAN LAS INSTRUCCIONES EXACTAMENTE COMO SE PROGRAMARON	ALGORITMOS <i>NO DETERMINISTAS</i> QUE APRENDEN DE LOS DATOS Y HACEN PREDICCIONES O CLASIFICACIONES
SE CONSIGUE UN RESULTADO NUMÉRICO PRECISO O UNA SIMULACIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN	SE CREA UN MODELO APRENDIDO QUE PUEDE PREDECIR UN RESULTADO DIFÍCIL DE CALCULAR A TRAVÉS DE OTRAS METODOLOGÍAS
LAS SIMULACIONES HPC REQUIEREN UN ALTO COSTE COMPUTACIONAL PARA SU EJECUCIÓN REPETIDA PARA EL ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE	SE ADAPTA MEJOR A LOS DESAFÍOS ACTUALES EN EL SECTOR DE SITUACIONES INCIERTAS Y NO LINEALES
NECESITA DE UNA ECUACIÓN FÍSICA EXPLÍCITA	APRENDE Y SE ADAPTA A PARTIR DE DATOS OPERATIVOS COMPLEJOS, CONFUSOS E INCOMPLETOS



LA IA EN EL SECTOR ENERGÉTICO DEL SIGLO XXI

METODOLOGÍAS FUNDAMENTALES DE IA	TECNOLOGÍAS QUE FACILITAN Y AMPLIFICAN EL DESPLIEGUE Y USO DE LA IA
APRENDIZAJE AUTOMÁTICO (ML)	GEMELOS DIGITALES
APRENDIZAJE PROFUNDO (DL)	IoT Y REDES DE SENSORES
IA GENERATIVA (GenAI)	COMPUTACIÓN AL BORDE
IA AGÉNTICA	CONECTIVIDAD 5G Y 6G
MODELOS DEL MUNDO	LA CADENA DE BLOQUES

1 Resumen ejecutivo: el imperativo de la IA

El sector energético se encuentra en un momento crucial, lidiando con las complejidades de la descarbonización, la descentralización de la generación de energía y el crecimiento exponencial de la demanda de electricidad. En este contexto, la inteligencia artificial (IA) ha evolucionado desde lo que en décadas pasadas se desarrollaba a través de modelos de estadística y de planificación de escenarios hacia la computación de alto rendimiento (HPC¹) y el entrenamiento de modelos algorítmicos de aprendizaje automático durante la década de los dos mil. Pero esta trayectoria, casi linear, ha sido recientemente retada por los modelos de IA avanzada que han disrumpido la innovación tecnológica del sector energético con modelos más allá de los algoritmos matemáticos de datos estructurados². Esta trayectoria ha convertido a la IA en una poderosa herramienta de fuerte imperativo estratégico con la que afrontar los desafíos del sector energético y forjar soluciones más eficientes, sostenibles y resilientes.

1.1 Factores fundamentales de la revolución energética de la IA

El creciente papel de la IA está directamente vinculado a los cambios fundamentales que están transformando la industria energética. Estos impulsores no son aislados, sino que forman un ciclo que se retroalimenta y convierte a la IA en una necesidad que no se puede postponer porque el mercado competitivo está demostrando que es una solución no solo viable, sino única en muchos casos.

1.1.1 Descarbonización

El compromiso global con un futuro bajo en carbono ha propiciado un aumento drástico de las fuentes de energía renovables,

¹ Por sus siglas en inglés: *high performance computing*.

² La distinción entre datos estructurados y no estructurados es fundamental para la gestión, el almacenamiento y el análisis de datos modernos, especialmente con el auge de la IA avanzada. La diferencia principal radica en la presencia o ausencia de un modelo o esquema de datos predefinido. Los datos estructurados no son solo números; habitualmente incluyen texto (y fechas, horas, moneda, etc.) que perfectamente se almacena en una base de datos tradicional. Los datos no estructurados pueden contener números, pero a menudo son difíciles de extraer sin herramientas especiales y complejos de IA/ML (PLN/Visión por computadora) para analizar.

como la solar y la eólica. Estas fuentes son inherentemente variables e intermitentes, lo que introduce una imprevisibilidad en la red eléctrica que los métodos tradicionales de gestión estática no pueden gestionar. La IA es esencial para gestionar esta variabilidad mediante la previsión de la producción de energía renovable y el equilibrio entre la oferta y la demanda, lo que facilita una mayor penetración de las energías limpias y reduce la huella de carbono.

1.1.2 Descentralización y digitalización

La proliferación de recursos energéticos distribuidos, como paneles solares en azoteas, microrredes y sistemas de almacenamiento de baterías, está descentralizando la generación de energía y creando un flujo de energía complejo y multidireccional. Este cambio requiere una red inteligente y altamente digitalizada que pueda gestionar grandes cantidades de datos en tiempo real para garantizar la estabilidad. La IA proporciona la única solución escalable para procesar estos datos y automatizar las complejas tareas de gestión de la oferta y la demanda en estas modernas redes inteligentes.

1.1.3 Electrificación

La electrificación acelerada de la economía, en particular con el crecimiento de los vehículos eléctricos (VE) y los centros de datos de alto consumo de energía, está ejerciendo una presión sin precedentes sobre la infraestructura de la red existente. Este aumento en la demanda requiere un nuevo nivel de inteligencia para la optimización de la red y la gestión de la carga. La IA es fundamental para pronosticar estos nuevos perfiles de carga y ajustar la distribución para evitar apagones y garantizar la confiabilidad³.

1.2 Entendiendo la IA y su poder de transformación

La IA hoy en día es ya más que una tecnología y se desarrolla como sistema de sistemas que abarca los diferentes tipos de

³ *Top 10 applications of AI in the energy sector*, disponible en: <https://www.fdmgroup.com/news-insights/ai-in-energy-sector/>

IA avanzada – IA generativa⁴, IA agéntica⁵, IA de aprendizaje profundo (*Deep Learning*)⁶ y modelos frontera⁷-modelos fundacionales, modelos grandes de language, modelos multimodales, capacidades emergentes y estado del arte⁸, formando un ecosistema interdependiente al que se le unen el universo de datos que procesar, el *software* y el *hardware* que se emplean en llevar a cabo esta tarea, así como de los semiconductores de procesamiento que se requieren para ejecutar las acciones requeridas en

⁴ La IA generativa es un tipo de inteligencia artificial que utiliza modelos de aprendizaje profundo, entrenados con conjuntos de datos masivos, para crear contenido en respuesta a la solicitud del usuario. A diferencia de la IA tradicional, que solo clasifica o analiza los datos existentes, la IA generativa aprende los patrones y estructuras subyacentes de sus datos de entrenamiento para producir de forma autónoma resultados comprensibles como texto, imágenes, audio, vídeo o código de *software*. Esta capacidad le permite potenciar la creatividad humana y automatizar tareas complejas de generación de contenido.

⁵ La IA agéntica se refiere a sistemas avanzados que muestran autonomía y capacidad de acción, lo que significa que pueden establecer sus propios subobjetivos, planificar una secuencia de acciones, ejecutarlas utilizando diversas herramientas y adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno para lograr un objetivo general con mínima intervención humana. A diferencia de la IA generativa, que crea contenido de forma reactiva (por ejemplo, redacta un informe a petición), la IA agéntica es un ejecutor proactivo que coordina múltiples pasos y sistemas (por ejemplo, redacta un informe, lo archiva en la base de datos, actualiza un panel y envía el resumen por correo electrónico a un equipo).

⁶ El aprendizaje profundo es un subcampo especializado del aprendizaje automático que utiliza modelos informáticos complejos de múltiples capas, denominados redes neuronales profundas, para analizar datos. El término «profundo» se refiere a la estructura de la red, que consta de numerosas capas ocultas interconectadas que procesan la información jerárquicamente, de forma similar al cerebro humano. Esta arquitectura permite que el modelo aprenda automáticamente características cada vez más abstractas y complejas a partir de datos sin procesar y no estructurados (como píxeles en una imagen o palabras en una oración) sin necesidad de programación humana explícita para la extracción de características, lo que le permite destacar en tareas sofisticadas como la traducción de idiomas, el reconocimiento de imágenes y la conducción autónoma.

⁷ Un modelo frontera es un término colectivo que designa a los sistemas de IA de propósito general, a gran escala y más avanzados que existen actualmente, que amplían los límites de las capacidades de la inteligencia artificial. Estos modelos suelen ser modelos fundacionales —entrenados con cantidades masivas de datos y computación— y se caracterizan por su capacidad para realizar una amplia variedad de tareas complejas en diferentes dominios (como razonamiento, codificación y generación de texto, imágenes y audio) con un rendimiento de vanguardia. Debido a su escala sin precedentes, a menudo exhiben capacidades emergentes que no fueron programadas explícitamente y, por lo tanto, conllevan un potencial significativo de impacto social, tanto positivo como arriesgado.

⁸ SOTA (*state of the art*, por sus siglas en inglés), lo más reciente y novedoso en desarrollo.

la gestión y distribución de la energía. No obstante, esta infraestructura tecnológica no podría ser ejecutable si le faltase el mayor atributo competitivo: la intervención humana especializada en análisis de datos, modelación de inferencia y cognición, y la aportación de profesionales del sector energético que puedan evaluar el valor aportado por la IA como sistema operativo y de ejecución. Junto con el capital humano especializado, emergen con mayor relevancia los protocolos y procesos empresariales creados en específico para que la IA pueda ejecutar su potencialidad.

Así, el futuro del sector en este segundo cuarto de siglo se revela cada vez más dependiente de las aportaciones que la IA realiza y, convencido de su habilidad para producir, gestionar y distribuir la energía de forma superior a otras tecnologías, apuesta en ella para transformar radicalmente una industria de sistemas tradicionales y estáticos por una de redes y operaciones dinámicas, inteligentes y proactivas⁹, superando mentalidades y actitudes del pasado y trazando una nueva hoja de ruta de visión trascendental hacia un sector transmutado, aumentado y superior.

Ante este panorama de oportunidades y potencialidad, cabe señalar que el análisis de datos y la alta computación desde la década de los sesenta en el siglo pasado han hecho que el sector energético se haya convertido en una de las industrias de mayor innovación y transformación. La IA no «llegó» a este sector inesperadamente, como ha sido el caso de otros sectores, sino que se la buscó en procesos de investigación y desarrollo como herramienta que permitiera dar el salto tecnológico desde la alta computación (HPC) para afrontar el tipo de retos que han emergido en las últimas décadas a los que la alta computación no se ajusta como solución viable.

Si bien la IA tradicional ha proporcionado enormes avances en automatización, detección y predicción y ha expandido su alcance a los datos no estructurados —las palabras, imágenes y vídeos que se deben de extraer y reclasificar—, esta IA de la eficiencia operacional no es la IA avanzada, autónoma y dinámica en su cognición con la que se nos hace imposible compararnos porque su aprendizaje y ejecución revelan que desarrolla un pensamiento multidimensional. Esta nueva IA avanzada no busca tan solo reducir costes o mejorar la eficiencia operacional, sino que persigue crear soluciones a retos que en el pasado reciente el sector se resignaba a aceptar como imposibilidades porque

⁹ *The Emergence of AI in the Energy Sector*, del The Energy Consortium.

los seres humanos y las tecnologías de entonces no abarcaban sus complejidades, como, por ejemplo, controlar el plasma en la fusión de los reactores nucleares para generar energía, el principal cuello de botella para el sector de la fusión nuclear durante más de setenta años¹⁰. Es una IA creativa, que busca autoaprender, autogestionarse y en la que el aporte humano es fundamental a la hora de aceptar sus resultados o rechazarlos. El dominio en donde los humanos aún pueden ejecutar el control de IA avanzada reside en la elección de datos por procesar, la formulación de hipótesis y estrategias sobre cómo se puede entrenar un modelo, así como la aseguración de que el modelo es seguro y de confianza. Por eso, en los cinco últimos años, se ha pasado a hablar de IA técnicamente sólida y escalable porque sus desarrollos se están orientando a enormes sectores industriales de naturaleza vital para la humanidad.

La IA en 2026 se asienta en dos objetivos que conseguir: crear un nuevo marco de valor en la innovación más allá de la computación de alto rendimiento y garantizar que no solo es segura desde el punto de vista de la ética y las garantías de gobernanza de datos, sino que es una IA de confianza, es decir, técnicamente apropiada para el uso al que se la destina y estandarizada y certificada para emplearla en sectores industriales y en la sociedad. Más allá de los requerimientos regulatorios, que obedecen políticas gubernamentales de controles de mercados y objetivos de bienestar en la sociedad, pero que se quedan cortos en exigir que la IA se pueda certificar tal como otros sistemas avanzados en otras industrias de alto riesgo como la aeroespacial, cabe señalar que la IA es un sistema en desarrollo continuo, versátil y en constante evolución y, por ello, ha sido muy complejo y desafiante en estos años del nacimiento de la IA avanzada crear tanto regula-

¹⁰ Desde los primeros intentos de construir máquinas de energía nuclear a fines de la década de 1940, los científicos han estado atrapados en un ciclo de creación de «energía estelar» en la Tierra a través de la fisión nuclear, solo para ver esta posibilidad desaparecer en milisegundos porque el plasma se volvió inestable. En los años cincuenta, los científicos descubrieron la inestabilidad de los primeros reactores en los que el plasma se retorció y enroscaba, tocando las paredes y enfriándose instantáneamente. Entre 1990 y 2010, máquinas como JET (Reino Unido) y TFTR (EE. UU.) lograron energía de fisión, pero solo pudieron mantenerla durante segundos. Los controles se basaban en cálculos matemáticos rígidos que no podían reaccionar con la suficiente rapidez ante la naturaleza caótica del plasma. En 2022, DeepMind y el Centro Suizo de Plasma demostraron que la IA podía «aprender» el comportamiento del plasma en simulación y luego pilotar los imanes reales para mantenerlo estable, algo revolucionario.

ción como estándares de certificación absolutos e inmutables. No obstante, es importante reflejar que, desde mediados de 2024, agencias como ISO e IEEE persiguen este objetivo y grandes avances se han conseguido en buscar una estandarización que se pueda ejecutar en los próximos dos años como vía aceptable que amague el rechazo de algunos países a la regulación como solución única en detrimento de la innovación.

1.3 Evolucionando desde la computación de alto rendimiento hacia la IA

La computación de alto rendimiento (HPC) tiene una larga trayectoria en la industria del petróleo y el gas, pero no es exclusiva de ella. La transición a una red eléctrica moderna y con uso intensivo de datos ha hecho que la HPC sea igualmente indispensable para las empresas de electricidad, los desarrolladores de energías renovables y los operadores de red a nivel mundial. La HPC es una tecnología crucial y en crecimiento en todo el sector energético y ha conseguido resolver enormes retos. No obstante, en la actualidad, la IA avanzada ha comenzado a desarrollarse en el sector como herramienta paralela de capacidades superiores y de mejor adaptación a contextos en los que la alta computación no rendía al 100 % como solución o forzaba a seguir usando paradigmas del pasado computacional.

HPC en la industria del petróleo y el gas (enfoque tradicional)

La industria del petróleo y el gas fue una de las primeras en adoptar comercialmente la alta computación (HPC) y ha impulsado los límites de la supercomputación durante décadas. Su uso se concentra principalmente en el segmento *upstream* (exploración y producción).

Aplicación	Objetivo
Procesamiento de datos sísmicos	La HPC procesa los enormes conjuntos de datos generados por los estudios sísmicos para crear imágenes del subsuelo en 3D y 4D de alta resolución. Esto ayuda a los geocientíficos a identificar con precisión la ubicación de los yacimientos de petróleo y gas y cómo evolucionan con el tiempo.
Simulación de yacimientos	Ejecuta modelos matemáticos complejos para simular el comportamiento de los fluidos (petróleo, gas, agua) dentro de un yacimiento. Esto es esencial para optimizar las ubicaciones de perforación, predecir las tasas de producción y maximizar la recuperación de hidrocarburos.

Aplicación	Objetivo
Dinámica de fluidos computacional (CFD)	Modelado del flujo de fluidos en tuberías, refinerías y equipos de perforación para garantizar la seguridad y mejorar la eficiencia.
Ciencias de los materiales	Acortar el diseño y las pruebas de nuevos materiales (por ejemplo, aleaciones, polímeros) necesarios para equipos que operan en entornos extremos de pozos o de aguas profundas.

HPC en el sector eléctrico (La frontera moderna)

En el sector eléctrico, la HPC es esencial para gestionar la complejidad de la red inteligente moderna e integrar fuentes de energía renovables variables.

Aplicación	Objetivo
Pronóstico de energía renovable	La computación de alto rendimiento (HPC) ejecuta modelos meteorológicos y atmosféricos avanzados (como la dinámica de fluidos computacional o CFD) para predecir la producción de fuentes intermitentes, como parques eólicos y solares. Esto es crucial para mantener la estabilidad de la red.
Análisis de la red y del flujo de energía	Realiza cálculos complejos y laboriosos, como el análisis del flujo de potencia óptimo (OPF) y el flujo de potencia (PF), casi en tiempo real. Esto ayuda a los operadores a garantizar la fiabilidad de la red, prevenir apagones y minimizar las pérdidas de energía, especialmente en redes extensas e interconectadas.
Modelado climático y resiliencia	Las simulaciones HPC modelan el impacto de eventos climáticos extremos (por ejemplo, huracanes, olas de calor) en la infraestructura física de la red, lo que ayuda a las empresas de servicios públicos a planificar la resiliencia y predecir las necesidades de mantenimiento.
Simulación de reactor nuclear	La HPC se utiliza para modelar el transporte de neutrones, la transferencia de calor y el comportamiento del combustible a largo plazo en reactores nucleares, tanto para el análisis de seguridad como para el diseño de reactores de próxima generación.
Descubrimiento de nuevos materiales	Acortar la investigación y el desarrollo de materiales nuevos y más eficientes para baterías, células solares y componentes de alta temperatura en la generación de energía.

La alta computación (HPC) se basa en la velocidad y el cálculo de fuerza bruta y se centra en resolver problemas computacionales grandes y complejos lo más rápido posible, por ejemplo, modelado meteorológico o simulaciones de dinámica de fluidos, mientras que la IA se centra en la simulación de inteligencia y patrones de aprendizaje permitiendo que las máquinas —simu-

lando la inteligencia humana— razonen, aprendan, perciban y tomen decisiones. Las diferencias entre una y otra se revelan en lo opuesto de sus metodologías: si bien en la alta computación se ejecuta un número masivo de algoritmos *deterministas predefinidos* mediante procesamiento paralelo —lo que implica ejecutar las instrucciones exactamente como se programaron—, con la IA se utilizan algoritmos *no deterministas* —por ejemplo, aprendizaje automático o aprendizaje profundo— para aprender de los datos y hacer predicciones o clasificaciones. Los resultados que se consiguen con ambas son inequívocamente singulares: mientras que con la alta computación se consigue un resultado numérico preciso o una simulación de alta resolución —por ejemplo, un pronóstico del tiempo o una estructura molecular—, con la IA, en cambio, se crea un modelo aprendido que puede predecir un resultado difícil de calcular a través de otras metodologías, por ejemplo, «el precio subirá» o «la máquina está a punto de fallar».

La alta computación no excluye a la IA y viceversa. La evolución en paralelo de ambas se viene produciendo desde los años sesenta y los noventa del siglo xx. La alta computación permitió que los datos sísmicos en 2D/3D y simulaciones numéricas estáticas de yacimientos se ejecutasen en ordenadores centralizados asignando a expertos humanos las decisiones de interpretación de datos limitados. Con la llegada de la IA avanzada a partir de 2018, estos cálculos han pasado a realizarse a través del aprendizaje profundo (*deep learning*) para poder conseguir una interpretación rápida y altamente precisa de vastos datos sísmicos y geológicos. Asimismo, a través de gemelos digitales, los datos de fondo de pozo se integran en tiempo real con modelos históricos, lo que proporciona pronósticos de producción dinámicos y adaptativos y optimiza la ubicación de los pozos con mucha mayor precisión. Si en el siglo xx el mantenimiento programado, las inspecciones manuales y los modelos simples de inventario/demanda se realizaban manualmente, a partir de 2010 el aprendizaje automático (*machine learning*) ha creado el mantenimiento predictivo, analizando datos de sensores de bombas, tuberías y turbinas con el fin de pronosticar fallos, minimizando así los costosos tiempos de inactividad no planificados. La eficiencia operativa basada en IA ha logrado optimizar la logística, gestionar el rendimiento de las refinerías y pronosticar la demanda con mayor precisión, mejorando la rentabilidad y reduciendo el desperdicio. Hoy en día, la visión artificial basada en IA monitoriza las instalaciones en tiempo real para detectar comportamientos inseguros o anomalías en los equipos. Los modelos de predicción de riesgos

analizan datos históricos, el clima y los registros operativos para pronosticar condiciones de alto riesgo facilitando la monitorización de emisiones y la optimización del consumo energético para alcanzar los objetivos de sostenibilidad.

En años recientes, se aprecia que la IA está comenzando a usarse de forma más extendida en el sector energético porque se adapta mejor a los desafíos actuales que la alta computación (HPC) tradicional porque el subsuelo terrestre es inherentemente incierto y no lineal y las simulaciones tradicionales requieren un alto coste computacional para su ejecución repetida para el análisis de la incertidumbre. Por ello la IA es la herramienta que ofrece la capacidad de aprender y adaptarse a partir de datos operativos complejos, confusos e incompletos, sin necesitar de una ecuación física explícita porque el entorno de aprendizaje y predicción de la IA se basa en esclarecer la incertidumbre. La IA, al adentrarse en industrias que recaban datos del mundo físico, está evolucionando a crear lo que se denomina un «modelo del mundo».

1.4 Evolucionando hacia una IA de modelos del mundo

Si bien los grandes modelos de lenguaje (LLM¹¹) actuales poseen grandes capacidades para predecir la siguiente palabra de una oración, en realidad no entienden por qué se rompe un vaso al caerse o cómo maniobra un coche en una intersección bajo la lluvia. La IA tradicional es reactiva: capta una entrada de datos (*input*) y produce un resultado (*output*). Un modelo del mundo, sin embargo, posee una representación interna de la realidad que le permite simular el futuro. Los fallos más frustrantes de la IA suelen deberse a la falta de física básica o intuición social. Desarrollar un modelo del mundo es la principal vía para dotar a la IA de sentido común y el sector energético se ha convertido en el mayor campo de pruebas de efecto trascendental que literalmente transformará de forma radical cómo evoluciona y responde a sus enormes retos.

En el sector energético, los «modelos mundiales» se están desarrollando como gemelos digitales de alta fidelidad de sistemas físicos, como el clima global, la red eléctrica o un reactor de fusión nuclear. Para 2026, los principales actores en este espacio se centrarán en la «IA de la física», donde las redes neuronales están limitadas por las leyes reales de la termodinámica

¹¹ *Large Language Models.*

y el electromagnetismo. El panorama competitivo en este tipo de desarrollos tiene a NVIDIA desarrollando el más avanzado «modelo mundial» literal para la energía y el clima. «Tierra-2» es su gemelo digital de todo el planeta, que utiliza IA generativa¹² para crear simulaciones meteorológicas y climáticas a escala kilométrica. Las empresas de servicios públicos utilizan Tierra-2 para predecir eventos climáticos extremos (como tormentas de viento u olas de calor) con semanas de anticipación para proteger la red eléctrica. Aliándose con Siemens, están construyendo modelos de «IA industrial» que simulan plantas de energía o fábricas enteras en un mundo virtual antes de colocar un solo ladrillo. Por su parte, DeepMind está aplicando los principios de los modelos de mundo para resolver los problemas físicos de control energético más complejos, como la simulación y control del plasma dentro de un reactor de fusión (Tokamak). Este modelo de mundo de un entorno similar al del Sol permite a la IA ensayar cómo mover imanes para mantener estable el plasma. Otro de sus desarrollos, WeatherNext 2, se basa en modelos de IA de predicción meteorológica que ya superan a las supercomputadoras tradicionales. En el marco de las energías renovables, esto es vital para predecir con exactitud la cantidad de energía solar y eólica disponible en un momento dado. En 2026 ha establecido una colaboración (misión Génesis) con el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE) para utilizar modelos de vanguardia (como Gemini) en la ciencia de los materiales, descubriendo nuevas composiciones químicas para baterías y materiales de captura de carbono.

En Europa, en cambio, el desarrollo de «modelos mundiales» de energía difiere del enfoque estadounidense. Mientras que el panorama estadounidense está fuertemente impulsado por gigantes tecnológicos privados, la estrategia europea es una combinación de iniciativas científicas con respaldo estatal e ingeniería industrial. En 2026, Europa buscará posicionarse como líder en «gemelos digitales», esencialmente modelos mundiales de alta fidelidad de la red física y del planeta mismo. Para 2026, se espera que la UE haya avanzado hacia un gemelo digital paneuropeo de la red eléctrica. Este proyecto integra los modelos de redes locales de veintisiete países en un único «modelo mundial» gigante del flujo energético del continente. Esto es crucial, ya que la seguridad energética de Europa depende ahora de compartir la energía eólica del norte y la energía solar del sur en tiempo real. El

¹² CorrDiff es el modelo de difusión correctiva creado por NVIDIA para actuar como una «lupa inteligente» sobre los modelos climáticos globales.

proyecto insignia europeo de «modelo mundial», Destino Tierra (DestinE), es una iniciativa de gran envergadura y plurianual de la Comisión Europea, la Agencia Espacial Europea (ESA) y el «Modelo físico del mercado energético europeo común» (CEPMPM)¹³ para crear una réplica digital de todo el sistema terrestre simulando la atmósfera, los océanos y la tierra con una resolución sin precedentes a escala de 1 km, permitiendo a los proveedores de energía europeos simular cómo un fenómeno meteorológico de una ocurrencia de 1 en 100 años afectaría a los parques eólicos marinos del mar del Norte o a la producción solar en España, proporcionando el mapa mental más preciso de la disponibilidad energética futura en el mundo.

1.5 Una IA del siglo XXI segura y de confianza

La versatilidad de la IA para resolver retos con creatividad y escalabilidad están sorprendiendo a reguladores y agencias de estándares industriales porque se desarrolla y despliega en contextos jamás antes concebidos y con una gran escalabilidad. Situaciones estancadas en el pasado, exentas de soluciones tangibles y abarcables, se han solucionado gracias a la enorme potencialidad de la IA.

1.5.1 *Desarrollando modelos de predicción con creatividad renovada*

Crear soluciones basadas en la IA es altamente creativo porque se exploran posibles soluciones a través de una tecnología altamente versátil. Uno de los mejores ejemplos de las altas capacidades creativas se centró en solventar el despliegue de conectividad en mercados emergentes como África subsahariana. Este es un reto enorme para los Gobiernos de países en desarrollo que, además, tienen que afrontar geografías de intensa complejidad. La IA en este contexto fue revolucionaria como solución para tener una visión clara de la ubicación de las líneas eléctricas existentes y facilitar la toma de mejores decisiones sobre dónde concentrar los esfuerzos, cómo diseñar la red y cómo obtener el equipo necesario. Hasta el momento, las agencias espaciales han provisionado de «ojos en el cielo» a los países en desarrollo, poniendo a su servicio los satélites geoestáticos y su habilidad para visualizar geografías con precisión de centímetros.

¹³ *Common European Power Market Physics Model.*

Pero la IA se está adentrando con gran poder en suplementar y optimizar allá donde no llegan los satélites y, para demostrar cómo la IA puede mapear con alta precisión la infraestructura de media tensión (MT) en los países africanos, la división de IA de la compañía americana Meta formó un consorcio de investigación con el programa de asistencia para la gestión del sector energético (ESMAP) del Banco Mundial; el Real Instituto de Tecnología de Suecia (KTH, por sus siglas en sueco); una de las universidades europeas líderes en ingeniería; el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés); un instituto de la Fundación McArthur en Washington D. C. que tiene como misión sin ánimo de lucro el mejorar la vida de las personas, proteger y restaurar la naturaleza y estabilizar el clima, y la Universidad de Massachusetts en Amherst. En conjunto, desarrollaron un nuevo modelo predictivo para mapear la infraestructura de media tensión (MT) utilizando datos públicos y datos asumidos. Para desarrollar el modelo, el primer paso fue localizar la electrificación a nivel de asentamiento detectando la radiancia nocturna a través del sensor de banda día-noche VIIRS en satélites de la NASA que proporcionaron imágenes de radiometría infrarrojas. El paso siguiente fue seguir la red eléctrica por las líneas eléctricas que la conectan. El algoritmo de estimación de la red buscó establecer conexiones de la manera más eficiente posible, utilizando redes eléctricas conocidas como plantillas, pero también basando sus recomendaciones y predicciones en elegir las rutas de la red que siguiesen carreteras, evitaran el agua y prefieran rutas más cortas. Este segundo conjunto de datos fue lo que favoreció que el modelo no solo consiguiera predecir correctamente el tendido eléctrico, sino que lo hiciera mejorando los resultados obtenidos solo con los datos del mundo real (RWD, por sus siglas en inglés), como los tendidos de luz que podían vislumbrarse en la noche sin necesidad de visión satelital. Este experimento piloto consiguió con éxito su propósito y se ha convertido en un modelo que puede permitir a los Gobiernos y ONG usarlo con certidumbre para comprender dónde la gente necesita electricidad o dónde ampliar la infraestructura de bombeo de agua para proporcionar servicios básicos. Los resultados de este modelo se pusieron a disposición del público a través del repositorio de datos energéticos abiertos del Banco Mundial, lo que garantizó que los datos pudieran ser utilizados por Gobiernos, organizaciones sin ánimo de lucro y otras organizaciones centradas en mejorar el acceso a la energía. El gran poder de la IA avanzada es su enorme escalabilidad a usarse en una gran variedad de escenarios resolviendo

diversos propósitos y necesidades con soltura y creatividad sin barreras.

1.5.2 Un nuevo concepto de infalibilidad en la predicción

La IA no necesita predecir con una infalibilidad del 100 % para ser de confianza. De hecho, cuando los modelos de IA en entrenamiento llegan a un supuesto 99 % de infalibilidad se sospecha que el aprendizaje se ha deteriorado, a menudo indicando «sobreajuste»; es decir, que el modelo ha memorizado los datos de entrenamiento históricos, pero tiene un rendimiento deficiente cuando se expone a datos nuevos del mundo real (la precisión de la prueba o el rendimiento fuera de la muestra). En el sector energético, los datos del mundo real juegan un papel importantísimo en la fiabilidad del modelo y, por ello, uno de los argumentos recientes para la fiabilidad de la IA avanzada en crear garantías de que el modelo se pueda certificar o estandarizar va a venir de la mano de las empresas del sector energético que comiencen a desarrollar estrategias de gobernanza de datos que incluyan cómo tratar los datos del mundo real (RWD).

1.5.3 La seguridad de los sistemas de IA en un mundo cada vez más expuesto a vulnerabilidades

Si bien las oportunidades son inmensas, también lo son los desafíos. La digitalización que posibilita la IA también genera nuevas vulnerabilidades, convirtiendo la ciberseguridad en una preocupación primordial. A medida que las empresas de servicios públicos integran la IA para gestionar redes inteligentes y reactores de fusión, abren simultáneamente una nueva frontera digital que los actores estatales y los ciberdelincuentes se apresuran a explotar. El sector energético ya no solo se defiende de los piratas informáticos humanos: también se defiende de la IA adversaria. En 2025, el tiempo promedio que tarda una brecha de seguridad asistida por IA en penetrar una red se redujo a solo 11 minutos (Devasia, 2025), en comparación con los días o semanas de los ataques tradicionales. La IA maliciosa puede mapear toda la topología de una red eléctrica en segundos, identificando sensores de «eslabón más débil» o *hardware* heredado que los analistas humanos podrían pasar por alto. Para contrarrestar esto, las empresas energéticas han implementado una estrategia denominada «Guardianes de IA», sistemas de seguridad autónomos que combaten en tiempo real con el código atacante y toman

decisiones tácticas de defensa a la velocidad de la máquina sin esperar la aprobación humana. A medida que se avanza hacia un futuro energético descentralizado (con millones de paneles solares, cargadores de vehículos eléctricos y baterías domésticas), la «superficie de ataque» ha crecido exponencialmente. Por ello, el sector energético está empezando a combinar la IA con el cifrado cuántico resistente. Dado que la IA puede decodificar los métodos de cifrado actuales con mucha mayor rapidez, el siguiente paso para proteger los reactores de fusión y fisión¹⁴ impulsados por IA es avanzar hacia una arquitectura de confianza cero, donde cada paquete de datos es verificado por una capa de seguridad de IA independiente antes de que pueda circular por la red.

Es absolutamente primordial que, en paralelo al desarrollo y despliegue de la IA en cualquier sector, se contruyan alrededor de ella sólidas barreras y estrategias de ciberseguridad que garanticen la protección de las infraestructuras y el sostenimiento de las operaciones.

1.6 Hacia una IA sostenible y de bajo consumo

El significativo consumo de energía y agua de los centros de datos de IA presenta una profunda paradoja: la misma tecnología diseñada para impulsar la eficiencia energética también impone una nueva y significativa presión sobre la red eléctrica. Además, abordar las consideraciones éticas, la privacidad de los datos y la brecha global de talento requiere un marco de gobernanza bien estructurado y bien definido. El imperativo estratégico para los líderes del sector energético es pasar de un enfoque fragmentado y basado en proyectos a una estrategia holística que considere la IA como una capacidad fundamental a largo plazo, integrando

¹⁴ Entender la diferencia entre fisión y fusión es clave para comprender el futuro de la energía. En términos simples, son procesos opuestos: uno rompe átomos y el otro los une. La primera es una fuente de energía constante, potente y no emite CO₂, pero produce residuos radiactivos que duran miles de años y existe el riesgo (aunque bajo) de un accidente si la reacción en cadena no se controla correctamente. La fusión nuclear, en cambio, libera mucha más energía que la fisión, unas cuatro veces más por kilo de un combustible (que es casi inagotable porque se saca del agua del mar), no produce residuos radiactivos de larga duración y es intrínsecamente segura (si algo falla, la reacción se detiene sola). Su reto reside en que es extremadamente difícil de lograr en la Tierra. Proyectos como ITER, que recrean las condiciones del centro del Sol a través de imanes gigantes y láseres ultrapotentes, están abriendo brecha en fusión nuclear donde la IA es su motor y centro de gravedad.

tecnología, talento y una gobernanza sólida para aprovechar al máximo su potencial de forma responsable.

A pesar de los retos, es innegable que la IA va a convertir el sector energético en una de las industrias más proactivas en trazar el nuevo bienestar de la humanidad, su prosperidad energética, y labrar un futuro que al mismo tiempo demuestra que los recursos energéticos se administran con sostenibilidad y que la civilización digital que Gobiernos y sector público construyen estará respaldada por un sector estratégico, valioso y responsable para crear el progreso económico y social del siglo XXI.

2 El contexto estratégico: impulsores y maduración del mercado

La adopción de la IA en el sector energético no es una tendencia incipiente, sino una maduración fundamental del mercado, impulsada por la convergencia de potentes fuerzas a nivel macro que se refuerzan. La industria está superando una fase de «piloto o planificación» que se ha orientado hacia la implementación de soluciones prácticas y escalables y el desarrollo de capacidades internas. Esta transición es una respuesta directa a la creciente complejidad e interconexión del panorama energético moderno.

El uso de la inteligencia artificial (IA) en el sector energético ha evolucionado significativamente desde los primeros sistemas basados en reglas hasta los complejos modelos de aprendizaje automático actuales. La irrupción de la IA en el sector energético supone una evolución transformadora. Inicialmente, la industria dependía de procesos estáticos, manuales y, a menudo, reactivos, donde los datos se almacenaban en silos y las decisiones se basaban en normas históricas y plazos rígidos. La llegada de la IA introdujo un nuevo paradigma centrado en el análisis de datos en tiempo real, las capacidades predictivas y la automatización inteligente como respuesta a la creciente complejidad de la red eléctrica, la necesidad de integrar fuentes de energía renovables variables y la búsqueda de una mayor eficiencia y seguridad operativas. En el sector del petróleo y el gas, la necesidad de identificar con mayor precisión las reservas potenciales y optimizar las rutas de perforación, reduciendo así los costes y el riesgo («pozos secos») ha permitido que la IA y sus grandes capacidades para analizar grandes cantidades de datos sísmicos y geológicos resuelva este reto. Igualmente y, quizá, lo más relevante sea la utilización de gemelos digitales impulsados por IA (réplicas

virtuales de activos como redes eléctricas, oleoductos, plataformas o refinerías) que se utilizan para la monitorización, simulación y optimización operativa en tiempo real. Estos avances en eficiencia energética han avanzado igualmente hacia la ciencia de materiales, ya que la IA está acelerando el descubrimiento y el codiseño de nuevos materiales para baterías y tecnologías solares que pivotan de paradigmas tradicionales del siglo xx.

La hoja de ruta de la innovación hacia una IA que responde a los desafíos se ha trazado a lo largo de décadas.

2.1 Los primeros años (décadas de 1970 a 1990): sistemas expertos

En la fase inicial, las aplicaciones de IA se basaban principalmente en sistemas basados en reglas o sistemas expertos. Estos sistemas buscaban codificar el conocimiento y los procesos de toma de decisiones de los operadores humanos en programas informáticos. Las aplicaciones principales se centraban en detectar y diagnosticar fallos en los sistemas de energía eléctrica, identificando anomalías y diagnosticando fallos en los equipos basándose en un conjunto predefinido de reglas. En el sector del petróleo y gas, los primeros modelos se utilizaban para simplificar la toma de decisiones en la exploración y la gestión de yacimientos.

2.2 El auge del aprendizaje automático (década de 1990 – principios de la década de 2010): redes neuronales y pronóstico

A mediados de la década de 1990, se observó un uso creciente de técnicas fundamentales de aprendizaje automático, como las redes neuronales artificiales y las máquinas de vectores de soporte, gracias a la creciente capacidad computacional. La utilización de datos históricos para una predicción más precisa y basada en redes neuronales para pronosticar la carga y el precio de maneras más precisas, basándose en datos de demanda, oferta y precio de la electricidad, lo cual es crucial para las operaciones del mercado y la programación de la red. En el sector del petróleo y el gas, los modelos de aprendizaje automático comenzaron a analizar los datos de los sensores de los equipos para predecir fallos antes de que ocurrieran, pasando del mantenimiento basado en el tiempo a una estrategia proactiva de mantenimiento predictivo impulsado por la IA, que, en lugar de

adherirse a programaciones estáticas basadas en calendarios o esperar a que el equipo falle, utiliza el aprendizaje automático para analizar datos de sensores y métricas históricas de rendimiento y predecir cuándo es probable que falle el equipo. Los beneficios son sustanciales, incluyendo la reducción del tiempo de inactividad no planificado, una mayor vida útil del equipo y menores costes de mantenimiento.

El aprendizaje automático también ha permitido realizar el pronóstico de energía renovable. La naturaleza intermitente de la energía solar y eólica presenta un desafío significativo para la estabilidad de la red. La IA proporciona una solución al procesar grandes cantidades de datos en tiempo real de estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y métricas de rendimiento históricas para producir predicciones altamente precisas de la generación de energía. Esta precisión mejorada permite a los operadores de la red optimizar la distribución y el almacenamiento de energía, lo que hace que la energía renovable sea más confiable y acelera su integración en la red.

2.3 La era de las redes inteligentes y el *big data* (década de 2010 - actualidad): aprendizaje profundo y optimización

La confluencia del concepto de redes inteligentes, la proliferación de sensores (IoT) y el aumento masivo de datos provenientes de medidores inteligentes y fuentes renovables condujeron a la adopción generalizada de IA avanzada. Esto permitió solventar la gestión del flujo de energía bidireccional y la variabilidad de que fuentes como la eólica y la solar impulsaran una importante innovación en IA hacia la gestión de redes inteligentes. Asimismo, los modelos de aprendizaje profundo (un subcampo del aprendizaje automático) mejoraron significativamente la precisión de las previsiones de producción eólica y solar con hasta 36 horas de antelación, lo que permitió una mayor estabilidad de la red y una mayor penetración de las renovables gracias a su óptima integración en la red. Los algoritmos de IA, al gestionar operaciones complejas de la red en tiempo real, incluyendo el equilibrio entre la oferta y la demanda, y la optimización del voltaje y el flujo de energía para reducir las pérdidas de energía han permitido un incremento de eficiencia operacional exponencial en las redes eléctricas inteligentes, un punto de no retorno que obliga al sector a continuar el trazado de esta hoja de ruta hacia una operabilidad automatizada.

2.4 Tendencias actuales (enfoque en IA generativa y resiliencia)

Explorando la IA avanzada, en concreto los grandes modelos de lenguaje (LLMs), el sector energético empieza a procesar, resumir y garantizar el cumplimiento normativo en documentos técnicos y regulatorios complejos automáticamente. Pero de más relevancia es el trabajo que se está realizando en áreas de ciberseguridad y resiliencia en donde las herramientas basadas en IA son esenciales para monitorear infraestructuras críticas, predecir y mitigar interrupciones de la red causadas por ciberataques o fenómenos meteorológicos extremos.

Este cambio tecnológico es un imperativo estratégico para abordar algunos de los desafíos globales más apremiantes, como el cambio climático, la seguridad energética y la creciente demanda de energía limpia y fiable, lo que marca un paso significativo hacia un futuro energético más innovador y sostenible.

3 El kit de herramientas de IA

La aplicación de la IA en el sector energético se sustenta en un conjunto diverso y cada vez más sofisticado de tecnologías y metodologías. El campo está evolucionando más allá de los algoritmos genéricos hacia sistemas especializados e integrados que aprovechan el conocimiento específico del dominio para resolver problemas cruciales.

3.1 Metodologías fundamentales de IA

3.1.1 Aprendizaje automático (ML)

El ML es la tecnología fundamental que utiliza algoritmos que aprenden de los datos para realizar predicciones o tomar decisiones. Esto incluye el aprendizaje supervisado para tareas como la previsión del consumo energético basada en datos históricos y el aprendizaje no supervisado para identificar patrones en datos no etiquetados, como el comportamiento del mercado o la segmentación de consumidores.

3.1.2 Aprendizaje profundo (DL)

Un subconjunto del ML, los modelos de aprendizaje profundo, se utiliza para tareas más complejas que requieren el procesa-

miento de grandes conjuntos de datos. Algunos ejemplos incluyen el reconocimiento de imágenes para analizar imágenes de drones de líneas eléctricas con el fin de detectar defectos y el monitoreo de carga no intrusivo (NILM)¹⁵ para desagregar el consumo de energía a nivel de dispositivo únicamente a partir de los datos de los medidores inteligentes¹⁶.

3.1.3 IA generativa (GenAI)

GenAI es una potente clase de modelos capaces de crear contenido nuevo y original. En el sector energético, sus aplicaciones se extienden más allá de la simple generación de texto para incluir el resumen de informes técnicos extensos, lo que permite una rápida transferencia de conocimientos para nuevos ingenieros, la generación de código a partir de instrucciones en lenguaje natural y la creación de imágenes sintéticas para simular nuevas rutas de líneas de transmisión o entrenar modelos de detección de defectos¹⁷.

3.2 Tecnologías que facilitan y amplifican el despliegue y uso de la IA

La eficacia de la IA se ve ampliada por su integración con otras tecnologías avanzadas paralelas.

3.2.1 Gemelos digitales

Un gemelo digital es una representación virtual de un activo, sistema o proceso físico que se actualiza continuamente con datos de sensores en tiempo real. Estos modelos dinámicos permiten la simulación de escenarios, el análisis predictivo y la prueba de cambios operativos sin afectar el sistema físico. Por ejemplo, se utilizan gemelos digitales para predecir la corrosión en generadores de vapor, lo que ahorra a las empresas de servicios públicos miles de millones en costes al año. A pesar de que los gemelos digita-

¹⁵ La monitorización de carga no intrusiva (NILM, *Non Intrusive Load Monitoring*), también conocida como desagregación de energía, es una técnica avanzada de procesamiento de señales y aprendizaje automático que identifica electrodomésticos individuales y su consumo energético simplemente monitorizando el consumo total de electricidad en un único punto, generalmente el contador eléctrico principal. En esencia, la NILM resuelve un problema inverso complejo: toma la señal de potencia total y la descompone en sus componentes sin necesidad de sensores independientes en cada electrodoméstico.

¹⁶ *AI-Powered Demand Side Management: Reshaping when and how we use electricity*, 2005.

¹⁷ *Generative AI in Transmission and Substations* - EPRI, AI White Paper 2025.

les crean representaciones digitales del mundo real, una tendencia poderosa es el desarrollo de redes neuronales basadas en la física¹⁸, que integran leyes y ecuaciones físicas en el proceso de aprendizaje de la IA, lo que garantiza que los modelos predictivos no solo sean precisos, sino también físicamente plausibles, un requisito fundamental para infraestructuras energéticas complejas.

3.2.2 IoT y redes de sensores

La proliferación de dispositivos del Internet de las cosas y redes de sensores es la capa fundamental para las aplicaciones de IA. Estos sensores recopilan continuamente datos en tiempo real sobre todo, desde vibración y temperatura hasta corriente eléctrica y voltaje. Estos datos proporcionan el combustible necesario para los algoritmos de IA, lo que permite el monitoreo del estado de los activos en tiempo real, la detección de anomalías y la programación de mantenimiento basada en datos.

3.2.3 Computación al borde

Mientras que el IoT recopila datos, la computación al borde los procesa en origen (por ejemplo, en una turbina eólica o una subestación local) en lugar de enviarlos a una nube central. Con esto se consigue la reducción de la latencia que es esencial para redes con capacidad de autorreparación que deben responder a un fallo en milisegundos. Asimismo, se alcanza una mayor eficiencia del ancho de banda, ya que los modelos de IA pueden filtrar el ruido¹⁹ localmente, enviando solo las anomalías significativas al sistema central. La privacidad y la seguridad quedan garantizadas, ya que los datos sensibles sobre el consumo de energía se pueden procesar *in situ*, lo que reduce el riesgo de interceptación de datos durante su tránsito.

¹⁸ La red neuronal se ve obligada a aprender una función que no solo se ajuste a los datos, sino que también satisfaga la ley física fundamental en todos los puntos probados dentro del dominio computacional; es decir, que no puede «inventar» o «asumir» la realidad, sino que la tiene que aceptar tal y como los datos físicos del mundo real le dicen que es, un cambio radical en el entrenamiento de estas redes, que aprenden por sí mismas. El impacto que los datos del mundo real (RWD, por sus siglas en inglés) van a imponer en la IA va a acelerar el desarrollo de la AGI, la IA de inteligencia general, la super IA pensante y percatada de lo que realmente es la vida y sus realidades analógicas.

¹⁹ El proceso de eliminar información irrelevante de un conjunto de datos para que pueda ver la «historia» que los datos realmente intentan contar. En el análisis de datos, el ruido no es sonido; es cualquier variación aleatoria que no representa la tendencia real.

3.2.4 Conectividad 5G y 6G

La transición al 5G (y al próximo 6G) proporciona la infraestructura de comunicación de alta velocidad y alta densidad necesaria para el «IoT masivo». Al segmentar la red se permite a las empresas de servicios públicos reservar una red exclusiva para señales críticas de control de IA, garantizando así que no se ralenticen por el tráfico de internet público. En este sentido, la comunicación ultrafiable de baja latencia (URLLC, por sus siglas en inglés) se beneficia de la IA para la sincronización de recursos energéticos distribuidos (como miles de baterías domésticas) y así equilibrar la red en tiempo real.

3.2.5 La cadena de bloques

El *blockchain* actúa como la «capa de confianza» para la IA, especialmente en los mercados energéticos descentralizados. En los ámbitos de comercio entre pares (P2P, por sus siglas en inglés), la IA puede gestionar la compraventa de excedentes de energía solar entre vecinos, mientras que el *blockchain* proporciona un registro seguro e inmutable para dichas transacciones, garantizando que los datos utilizados para entrenar modelos no hayan sido manipulados por actores maliciosos ni ciberataques.

4 Aplicaciones transformadoras en toda la cadena de valor energética

El impacto de la IA no se limita a mejoras aisladas; está creando un ecosistema integral de soluciones que redefine los procesos de negocio clave. Al pasar de lo reactivo a lo proactivo y de lo manual a lo automatizado, la cadena de valor energética se está convirtiendo en un ciclo continuo optimizado por la IA que ofrece soluciones tangibles en varios frentes.

4.1 Transmisión, distribución y gestión de la red

4.1.1 Redes inteligentes

La IA es fundamental para el desarrollo de redes inteligentes que utilizan tecnología de comunicaciones digitales para detectar y reaccionar ante cambios locales en el uso. Los algoritmos de IA

analizan datos en tiempo real de medidores inteligentes y dispositivos IoT para predecir patrones de consumo, equilibrando dinámicamente la oferta y la demanda para minimizar el desperdicio de energía y garantizar una prestación de servicios constante. Este equilibrio dinámico es esencial para mantener la estabilidad de la red y prevenir apagones.

Medir el porcentaje exacto de «redes inteligentes» en el mundo es complejo, ya que no existe una definición global única de qué hace que una red sea «inteligente». Sin embargo, los expertos en energía suelen medir el progreso mediante tres indicadores principales: finalización de la red inteligente, penetración de medidores inteligentes y puntuaciones de madurez digital. A partir de 2026, el panorama global se desglosa de la siguiente manera:

- a) Cobertura y finalización global: según estudios recientes del sector (p. ej., Juniper Research, 2025/2026), el mundo aún se encuentra en las etapas iniciales e intermedias de la transición. Se calcula que la red inteligente global sería aproximadamente el 24,2 % a partir de 2025, proyectando para 2030 un alcance del 42,7 % a medida que la infraestructura más antigua llegue al final de su vida útil y se reemplace por sistemas digitales. Existe, sin embargo, el problema del «40/40»: en regiones como Europa, aproximadamente el 40 % de la red eléctrica tiene más de 40 años, lo que significa que una parte significativa de la red global aún funciona con tecnología analógica diseñada para un flujo de energía unidireccional.
- b) Penetración de los contadores inteligentes (los «ojos» de la red): los contadores inteligentes son el componente más visible de una red inteligente. Proporcionan la comunicación bidireccional necesaria para el funcionamiento de la IA. Las unidades totales en instalaciones globales superaron los 1800 millones de unidades a finales de 2024 y se prevé que superen los 3000 millones para 2030 (Counterpoint, 2025). Líderes mundiales se encuentran principalmente en Norteamérica, con una penetración aproximada del 81 %, aunque China ha alcanzado una penetración cercana al 100 % en zonas urbanas, actuando como un motor de datos masivo para la gestión de la red impulsada por IA. Europa, entretanto, se está recuperando rápidamente (con un promedio aproximado del 72 %), impulsada por los mandatos de la UE para la descarbonización.

4.1.2 Detección de fallos y redes autorreparadoras

Los métodos tradicionales de detección de fallos suelen ser lentos, en su mayoría analógicos²⁰, y carecen de capacidades predictivas. Los sistemas impulsados por IA están revolucionando esto al procesar datos en tiempo real de los sensores para detectar anomalías y anticipar fallos antes de que provoquen averías graves. Esto está permitiendo el desarrollo de redes «autorreparadoras», que utilizan detección impulsada por IA y sistemas de control inteligente para detectar, analizar y responder de forma autónoma a los fallos. Estos sistemas pueden aislar automáticamente los fallos y reconfigurar la distribución de energía, lo que previene casi el 45 % de las posibles interrupciones del servicio y minimiza los tiempos de restauración de la energía hasta en un 60 %. Esto mejora significativamente la resiliencia y la confiabilidad de la red.

4.1.3 Gestión de cortes

La IA mejora la gestión de cortes al usar datos de medidores inteligentes y sensores para determinar la ubicación exacta de un fallo. También pueden predecir los tiempos de restauración según el tipo de corte, la ubicación, las condiciones climáticas y los recursos disponibles, lo que permite a las empresas de servicios públicos brindar información más precisa y oportuna a los clientes.

4.2 Mercados y comercio de energía

Un pronóstico preciso es crucial para garantizar la estabilidad de la red y la seguridad del suministro. Los modelos de IA pueden entrenarse con datos históricos e incorporar una serie de fuentes de datos adicionales, como informes meteorológicos en tiempo real e indicadores económicos, para predecir patrones de con-

²⁰ Históricamente, las inspecciones de redes de alta tensión se han venido realizando casi en su totalidad por humanos y helicópteros. Recientemente, los drones provistos de visión termal se están convirtiendo con rapidez en la herramienta principal para este trabajo, pero la IA es la herramienta de tercera generación que está propulsando las inspecciones autónomas gracias a drones autónomos que se instalan en las subestaciones. Despegan automáticamente, vuelan un circuito programado de kilómetros y regresan a su base para recargarse sin que ningún humano toque un controlador. En lugar de que una persona mire diez mil fotografías de postes de electricidad, un *software* de inteligencia artificial «filtra» los datos y marca automáticamente solo las imágenes que muestran óxido o daños.

sumo futuros con mayor precisión. Esta capacidad es especialmente importante para gestionar la variabilidad introducida por las fuentes de energía renovables.

Asimismo, la volatilidad de los mercados energéticos modernos, impulsada por la creciente proporción de energías renovables, es un motivador clave para la adopción del comercio algorítmico. Las plataformas impulsadas por IA analizan grandes conjuntos de datos en tiempo real, lo que proporciona información predictiva y evaluaciones de riesgos que permiten tomar decisiones comerciales más informadas y rentables. Estos algoritmos pueden ejecutar operaciones de forma autónoma con una intervención humana limitada, lo que permite una mayor flexibilidad y reacciones más rápidas en mercados dinámicos. Sin embargo, esto no es un reemplazo completo de los comerciantes humanos; muchas empresas encuentran que el enfoque más valioso es una relación simbiótica donde los algoritmos manejan cálculos complejos y procesamiento de datos y los expertos humanos toman las decisiones estratégicas finales basadas en los resultados.

4.3 Gestión de la demanda y compromiso del cliente

El sector energético, cuando sirve al consumidor, está realizando grandes cambios en cuanto a los servicios prestados, su innovación y la aproximación a crear experiencias individualizadas.

- a) *Cambio automatizado de carga y control de electrodomésticos inteligentes*: la IA es un facilitador clave para la gestión de la demanda, que tiene como objetivo redefinir cuándo y cómo se utiliza la electricidad. La IA ajusta de forma autónoma los dispositivos inteligentes, como termostatos, sistemas de calor, ventilación y aire acondicionado, así como de cargadores de vehículos eléctricos, para cambiar el uso de energía a horas de menor demanda. Esto es posible gracias al aprendizaje de refuerzo, que permite a la IA conocer las preferencias del usuario y equilibrar el ahorro en los costes de energía con la comodidad. Esta capacidad convierte a los consumidores pasivos en participantes activos en la estabilidad de la red.
- b) *Información y participación personalizadas*: la IA proporciona un avance significativo en la participación del cliente al ofrecer información personalizada sobre la energía. A través de tecnologías como el monitoreo de carga no intrusivo, que desagrega el uso de energía de los datos de los medidores inteligentes, la IA puede proporcionar a los clientes patrones

de consumo detallados y específicos de cada dispositivo y recomendaciones de eficiencia. Este enfoque hiperpersonalizado no solo promueve la eficiencia energética, sino que también genera confianza y alienta a los clientes a convertirse en socios en la estabilidad de la red.

- c) *Servicio de atención al cliente y soporte del centro de llamadas*: la IA generativa está revolucionando la atención al cliente al impulsar herramientas de autoservicio inteligentes y agentes asistidos por IA. Al automatizar las consultas de rutina y proporcionar a los representantes del centro de llamadas datos matizados en tiempo real, se ha demostrado que la IA reduce las llamadas de alta facturación y aumenta los índices de satisfacción del cliente.

5 Navegando la paradoja energética de la IA: desafíos, riesgos y gobernanza crítica

El potencial transformador de la IA es un arma de doble filo. Si bien permite una eficiencia sin precedentes, también introduce riesgos nuevos y complejos y tiene un impacto ambiental significativo. La «paradoja energética de la IA» es un desafío central que requiere una gestión deliberada y estratégica.

5.1 El panorama operativo y técnico

La implementación de la IA en el sector energético no está exenta de obstáculos. Uno de los principales desafíos es la integración de la IA avanzada con una infraestructura heredada que no fue diseñada para la digitalización y los flujos de datos en tiempo real. Esto se ve agravado por la necesidad de datos estandarizados de alta calidad, ya que los datos brutos de las redes inteligentes suelen ser incoherentes, incompletos e inconsistentes. Además, existe una reconocida brecha de talento en la industria, con una escasez significativa de profesionales con experiencia técnica especializada tanto en IA como en tecnología operativa específica para la energía. Esta falta de experiencia en ambos dominios es un obstáculo crítico para la adopción escalable de la IA.

5.2 Ciberseguridad y resiliencia del sistema

La mayor digitalización y conectividad requeridas para las redes eléctricas basadas en IA crean un panorama de amenazas en

rápida expansión. Las herramientas basadas en IA actúan como un «multiplicador de fuerza» en ambas direcciones, mejorando la detección de amenazas y permitiendo una protección más receptiva, al tiempo que empoderan a los adversarios con nuevos y sofisticados vectores de ataque. Las amenazas específicas incluyen la inyección de datos falsos y los ataques con retardo de tiempo, donde los datos manipulados de los sensores pueden engañar a las acciones de control y potencialmente causar inestabilidad en la red. El auge del aprendizaje automático adversario también permite a los actores maliciosos evadir la detección. La defensa contra estas amenazas requiere una defensa proactiva y en capas y un nuevo tipo de fuerza laboral que comprenda tanto la IA/TI como la TO específica para la energía.

En 2025, la ciberseguridad ha alcanzado un nuevo hito en innovación con la arquitectura de confianza cero, que ha pasado de ser un concepto teórico a un requisito regulatorio para infraestructuras críticas, en particular en el sector energético. A diferencia de la seguridad perimetral tradicional, que actúa como una muralla alrededor de un castillo, la confianza cero trata a cada usuario, dispositivo y componente de *software* como una amenaza potencial, incluso a aquellos que ya están dentro del sistema, y actúa como defensa especializada contra estas amenazas de «próxima generación»:

a) Contrarrestando la ingeniería social impulsada por IA

Los atacantes ahora utilizan IA generativa para crear *deepfakes* hiperrealistas de ejecutivos del sector energético o correos electrónicos de *phishing* «perfectos». Ante esto, la defensa de confianza cero ignora el factor humano. Incluso si un empleado es engañado para que revele su contraseña, el sistema requiere autenticación multifactor y verificación contextual para cada acción. Además, se realiza la comprobación del estado del dispositivo. Si el inicio de sesión proviene de un dispositivo que no ha sido analizado en busca de *malware* en la última hora, el acceso se deniega al instante, deteniendo la brecha impulsada por IA desde el primer momento.

b) Prevención del «movimiento lateral» con microsegmentación

El *malware* impulsado por IA está diseñado para propagarse como un virus por la red hasta encontrar el «cerebro» (el centro de control). La defensa de confianza cero divide la red en miles de «microsegmentos» aislados, produciendo el efecto mampara: si un *hacker* infecta un contador inteligente en un barrio residencial de ciudad,

queda atrapado en ese diminuto segmento. No puede acceder a las líneas de transmisión de alta tensión ni a los sistemas de refrigeración nuclear porque no hay una ruta sin una nueva verificación explícita.

c) Defensa contra el «envenenamiento de datos»

La IA maliciosa puede intentar «envenenar» los datos que se envían a la IA de una red eléctrica; por ejemplo, simulando un aumento masivo de la demanda de energía para provocar que el sistema se apague. Con la defensa de confianza cero, a cada sensor y «agente» de IA se le asigna una identidad digital única. Analizando el comportamiento continuo de cada sensor, si un sensor comienza a enviar datos que parecen «sintéticos» o fuera de lo común, el motor de políticas de confianza cero lo marca como «no confiable». El sistema cambia entonces a una fuente de datos de respaldo o a modo seguro hasta que una persona pueda verificar la integridad de los datos.

Característica	Impacto en la seguridad	Estado de la industria en 2025
Centrado en la identidad	Evita que las contraseñas robadas provoquen apagones	Estándar para todos los nuevos proyectos de red de la UE y EE. UU.
Monitoreo continuo	Detecta «amenazas internas» o IA comprometida en tiempo real	Integrado con monitores de inteligencia artificial estilo DeepMind
Suponer una brecha en la ciberseguridad	El sistema permanece funcional incluso durante un ataque activo	Requerido por las regulaciones NERC CIP y NIS2
Mínimo privilegio	Los empleados solo ven lo que necesitan para hacer su trabajo	Reduce las interrupciones relacionadas con errores humanos en aproximadamente un 40 %

Resumen de beneficios para las plantas de energía (datos de 2025)

En el ámbito de la fisión nuclear, la confianza cero está ya integrada en el diseño de los pequeños reactores modulares que se desarrollan actualmente. Aunque funcionan con energía nuclear, su gran valor está en cómo ayudan a la red eléctrica en la descarbonización industrial, ya que, a diferencia de las grandes centrales que son difíciles de «apagar y encender», los reactores modulares pueden ajustar su potencia rápidamente para cubrir los huecos cuando no hay sol o viento. Dado que estos reactores suelen estar diseñados para operación remota o autónoma, utilizan la confianza cero para garantizar que las señales remotas estén cifradas, verificadas y restringidas a diodos de datos unidireccionales específicos, lo que imposibilita físicamente que un *hacker* envíe una orden de apagado desde fuera de la sala de control autorizada.

5.3 La huella ambiental de la IA

La «paradoja energética de la IA» es un desafío clave de nuestro tiempo. Si bien la IA ayuda a las empresas a reducir el consumo energético hasta en un 60 % en algunos casos mediante la optimización de la gestión de edificios y las redes inteligentes, la tecnología en sí misma consume enormes cantidades de energía cuando se trata de entrenar modelos de IA de billones de parámetros, como es el caso de los centros de alta computación o los centros de datos de compañías dedicadas al entrenamiento de grandes modelos de lenguaje (LLM, por sus siglas en inglés). Hasta 2022, los centros de datos representaron alrededor del 2 % de las emisiones de carbono relacionadas con la energía y esto incluía centros de datos en donde no se entrenaba IA (AIE, 2024).

Pero desde 2025 el panorama ha cambiado radicalmente para aquellas compañías de IA que han irrumpido en el mercado hasta entonces dominado por los modelos fundacionales de gran tamaño, principalmente desarrollados por compañías estadounidenses. A fines de 2025 se comienza a comentar que este es el año en que la «IA verde» ha pasado de ser un interés académico nicho a un requisito empresarial crucial y, por tanto, imposible de continuar con el gasto computacional de años anteriores, que pronosticaban escenarios imposibles de asumir energéticamente en la mayoría de los países.

Actualmente, la industria se está alejando de la filosofía de «cuanto más grande, mejor» y se está orientando hacia un diseño que prioriza la eficiencia. Los últimos avances y tendencias en la reducción de la huella computacional y ambiental de la IA a finales de 2025 han reconfigurado los pronósticos de muchas agencias y, sobretodo, han cambiado el paradigma del desarrollo de modelos fundacionales en los que se basa la IA avanzada.

5.3.1 Técnicas de «adelgazamiento» algorítmico

Los investigadores han descubierto que gran parte de la energía utilizada por los grandes modelos de lenguaje es computación desperdiciada. Nuevas técnicas están eliminando este desperdicio gracias a la aparición en el mercado de los modelos Chinos y sus nuevas propuestas sobre la arquitectura y el aprendizaje de los modelos. Las técnicas más revolucionarias en 2025 han sido:

DeepSeek y MoE (mezcla de expertos)

El modelo de lenguaje Chino DeepSeek lanzado a mediados de enero de 2025 presentó una arquitectura singular que le permitió reducir sus necesidades de alta computación, fruto del embargo sobre chips de última generación y de herramientas de diseño litográfico que EE. UU. y Europa impusieron a China desde 2019. En lugar de utilizar todos los parámetros para cada cálculo, el modelo selecciona dinámicamente algunas subredes «expertas» para procesar la entrada de datos. Esto hace que el modelo sea más rápido y económico de ejecutar, ya que evita el consumo masivo de memoria y energía de un modelo completamente denso. Esta nueva arquitectura inspirada en principios de inferencia en aprendizaje automático ha permitido que los modelos mantengan un rendimiento excepcional consumiendo hasta un 90 % menos de energía por consulta.

Cuantización extrema (1 bit y 2 bits)

Tradicionalmente, la IA utiliza números de 16 o 32 bits. En 2025, los avances en arquitecturas de «1 bit» permiten que los modelos se ejecuten con una precisión mucho menor. Esto reduce el uso de memoria y el consumo de energía entre cuatro y ocho veces, con una pérdida de precisión insignificante.

Destilación de conocimiento

Se utilizan modelos «profesor» de gran tamaño para entrenar modelos «estudiante», que son diez veces más pequeños, pero conservan más del 90 % de su capacidad. Esto los hace lo suficientemente eficientes como para ejecutarse en dispositivos locales en lugar de en centros de datos masivos.

5.3.2 Hardware: la transición al «borde» (edge computing)

La sostenibilidad está impulsando una transición masiva hacia la IA en el dispositivo, que evita la transferencia de datos a la nube, que consume mucha energía. Los portátiles y teléfonos de 2025 ahora cuentan con chips de IA dedicados, *NPU (unidades de procesamiento neuronal)*, optimizados para la «inferencia» (ejecutar la IA) en lugar del «entrenamiento». Estos chips son de cien a mil veces más eficientes energéticamente que las GPU de propósito general. Los nuevos chips inspirados en el cerebro humano (*com-*

putación neuromórfica) solo consumen energía cuando reciben un pico de datos. Este procesamiento «basado en eventos» utiliza una fracción de la electricidad de los chips tradicionales que funcionan con un reloj continuo.

5.3.3 Programación consciente de la huella de carbono

Google y otros proveedores de nube han implementado plataformas «inteligentes en carbono» a través de técnicas como el *desplazamiento temporal* —las tareas de entrenamiento de IA que no son sensibles al tiempo se programan automáticamente para cuando la red eléctrica local tiene un excedente de energía eólica o solar—, y *de ubicación* —las cargas de trabajo se «teletransportan» digitalmente a centros de datos en regiones con sol o viento, maximizando el uso de energía libre de carbono en tiempo real—.

5.3.4 El impuesto energético del «razonamiento»

Un descubrimiento crucial para 2025 es la «brecha del razonamiento». Los datos más recientes, a diciembre de 2025, confirman que los nuevos modelos de «razonamiento» (que piensan paso a paso) pueden consumir entre treinta y setecientas veces más energía que los modelos estándar, ya que generan miles de «pensamientos» internos antes de dar una respuesta. Para solucionar esto, los sistemas de 2025 utilizan «IA de enrutador», una IA diminuta y de bajo consumo que decide si la pregunta del usuario es simple (p. ej., «¿Qué tiempo hace?») o compleja. Las preguntas sencillas se envían a modelos diminutos, ahorrando así la alta potencia para problemas realmente complejos.

Técnica	Potencial ahorro energético	Estado (finales de 2025)
Mezcla de expertos (MoE)	~90 % reducción	Estándar en los nuevos modelos fronterizos
Cuantización (1 bit/2 bits)	4x - 8x reducción	Se está adoptando rápidamente para la IA móvil
IA en el dispositivo (de borde)	100x - 1000x	Integrado en la mayoría de los nuevos productos electrónicos de consumo
Programación consciente del carbono	~30 % carbón reducción	Obligatorio según muchas políticas ESG corporativas

Tabla de Resumen

5.3.5 Despliegue de los primeros desarrollos comerciales de «IA verde»

Europa es actualmente líder mundial en la regulación de la IA sostenible (ley de IA de la UE) y en la investigación sobre eficiencia. Estos son los datos específicos más recientes para 2025 que merecen citarse a modo de ejemplo.

a) España: la revolución del «prosumidor» y las redes inteligentes

España está aprovechando su enorme capacidad solar y eólica mediante el uso de IA para gestionar la descentralización, que es inherentemente más sostenible que las plantas centralizadas de combustibles fósiles.

- *Altano Energy (Madrid)*: esta *startup* utiliza IA para gestionar una plataforma integrada de energía limpia en todo el mercado ibérico. Sus modelos de IA analizan los patrones de consumo para cambiar automáticamente a los clientes a la electricidad más barata y ecológica disponible en tiempo real, reduciendo la necesidad de plantas de alta emisión de carbono para las horas punta.
- *Proyecto A3E-INDAL*: una colaboración pionera en España entre la Universidad de Castilla-La Mancha y el centro tecnológico Ainia. Desarrollaron un *software* de IA que «imita a un experto en energía». Está diseñado específicamente para ejecutarse en *hardware* de bajo consumo en fábricas de procesamiento de alimentos (como plantas de conservas de carne) para identificar ahorros de energía de hasta un 17 % sin necesidad de conexión a un centro de datos masivo y de alto consumo energético.
- *Endesa y Red Eléctrica*: datos recientes para 2025 muestran que el 56 % de la electricidad de España proviene actualmente de energías renovables. Las empresas de servicios públicos españolas utilizan modelos de aprendizaje automático (como Random Forest y XGBoost) para predecir los precios y la demanda de energía. Estos modelos son miles de veces más pequeños que los grandes modelos de lenguaje, pero han mejorado la estabilidad de la red y reducido significativamente el desperdicio.

b) Mistral AI (Francia): el líder que prioriza la eficiencia

Mistral AI se ha convertido en la respuesta europea a Silicon Valley, pero con un enfoque radical en los «modelos de len-

guaje pequeños» (SLM). En el informe de transparencia de julio de 2025, Mistral fue la primera empresa en publicar un reporte de «huella ambiental» para su modelo Mistral Large 2. La consecuencia clave de esta acción fue demostrar que un modelo diez veces más pequeño genera impactos de un orden de magnitud menor para la misma tarea. Su estrategia anima a las empresas a agrupar las solicitudes de IA y utilizar el modelo más pequeño posible para la tarea (por ejemplo, utilizando Mistral 7B para un resumen en lugar de GPT-4).

Para entender este impacto en toda su dimensión, baste comparar a Open AI Chat GPT4 y modelos fundacionales pequeños²¹ desarrollados por Mistral y otras compañías.

Métrica	Modelo general grande (por ejemplo, GPT-4)	Modelo específico para tareas pequeñas (p. ej., Mistral/SLM)
Consumo energético	Alto (comparable a un pueblo pequeño)	90 % más bajo
Refrigeración por agua	~500 ml por cada 10-50 consultas	Escaso
Infraestructura	Centros de datos masivos a hiperescala	Dispositivos locales de «borde» / NPU
Latencia	Superior (dependiente de la nube)	Tiempo real

Impacto del modelo grande vs. pequeño (2025)

5.4 Consideraciones éticas y sesgo algorítmico

El despliegue de la IA en áreas de gran importancia, como la infraestructura energética, plantea complejas consideraciones éticas. Un riesgo clave es el sesgo algorítmico, ya que los modelos de IA entrenados con datos sesgados pueden perpetuar dichos sesgos, lo que genera un acceso desigual a la energía limpia o una exposición desproporcionada a la contaminación en ciertas comunidades. Este riesgo subraya la necesidad crucial de

²¹ Si bien el término «modelo fundacional» fue acuñado por Stanford en 2021 para describir modelos entrenados con datos amplios que pueden adaptarse a muchas tareas, la variante «pequeña» es una evolución técnica específica de 2024-2025. Un modelo fundacional pequeño (SFM) es un modelo de IA versátil entrenado con conjuntos de datos diversos y de alta calidad que, a diferencia de sus homólogos «grandes» (LLM), está diseñado intencionalmente con un número de parámetros significativamente menor (normalmente menos de 10 mil millones). El objetivo de un SFM es lograr un rendimiento adaptado de diez a cien veces su tamaño en razonamientos específicos o tareas especializadas, manteniendo al mismo tiempo una huella computacional mínima.

transparencia y rendición de cuentas, garantizando que las decisiones tomadas por los sistemas de IA sean explicables y que un ser humano sea responsable de ellas, especialmente en un ámbito donde los fallos pueden tener consecuencias catastróficas. Además, la recopilación y el análisis de grandes cantidades de datos sobre el consumo de energía plantean importantes preocupaciones sobre la privacidad de los datos que deben abordarse mediante marcos de gobernanza sólidos.

Cuando los reguladores contemplan los sesgos en la IA y persiguen crear una IA «segura», su definición es multifacética y va mucho más allá de la simple prevención de daños físicos. Abarca una amplia gama de principios diseñados para garantizar que los sistemas de IA se desarrollen y utilicen de forma que protejan a la ciudadanía, defiendan los valores democráticos y promuevan la confianza, buscando la equidad y la inclusión. Por ello, el reto en estos momentos es crear una IA «demostrable», es decir, que su proceso de toma de decisiones debe ser, en cierto grado, comprensible. Este principio, a menudo denominado «explicabilidad», exige que los usuarios y los organismos reguladores puedan comprender cómo un sistema de IA de alto riesgo llegó a una conclusión determinada. El objetivo es generar confianza y permitir la rendición de cuentas y la presentación de recursos en caso de fallo.

6 Marcos geopolíticos y regulatorios: dando forma al futuro de la IA en la energía

La importancia estratégica de la IA trasciende las esferas corporativa y operativa, alcanzando una dimensión geopolítica y de seguridad nacional. La carrera por la supremacía de la IA no es meramente tecnológica; está profundamente ligada a la capacidad de una nación para proporcionar la «energía bruta» y la «seguridad informática» fundamentales para el funcionamiento de dichos sistemas. Por lo tanto, el papel del sector energético es prioritario, ya que la capacidad de una nación para generar y suministrar energía fiable y asequible es ahora un componente fundamental de su liderazgo tecnológico en la era de la IA.

6.1 El panorama regulatorio en evolución

Gobiernos de todo el mundo están empezando a definir el futuro de la IA mediante una regulación proactiva. La ley de IA de la

Unión Europea es la primera ley integral del mundo sobre IA y establece un sistema de clasificación basado en riesgos. La condición del sector energético como infraestructura crítica lo sitúa en la categoría de «alto riesgo», lo que somete a sus sistemas de IA a estrictas regulaciones, que incluyen evaluaciones a lo largo de su ciclo de vida y el registro obligatorio en una base de datos de la UE. Este marco exige transparencia y rendición de cuentas y define cómo se desarrollan y gestionan los modelos de IA.

A donde el regulador ya no llega, y quizá este sea el mayor reto, es a lidiar con la IA agéntica, que toma decisiones sin consultar al humano, por ejemplo por necesidades de actuar con rapidez en momentos críticos, y otros ejemplos descritos en capítulos anteriores. El vacío regulatorio de cómo hacer responsable de actos a un sistema autónomo se ha complicado más allá de la IA generativa y los modelos fundacionales porque es un sistema operativo completamente distinto que no incluye al humano en los procesos de decisión y que puede usar tecnologías de otros en la realización de tareas. En este caso, buscar responsabilidad se expande ya a terceras partes y esto es un enorme riesgo regulatorio. En 2026 y 2027, cuando miles de agentes inteligentes van a estar operativos, y quizá en combinación con computación cuántica, las existentes regulaciones se verán forzadas a modificar algunos de los parámetros empleados en crear principios de responsabilidad y transparencia de modelos de lenguaje porque la IA agéntica no es un modelo, sino un patrón arquitectónico o un diseño de sistema, más que un «modelo» único como GPT-4 o Claude.

Las «lagunas» regulatorias específicas que se han identificado recientemente y que constituirán el nuevo marco para una regulación eficiente se pueden dividir en varios campos:

- La falacia del «humano-en-el-ciclo»: muchas regulaciones asumen que un humano revisará el resultado de la IA antes de utilizarlo. En la IA agéntica, el objetivo es eliminar al humano del ciclo para ganar velocidad y escala. Las leyes actuales aún no tienen reglas claras para los sistemas «humano-en-el-ciclo» (donde solo los humanos supervisan) o «humano-fuera-del-ciclo».
- Responsabilidad en «cadenas»: si se crea un agente que utiliza un modelo de OpenAI, una herramienta de búsqueda de Google y una herramienta de pago de Stripe, y dicho agente realiza una compra ilegal, el marco regulatorio tiene que ca-

librar en dónde reside la responsabilidad y de qué forma. El enfoque actual de la ley de IA de la UE en el «proveedor» del modelo base no cubre del todo al «orquestador» que conectó todas esas herramientas.

- *Sandboxing* y «radios de explosión»: los riesgos de la IA generativa son principalmente informativos. Los riesgos de la IA agéntica son operativos. Las leyes existentes se centran en la privacidad y la seguridad de los datos, pero aún no exigen «cajas de arena digitales» o «límites de gasto» para los agentes de IA, que son el equivalente a los guardias de seguridad físicos en los robots de las fábricas.

Ante estos retos, los reguladores están empezando a cambiar de estrategia. A principios de 2026, se verán nuevos debates sobre:

- Documentación dinámica: exigir a los agentes que mantengan una grabadora de vuelo de «caja negra» para cada llamada y decisión relacionada con las herramientas.
- Auditabilidad de los agentes: garantizar que un agente pueda explicar por qué realizó una acción específica, no solo lo que generó.
- Interruptores de emergencia: protocolos obligatorios de parada de emergencia para sistemas autónomos.

6.2 La carrera geopolítica por la «seguridad informática»

La analogía de que «la informática es el nuevo petróleo» destaca el profundo vínculo entre la capacidad energética de una nación y su competitividad tecnológica. Las inmensas demandas energéticas de los centros de datos de IA significan que las naciones que controlan el acceso a energía confiable e infraestructura de supercomputación ejercerán el mismo tipo de poder que aquellas que alguna vez dominaron los suministros energéticos. Este contexto eleva la capacidad de una nación para modernizar su red, expandir las fuentes de energía bajas en carbono y mejorar la eficiencia de los recursos de un objetivo de sostenibilidad a un imperativo de seguridad nacional. De hecho, el impulso a la «IA soberana» —el impulso de las naciones para desarrollar su propia infraestructura, modelos y datos de IA dentro de sus fronteras— es una respuesta directa a esto, ya que los países buscan reducir su exposición al riesgo geopolítico mediante el desarrollo de su propia capacidad nacional de IA.

Como era de esperar, en 2026, la IA soberana se ha convertido en un importante motor de cambio en el sector energético. Esta tendencia está transformando la relación entre la tecnología y la energía, pasando de una de «consumidor y proveedor» a una alianza estratégica profundamente integrada. Así es como la IA soberana está afectando al sector:

– El «precio de entrada» energético para la soberanía

Naciones como los Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudí e India están descubriendo que la IA soberana es tanto una política energética como tecnológica. A diferencia de la nube global (donde los centros de datos pueden ubicarse en cualquier lugar con energía económica), la IA soberana requiere que los centros de datos se construyan localmente. Esto ejerce una enorme presión sobre las redes nacionales, que no fueron diseñadas para cargas de tan alta densidad. Asimismo, el entrenamiento de la IA requiere energía «siempre disponible». Esto está revitalizando el interés en la energía nuclear, específicamente en los reactores modulares pequeños, que proporcionan energía constante y libre de carbono para clústeres de datos soberanos.

– La «red inteligente» como activo soberano

Para gestionar el pico energético masivo causado por la IA localizada, los países utilizan esa misma IA para gestionar sus redes energéticas. Se están entrenando modelos de IA soberanos con base en el clima local y los patrones de consumo para optimizar la red en tiempo real. Esto reduce el desperdicio de energía de los parques eólicos y solares. Al controlar la IA que gestiona la red, las naciones protegen su infraestructura energética crítica de la ciberinterferencia externa, un pilar clave de la soberanía.

– Cambio en la inversión energética

Se viene observando una tendencia hacia las «zonas de crecimiento de la IA», áreas geográficas donde la infraestructura energética se acelera específicamente para la IA. En este contexto, los Gobiernos y las entidades estatales locales ya no solo compran energía, sino que ahora coinvierten en líneas de transmisión de alto voltaje y generación *in situ* (como turbinas de gas con captura de carbono) para garantizar que sus modelos soberanos nunca se desconecten. Los fondos soberanos de inversión, entidades como el PIF en Arabia Saudí o Mubadala en Emiratos Árabes, están invirtiendo miles de millones en

proyectos de energía «verde» específicamente para impulsar sus ambiciones nacionales en materia de IA, vinculando eficazmente el futuro de sus economías basadas en el petróleo con un futuro de IA basado en energías renovables.

En definitiva, la IA soberana está transformando el sector energético, pasando de ser un servicio público silencioso a una frontera estratégica de seguridad nacional. A medida que los países se alejan de la dependencia global de la nube y se orientan hacia una infraestructura localizada de alta densidad, la red eléctrica ya no es solo un «proveedor», sino la columna vertebral de la autonomía digital de una nación. En este nuevo panorama, el éxito de las ambiciones de IA de un país se medirá no solo por la sofisticación de sus algoritmos, sino por su capacidad para garantizar un suministro eléctrico estable, sostenible y soberano, convirtiendo la búsqueda de inteligencia en un catalizador permanente para la transición energética global.

7 Recomendaciones estratégicas

El camino por seguir para las organizaciones energéticas no es un simple plan de adopción, sino una estrategia multifacética que considera la IA como una capacidad fundamental que debe desarrollarse, no como un producto que se compra. El éxito depende de un enfoque holístico que integre tecnología, talento y una gobernanza sólida desde el principio.

7.1 Estrategia de tecnología e innovación

Las organizaciones deben priorizar los casos de uso de alto impacto que ofrecen un claro retorno de la inversión (ROI) y escalabilidad, como el mantenimiento predictivo, el pronóstico de energía renovable y la optimización de la red inteligente. Este enfoque permite que los programas piloto a pequeña escala prueben la viabilidad antes de ampliarlos. Además, es fundamental promover e invertir en *hardware* energéticamente eficiente y soluciones de refrigeración optimizadas para IA para abordar la paradoja energética de la IA, asegurando que el impacto neto de la IA sea positivo.

7.2 Estrategia organizacional y de talento

La importante brecha de talento debe abordarse a través de un plan estratégico de fuerza laboral que priorice la adquisición y el

desarrollo de experiencia de doble dominio tanto en IA/ciencia de datos como en tecnología operativa (OT) específica de energía. Las implementaciones de IA más exitosas en el sector energético implican la creación de un equipo dedicado a la ciencia de datos y el fomento de una cultura de colaboración con las partes interesadas del negocio, lo que demuestra la importancia de un enfoque integrado de la tecnología y el talento.

7.3 Gobernanza y gestión de riesgos

Un marco integral de gobernanza de la IA es esencial para garantizar el cumplimiento normativo, el uso ético y una gestión sólida de riesgos desde el desarrollo hasta la implementación. Este marco debe incluir protocolos estrictos de privacidad de datos y ciberseguridad para proteger contra nuevas amenazas impulsadas por la IA, como el envenenamiento de datos y los ataques adversarios. Las organizaciones también deben trabajar activamente para mitigar el sesgo algorítmico y garantizar la transparencia y la rendición de cuentas en todas las decisiones impulsadas por la IA.

7.4 Colaboración y desarrollo de ecosistemas

Por último, las organizaciones deben colaborar con los reguladores, el mundo académico y sus pares de la industria para dar forma a las políticas y compartir las mejores prácticas. Al participar en asociaciones público-privadas, el sector energético puede ayudar a acelerar el desarrollo y la implementación seguros de tecnologías de próxima generación, al tiempo que garantiza que la IA sirva al interés público y contribuya a un futuro energético más resiliente y sostenible para todos.

Bibliografía

- Agencia Internacional de la Energía. (2024). *Electricity 2024. Analysis and forecast to 2026*.
- . (2025). *Energy and AI* (Special Report).
- . (s. f.). *AI and Energy Security*.
- AI Energy Calculator. (2025a). *5 Ways to Reduce Your AI Model's Energy Consumption Without Sacrificing Performance*.
- . (2025b). *The Future of AI is Green: Emerging Technologies for Energy-Efficient Machine Learning*.

- Amar, J. *et al.* (2022). *AI-driven operations forecasting in data-light environments*. McKinsey & Co.
- Applied AI Pulse. (2025). *Physical AI: Paced Adoption in Asset-Heavy Sectors*.
- Comisión Europea. (2026). *Strategic Roadmap for Digitalisation and AI in the Energy Sector*.
- Counterpoint. (2025). *Global Smart Meter Installations Set to Surpass 3 Billion by 2030 Amid Accelerating Adoption*.
- Da-eun, K. (2025). AI Simplifies Plasma Control for Nuclear Fusion. *The Chosun Daily*.
- Dalton, D. (2025). Google Signs Deal to Buy Fusion Energy From Bill Gates-Backed Nuclear Startup. *Nucnet*.
- Darley, J. (2025). Why is Google Investing in Nuclear Fusion With TAE? *Technology Magazine*.
- Devasia, A. (2025). *AI Cyber Threat Statistics: The 2025 Landscape of AI-Powered Cyberattacks*. The Network Installers.
- Dixit, S. (2024). *AI in the Oil and Gas Industry: From drilling optimization to market prediction*. HCLTech.
- Dou, Y. *et al.* (2025). *Geological Everything Model 3D: A Promptable Foundation Model for Unified and Zero-Shot Subsurface Understanding* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://arxiv.org/html/2507.00419v1>
- Energy Management Institute. (2025). *Energy in the Age of AI: Key Trends for 2026*.
- Gent, E. (2025). *Hugging Face Says AI Models With Reasoning Use 30x More Energy on Average*. SingularityHub.
- Google Cloud Transform. (2026). *Sovereign AI and Air-Gapped Security in the Energy Sector*.
- Icaza Álvarez, D. *et al.* (2025). The Evolution of AI Applications in the Energy System Transition: A Bibliometric Analysis of Research Development, the Current State and Future Challenges [en línea]. *Energies*. 18(6), 1523. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/193N39AFLA
- Innovation News Network. (2025). *The AI-Energy Nexus: The Atomic Imperative for sustainable AI*. Purdue University
- Jackson, A. (2025). *Google to Back TAE Technologies Nuclear Fusion Energy*. Data Centre Magazine.

- Jaramillo-Alcazar, A., Govea, J. y Villegas, W.(2023). *Anomaly Detection in a Smart Industrial Machinery Plant Using IoT and Machine Learning*. Quito, Escuela de Ingeniería en Ciberseguridad, Facultad de Ingenierías Ciencias Aplicadas, Universidad de Las Américas.
- Kim, L. (2025). *How on-device AI can help us cut AI's energy demand*. World Economic Forum.
- Li, W. (2014). *Inverse Modelling and Uncertainty Quantification*. Faculty of the USC Graduate School, USC University of Southern California.
- L., Jennifer (2026). *AI Drives a Transformative Wave in Global Data Centers— JLL / Carbon Credits*, January 2026.
- Mesh AI. (2025). *AI in Energy: From Experimentation to Strategic Imperative*. Enlit Europe.
- Ofgem. (2026). *Futureproofing Cyber Regulation: The NIS2 and Cyber Resilience Act Era*.
- Potter, L. (2025). *Top 10: AI Applications in Energy 2025*. Energy Digital.
- SC Media. (2026). *Critical Infrastructure Facing Cyber Surge: The Rise of Autonomous Adversaries*.
- ShopHatch. (2025). *Hardware's New Horizon: Powering AI, Sustainability, and the Edge in 2025*.
- Terrell, M. (2025). *Our latest bet on a fusion-powered future*.
- The Fusion Team. (2025). *Bringing AI to the next generation of fusion energy*. Google Deepmind.
- UNESCO. (2025). *AI Large Language Models: new report shows small changes can reduce energy use by 90%*.
- . (s. f.). *Green Digital Transformation. Advancing sustainable and energy-efficient AI to power an inclusive, right-based digital future*.
- Vakhshouri, S. (2025). *Outlook 2026: The Algorithmic Arms Race for Energy*. Petroleum Economist.
- World Economic Forum. (2025). *How AI Can Accelerate the Energy Transition, Rather Than Compete With It*.
- Yao, D., Calic, G. y Wu, A. (2025). *Meta's Energy Dilemma: Powering the AI Future*. Harvard Business School.