TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Administración y Dirección de Empresas

Título: Impacto estratégico y organizativo de la inteligencia artificial en la industria nuclear

Autoría: Ainhoa Pedraza Perales

Tutoría: Laura Sáez Ortuño

Departamento: Departamento de empresa

Curso académico: 2025-2026

Semestre: Segundo

Periodo: Ordinario

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Facultat d'Economia i Empresa

Agradecimientos:

A mis padres,

por estar siempre presentes, por su confianza y su esfuerzo constante. Gracias por enseñarme el valor del trabajo y darme la oportunidad que vosotros no tuvisteis. Sois parte de todo lo que soy. Espero que os sintáis orgullosos, porque este logro también es vuestro.

A mi hermano,

por hacer más ligeros los momentos de estrés y por recordarme, incluso sin palabras, que nunca estaré sola.

A mi pareja,

por ser mi apoyo más incondicional y por ayudarme siempre en todo lo que has podido. Me faltan palabras de agradecimiento, gracias por ser mi persona.

A todas aquellas personas que han estado a lo largo de este camino,

por cada mensaje de ánimo, por las risas que me han salvado en los momentos más duros y por recordarme, una y otra vez, que podía conseguirlo.

Y, por último, este trabajo me lo dedico también a mí.

Por confiar cuando no era fácil.

Por disfrutar, aprender y avanzar.

Por atreverme a soñar en grande…

Ahora puedo decir que lo he logrado.

Resumen

La irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) en sectores de infraestructura crítica plantea interrogantes de gran relevancia estratégica y organizativa. Este trabajo analiza el impacto que la adopción de sistemas de IA está generando en la industria nuclear, un sector caracterizado por sus exigentes estándares regulatorios, sus elevados costes de capital y una cultura organizativa históricamente orientada al control y la seguridad.

A partir de una metodología cualitativa fundamentada en la triangulación de entrevistas a expertos de ANAV, Westinghouse e IDOM, se evalúa cómo la IA transforma la eficiencia operativa, la gestión del talento y la gobernanza tecnológica. Este enfoque se complementa con un modelo financiero ilustrativo que traduce a magnitudes económicas el impacto de la IA en la reducción de costes operativos y la disponibilidad de la planta. Los resultados demuestran que tecnologías como el mantenimiento predictivo y el procesamiento de lenguaje natural constituyen una ventaja competitiva clave para la viabilidad económica del parque nuclear. Se concluye que su adopción exige una gobernanza sólida, sustentada en la ciberseguridad, la explicabilidad de los datos y la innegociable supervisión humana.

Palabras clave: Inteligencia artificial; industria nuclear; mantenimiento predictivo; gobernanza tecnológica; ventaja competitiva; gestión del cambio; supervisión humana.

Resum

La irrupció de la Intel·ligència Artificial (IA) en sectors d'infraestructura crítica planteja interrogants de gran rellevància estratègica i organitzativa. Aquest treball analitza l'impacte que l'adopció de sistemes d'IA està generant en la indústria nuclear, un sector caracteritzat pels seus exigents estàndards regulatoris, els seus elevats costos de capital i una cultura organitzativa històricament orientada al control i la seguretat.

A partir d'una metodologia qualitativa fonamentada en la triangulació d'entrevistes a experts d'ANAV, Westinghouse i IDOM, s'avalua com la IA transforma l'eficiència operativa, la gestió del talent i la governança tecnològica. Aquest enfocament es complementa amb un model financer il·lustratiu que tradueix a magnituds econòmiques l'impacte de la IA en la reducció de costos operatius i la disponibilitat de la planta. Els resultats demostren que tecnologies com el manteniment predictiu i el processament de llenguatge natural constitueixen un avantatge competitiu clau per a la viabilitat econòmica del parc nuclear. Conclou que la seva adopció exigeix una governança sòlida, sustentada en la ciberseguretat, l'explicabilitat de les dades i la innegociable supervisió humana.

Paraules clau: Intel·ligència artificial; indústria nuclear; manteniment predictiu; governança tecnològica; avantatge competitiu; gestió del canvi; supervisió humana.

Abstract

The emergence of Artificial Intelligence (AI) in critical infrastructure sectors raises first-order strategic and organisational questions. This paper analyses the impact that AI adoption is generating in the nuclear industry, a sector characterised by demanding regulatory standards, high capital costs, and an organisational culture historically oriented towards control and safety.

Drawing on a qualitative methodology based on triangulating interviews with experts from ANAV, Westinghouse, and IDOM, this study evaluates how AI transforms operational efficiency, talent management, and technology governance. This approach is complemented by an illustrative financial model that translates the impact of AI on reducing operating costs and increasing plant availability into economic terms. The results demonstrate that technologies such as predictive maintenance and natural language processing constitute a key competitive advantage for the economic viability of nuclear power plants. The study concludes that their adoption requires robust governance, underpinned by cybersecurity, data explainability, and essential human oversight.

Keywords: Artificial intelligence; nuclear industry; predictive maintenance; technological governance; competitive advantage; change management; human-in-the-loop.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 7

II. OBJETIVOS 9

III. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS CENTRALES NUCLEARES 10

3.1 Características económicas y estructurales del sector 10

3.2 Marco regulatorio internacional 10

3.3 Barreras de entrada y dinámica competitiva 11

3.4 Digitalización y transformación tecnológica 11

3.4.1 Impacto en la eficiencia operativa y la reducción de costes 12

3.4.2 El reto de proteger la información corporativa 13

3.4.3 Ciberseguridad y cumplimiento de la normativa 13

IV. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE IA EN LA ACTUALIDAD 14

4.1 Innovación tecnológica y ventaja competitiva 14

4.1.1 De la Inteligencia de Negocio a la IA Predictiva 14

4.1.2 El factor humano y la gestión del cambio organizacional 15

4.2 Aprendizaje automático y sistemas expertos 15

4.2.1 Niveles de Autonomía Operativa 15

4.2.2 Gestión del riesgo y el modelo "Humano en el bucle " 16

V. BENEFICIOS, LIMITACIONES Y RIESGOS DE LA IA COMO DECISIÓN ESTRATÉGICA EMPRESARIAL 18

5.1 Impacto en la estructura de costes y rentabilidad operativa 18

5.1.1 Rentabilidad y eficiencia en el entorno empresarial 18

5.1.2 Optimización operativa y ajuste dinámico de la producción 18

5.1.3 Valor de negocio y capacidades técnicas en centrales nucleares 19

5.2 Evaluación de inversiones y análisis coste-beneficio 19

5.2.1 Precisión predictiva en el presupuesto de capital 20

5.2.2 Modelos de escenarios y previsión del flujo de caja 20

5.2.3 Desafíos de adopción y altos costes de infraestructura (CAPEX) 20

5.3 Implicaciones organizativas y culturales 21

5.3.1 Ética y el concepto de ENAI (Ethics of Nuclear and Artificial Intelligence) 22
5.4 Gestión del talento y nuevas competencias 22
5.4.1 Optimización operativa y reducción del error humano 22
5.4.2 Transformación cualitativa de roles y el nuevo perfil profesional 23
5.4.3 La escasez del talento y la formación corporativa 23
5.5 Riesgos regulatorios, reputacionales y de ciberseguridad 23
5.5.1 Desafíos técnicos, algorítmicos y medioambientales 24
5.5.2 Ciberseguridad y cadena de suministro 24
5.5.3 Cumplimiento normativo y marcos de gobernanza (NIST) 26
VI. ANÁLISIS EMPÍRICO: INTEGRACIÓN DE IA EN LA INDUSTRIA NUCLEAR 27
6.1 Estado actual de adopción de la Inteligencia Artificial 27
6.1.1 La "maduración responsable" en el entorno nuclear 27
6.1.2 La dualidad reto-oportunidad en el proveedor tecnológico 27
6.1.3 Adopción estimada en ingeniería y construcción 28
6.1.4 Convergencias y divergencias en el punto de partida 28
6.2 Iniciativas concretas implementadas y beneficios observados 28
6.2.1 Iniciativas en ANAV: bajo riesgo, alto aprendizaje 29
6.2.2 Iniciativas en Westinghouse: de la búsqueda documental a la modificación de diseño 29
6.2.3 Iniciativas en IDOM: hacia la gestión integral de la obra 29
6.2.4 Lectura comparada de beneficios y limitaciones 29
6.3 Impacto estratégico y ventaja competitiva 30
6.3.1 El impacto financiero desde la perspectiva del operador 30
6.3.2 La ventaja competitiva del proveedor: infraestructura propia y conocimiento del caso de uso 30
6.3.3 IDOM y el conocimiento del caso de uso como ventaja estratégica 30
6.4 Gobernanza, regulación y gestión de riesgos 31
6.4.1 El marco regulatorio nuclear: acelerador y freno simultáneos 31
6.4.2 La gobernanza multidisciplinar en Westinghouse 31
6.4.3 El Reglamento de IA de la UE como marco de referencia en IDOM 31
6.4.4 Convergencias en la gestión del riesgo 32

6.5 Cultura organizativa y barreras de adopción 32
6.5.1 La confianza como barrera principal en el entorno nuclear 32
6.5.2 La gestión del cambio como denominador común 32
6.5.3 La barrera de acceso como factor temporal en ingeniería 33
6.6 Gestión del talento y transformación del perfil profesional 33
6.6.1 Del ingeniero tradicional al ingeniero-intérprete de IA 33
6.6.2 La irrupción de la IA generativa y el impacto en los perfiles administrativos 33
6.6.3 La IA invisible y el impacto en equipos de obra 34
6.7 Perspectivas de futuro y recomendaciones estratégicas 34
6.7.1 Las tecnologías con mayor potencial y recomendaciones para un despliegue responsable 34
6.8 Síntesis del análisis empírico 35
VII. PROPUESTAS DE FUTURO DE ADOPCIÓN DE IA 36
7.1 Desafíos estructurales y viabilidad económica del parque nuclear 36
7.2 La Inteligencia Artificial como aliada estratégica en la gestión empresarial 36
7.3 Recomendaciones para un despliegue responsable y orientado a resultados 37
7.4 Ilustración cuantitativa: modelo de escenarios de impacto financiero 37
VIII. CONCLUSIONES 38
IX. BIBLIOGRAFÍA 40
X. ANEXOS 42
ANEXO I: Declaración de uso de inteligencia artificial generativa 42
ANEXO II: Guion de las entrevistas a expertos 42
ANEXO III: Transcripciones de las entrevistas 44
ANEXO IV: Tabla comparativa de las tres entrevistas para realizar el análisis empírico 50
ANEXO V: Modelo ilustrativo de impacto financiero de la adopción de IA en una central nuclear genérica 51
V.1. Escenario 1 — Ahorro por mejora de disponibilidad (+0,1 punto porcentual) 52
V.2. Escenario 2 — Prevención de un fallo en un equipo crítico (evento puntual) 52
V.3. Escenario 3 — Modelo de inversión a 5 años (VAN, TIR, ROI y payback) 53
ANEXO VI: Listado de acrónimos y abreviaturas 56

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el debate sobre la inteligencia artificial y el *machine learning*[1] se ha instalado ya como práctica habitual en los entornos académico, empresarial y mediático. Los orígenes de estas disciplinas se remontan a la segunda mitad del siglo XX, aunque su desarrollo ha experimentado un crecimiento exponencial durante la última década, revolucionando rápidamente los modelos operativos de múltiples sectores sociales e industriales.

En este contexto, el presente trabajo se centra en analizar el impacto estratégico que esta tecnología avanzada está teniendo en las centrales nucleares. La integración de la IA en el ámbito de las centrales nucleares representa un gran reto de investigación y una de las transformaciones tecnológicas más relevantes de la industria energética actual. Ambas son herramientas muy complejas con un gran potencial tecnológico, especialmente las instalaciones nucleares ya que son infraestructuras críticas de extrema complejidad técnica; en ellas, la gestión eficiente de la información resulta vital debido a los altísimos estándares de seguridad exigidos. Teniendo en cuenta que estas plantas operativas generan volúmenes masivos de datos procedentes de redes de sensores, sistemas de control automático, registros operativos y procesos de mantenimiento, la IA puede resultar muy útil ya que procesa grandes cantidades de datos, detecta problemas, predice posibles fallos y mejora la toma de decisiones en tiempo real. No obstante, esto también presenta desafíos, ya que la seguridad es lo más importante en este sector, por lo que los algoritmos utilizados deben ser transparentes y fiables. Además, su integración debe seguir las normativas y marcos regulatorios existentes, con lo cual requiere un análisis riguroso de su funcionamiento y posibles implicaciones.

La motivación principal de este estudio es analizar cómo la incorporación de estas tecnologías está transformando los modelos de gestión y los procesos de toma de decisiones dentro de las organizaciones. Más allá del componente puramente técnico, resulta vital comprender cómo estas herramientas influyen en la eficiencia operativa, la optimización de recursos, la reducción de costes y la generación de ventajas competitivas sostenibles. El propósito no es reemplazar los sistemas tradicionales, sino crear una simbiosis donde la IA actúe como una capa de seguridad y eficiencia sobre los sistemas deterministas convencionales, garantizando una adopción alineada con los objetivos regulatorios y de gobernanza corporativa de la empresa.

Esta investigación parte de la hipótesis principal de que la adopción estratégica de sistemas de inteligencia artificial en centrales nucleares puede mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la gestión del riesgo, siempre que su implantación se realice bajo un marco sólido de validación, supervisión humana y control regulatorio. De forma complementaria, se establecen hipótesis secundarias centradas en el impacto operativo de estas tecnologías; en concreto, se sugiere que los modelos de aprendizaje profundo (*deep learning*[2]) permiten una detección de anomalías

[1] Rama de la IA basada en algoritmos que permiten a los sistemas identificar patrones y aprender de datos estructurados de forma autónoma con una mínima intervención humana
[2] Subcampo del *machine learning* basado en redes neuronales complejas, capaz de procesar grandes volúmenes de datos no estructurados (como texto o imágenes)

más ágil en comparación con los métodos tradicionales, ya que la aplicación de sistemas de mantenimiento predictivo en IA puede disminuir fallos mecánicos y optimizar la planificación de intervenciones. Seguidamente, para alcanzar los objetivos propuestos el estudio se apoya en una metodología cualitativa basada en la triangulación de fuentes. Este enfoque combina dos procedimientos complementarios: la revisión bibliográfica sistemática de la literatura académica y técnica especializada, y la realización de entrevistas en profundidad a profesionales de referencia en el sector. Las entrevistas se realizaron a tres expertos con perfiles complementarios: David Martínez Veciana, que aporta la perspectiva del operador nuclear; Javier Barroso Martín, que representa la visión del proveedor tecnológico global; y Xavier Amorós Trías, que ofrece la perspectiva de la ingeniería consultora especializada. La información obtenida se analizó mediante categorización temática y comparación cruzada entre los tres perfiles, siguiendo los criterios propios del análisis cualitativo de datos primarios. Como complemento, y para dotar al análisis de una dimensión económica tangible, se incorpora un modelo financiero ilustrativo de escenarios (desarrollado en el Anexo V). A partir de parámetros de mercado, este modelo cuantifica el impacto potencial de la IA sobre la disponibilidad y el mantenimiento de una central.

La relevancia de este estudio se enmarca estratégicamente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas, garantizando que la investigación esté alineada con las metas europeas y globales de sostenibilidad y gobernanza. La convergencia de la industria nuclear y la inteligencia artificial impacta de forma directa en el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al optimizar una fuente de energía estable y de bajas emisiones. Del mismo modo, el proyecto se alinea con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) mediante la integración de tecnologías avanzadas en infraestructuras críticas. La optimización de recursos a través del mantenimiento predictivo y la contribución a la descarbonización refuerzan los ODS 12 (Producción y consumo responsables) y 13 (Acción por el clima). Finalmente, la exigencia de trazabilidad algorítmica y supervisión humana en un marco regulatorio estricto conecta directamente con el ODS 16 (Paz, justicia e instituciones sólidas).

Asimismo, para contextualizar la viabilidad y el estado de estas innovaciones en el mercado, es importante señalar que las tecnologías abordadas en este trabajo no se encuentran en una fase de investigación básica, sino que presentan un nivel de madurez tecnológica avanzado. En concreto, los sistemas analizados se sitúan en un *Technology Readiness Level* (TRL) comprendido entre 6 y 8. Esto indica que la investigación se centra en tecnologías que ya han sido demostradas en entornos operacionalmente relevantes (TRL 6) y que constituyen sistemas completos y cualificados listos para su despliegue en el exigente ecosistema de las centrales nucleares (TRL 8).

II. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es analizar cómo la inteligencia artificial puede integrarse en la industria nuclear de forma segura y responsable. Se busca entender mejor las oportunidades y limitaciones de su implementación, ya que esto es importante para entender cómo las nuevas tecnologías pueden incorporarse en sectores estratégicos y sensibles. El propósito no es reemplazar los sistemas tradicionales, sino hacer que la evolución tecnológica refuerce los principios de seguridad, control y fiabilidad que sustentan la operación de las centrales nucleares. Hay varias preguntas clave que guiarán el análisis. Por ejemplo, ¿puede la inteligencia artificial realmente dar a las empresas una ventaja competitiva? ¿Cuál es su impacto económico real en términos de reducción de costes y rentabilidad de activos? Es fundamental entender cómo las regulaciones afectan las decisiones de inversión y qué barreras culturales dificultan la adopción de tecnologías nuevas en empresas conservadoras.

El presente trabajo investiga cómo la inteligencia artificial afecta a la toma de decisiones directivas y cómo encontrar un equilibrio entre la automatización y la supervisión humana. Establece criterios claros para medir el retorno de la inversión en inteligencia artificial.

III. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS CENTRALES NUCLEARES

La industria nuclear es un pilar energético de gran complejidad a nivel global, con una infraestructura tecnológica crítica y un entorno de mercado muy regulado. Para entender el impacto de las tecnologías emergentes en el sector, resulta necesario analizar su realidad económica, sus barreras estructurales y los desafíos regulatorios a los que se enfrenta en la actualidad.

En la actualidad, el sector se enfrenta a un doble desafío: por un lado, el envejecimiento de los parques nucleares en economías avanzadas, lo que exige una gestión de activos extremadamente eficiente para garantizar su viabilidad económica; y por otro, la irrupción de nuevas dinámicas competitivas lideradas por la economía digital, que demanda una generación eléctrica masiva, estable y libre de emisiones de carbono. Este escenario configura un ecosistema donde la digitalización y la seguridad dejan de ser elementos accesorios para convertirse en los ejes vertebradores de la estrategia corporativa de las operadoras (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2023; Agencia Internacional de la Energía [AIE], 2022).

3.1 Características económicas y estructurales del sector

Desde un punto de vista financiero y operativo, el sector nuclear atraviesa actualmente una etapa crítica debido al envejecimiento generalizado de sus parques nucleares y los altos costes de capital (CAPEX[3]). A nivel global, alrededor de 200 de las 434 centrales de todo el mundo tienen entre 25 y 30 años de antigüedad, por tanto, el presente trabajo se centra en analizar el impacto para seguir siendo viables debe evaluar proyectos de extensión de vida o la construcción de nuevas plantas para mantener su rentabilidad (OIEA, 2023).

Sin embargo, el freno más evidente es el riesgo financiero, ya que la inversión inicial para una nueva planta exige un inmovilizado material que oscila entre los 3.000 y 4.500 millones de euros con plazos de retorno excesivamente largos. Además, la viabilidad económica a largo plazo se ve amenazada por la volatilidad en la cadena de suministro de materias primas, especialmente el uranio, cuyo precio ha sufrido fuertes fluctuaciones en los últimos años debido a la escasez de reservas accesibles.

3.2 Marco regulatorio internacional

A nivel institucional, las operadoras nucleares trabajan en un mercado muy controlado. El desafío regulatorio no solo se centra en la seguridad operativa, sino también en problemas políticos como la gestión de residuos a largo plazo. Esto aumenta los costes de cumplimiento normativo.

Desde el punto de vista de la gestión, la liberalización del mercado eléctrico ha creado tensiones entre la rentabilidad de las empresas y la seguridad normativa. Las empresas energéticas

[3] Inversión en activos fijos, infraestructuras o tecnología destinada a mejorar la capacidad operativa de la empresa y generar beneficios a largo plazo.

intentan maximizar sus beneficios, pero enfrentan el reto de reducir sus costes operativos. Para lograrlo, necesitan disminuir los tiempos de recarga y mantenimiento. Sin embargo, deben controlar rigurosamente estos procesos para evitar penalizaciones del Consejo de Seguridad Nuclear (AIE, 2022).

3.3 Barreras de entrada y dinámica competitiva

Tradicionalmente, el sector nuclear ha funcionado bajo lógicas propias de un oligopolio o incluso de un monopolio natural. Las barreras de entrada son extraordinariamente elevadas: las inversiones iniciales son descomunales, los proyectos requieren más de una década para completarse y una complejidad técnica y regulatoria extrema que, en la práctica, ha hecho casi imposible la aparición de nuevos competidores convencionales ha sido casi imposible (Foro de la Industria Nuclear Española, 2023).

A esta estructura cerrada se suma una fuerte dependencia internacional. Países como España importan todo el uranio que consumen y dependen de un número muy reducido de multinacionales extranjeras para el enriquecimiento y la gestión del ciclo del combustible. La cadena de suministro, por tanto, no solo es costosa, sino también geopolíticamente sensible.

Sin embargo, este equilibrio histórico está empezando a romperse. La irrupción de gigantes tecnológicos como *Microsoft* o *Google* está introduciendo una dinámica competitiva completamente nueva. El entrenamiento y funcionamiento continuo de los modelos de inteligencia artificial consume cantidades masivas de electricidad, hasta el punto de poner en riesgo los compromisos de sostenibilidad como los criterios ESG[4] que estas empresas han asumido públicamente. Para ellas, garantizar un suministro eléctrico estable, abundante y libre de carbono ha pasado de ser un objetivo estratégico a convertirse en una cuestión de supervivencia corporativa.

En este contexto, las tecnológicas han comenzado a asumir riesgos empresariales en un sector del que tradicionalmente habían permanecido al margen. Lo están haciendo por dos vías: reactivando instalaciones existentes o invirtiendo en tecnologías nuevas y emergentes, como reactores modulares pequeños. Esto muestra que el sector nuclear ya no es solo para empresas de servicios públicos y gobiernos, sino que también es importante para la economía digital. En definitiva, la energía nuclear se está convirtiendo en un activo estratégico para la economía digital, y las empresas tecnológicas están liderando este cambio (PwC, 2023).

3.4 Digitalización y transformación tecnológica

Para comprender la urgencia de la modernización en el sector nuclear, es imperativo analizar el contexto macroeconómico nacional y el respaldo institucional que está recibiendo la innovación tecnológica. En el mercado español, el sector de la IA alcanzó la impresionante cifra de 2.650 millones de dólares estadounidenses en 2024, y las proyecciones indican un crecimiento sostenido de 11.150 millones de dólares adicionales hacia 2031. Reconociendo este potencial

[4] Conjunto de factores ambientales, sociales y de gobernanza utilizados para evaluar la sostenibilidad, el impacto ético y la gestión responsable de una empresa en su actividad económica.

transformador, el sector público ha tomado un papel activo para no quedarse atrás en competitividad. Solo en 2024, el gobierno español destinó 600 millones de euros en inversiones públicas exclusivamente para proyectos de inteligencia artificial. Dentro de este presupuesto, destaca especialmente la atención hacia la modernización de infraestructuras y el tejido productivo, canalizando la mayor parte de estos fondos (125,4 millones de euros) hacia la digitalización de la industria y el desarrollo de ciudades inteligentes (Statista, 2024).

La modernización del sector energético exige una integración cada vez mayor de tecnologías avanzadas tanto en las redes corporativas (IT) como en las tecnologías de operación (OT) de las plantas. Desde una perspectiva directiva, esta transformación tecnológica requiere estructurar y gobernar adecuadamente las fuentes de información de la empresa. Las centrales de generación capturan grandes volúmenes de datos operativos a través de historiadores de datos conectados a sus Sistemas de Control Distribuido (DCS)[5] y sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)[6]. El verdadero valor empresarial de la digitalización se alcanza cuando esta información operativa se integra en repositorios corporativos como lagos de datos (*data lak*es[7]). Esto permite interconectar la telemetría física con sistemas críticos de gestión empresarial, como el Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS) [8] o el *software* de Planificación de Recursos Empresariales (ERP[9]), a través de catálogos de datos integrados (EPRI, 2024).

3.4.1 Impacto en la eficiencia operativa y la reducción de costes

A nivel de planta, la automatización en la gestión de datos hace que los procesos sean más fiables y permite reducir el tiempo que requieren las operaciones habituales. Para la dirección de operaciones, esto tiene un impacto directo en la cuenta de resultados y en la seguridad: no solo disminuye los tiempos de inactividad, logrando una reducción de costes y un aumento del rendimiento, sino que reduce la posibilidad de errores asociados al factor humano en situaciones de alta presión. Además, disminuye los tiempos de exposición a la radiación por parte de los trabajadores, mejorando la protección radiológica. En esta misma línea de eficiencia, el uso de drones, impulsado por el aprendizaje automático y la visión artificial, está mejorando la accesibilidad en los trabajos de supervisión humana, facilitando el acceso a zonas complejas de las instalaciones. De cara a futuras inversiones de capital, la integración tecnológica también se aplicará en la fase de diseño de las instalaciones, ya que ayudará a optimizar la ingeniería, reducir costes, acortar los plazos de ejecución y mejorar la seguridad (Romera, 2023).

---

[5] *Distributed Control System:* Sistema de control industrial donde las funciones de supervisión y control están distribuidas entre varios controladores conectados en red, permitiendo gestionar procesos complejos de forma estable y en tiempo real.
[6] *Supervisory Control And Data Acquisition*: Sistema que supervisa y controla procesos industriales a distancia, recogiendo datos en tiempo real de sensores y equipos para monitorizar y automatizar su funcionamiento.
[7] Sistema de almacenamiento que guarda grandes volúmenes de datos en bruto, en su formato original, estructurados y no estructurados, para su posterior análisis.
[8] *Computerized Maintenance Management System*: *Software* que ayuda a gestionar, planificar y registrar el mantenimiento de equipos e instalaciones para reducir fallos y optimizar su uso.
[9] Sistema de gestión que integra y automatiza los principales procesos de una empresa (como finanzas, compras, producción y recursos humanos) en una única plataforma.

3.4.2 El reto de proteger la información corporativa

Para gestionar estos activos digitales, la dirección debe establecer políticas de clasificación. Un reto gerencial clave es el riesgo de agregación: conjuntos de datos que individualmente no son sensibles pueden, al combinarse, generar un conjunto de información altamente crítico para la empresa. La convergencia de las redes IT y OT obliga a replantear las estrategias de gestión de riesgos basándose en la Tríada CIA[10]: Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad. Mientras que en los sistemas informáticos (IT) la confidencialidad suele ser la prioridad, en los entornos de operaciones (OT) la disponibilidad y la integridad de los sistemas son absolutamente críticas (EPRI, 2024).

3.4.3 Ciberseguridad y cumplimiento de la normativa

Para proteger el ecosistema corporativo, la estrategia más eficiente es implementar un enfoque de "seguridad desde el diseño" (*secure-by-design*) desde la fase conceptual de los proyectos. Este marco de seguridad debe respaldarse con auditorías, las cuales proporcionan evidencias en caso de procesos legales, demostrando que la empresa no incurrió en negligencias al proteger sus sistemas. Finalmente, la incursión en la inteligencia artificial plantea importantes desafíos regulatorios al considerar simultáneamente la tecnología nuclear y la propia IA operativa. Organismos como la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) de Estados Unidos están diseñando estrategias para abordar esta realidad, destacando una clasificación de los algoritmos en cuatro niveles en función de su grado de autonomía respecto a la intervención y decisión humana. Como señala el *Electric Power Research Institute*: «La inteligencia artificial no es solo una herramienta de eficiencia, sino un nuevo vector de ataque que requiere una defensa multicapa basada en la integridad absoluta de los datos» (EPRI, 2024, p. 14). Este nuevo paradigma exige que las propias entidades reguladoras y empresas establezcan planes de formación e intercambio de conocimiento para garantizar que se puedan evaluar y supervisar estas tecnologías con plenas garantías de seguridad (EPRI, 2024).

[10] Modelo fundamental de la seguridad de la información, utilizado por las empresas para diseñar sus políticas de seguridad y proteger sus activos

IV. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE IA EN LA ACTUALIDAD

A partir de este capítulo se establece el marco teórico y conceptual de la inteligencia artificial (IA) aplicada al entorno empresarial y operativo. Para comprender su impacto, es necesario analizar la transición estratégica desde los sistemas de Inteligencia de Negocio tradicionales hacia modelos de IA predictiva, destacando cómo el aprendizaje automático y los sistemas expertos están redefiniendo la toma de decisiones. Asimismo, se exploran los diferentes niveles de autonomía operativa en infraestructuras críticas y la vital importancia de la gestión del cambio organizacional para integrar estas tecnologías con éxito, mitigando la resistencia del capital humano (Moreno Izquierdo, 2025; OIEA, 2025).

4.1 Innovación tecnológica y ventaja competitiva

La evolución tecnológica actual ha marcado un antes y un después en la gestión empresarial, cambiando el enfoque de la Inteligencia de Negocio tradicional hacia la adopción de la inteligencia artificial como motor clave de innovación estratégica. Según Moreno Izquierdo (2025), esta transición representa un verdadero cambio de paradigma, donde la capacidad de procesar enormes volúmenes de datos diversos y complejos permite a las empresas desarrollar estrategias basadas en evidencias con una precisión y eficiencia sin precedentes.

4.1.1 De la Inteligencia de Negocio a la IA Predictiva

En cuanto a la ventaja competitiva, la integración de modelos de aprendizaje automático y algoritmos avanzados actúa como un catalizador para la eficiencia operativa, ayudando a identificar patrones y anomalías que serían difíciles de detectar con métodos convencionales. Esta capacidad predictiva transforma la toma de decisiones, pasando de un enfoque reactivo a uno proactivo y orientado al futuro, lo que refuerza la agilidad corporativa y la gestión del riesgo. Además, la aplicación de la IA en áreas críticas como el costeo de proyectos y la optimización de recursos no solo mejora el rendimiento financiero, sino que también fomenta una cultura de innovación continua en las prácticas de gestión, asegurando la sostenibilidad de la ventaja competitiva en esta era digital.

La verdadera ventaja competitiva se hace evidente al llevar la teoría a la práctica diaria de la empresa. En el mundo comercial, por ejemplo, la inteligencia artificial permite crear modelos analíticos que predicen cómo se comportarán los consumidores, basándose en los datos históricos que la organización ha acumulado. Un ejemplo claro de esto es la implementación de sistemas de *scoring* que evalúan la probabilidad de compra, ayudando a identificar qué clientes potenciales son clave para la estrategia de ventas. Al clasificar a los usuarios según su probabilidad de adquirir un producto o servicio, los equipos de ventas pueden enfocar sus esfuerzos de manera más efectiva, optimizando así su tiempo y maximizando el rendimiento financiero de las operaciones. Esta transición de un enfoque genérico a uno hiperpersonalizado y eficiente se convierte en un diferenciador clave frente a la competencia.

Sin embargo, pasar de la Inteligencia de Negocio a la inteligencia artificial no es posible sin una base sólida de información. El primer paso para cualquier automatización exitosa es una gestión adecuada de los datos operativos. Para que los algoritmos puedan detectar patrones y hacer predicciones confiables, las organizaciones deben apoyarse en Sistemas de Gestión del Conocimiento (KMS), que actúan como el repositorio del conocimiento organizacional a través de estructuras bien definidas. Estos sistemas facilitan el análisis del conocimiento almacenado para identificar tendencias, apoyando así el proceso de toma de decisiones estratégicas de manera continua y escalable (Moreno Izquierdo, 2025).

4.1.2 El factor humano y la gestión del cambio organizacional

El factor humano y la gestión del cambio organizacional son aspectos cruciales en el mundo actual. Es fundamental entender que la innovación tecnológica, por sí sola, no asegura una ventaja competitiva a menos que venga acompañada de una gestión del cambio efectiva. Cualquier cambio en los procesos tradicionales de una empresa puede generar resistencia entre los empleados, y superar esa resistencia puede ser complicado sin un apoyo firme de la dirección. La verdadera dificultad en la digitalización avanzada no se encuentra solo en la adopción de nuevas herramientas, sino en ayudar a los usuarios finales a superar su falta de conocimiento técnico. Para lograr una ventaja competitiva sostenible, las empresas deben abordar estas barreras a través de programas de formación adecuados, permitiendo que su capital humano vea la inteligencia artificial como un aliado estratégico en sus tareas diarias. Como señala Moreno Izquierdo (2025), «el éxito de la IA en organizaciones de alta fiabilidad no depende de la sofisticación del algoritmo, sino de la capacidad de la plantilla para realizar una supervisión crítica y ética de los resultados».

4.2 Aprendizaje automático y sistemas expertos

A modo de referencia sobre el alcance global de la IA en tecnologías nucleares, tal y como señala el OIEA (2022), la extraordinaria versatilidad de estas tecnologías ilustra su éxito en sectores alejados de la energía, como la agricultura y la salud. Es precisamente esta capacidad para procesar información compleja y aportar soluciones adaptadas lo que, dentro del marco corporativo y técnico del sector nuclear, se canaliza principalmente mediante el aprendizaje automático y el desarrollo de sistemas expertos.

4.2.1 Niveles de Autonomía Operativa

La clasificación de los niveles de autonomía en la industria nuclear se fundamenta en un marco evolutivo de cinco etapas. Este esquema permite trazar la transición desde la ausencia tecnológica hasta la independencia total de los sistemas, facilitando la comprensión de cómo la inteligencia artificial transformará la organización del trabajo:

NIVELES TEÓRICOS DE IA Y AUTONOMÍA	Posibles usos de la IA y la autonomía en actividades nucleares comerciales
Nivel 0: IA no utilizada	Sin integración de la inteligencia artificial o autonomía en los sistemas o procesos de planta.
Nivel 1: Asistencia (Toma de decisiones humana asistida por una máquina)	Integración de IA en los sistemas se utiliza para la optimización, la orientación operativa o la automatización de procesos comerciales que no afectan a la seguridad, la protección o el control de la planta.
Nivel 2: Colaboración (Toma de decisiones humana aumentada por una máquina)	Integración de IA en sistemas donde los algoritmos hacen recomendaciones que podrían afectar a la seguridad o el control de la planta, pero que son evaluadas y ejecutadas rigurosamente por un responsable humano.
Nivel 3: Operación (Toma de decisiones de la máquina supervisada por un humano)	Integración de IA y autonomía en sistemas donde los algoritmos toman decisiones y ejecutan operaciones que podrían afectar la seguridad y el control de la planta, pero siempre bajo la supervisión directa de un humano.
Nivel 4: Totalmente autónomo (Toma de decisiones de la máquina sin intervención humana)	IA totalmente autónoma en sistemas donde el algoritmo es responsable único de la operación, el control y la adaptación inteligente, sin depender de la intervención o supervisión humana en absoluto.

Tabla 1: Niveles teóricos de IA y autonomía en actividades nucleares comerciales. Elaboración propia a partir de: (OIEA,2025) y (NRC, 2023)

El impacto estratégico de esta escala radica en entender que, a medida que la tecnología avanza y se establece en áreas clave, la necesidad de intervención humana en las operaciones diarias de la planta disminuye gradualmente. Esto transforma de manera radical la estructura organizativa y operativa del sector (OIEA, 2025; NRC, 2023).

4.2.2 Gestión del riesgo y el modelo "Humano en el bucle [11]"

En el camino hacia una mayor automatización, los sistemas expertos están jugando un papel clave en el sector energético. Estos sistemas son herramientas informáticas que buscan imitar la capacidad de decisión de un experto humano. De acuerdo con el *Electric Power Research Institute* (2024), estamos viendo un crecimiento acelerado de estos sistemas, impulsado por la incorporación de la inteligencia artificial generativa y los modelos de lenguaje de gran escala (LLM[12]). Desde la perspectiva de la gestión de riesgos y la autonomía, es crucial analizar cómo

[11] Enfoque en el que una persona interviene en sistemas automatizados o de inteligencia artificial para supervisar, validar o corregir sus decisiones.

[12] *Large Language Model*: modelo de inteligencia artificial entrenado con grandes volúmenes de datos textuales, capaz de comprender, generar y procesar lenguaje natural.

estas tecnologías impactan en las operaciones. Mientras que las aplicaciones que apoyan el análisis, como la revisión de documentos o propuestas comerciales, presentan un riesgo relativamente bajo, el uso de algoritmos para controlar o ajustar directamente infraestructuras críticas implica un riesgo considerable, especialmente por las posibles repercusiones en la seguridad de las instalaciones y equipos. Por eso, desde un enfoque de dirección estratégica y gestión de infraestructuras, es fundamental mantener un modelo de "humano en el bucle"(*human-in-the-loop*). Esta medida asegura que las decisiones importantes siempre sean supervisadas y validadas por personal capacitado, garantizando que la búsqueda de eficiencia a través de la autonomía tecnológica no ponga en peligro la fiabilidad del servicio ni la seguridad de la empresa.

V. BENEFICIOS, LIMITACIONES Y RIESGOS DE LA IA COMO DECISIÓN ESTRATÉGICA EMPRESARIAL

La adopción de la inteligencia artificial representa una decisión estratégica de alto impacto para la viabilidad a largo plazo de las centrales nucleares. En este apartado se evalúan, desde una perspectiva financiera y de *management*, los beneficios directos sobre la rentabilidad operativa y la eficiencia en la evaluación de inversiones de capital (CAPEX). No obstante, la implementación de estas herramientas de vanguardia conlleva importantes retos estructurales, tales como la adaptación de las competencias del talento humano, los dilemas éticos y, de manera crítica, los riesgos asociados a la ciberseguridad industrial y el estricto cumplimiento normativo (Jafar y Muchran, 2025; Statista, 2024; EPRI, 2024).

5.1 Impacto en la estructura de costes y rentabilidad operativa

La inteligencia artificial ofrece un amplio abanico de oportunidades para el desarrollo de la energía nuclear. Gracias a su capacidad para mejorar la eficiencia, automatizar procesos, reforzar la seguridad y ejecutar mantenimiento predictivo, su adopción avanza con rapidez en distintas áreas del sector nuclear (Picot, 2023).

5.1.1 Rentabilidad y eficiencia en el entorno empresarial

Desde un enfoque de rentabilidad y eficiencia operativa, la inteligencia artificial se presenta como un motor clave para la transformación de las empresas. Aunque en 2023 solo alrededor del 10 % de las empresas españolas habían adoptado soluciones de IA, las proyecciones sugieren un crecimiento explosivo, con una penetración que podría llegar al 75 % para 2030. Este rápido avance está impulsado en gran medida por los grandes modelos de lenguaje (LLMs), que ya son utilizados activamente por más del 60 % de las organizaciones en 2024.

La razón financiera y estratégica detrás de estas inversiones es evidente: el 51 % de las empresas espera que la adopción de IA generativa aumente significativamente su eficiencia y productividad. Además, las expectativas de retorno de inversión se basan en la reducción directa de costes operativos (34 %), el fomento constante de la innovación empresarial (33 %) y la creación de nuevas fuentes de ingresos (30 %) (Statista, 2024).

5.1.2 Optimización operativa y ajuste dinámico de la producción

En el día a día, los operadores utilizan algoritmos de aprendizaje automático para monitorear en tiempo real y llevar a cabo mantenimiento predictivo. Estos modelos filtran enormes cantidades de datos de sensores, permitiendo que los analistas humanos se concentren en las irregularidades más relevantes en un mar de información. Así, el personal de inspección solo necesita revisar los datos que realmente importan. Esta tecnología no reemplaza el análisis humano, sino que lo complementa, ofreciendo resultados más precisos y rápidos, aunque aún requiere de la intervención humana, que sigue siendo esencial. Hoy en día, el aprendizaje automático ya se utiliza para detectar grietas en tuberías y tanques de metal en las plantas nucleares. Con su mayor precisión, reducción de costes y optimización de la supervisión humana, se promete aportar grandes beneficios al sector de la energía nuclear.

Desde el punto de vista de la rentabilidad, la IA tiene el potencial de aumentar la eficiencia y asegurar un suministro constante de electricidad al ajustar la generación en función de datos en tiempo real, como la demanda de los consumidores, las condiciones meteorológicas y el rendimiento de los equipos. Las tareas rutinarias podrían ser automatizadas mediante robótica y sistemas de IA, lo que permitiría que los humanos se enfoquen en tareas de mayor valor y mejoren la eficiencia de la planta. Además, esta tecnología tiene el potencial de mejorar el consumo de combustible y aumentar la producción de energía en los reactores. En este contexto, la inteligencia artificial, trabajando en conjunto con otras tecnologías emergentes como los gemelos digitales[13], podría ser clave para elevar la eficiencia en la producción de energía nuclear de manera integral. Estos funcionan como una representación virtual de un proceso u objeto físico, lo que permite a los gerentes y a los ingenieros simular situaciones reales y anticipar sus resultados de manera segura antes de implementar cualquier cambio en la planta física (Picot, 2023).

5.1.3 Valor de negocio y capacidades técnicas en centrales nucleares

Este apartado analiza los principales beneficios que la inteligencia artificial aporta a las plantas de energía nuclear, destacando tanto sus capacidades técnicas como su valor estratégico de negocio. A nivel de capacidades, la tecnología abarca desde modelos superficiales que resultan ideales para optimizar procesos y detectar fallos tempranos, hasta complejas redes de aprendizaje profundo que revolucionan la visión artificial, las tareas robóticas y la evaluación de grandes volúmenes de datos en inspecciones.

A esto se suma el procesamiento de lenguaje natural y los modelos de lenguaje grande (LLMs), los cuales permiten analizar enormes cantidades de texto para extraer información valiosa, resumir manuales y guiar a los trabajadores en sus prácticas diarias. Todo este despliegue tecnológico se traduce en un valor de negocio muy claro: las instalaciones logran resultados más rápidos y detectan anomalías de forma temprana. Esto impulsa la eficiencia operativa, la fiabilidad y la seguridad física de los empleados. Además, resulta ser una herramienta estratégica para gestionar los retos de la fuerza laboral, al reducir la necesidad de tener personal altamente calificado físicamente en la planta para ciertas tareas repetitivas (OIEA, 2025).

5.2 Evaluación de inversiones y análisis coste-beneficio

La evaluación de inversiones, también conocida como presupuesto de capital, es una herramienta de planificación que ayuda a asignar adecuadamente los recursos financieros entre los proyectos de inversión, con el objetivo de tomar las decisiones de inversión correctas y ayudar a medir la viabilidad del proyecto. En este proceso, la tecnología de IA actúa como una herramienta auxiliar o predictiva que puede mejorar la calidad de las estimaciones, reducir los

[13] Copia virtual de un sistema o objeto real que se actualiza con datos en tiempo real para simular, analizar y optimizar su funcionamiento.

errores en la toma de decisiones y acelerar el proceso de análisis de datos. (Jafar y Muchran, 2025).

5.2.1 Precisión predictiva en el presupuesto de capital

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la gestión financiera facilita el examen de los datos pasados y la evolución del mercado en tiempo real, lo que da como resultado predicciones más precisas y eficaces. Las tecnologías de inteligencia artificial y aprendizaje automático ofrecen soluciones convincentes, ya que pueden manejar grandes volúmenes de datos, detectar patrones y predecir tendencias futuras con un grado de precisión muy alto. De este modo, la tecnología de IA es capaz de identificar patrones y datos complejos, irregulares y de difícil acceso a los que no se puede acceder de forma manual o convencional, mejorando así la calidad y precisión de las decisiones de inversión. Asimismo, la aplicación de la IA en el costeo de proyectos basado en actividades (ABPC[14]) no solo mejora el rendimiento financiero del proyecto, sino que también impulsa la innovación en las prácticas generales de gestión de proyectos (Jafar y Muchran, 2025).

5.2.2 Modelos de escenarios y previsión del flujo de caja

Al implementar los modelos de aprendizaje automático (ML) impulsados por IA, las organizaciones pueden aprovechar el poder de estos algoritmos, lo que transforma la planificación de escenarios para proporcionar conocimientos más profundos, modelos predictivos y capacidades de toma de decisiones mejoradas directamente. La tecnología de inteligencia artificial puede ayudar con el pronóstico probabilístico y el modelado de escenarios, lo que permite a las organizaciones o empresas volverse más ágiles para abordar la incertidumbre de una manera más eficiente. Esto resulta fundamental, dado que los enfoques convencionales de previsión de flujo de caja a menudo pasan por alto los cambios rápidos del mercado, las crisis económicas y los riesgos específicos de la industria que son difíciles de superar. (Jafar y Muchran, 2025).

5.2.3 Desafíos de adopción y altos costes de infraestructura (CAPEX)

A pesar de sus ventajas, en la práctica, la adopción de la tecnología de IA en la planificación del presupuesto de capital en las empresas no se puede separar de los desafíos, como el hecho de que la tecnología de IA no puede ayudar completamente a mejorar la toma de decisiones. La implementación de la tecnología de IA requiere costes significativos, y las empresas también deben enfrentar desafíos en la preparación de recursos humanos, la integración de sistemas y los riesgos de seguridad de los datos. Uno de los mayores riesgos radica en que la falta de transparencia en estos sistemas ha planteado preocupaciones significativas sobre su uso en

[14] (*Activity-Based Project Costing*): metodología de costeo de proyectos que asigna los costes a las actividades específicas que los generan, permitiendo una estimación más precisa y granular del presupuesto de capital.

campos críticos como las finanzas y la atención médica, donde la transparencia en los procesos de toma de decisiones es de suma importancia. Finalmente, el uso de la tecnología de IA también presenta varios desafíos que deben abordarse, como la calidad de los datos, la legibilidad, el cumplimiento de las regulaciones, la supervisión humana y las consideraciones éticas. (Jafar y Muchran, 2025).

Para ilustrar la magnitud de estos altos costes mencionados anteriormente, es importante observar las proyecciones de inversión que requiere esta tecnología. El valor anticipado de los gastos de capital en centros de datos impulsados por la inteligencia artificial a nivel mundial, para el periodo entre 2025 y 2030, muestra cifras de inversión extremadamente altas. Estos gastos de capital se dividen principalmente en tres categorías fundamentales para el funcionamiento de la IA: la infraestructura del centro de datos, los equipos de tecnologías de la información y el suministro de energía (Statista, 2024).

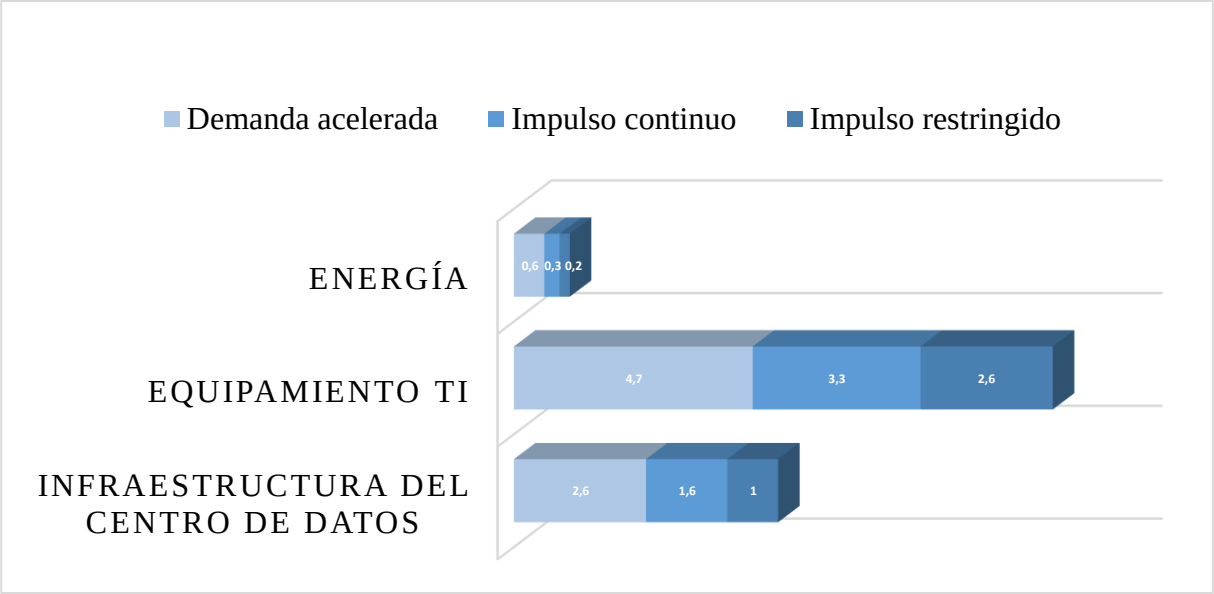


Figura 1. Valor previsto de los gastos de capital (CAPEX) en centros de datos impulsados por IA a nivel mundial entre 2025 y 2030, por categoría y escenario (en billones de dólares estadounidenses). Elaboración propia a partir de: (Statista, 2024)

5.3 Implicaciones organizativas y culturales

El éxito de las innovaciones tecnológicas en la industria nuclear no reside únicamente en la capacidad técnica, sino en una gestión organizativa que priorice la comunicación y el consenso. La literatura especializada (OIEA, 2025) subraya la importancia de fomentar una comunicación constante y fluida entre todas las partes interesadas para comprender tanto los beneficios esperados como las limitaciones reales de estas aplicaciones.

Para construir una confianza sólida en la tecnología, es imprescindible el trabajo conjunto entre expertos en la materia, el personal operativo de las plantas y las entidades reguladoras. Este esfuerzo colaborativo e interdisciplinario, sumado a una estrategia de despliegue gradual, constituye la garantía de que la inteligencia artificial se implemente con los más altos estándares de fiabilidad. Por su parte, los reguladores están realizando grandes avances para comprender

a fondo todas las implicaciones de esta tecnología, identificar sus riesgos potenciales e invertir en marcos de trabajo regulatorio que estén debidamente informados y preparados para el futuro.

5.3.1 Ética y el concepto de ENAI (Ethics of Nuclear and Artificial Intelligence)

La convergencia de las tecnologías nucleares y la inteligencia artificial podría exacerbar las preocupaciones éticas existentes y crear otras nuevas, lo que hace necesaria una nueva disciplina en esta interfaz conocida como Ética de las Tecnologías Nucleares y de Inteligencia Artificial.

Esta disciplina tiene como objetivo establecer una ética que se incorpore desde el principio en el diseño, desarrollo, despliegue y uso de aplicaciones de inteligencia artificial en el campo nuclear. De esta forma se contribuye a crear conciencia entre los profesionales sobre el impacto ético de estas tecnologías y se crean mecanismos para un diálogo sólido con las partes interesadas. Todo esto garantiza una toma de decisiones informada éticamente y aceptada por la sociedad, lo que en última instancia permite una gobernanza responsable de la inteligencia artificial en el ámbito nuclear (OIEA, 2022).

5.4 Gestión del talento y nuevas competencias

La integración de la Inteligencia Artificial en las organizaciones nucleares no solo requiere una actualización tecnológica, sino una transformación profunda del capital humano. Este proceso exige la definición de nuevas competencias digitales y analíticas que permitan a los empleados colaborar eficazmente con sistemas autónomos. La gestión del talento debe enfocarse en el *upskilling*[15] y *reskilling*[16] de la plantilla, garantizando que el conocimiento experto tradicional se fusione con las nuevas capacidades tecnológicas para mantener la excelencia operativa y la seguridad (Moreno Izquierdo, 2025; Ramos García-Nates, 2024).

5.4.1 Optimización operativa y reducción del error humano

Por otro lado, la inteligencia artificial mejora la interacción humano-computadora en la sala de control principal de las centrales nucleares, la cual es la base para que el operador perciba y controle eficientemente el estado de la planta.

El reconocimiento de voz y de gestos, con alta precisión y un tiempo de respuesta rápido, puede simplificar el proceso operativo y mejorar la eficiencia del operador. Esta interacción multimodal puede utilizarse precisamente para reducir la carga de trabajo del operador y lograr el efecto de disminuir los errores humanos. En los procesos de trabajo típicos tras un evento en la planta, las decisiones basadas en humanos no solo consumen mucho tiempo, sino que también

[15] Proceso de adquisición de nuevas competencias o la optimización de las ya existentes para que un trabajador sea más eficaz en su puesto actual

[16] Proceso de formación de un empleado para un nuevo puesto dentro de la empresa. Implica adquirir competencias totalmente diferentes porque su función anterior ha quedado obsoleta o porque las necesidades estratégicas de la organización han cambiado.

son propensas a errores y el procesamiento del lenguaje natural junto con la inteligencia artificial puede replicar este proceso humano de toma de decisiones, optimizando el análisis de informes y la generación de resultados (OIEA, 2022).

5.4.2 Transformación cualitativa de roles y el nuevo perfil profesional

La incorporación de la inteligencia artificial en el ámbito nuclear no busca reemplazar a los trabajadores, sino más bien transformar de manera cualitativa sus habilidades y funciones. Al encargarse de tareas repetitivas y de monitoreo constante, como la vigilancia continua de redes para detectar anomalías, la IA permite a los profesionales liberar un tiempo valioso. Desde la perspectiva de la gestión del talento, esto representa un cambio de paradigma: el personal técnico y de seguridad ya no se ocupa de labores rutinarias, sino que puede enfocarse en tareas más estratégicas, analíticas y en la coordinación de respuestas ante incidentes complejos. Por lo tanto, el nuevo perfil profesional que se necesita en la industria no solo debe dominar los procesos físicos de la planta, sino que también debe desarrollar habilidades para interactuar con herramientas algorítmicas, interpretar sus resultados y, lo más crucial, ejercer un juicio crítico que valide las recomendaciones de la máquina en comparación con la experiencia práctica (Hewes, 2023).

5.4.3 La escasez del talento y la formación corporativa

La adopción de la inteligencia artificial presenta un reto considerable en la gestión de recursos humanos, especialmente cuando se trata de atraer y retener talento especializado. En el contexto español, el mercado laboral muestra una notable juventud en la fuerza de trabajo relacionada con los datos y la inteligencia artificial; en 2023, un 67,5 % de estos profesionales tenía menos de dos años de experiencia, mientras que solo un 6,7 % contaba con una trayectoria consolidada de entre cinco y diez años. Esta falta de perfiles senior se ve agravada por la escasez de especialistas en áreas técnicas críticas, donde se observan déficits del 28,5 % en ingenieros de Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP[17]) y del 28,2 % en expertos en visión artificial, lo que representa una barrera estructural para la adopción de estas tecnologías. De hecho, la falta de talento y habilidades técnicas se convierte en una barrera estructural, afectando al 23 % de las empresas españolas en sus esfuerzos por implementar IA generativa. Por lo tanto, es crucial que la dirección de recursos humanos priorice planes de formación continua (*reskilling* y *upskilling*) para cerrar esta brecha y garantizar la competitividad tecnológica de la organización (Statista, 2024).

5.5 Riesgos regulatorios, reputacionales y de ciberseguridad

A pesar de los beneficios operativos, el despliegue de la IA introduce una nueva matriz de riesgos que la dirección estratégica debe gestionar proactivamente. Los riesgos regulatorios surgen de la necesidad de cumplir con normativas en constante evolución, mientras que los riesgos reputacionales se vinculan a la percepción pública sobre la seguridad de una IA autónoma. No obstante, el desafío más crítico es la ciberseguridad, ya que la apertura de los

[17] Rama de la inteligencia artificial que se ocupa de la interacción entre las computadoras y el lenguaje humano

sistemas de la planta a algoritmos inteligentes aumenta la superficie de ataque y exige protocolos de defensa multicapa extremadamente rigurosos (EPRI, 2024; NRC, 2023).

5.5.1 Desafíos técnicos, algorítmicos y medioambientales

Las herramientas de inteligencia artificial ofrecen capacidades avanzadas que permiten redactar textos complejos, mantener conversaciones fluidas y crear elementos visuales y audiovisuales de forma totalmente automatizada. Sin embargo, a pesar de su tremendo potencial, la adopción de estas tecnologías presenta importantes desafíos técnicos y éticos que deben ser gestionados con precaución. Uno de los problemas más debatidos es el desafío conocido como la "caja negra". Este concepto hace referencia a la profunda opacidad de los procesos internos de las redes neuronales, lo que impide comprender exactamente qué camino lógico o matemático sigue el algoritmo para llegar a una conclusión o decisión determinada. A esta falta de trazabilidad se suma el riesgo de las "alucinaciones", un fenómeno problemático en el que el modelo, al desconocer la información real sobre un tema, inventa respuestas o datos y los presenta con total seguridad. Por otro lado, el impacto ambiental y la sostenibilidad representan un reto mayúsculo, ya que el entrenamiento de estos modelos de lenguaje requiere una cantidad de energía gigantesca. Como referencia, el entrenamiento del modelo *GPT-3* llegó a consumir 1.287 GWh, lo que equivale a más de una hora de producción ininterrumpida de una central nuclear.

Finalmente, la seguridad de los datos es un factor crítico en el entorno industrial. Resulta imperativo no introducir información confidencial o sensible en herramientas de IA abiertas o públicas. Esta precaución es fundamental para evitar brechas de privacidad y seguridad, ya que, al utilizar plataformas externas, se pierde el control sobre dónde y cómo viaja o se almacena esa información corporativa (López Alonso, 2025)

5.5.2 Ciberseguridad y cadena de suministro

Desde la perspectiva de la seguridad corporativa, la digitalización sumerge a la organización en una constante "carrera armamentística" tecnológica, ya que los ciberdelincuentes también utilizan la inteligencia artificial para hacer sus ataques más sofisticados, automatizar la creación de malware y eludir los controles al imitar el comportamiento de usuarios legítimos. Uno de los riesgos operativos más críticos es la dependencia de la calidad de los datos; si los datos de entrada son manipulados de manera maliciosa (*data poisoning*[18]), el sistema inteligente podría generar lecturas erróneas y engañar a los operadores de la instalación.

Además, desde la perspectiva de la gobernanza corporativa, reemplazar los sensores físicos tradicionales con modelos predictivos de inteligencia artificial plantea un serio problema de confianza, dada la falta de transparencia en los algoritmos y en su capacidad de explicación. Si la dirección y los organismos reguladores no pueden auditar cómo y por qué una máquina ha

[18] Tipo de ciberataque que consiste en la manipulación malintencionada de los datos de entrenamiento de un modelo de inteligencia artificial.

tomado una decisión relacionada con la seguridad, se vuelve imposible asegurar la integridad del sistema. Por lo tanto, a pesar de los avances tecnológicos, procesos esenciales como la protección física y el control de materiales nucleares requieren, sin duda, la supervisión y la intervención humana como la última línea de defensa (Hewes, 2023).

La adopción de la inteligencia artificial va más allá de las fronteras internas de las organizaciones, afectando de manera directa la gestión estratégica de la cadena de suministro. Las infraestructuras energéticas dependen de redes globales de proveedores de *software* y componentes. Si uno de estos proveedores utiliza herramientas de IA de manera insegura (como incorporar código generado por IA con vulnerabilidades no detectadas), el riesgo se transmite automáticamente a lo largo de toda la cadena de valor. Por eso, desde la perspectiva de compras y cumplimiento corporativo, es crucial establecer auditorías rigurosas que exijan a los proveedores ser transparentes sobre cómo entrenan y despliegan sus modelos de IA, asegurando que no se introduzcan dependencias críticas o vulnerabilidades de terceros en los sistemas de tecnología operativa (OT) de la empresa.

En el ámbito operativo, la verdadera revolución de la IA Generativa no se encuentra en la automatización industrial directa, sino en la transformación radical de las operaciones de seguridad (*SecOps*[19]) y la gestión del conocimiento técnico. La enorme cantidad de alertas de seguridad y la complejidad de los manuales de equipos técnicos a menudo superan la capacidad de los analistas humanos. Los modelos de lenguaje de gran escala (LLM) funcionan como aceleradores de productividad: ayudan en el triaje inicial de incidentes, resumen la inteligencia de amenazas y facilitan la consulta interactiva de extensos repositorios documentales. Esta capacidad de síntesis no reemplaza al personal cualificado, sino que optimiza drásticamente sus tiempos de respuesta y análisis, permitiendo a la organización retener el conocimiento crítico (incluso ante la rotación de personal) y destinar sus recursos humanos a tareas de planificación estratégica y resolución de problemas complejos (EPRI, 2024).

ELEMENTOS DEL ANÁLISIS	FUNCIÓN: ANÁLISIS	FUNCIÓN: AUTOMATIZACIÓN	FUNCIÓN: SISTEMAS EXPERTOS
Tipos de datos	Estructurados y no estructurados	Datos estructurados	Todo tipo de datos
Ataques a los datos	Robo o modificación de datos de análisis	Manipulación para cambiar la ejecución	Robo o modificación de entrenamiento
Ataques al modelo	Robo o modificación del código del modelo	Alteración del código de automatización	Robo de la lógica del modelo

[19] Enfoque metodológico y organizacional que busca la colaboración estrecha entre los equipos de seguridad y los equipos de operaciones.

Manipulación del usuario	Poco común	Aprobación de acciones erróneas	Inyección de *prompts* y *jailbreaking*[20]
Ataques a la salida	Robo o modificación de la respuesta	Salidas deficientes para mal funcionamiento	Manipulación de la respuesta final
Controles de ciberseguridad	• Arquitecturas defensivas • Protección de datos • Control de accesos	• Gestión de autorizaciones • Pruebas de *software* • Formación de usuarios	• Anonimización y sanitización • Garantía de calidad • Concienciación técnica

Tabla 2: Vectores de ataque y controles de ciberseguridad según la función del sistema de IA. Elaboración propia a partir de: (EPRI, 2024)

5.5.3 Cumplimiento normativo y marcos de gobernanza (NIST)

A pesar de los evidentes beneficios operativos, la incorporación de la inteligencia artificial en el mundo empresarial enfrenta importantes desafíos relacionados con el riesgo y la regulación. En el contexto corporativo español, el cumplimiento normativo se destaca como la principal barrera para la adopción de la IA generativa, siendo identificado así por el 46% de los líderes empresariales y tecnológicos en 2024. Al mismo tiempo, la complejidad de estas tecnologías provoca que el 36% de las organizaciones se vean frenadas en sus proyectos debido a la dificultad de gestionar los riesgos asociados. Esta situación pone de manifiesto una vulnerabilidad estratégica: la falta de modelos de gobernanza tecnológica sólidos, una deficiencia que limita el progreso de la IA en el 31% de las empresas. Por lo tanto, es crucial que la alta dirección establezca marcos de control y auditoría que aseguren la trazabilidad algorítmica y el cumplimiento estricto de las normativas legales vigentes, protegiendo así a la organización de posibles contingencias legales y daños a su reputación (Statista, 2024).

Para manejar este ecosistema tecnológico que cambia rápidamente, la alta dirección no puede depender de políticas aisladas; necesita metodologías bien estructuradas que demuestren responsabilidad ante los accionistas y reguladores. Adoptar marcos normativos reconocidos a nivel internacional, como el *Artificial Intelligence Risk Management Framework* (AI RMF) del NIST, ofrece a las empresas una base sólida para gobernar, mapear, medir y gestionar los riesgos relacionados con la IA a lo largo de su ciclo de vida. Implementar un marco de este tipo garantiza que las decisiones tecnológicas estén alineadas con la tolerancia al riesgo de la empresa, los estándares éticos y los objetivos comerciales, lo que resulta en un despliegue de la IA que es innovador, seguro y fácil de auditar (EPRI, 2024).

[20] Proceso que elimina las restricciones impuestas por el fabricante para obtener el control total sobre el sistema operativo.

VI. ANÁLISIS EMPÍRICO: INTEGRACIÓN DE IA EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

Con el objetivo de contrastar el marco teórico desarrollado en los capítulos anteriores con la realidad operativa y estratégica del sector, este capítulo presenta un análisis cualitativo basado en entrevistas en profundidad realizadas a tres expertos de referencia en sus respectivos ámbitos. Los perfiles seleccionados representan tres perspectivas complementarias e igualmente relevantes para comprender el impacto de la inteligencia artificial en la industria nuclear: la visión del *operador de planta*, a través de David Martínez Veciana, Jefe de Ingeniería y miembro del Comité de Gobernanza y Estrategia de IA (CGEIA) de la Asociación Nuclear Ascó-Vandellós (ANAV); la visión del proveedor tecnológico global, a través de Javier Barroso Martín, Customer Solutions Manager de Westinghouse Electric Company; y la visión de la ingeniería consultora especializada, a través de Xavier Amorós Trías, On-site Manager de IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

El análisis se estructura mediante una triangulación temática que permite identificar convergencias, divergencias y matices entre los tres perfiles entrevistados. Las categorías analíticas se articulan en torno a siete bloques temáticos, directamente alineados con los objetivos e hipótesis de esta investigación: (1) estado actual de adopción de la IA; (2) iniciativas concretas y beneficios observados; (3) impacto estratégico y ventaja competitiva; (4) gobernanza, regulación y riesgos; (5) cultura organizativa y barreras de adopción; (6) gestión del talento y transformación del perfil profesional; y (7) perspectivas de futuro y recomendaciones estratégicas.

6.1 Estado actual de adopción de la Inteligencia Artificial

El primer punto de análisis se centra en cómo cada uno de los expertos percibe el grado de madurez de la IA en sus respectivos entornos. La comparación revela que, si bien existe un consenso general sobre el potencial transformador de esta tecnología, el ritmo y el carácter de la adopción difieren significativamente según el contexto institucional y el sector de actividad.

6.1.1 La "maduración responsable" en el entorno nuclear

Desde la perspectiva del operador nuclear, David Martínez Veciana describe la situación de ANAV como una fase de «maduración responsable», en contraposición a una irrupción disruptiva. En sus propias palabras, han «pasado de una visión exploratoria hacia un enfoque más sistemático donde priman la seguridad, la trazabilidad y la gobernanza tecnológica». Esta caracterización es especialmente significativa, pues subraya que en el sector nuclear la adopción de IA no puede disociarse de un marco estricto de validación técnica y regulatoria. El directivo precisa, además, que «en una central nuclear no podemos hablar de adopción masiva o disruptiva», diferenciando así el ritmo del sector de otras industrias.

6.1.2 La dualidad reto-oportunidad en el proveedor tecnológico

Javier Barroso Martín, desde Westinghouse, articula el estado de la IA a nivel global en términos de una dualidad: «es tanto un reto como una oportunidad». El reto reside en la

profunda transformación de procesos y formas de trabajo que la tecnología exige; la oportunidad, en la capacidad de hacer cosas nuevas y ser más eficientes. A diferencia de ANAV, cuya adopción está condicionada por la regulación nuclear, Westinghouse opera como empresa proveedora y desarrolladora, lo que le permite un ritmo de innovación mayor, aunque siempre bajo la restricción de que sus soluciones deben adaptarse a los exigentes entornos normativos de sus clientes. El entrevistado señala que una de las problemáticas emergentes más relevantes ha sido «la filtración de información», ya que el personal tendía a «subir documentación que no debe a sitios que no debe», lo que ha obligado a la empresa a invertir en gobernanza interna.

6.1.3 Adopción estimada en ingeniería y construcción

Xavier Amorós Trías ofrece la estimación cuantitativa más concreta de los tres entrevistados, cifrando el estado de adopción de la IA/ML en el sector de la ingeniería y la construcción «en un 40 % aproximadamente», entendida como la fracción de profesionales que hace uso habitual de estas herramientas en su trabajo diario. Esta cifra engloba un espectro amplio de sistemas, desde «IA perceptiva», hasta «generativa, agéntica y física». La perspectiva de IDOM es la más avanzada en términos de metodología de adopción, ya que la empresa parte, a diferencia de otras organizaciones, no de las herramientas disponibles, sino de los *casos de uso* previamente identificados (varios centenares, según el entrevistado), un enfoque que denomina la antítesis del «efecto Bricomanía[21]».

6.1.4 Convergencias y divergencias en el punto de partida

Los tres expertos coinciden en que la adopción de la IA en sus respectivos sectores es un proceso en curso, no acabado, y que su ritmo está condicionado tanto por factores internos (cultura organizativa, disponibilidad de datos, capacidad técnica) como externos (regulación, contexto geopolítico, madurez del mercado tecnológico). Sin embargo, divergen en el estado de partida: mientras ANAV se sitúa en una fase de exploración sistemática y controlada, Westinghouse despliega soluciones ya operativas para clientes globales, e IDOM trabaja desde una arquitectura metodológica basada en varios centenares de casos de uso identificados, con varias decenas de iniciativas ya activas. Esta gradación refleja, en buena medida, las diferencias inherentes entre el rol de operador, proveedor e ingeniero consultor.

6.2 Iniciativas concretas implementadas y beneficios observados

Un segundo eje de análisis aborda las iniciativas concretas que cada organización ha desarrollado o está desarrollando, así como los beneficios tangibles identificados y las limitaciones encontradas en la práctica. Este bloque permite contrastar la teoría con la evidencia empírica y ofrece una visión más granular del estado real de la tecnología en diferentes contextos de aplicación.

[21] Falsa ilusión de competencia y sencillez que se experimenta al ver a un experto realizar una tarea, te hace creer erróneamente que tú también posees las habilidades y la facilidad para hacerlo.

6.2.1 Iniciativas en ANAV: bajo riesgo, alto aprendizaje

La estrategia de ANAV se articula bajo el principio de «bajo riesgo y alto aprendizaje», lo que se traduce en pilotos focalizados y de alcance controlado. Entre las iniciativas exploradas destacan los «modelos de predicción de fallos basados en históricos», el uso de «NLP para análisis de informes de mantenimiento» y herramientas de «visión artificial para identificar corrosión». Los beneficios más tangibles residen en una «mayor capacidad de anticipación frente a modos de fallo complejos» y una «menor carga analítica para los equipos», que libera tiempo para tareas de mayor valor añadido. No obstante, el directivo es particularmente claro sobre las limitaciones: «La IA no es aceptable si no es explicable», y añade que «integrar sistemas modernos con infraestructuras industriales antiguas es complejo». La calidad del dato emerge como un reto estructural y continuo.

6.2.2 Iniciativas en Westinghouse: de la búsqueda documental a la modificación de diseño

Westinghouse ha desarrollado dos líneas de iniciativa diferenciadas. La primera, orientada a los clientes, consiste en un sistema de búsqueda semántica sobre documentación histórica generada por el grupo de propietarios de reactores PWR[22] en más de 20-25 años. Según el entrevistado, esta herramienta no solo agiliza la búsqueda, sino que «encuentra mucho más de lo que el usuario había identificado previamente». La segunda iniciativa, circunscrita al mercado estadounidense, integra agentes de IA en el proceso de desarrollo de paquetes de modificación de diseño, permitiendo al sistema ofrecer «recomendaciones históricas basadas en modificaciones similares» y realizar cálculos de apoyo a los ingenieros. A nivel interno, el uso corporativo de *Microsoft Copilot* ha permitido optimizar las tareas administrativas del día a día. El principal beneficio identificado es la «difusión y búsqueda rápida de información», que acelera significativamente los procesos de trabajo.

6.2.3 Iniciativas en IDOM: hacia la gestión integral de la obra

En el caso de IDOM, las iniciativas activas en gestión de proyectos sobre el terreno se concentran en cuatro grandes áreas: la gestión de la configuración en modelos BIM durante la construcción, el etiquetado automático de fotografías de obra, la gestión administrativa mediante transcripción automática y generación de actas de reunión, y la prevención de riesgos laborales. El entrevistado señala que «los beneficios más tangibles ahora mismo son los relacionados con la gestión administrativa y el seguimiento y cumplimiento normativo». Sin embargo, reconoce que muchos procesos están aún en una etapa que denomina de «*Brown field*», en la que se añade IA a procesos ya existentes, sin que aún se haya llegado a la fase de «*Green field*», donde los procesos se diseñan desde cero con la IA integrada, y donde prevé que se produzca «el mayor impacto».

6.2.4 Lectura comparada de beneficios y limitaciones

A pesar de las diferencias en los contextos de aplicación, emergen patrones comunes en los beneficios observados: los tres entrevistados destacan la capacidad de la IA para gestionar

[22] *Pressurized Water Reactor:* tipo de reactor nuclear más común, representando más de la mitad de las centrales operativas

grandes volúmenes de información de forma más eficiente, reducir la carga analítica del personal y anticipar problemas. Las limitaciones también comparten un denominador común: la calidad e integración de los datos, la complejidad de conectar sistemas modernos con infraestructuras heredadas y la necesidad de mantener la supervisión humana en los procesos críticos.

6.3 Impacto estratégico y ventaja competitiva

El tercer bloque de análisis aborda una de las preguntas centrales de esta investigación: si la adopción de la IA puede traducirse en una ventaja competitiva sostenible para las organizaciones del sector nuclear y de la ingeniería. Las respuestas de los tres entrevistados revelan una visión matizada que va más allá de la tecnología en sí misma.

6.3.1 El impacto financiero desde la perspectiva del operador

David Martínez Veciana cuantifica el valor estratégico de la IA en términos concretos y directamente vinculados a la cuenta de resultados: «Un aumento del 0,1 % de disponibilidad puede significar cientos de miles de euros al año» y «si la IA ayuda a evitar un fallo de un equipo crítico, el retorno puede ser de millones». Esta cuantificación ilustra cómo, en un entorno de altos costes fijos como el nuclear, pequeñas mejoras operativas generan un impacto económico desproporcionadamente elevado. Más allá de la dimensión financiera, el directivo subraya un beneficio de naturaleza estratégica: la IA «ayuda a reducir incertidumbre, y la incertidumbre es costosa». Sin embargo, su visión sobre la ventaja competitiva es particularmente reveladora para los propósitos de esta investigación: «sí, pero no por la tecnología en sí misma». La ventaja, afirma, provendrá de la gestión de los datos, la integración en procesos existentes y la preparación de los equipos. Su conclusión es contundente: «la tecnología no es el reto; el reto es la organización y la gobernanza».

6.3.2 La ventaja competitiva del proveedor: infraestructura propia y conocimiento del caso de uso

Javier Barroso Martín sitúa la ventaja competitiva de Westinghouse en dos dimensiones. Por un lado, en el desarrollo de una infraestructura tecnológica propia que garantiza la seguridad y confidencialidad de los datos sensibles de sus clientes, diferenciándose así de las soluciones generalistas disponibles en el mercado. Por otro lado, en el profundo conocimiento del sector y de la documentación técnica nuclear, que permite entrenar y desplegar sistemas de IA con un nivel de especificidad y precisión que otros actores no pueden replicar fácilmente. En este sentido, Westinghouse transita de ser un proveedor de equipos y servicios nucleares a convertirse, también, en un proveedor de capacidades digitales avanzadas para la industria.

6.3.3 IDOM y el conocimiento del caso de uso como ventaja estratégica

Xavier Amorós Trías comparte la visión de que la ventaja competitiva no reside en la tecnología, sino en el conocimiento previo de los casos de uso. Usando la analogía de la ferretería, el directivo argumenta que «resulta mucho más fundamental conocer bien el trabajo que tienes que realizar para después ir a la ferretería a seleccionar las mejores herramientas»,

advirtiendo sobre lo que en IDOM denominan «efecto Bricomanía»: adquirir herramientas caras y complejas sin saber después dónde aplicarlas. No obstante, reconoce que «la capacidad de integrar esos sistemas de IA es y será una ventaja competitiva para IDOM», especialmente cuando los procesos de obra se diseñen de cero con la IA integrada desde el inicio (etapa *Green field*).

6.4 Gobernanza, regulación y gestión de riesgos

La dimensión regulatoria y de gobernanza constituye uno de los ejes de mayor tensión en la adopción de la IA, especialmente en sectores críticos. El análisis comparado muestra cómo las tres organizaciones han desarrollado respuestas diferenciadas ante un marco normativo en proceso de definición.

6.4.1 El marco regulatorio nuclear: acelerador y freno simultáneos

David Martínez Veciana ofrece una caracterización paradójica pero precisa del impacto regulatorio: «El marco regulatorio es un acelerador y un freno a la vez». La regulación marca el camino, pero exige un nivel de control, trazabilidad y explicabilidad que ralentiza el ritmo de adopción. Los organismos supervisores —OIEA, NRC, CSN— están definiendo principios para el uso de IA en entornos nucleares, aunque todavía no existen «criterios cerrados de licenciamiento». En este contexto, el principio innegociable que rige la estrategia de ANAV es que «ningún modelo puede tomar decisiones autónomas» y que «todo modelo debe ser auditable». El CGEIA actúa como el órgano central que vela por el cumplimiento de estos principios, definiendo el marco de gobernanza, priorizando casos de uso y coordinando la formación del personal. La premisa que articula todo el sistema de gobernanza se resume en una frase del entrevistado: «sin control y sin trazabilidad no hay IA aceptable en un entorno nuclear».

6.4.2 La gobernanza multidisciplinar en Westinghouse

Westinghouse ha articulado su respuesta al reto regulatorio y de gobernanza a través de la creación de un comité de supervisión del uso de IA, de carácter deliberadamente multidisciplinar. El entrevistado subraya que este carácter es «crítico para obtener los resultados deseados», ya que el comité integra no solo al área de IA y al equipo de sistemas y ciberseguridad, sino también a áreas transversales como legal, control de exportaciones, formación y calidad. Esta visión holística refleja la comprensión de que la IA «tiene implicaciones mucho más allá» del ámbito puramente tecnológico. Westinghouse ha traducido estos principios en procedimientos obligatorios de formación y en el desarrollo de una infraestructura propia que garantiza que los datos de clientes no lleguen a manos de terceros.

6.4.3 El Reglamento de IA de la UE como marco de referencia en IDOM

IDOM introduce una perspectiva regulatoria diferenciada al situar el Reglamento de IA de la Unión Europea como el marco normativo de referencia. Como empresa europea, el entrevistado afirma que están obligados a «seguir escrupulosamente las normativas al respecto». Esta orientación se ha materializado en el desarrollo de una «Política de uso responsable de sistemas

de IA en IDOM», vigente desde hace dos años, que clasifica los sistemas de IA por nivel de riesgo (inaceptable, alto, medio y bajo) y establece procedimientos específicos para cada categoría. Además, la empresa se encuentra en proceso de obtención de la ISO 42001 «Sistema de gestión de IA», que facilita la gestión eficaz de todos los aspectos relacionados con la trazabilidad y la fiabilidad de las decisiones apoyadas en IA.

6.4.4 Convergencias en la gestión del riesgo

Más allá de las diferencias en los marcos regulatorios de referencia de cada organización, los tres entrevistados convergen en la identificación de los mismos vectores de riesgo: la falta de explicabilidad de los modelos (el problema de la «caja negra»), la ciberseguridad como superficie de ataque en expansión, el riesgo reputacional asociado a un error de la IA en entornos críticos y la dependencia excesiva de los sistemas algorítmicos en detrimento del juicio técnico humano. Esta convergencia valida la hipótesis de que los retos de gobernanza de la IA trascienden los sectores específicos y responden a vulnerabilidades estructurales comunes.

6.5 Cultura organizativa y barreras de adopción

La dimensión cultural y organizativa emerge con especial fuerza en los tres testimonios como el factor que, en mayor medida, condiciona el éxito o el fracaso de la adopción de la IA. La tecnología, en sí misma, aparece como el elemento menos problemático.

6.5.1 La confianza como barrera principal en el entorno nuclear

David Martínez Veciana identifica la confianza como «la principal barrera» en una industria que depende «profundamente del control humano y de procedimientos extremadamente precisos». La introducción de tecnologías «no deterministas» —es decir, sistemas cuyas salidas no son perfectamente predecibles ni completamente trazables— genera una resistencia inicial comprensible en un entorno donde el error tiene consecuencias potencialmente catastróficas. Sin embargo, el directivo señala que esta resistencia se supera cuando «la gente ve que la IA no quita control, sino que les da más información». Este cambio de percepción es, a su juicio, el verdadero detonante de la transformación cultural, y no puede lograrse mediante imposición, sino a través de la transparencia, la formación y la participación del personal en el diseño de las soluciones.

6.5.2 La gestión del cambio como denominador común

Javier Barroso Martín conecta explícitamente las barreras culturales con la gestión del cambio, señalando que «no es solo un tema de la inteligencia artificial, sino que viene incluso con la digitalización». El directivo identifica un patrón recurrente: muchos usuarios, al recibir el primer resultado de un sistema de IA que no es el esperado, concluyen que «no vale, es que no es bueno», sin cuestionar si la pregunta formulada era la correcta o si el sistema disponía del conocimiento necesario para responderla adecuadamente. Este fenómeno, que el entrevistado compara con el uso incorrecto de una fórmula en Excel, genera una «barrera cultural» que solo puede superarse mediante una metodología clara de uso y una actitud de espíritu crítico. Su

analogía es ilustrativa: «Si escribimos mal en una fórmula, el resultado que nos va a dar es malo». La IA no es diferente: requiere ser interrogada correctamente para producir resultados válidos.

6.5.3 La barrera de acceso como factor temporal en ingeniería

Xavier Amorós Trías adopta una perspectiva de largo plazo sobre la barrera cultural, argumentando que en la actualidad los sistemas de IA son un «producto» visible y diferenciado, lo que eleva su «barrera de potencial». Sin embargo, anticipa que, en los próximos años, la IA «pasará a ser una funcionalidad invisible integrada en todos nuestros productos y servicios», lo que reducirá progresivamente la barrera de acceso «hasta desaparecer completamente». Esta visión resulta especialmente pertinente en el contexto de equipos multidisciplinares e internacionales en obra, donde tecnologías como la traducción simultánea en tiempo real podrían reducir radicalmente los malentendidos y la necesidad de reingeniería.

6.6 Gestión del talento y transformación del perfil profesional

El sexto bloque analiza cómo la incorporación de la IA está redefiniendo los perfiles profesionales y los requerimientos de talento en cada uno de los sectores representados. Las respuestas revelan una transformación en curso que, más que destruir empleos, está reconfigurando las competencias exigidas.

6.6.1 Del ingeniero tradicional al ingeniero-intérprete de IA

David Martínez Veciana describe una evolución hacia perfiles que combinan «ingeniería tradicional y competencias digitales». El nuevo profesional nuclear deberá ser capaz de «interpretar modelos de IA», gestionar datos operativos y ejercer un juicio crítico que valide las recomendaciones de la máquina frente a la experiencia práctica. Aparecen también nuevas especialidades antes inexistentes en las plantillas de las centrales, como la ciberseguridad industrial y la integración de sistemas heterogéneos. El directivo es taxativo al afirmar que «no se trata de sustituir perfiles, sino de ampliar capacidades», una posición coherente con la filosofía de «humano en el bucle» que caracteriza la estrategia de ANAV.

6.6.2 La irrupción de la IA generativa y el impacto en los perfiles administrativos

Javier Barroso Martín aporta una distinción fundamental que enriquece el análisis: la IA no es un fenómeno nuevo en la industria nuclear. Los «sistemas de reconocimiento de patrones para monitorización de vibraciones llevan más de 10 años en la industria», y al ser modelos matemáticos y estadísticos, son «muy entendibles por el perfil de ingeniero que prima en la industria». El verdadero cambio de paradigma proviene de la IA generativa, cuyo impacto recaerá principalmente sobre «los perfiles administrativos», tanto en el lado de los proveedores como de las plantas. El directivo anticipa que «va a ser necesario menos de esos perfiles», pero al mismo tiempo subraya que surgirá la necesidad de especialistas capaces de «alimentar y asegurarse de que la documentación a la que tiene acceso la IA generativa es buena». Su diagnóstico sobre el sector nuclear español es que «la adopción es más baja y el impacto más

aislado», aunque observa que en Estados Unidos «muchas plantas casi se han convertido en empresas de IT».

6.6.3 La IA invisible y el impacto en equipos de obra

Xavier Amorós Trías no aborda de forma extensa la transformación del perfil profesional individual, pero proyecta un impacto muy relevante en la dinámica de los equipos de obra multidisciplinares e internacionales. La visión de IDOM es que, a medida que la IA se integre de manera invisible en los productos y servicios del sector, su adopción dejará de ser percibida como un cambio de perfil y pasará a ser simplemente parte del trabajo cotidiano. En este sentido, el cambio no es tanto en el perfil formal del profesional como en las herramientas con las que trabaja y en la capacidad de sacarles partido.

6.7 Perspectivas de futuro y recomendaciones estratégicas

El séptimo y último bloque recoge las visiones prospectivas y las recomendaciones estratégicas que los tres expertos ofrecen a organizaciones que buscan iniciar o acelerar su proceso de adopción de IA. La confluencia de sus perspectivas dibuja una hoja de ruta con elementos comunes, pero también con énfasis diferenciados según el rol de cada organización.

6.7.1 Las tecnologías con mayor potencial y recomendaciones para un despliegue responsable

Los tres entrevistados coinciden en señalar los gemelos digitales integrados con datos en tiempo real y la visión artificial como las tecnologías con mayor potencial de transformación en los próximos cinco a diez años. David Martínez Veciana añade a esta lista la IA explicable (XAI), que considera indispensable en entornos regulados, y los sistemas de NLP para el análisis de documentación masiva. Javier Barroso Martín pone el acento en la integración de agentes de IA en los flujos de trabajo técnicos, como los procesos de modificación de diseño. Xavier Amorós Trías destaca, además, el reconocimiento de voz para la captura instantánea de experiencia operativa en obra, la traducción simultánea para equipos multinacionales y los sistemas de IA física —más allá de los drones— para la realización de actividades de riesgo o automatizables, como movimientos de tierras, trabajos en altura o en espacios confinados.

Las recomendaciones estratégicas de los tres expertos son coherentes entre sí y apuntan en la misma dirección. David Martínez Veciana sintetiza su hoja de ruta en tres principios: «empezar pequeño, pensar grande»; establecer una «gobernanza sólida desde el primer día»; e invertir en talento y cultura, no solo en herramientas. Su consejo más profundo es que la organización debe «entender que la IA no es un fin: es un medio para mejorar seguridad, eficiencia y toma de decisiones».

Javier Barroso Martín recomienda, ante todo, «tener muy claro qué quieres conseguir», ya que la claridad sobre el objetivo permite seleccionar el enfoque tecnológico más adecuado. Distingue entre necesidades administrativas generalistas —para las cuales una herramienta corporativa como *Copilot* puede ser suficiente— y necesidades técnicas o de documentación

sensible —para las cuales puede ser necesario desarrollar infraestructura propia o recurrir a soluciones dentro de servidores privados—. En su opinión, la adopción futura está garantizada; la incertidumbre reside únicamente en los plazos, que estarán determinados por el ritmo al que la regulación de cada país permita el uso de estas tecnologías.

Xavier Amorós Trías, por su parte, recomienda situar los casos de uso como punto de partida estratégico, antes que las herramientas. La lógica de IDOM —identificar primero el reto y después seleccionar la tecnología adecuada para resolverlo— es una recomendación extrapolable a cualquier organización que quiera evitar el «efecto Bricomanía». Su visión sobre el futuro inmediato es que la irrupción de la IA como funcionalidad invisible en productos y servicios reducirá drásticamente la barrera de acceso, democratizando el uso de estas tecnologías en entornos de obra que hasta ahora habían permanecido ajenos a la transformación digital.

6.8 Síntesis del análisis empírico

El análisis temático cruzado de las tres entrevistas permite extraer una serie de conclusiones empíricas que enriquecen y matizan el marco teórico desarrollado en los capítulos anteriores. En primer lugar, se confirma que la adopción de la IA en el sector nuclear y en la ingeniería especializada es un proceso gradual, heterogéneo y condicionado tanto por factores tecnológicos como organizativos, culturales y regulatorios. En segundo lugar, la ventaja competitiva derivada de la IA no reside en la tecnología en sí, sino en la capacidad de las organizaciones para gestionarla con rigor: gobernanza sólida, datos de calidad, talento preparado y una cultura que integre la IA como aliada del juicio humano, no como sustituto de este.

En tercer lugar, emerge una coincidencia fundamental entre los tres perfiles: el modelo de «humano en el bucle» no es solo una exigencia regulatoria, sino una convicción estratégica compartida. La IA se despliega como una herramienta que amplifica las capacidades humanas, pero la responsabilidad sobre las decisiones críticas sigue y debe seguir recayendo en las personas. Esta coincidencia resulta especialmente significativa al provenir de organizaciones con roles tan distintos en la cadena de valor del sector.

Finalmente, el análisis revela que el principal freno a la adopción de la IA no es tecnológico ni financiero, sino cultural y organizativo. La gestión del cambio emerge como la competencia directiva más crítica en este proceso de transformación, por encima incluso del dominio técnico de las herramientas. Esta conclusión empírica conecta directamente con las implicaciones estratégicas y de *management* que se desarrollan en el capítulo siguiente.

VII. PROPUESTAS DE FUTURO DE ADOPCIÓN DE IA

A partir del análisis bibliográfico y las evidencias empíricas obtenidas en el caso de estudio, este capítulo formula recomendaciones estratégicas para la integración futura de la inteligencia artificial en el sector nuclear. Frente a los desafíos estructurales de un parque nuclear envejecido y los altos costes de mantenimiento, se propone una hoja de ruta gerencial donde la IA actúe como una aliada indispensable para garantizar la viabilidad económica y operativa. Se enfatiza la necesidad de un despliegue tecnológico ético, responsable y siempre orientado a potenciar, en lugar de sustituir, la capacidad crítica del capital humano (Castejón, 2008; Ramos García-Nates, 2024).

7.1 Desafíos estructurales y viabilidad económica del parque nuclear

El futuro del sector nuclear está marcado por una realidad económica y operativa que demanda una transformación significativa. Tal y como se menciona también en el primer apartado del marco teórico por la OIEA, alrededor de 200 de las 434 centrales en funcionamiento tienen entre 25 y 30 años, lo que genera serias dudas sobre su viabilidad a largo plazo sin inversiones masivas en renovación.

Esta situación estructural obliga a las organizaciones a realizar esfuerzos intensivos en capital, con inversiones de alto riesgo para la construcción de nuevas plantas, un capital que muchas empresas no están dispuestas a arriesgar en mercados liberalizados. A esta barrera financiera se suma la inestabilidad en la cadena de suministro del uranio, cuyo precio ha mostrado una alta volatilidad, y la falta de una solución definitiva para la gestión de residuos. En este contexto, cualquier propuesta de futuro para el sector debe enfocarse en una optimización extrema de la eficiencia operativa y una reducción de los costes de mantenimiento para asegurar que las plantas sigan siendo rentables y seguras (Castejón, 2008).

7.2 La Inteligencia Artificial como aliada estratégica en la gestión empresarial

Frente a la necesidad de mejorar la competitividad en un entorno de costes fijos elevados, la inteligencia artificial se presenta no como un fin en sí mismo, sino como una herramienta clave para potenciar las capacidades de la organización. Sin embargo, desde la perspectiva de la alta dirección, es fundamental entender que esta tecnología no es una "varita mágica" que garantice el éxito empresarial solo por ser implementada.

La nueva situación estratégica exige que las empresas utilicen la IA como una herramienta de apoyo para alcanzar nuevas metas de eficiencia, pero siempre manteniendo una actitud de alerta y responsabilidad. La verdadera ventaja competitiva para una central nuclear en el futuro no vendrá solo de la adopción de algoritmos avanzados, sino de la capacidad de sus líderes para tomar decisiones informadas que definan el presente y el futuro de la empresa, integrando la innovación tecnológica con los valores fundamentales de la organización (Ramos García-Nates, 2024).

7.3 Recomendaciones para un despliegue responsable y orientado a resultados

Para que la industria nuclear pueda navegar con éxito hacia esta nueva etapa digital, la dirección estratégica debe seguir una hoja de ruta basada en la prudencia y el enfoque en el negocio. En primer lugar, es imperativo evitar la adopción indiscriminada de tecnología; la dirección debe centrar sus esfuerzos en identificar problemas de negocio concretos y evaluar si la IA es la herramienta adecuada para resolverlos, midiendo siempre el retorno de la inversión y los riesgos asociados a largo plazo.

En segundo lugar, la esencia de la empresa debe seguir residiendo en su capital humano. La automatización y la digitalización deben servir para potenciar las habilidades de los trabajadores y líderes, quienes son el tejido único que da vida a la organización. Finalmente, cualquier propuesta de futuro debe mantener la ética empresarial y la humanidad como pilares inquebrantables, asegurando que la búsqueda de la rentabilidad a través de la tecnología no comprometa la integridad ni los valores que definen la existencia de la empresa en un sector tan sensible como el nuclear (Ramos García-Nates, 2024).

7.4 Ilustración cuantitativa: modelo de escenarios de impacto financiero

Con el fin de complementar el análisis cualitativo con una aproximación económica tangible, se ha elaborado un modelo de escenarios de carácter ilustrativo que traduce a magnitudes financieras concretas las valoraciones aportadas por los expertos entrevistados, en particular la cuantificación realizada por el responsable de ANAV. El modelo, desarrollado en detalle en el Anexo V, parte de supuestos explícitos y parámetros de mercado de dominio público, y no pretende sustituir un estudio cuantitativo riguroso, sino evidenciar la coherencia económica de los testimonios recogidos.

Tomando como referencia una central genérica de 1.000 MW, el ejercicio confirma que una mejora de tan solo 0,1 punto porcentual en la disponibilidad equivale a un beneficio anual cercano a los 500.000 euros, mientras que la prevención de un único fallo en un equipo crítico puede evitar pérdidas superiores a los 13,8 millones de euros. Articulado como decisión de inversión, un proyecto piloto de mantenimiento predictivo con un CAPEX de 1,2 millones de euros arrojaría, bajo supuestos prudentes, un Valor Actual Neto positivo de aproximadamente 514.000 euros a cinco años, una Tasa Interna de Retorno del 23 % y un periodo de recuperación inferior a tres años.

No obstante, el análisis de sensibilidad incorporado revela que esta rentabilidad no es incondicional: por debajo de un precio eléctrico aproximado de 52 €/MWh el proyecto dejaría de ser viable. Este matiz resulta especialmente significativo, pues refuerza la tesis central de esta investigación: el valor de la inteligencia artificial no reside en la tecnología en sí misma, sino en su despliegue contextualizado y en la capacidad de la organización para evaluar, con rigor financiero, cuándo y cómo invertir en ella.

VIII. CONCLUSIONES

La investigación confirma la hipótesis principal del trabajo: la adopción estratégica de sistemas de inteligencia artificial en centrales nucleares puede mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la gestión del riesgo, siempre que su implantación se lleve a cabo bajo un marco sólido de validación, supervisión humana y control regulatorio. Los tres casos analizados —ANAV, Westinghouse e IDOM— coinciden en señalar que la tecnología en sí misma no constituye la ventaja competitiva; lo es la capacidad organizativa para gestionarla con rigor.

En términos de impacto financiero, los expertos entrevistados cuantifican el retorno de forma contundente: un incremento de tan solo el 0,1 punto porcentual en la disponibilidad de planta puede traducirse en cientos de miles de euros anuales, mientras que la prevención de un fallo crítico mediante mantenimiento predictivo puede generar ahorros de varios millones. La inteligencia artificial actúa, en este sentido, como un reductor de incertidumbre sistémica; y la incertidumbre, en el entorno nuclear, tiene un coste directo y medible.

Desde la perspectiva de la dirección estratégica, la investigación identifica cinco palancas de gestión que determinan el éxito de la adopción de la inteligencia artificial en el sector. La primera es el establecimiento de una gobernanza tecnológica sólida desde el primer día, articulada mediante comités multidisciplinares, principios éticos explícitos y auditorías regulares de los modelos desplegados. La segunda es la gestión de la calidad del dato como prioridad absoluta, partiendo de la premisa de que ningún modelo de inteligencia artificial puede superar la calidad de los datos con los que ha sido entrenado. La tercera es la integración progresiva en procesos ya robustos, evitando la creación de flujos de trabajo paralelos y apostando por casos de uso acotados pero escalables. La cuarta es la inversión en talento y cultura organizativa, a través de programas de *upskilling* y *reskilling* que permitan a los equipos supervisar críticamente los resultados de los modelos. La quinta, innegociable en el contexto nuclear, es el mantenimiento de la supervisión humana activa, garantizando que ningún sistema de inteligencia artificial tome decisiones autónomas en áreas que afecten a la seguridad operativa.

La metodología cualitativa es la más adecuada ante la escasez de datos públicos sobre la adopción de la inteligencia artificial en el sector nuclear. La triangulación de tres perfiles expertos ha permitido contrastar la teoría con la realidad operativa, revelando matices organizativos, culturales y regulatorios que difícilmente podría haberse alcanzado mediante encuestas o análisis de datos secundarios. Para dotar al estudio de concreción económica, se incluye un modelo financiero ilustrativo (Anexo V) sobre una central de 1000 MW. Este escenario confirma que una mejora del 0,1 punto porcentual en la disponibilidad genera medio millón de euros de beneficio anual, con una TIR del 23 % en mantenimiento predictivo. No obstante, el análisis de sensibilidad vincula esta rentabilidad a los precios del mercado, validando empíricamente la conclusión cualitativa: la ventaja competitiva no reside en la tecnología, sino en su despliegue organizativo y su evaluación con rigor financiero.

No obstante, conviene precisar, la transferibilidad analítica: la posibilidad de que los patrones identificados resulten aplicables a entornos comparables cuando se verifica una suficiente similitud contextual. En este sentido, conclusiones como la centralidad del modelo de «humano en el bucle», el papel de la gobernanza como factor crítico de éxito o la calidad del dato como principal cuello de botella técnico no dependen del marco regulatorio específico de cada jurisdicción, sino que responden a vulnerabilidades estructurales comunes al despliegue de IA en infraestructuras críticas. Por ello, cabe esperar que mantengan su validez analítica en escenarios similares, correspondiendo al lector valorar el grado de proximidad contextual antes de trasladarlos a su propio entorno. Asimismo, la naturaleza exploratoria y cualitativa del trabajo impide establecer relaciones causales estadísticamente robustas entre la adopción de IA y los resultados empresariales, lo que abre la puerta a futuras investigaciones de carácter cuantitativo y longitudinal.

A partir de las limitaciones identificadas, se señalan cuatro líneas de investigación con potencial para profundizar en la comprensión del fenómeno estudiado. En primer lugar, un estudio longitudinal del retorno de la inversión en proyectos piloto de inteligencia artificial en centrales nucleares europeas, con métricas cuantitativas de disponibilidad, costes de mantenimiento y reducción de incidencias, permitiría validar empíricamente las estimaciones de impacto financiero recogidas en las entrevistas. En segundo lugar, un análisis comparativo del marco regulatorio aplicable a la inteligencia artificial en el sector nuclear entre diferentes jurisdicciones — Estados Unidos, Unión Europea, Francia y Japón — contribuiría a identificar mejores prácticas exportables y convergencias regulatorias. En tercer lugar, la investigación sobre el impacto de la inteligencia artificial generativa en la gestión del conocimiento institucional de las plantas, especialmente en contextos de alta rotación de personal experto, constituye una línea de trabajo de creciente relevancia. En cuarto lugar, el desarrollo de modelos de gobernanza adaptados a las pequeñas y medianas empresas proveedoras del sector nuclear, donde los recursos para implantar comités especializados son más limitados, respondería a una necesidad práctica todavía no suficientemente cubierta por la literatura.

En definitiva, la inteligencia artificial no representa, en el sector nuclear, una promesa de futuro, sino una realidad en construcción cuya consolidación depende menos de los avances tecnológicos — ya suficientemente maduros en muchos ámbitos — que, de la voluntad y la capacidad de las organizaciones para dotarse de las estructuras de gobernanza, el talento y la cultura organizativa necesarios para integrar estas herramientas de forma segura, explicable y orientada a resultados. Como ha quedado de manifiesto a lo largo de este trabajo, la tecnología no es el reto principal; el reto es la organización y la gobernanza.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Informes técnicos y de organismos / consultoras

Agencia Internacional de la Energía (AIE/IEA). (2022). *Nuclear power and secure energy transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems.* https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions

Electric Power Research Institute (EPRI). (2024). *Artificial intelligence and generative AI in the energy sector: Cyber security use-cases, considerations, and implications (Technical Brief No. 3002029821). EPRI.*

Foro de la Industria Nuclear Española. (2023). *Resultados nucleares y perspectivas.* https://www.foronuclear.org/resultados2023/

International Atomic Energy Agency (OIEA/IAEA). (2022). *Artificial intelligence for accelerating nuclear applications, science and technology.* https://www.iaea.org/publications/15198/artificial-intelligence-for-accelerating-nuclear-applications-science-and-technology

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). *Nuclear power reactors in the world (Reference Data Series No. 2).* https://www.iaea.org/publications/15485/nuclear-power-reactors-in-the-world

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2025). *Considerations for deploying artificial intelligence applications in the nuclear power industry (IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.26).* https://www.iaea.org/publications/15485/nuclear-power-reactors-in-the-world

National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial intelligence risk management framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1). U.S. Department of Commerce.* https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2024). *Artificial intelligence risk management framework: Generative artificial intelligence profile (NIST AI 600-1). U.S. Department of Commerce.* https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1

PricewaterhouseCoopers (PwC). (2023). *The intersection of AI and energy: Powering the digital economy. PwC Global Reports.*

Ramos García-Nates, R. (2024). *Claves sobre la inteligencia artificial para un empresario como tú. Nuevas tendencias, (111), 20–24.*

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2023). *Artificial intelligence strategic plan: Fiscal years 2023–2027 (NUREG-2261).* https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr2261/index

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2021). Data Science and Artificial Intelligence Regulatory Applications Workshops: Summary and Presentations.

Normas y estándares

International Organization for Standardization. (2023). *Information technology — Artificial intelligence — Management system (ISO/IEC 42001:2023). ISO.* https://www.iso.org/standard/42001

Artículos de revista académica

Jafar, F. A., & Muchran, M. (2025). *Analysis of the impact of artificial intelligence (AI) technology as a predictive tool in capital budgeting: Opportunities and challenges in the digital era. International Journal of Economic Research and Financial Accounting, 3(4), 892–897.*

Artículos en revistas y boletines profesionales o divulgativos

Hewes, M. (2023). *Cómo la inteligencia artificial cambiará la seguridad informática y la seguridad física de la información en el mundo nuclear. Boletín del OIEA, 14-15.*

López Alonso, A. (2025, septiembre). *La revolución de la IA: Transformando cómo nos comunicamos. Nuclear España.*

Picot, W. (2023). *Mejora de la producción de energía nucleoeléctrica gracias a la inteligencia artificial. Boletín del OIEA, septiembre, 18–19.*

Romera, E. (2023). *Inteligencia artificial, seguridad nuclear y protección radiológica. Nuclear España.*

Tesis

Moreno Izquierdo, R. (2025). *De la inteligencia de negocio a la inteligencia artificial (Tesis doctoral, Universidad Rey Juan Carlos).* https://burjcdigital.urjc.es/

Libros y publicaciones de entidad

Castejón, F. (2008). *Nueva situación y futuro de las centrales nucleares. Ecologistas en Acción*.

Bases de datos y portales web

Statista. (2024). *Artificial intelligence (AI) in Spain.* https://www.statista.com/study/173465/artificial-intelligence-ai-in-spain

X. ANEXOS

ANEXO I: Declaración de uso de inteligencia artificial generativa

Mediante el presente documento, yo, Ainhoa Pedraza Perales, declaro haber utilizado herramientas basadas en inteligencia artificial generativa, concretamente Gemini Pro, ChatGPT y Claude durante el proceso de elaboración de este Trabajo de Fin de Grado titulado "Impacto estratégico y organizativo de la Inteligencia Artificial en la industria nuclear", habiéndose limitado su uso estrictamente a finalidades de asistencia permitidas por la normativa académica, entre ellas la generación de ideas creativas y la estructuración inicial de contenidos, el apoyo para la comprensión y síntesis de conceptos técnicos complejos, así como la asistencia lingüística para la revisión ortotipográfica, la traducción y la mejora de la redacción, dejando constancia expresa de que toda la información generada por dichas herramientas ha sido rigurosamente revisada, validada y contrastada con fuentes bibliográficas y académicas fiables, y confirmando asimismo que mantengo en todo momento mi propio criterio analítico, la autoría intelectual y la responsabilidad total e indelegable sobre las conclusiones y resultados finales presentados en este trabajo

ANEXO II: Guion de las entrevistas a expertos

PRIMERA ENTREVISTA — ANAV (Ascó-Vandellós)

Entrevistado: David Martínez Veciana

Cargo: Jefe de Ingeniería en Planta de Ascó | Responsable del Proceso de Fiabilidad de Equipos (Ascó y Vandellòs) | Miembro del Comité de Gobernanza y Estrategia de Inteligencia Artificial (CGEIA) de ANAV

Propósito: Recopilar una visión experta sobre el impacto estratégico, operativo y organizativo de la Inteligencia Artificial en las centrales nucleares de Ascó y Vandellòs.

Preguntas:

- ¿Cómo describiría el estado actual de adopción de IA en Ascó y Vandellòs? ¿Qué áreas son más susceptibles de beneficiarse?
- ¿Qué proyectos o iniciativas concretas de IA se han explorado o implementado en ANAV? ¿Cuáles han sido los beneficios más tangibles y las limitaciones reales?
- Desde la dirección empresarial, ¿qué aporta la IA a la eficiencia, fiabilidad y rentabilidad? ¿Puede convertirse en ventaja competitiva sostenible?
- ¿Cómo afecta el marco regulatorio (OIEA, NRC, CSN) a la velocidad de adopción? ¿Cómo garantiza ANAV la trazabilidad y explicabilidad de sus modelos?
- ¿Qué barreras culturales y organizativas existen? ¿Cómo evoluciona el perfil profesional requerido?
- ¿Cuál es el papel del CGEIA? ¿Qué principios de gobernanza considera esenciales?

- ¿Qué tecnologías de IA tienen más potencial en los próximos 5-10 años? ¿Qué recomendaciones daría a otra organización?

SEGUNDA ENTREVISTA — WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY

Entrevistado: Javier Barroso Martín

Cargo: Customer Solutions Manager | Digital Transformation & Business Development in Nuclear

Propósito: Recopilar una visión experta sobre el impacto estratégico, operativo y organizativo de la IA desde la perspectiva de un proveedor tecnológico global de referencia en el sector nuclear.

Preguntas:

- ¿Cómo describiría el estado actual de adopción de IA en el sector nuclear a nivel global y en España desde la perspectiva de Westinghouse?
- ¿Qué proyectos, soluciones o iniciativas concretas de IA está desarrollando Westinghouse para sus clientes? ¿Qué beneficios y limitaciones se están observando?
- ¿Qué aporta la IA a la eficiencia, fiabilidad y rentabilidad de los activos nucleares? ¿Es una ventaja competitiva sostenible para Westinghouse?
- ¿Cómo afecta el marco regulatorio a la velocidad de innovación y despliegue de soluciones de IA? ¿Cómo garantiza Westinghouse la trazabilidad de sus algoritmos?
- ¿Qué barreras culturales perciben en las plantas? ¿Cómo está cambiando el perfil profesional con la incorporación de la IA?
- ¿Qué mecanismos de gobernanza interna utiliza Westinghouse para supervisar el desarrollo de productos basados en IA?
- ¿Qué tecnologías tienen más potencial en los próximos 5-10 años? ¿Qué recomendaciones daría a una operadora que quiera adoptar IA con socios tecnológicos?

TERCERA ENTREVISTA — IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE

Entrevistado: Xavier Amorós Trías

Cargo: *On-site Manager en IDOM Consulting, Engineering, Architecture*

Propósito: Recopilar una visión experta sobre el impacto estratégico, operativo y organizativo de la IA en la gestión y ejecución de proyectos de ingeniería desde el terreno.

Preguntas:

- ¿Cómo describiría el estado actual de adopción de IA en el sector de la ingeniería y construcción desde IDOM? ¿Qué áreas de ejecución y supervisión de obra se benefician más?
- ¿Qué soluciones o iniciativas concretas de digitalización e IA se están implementando en IDOM para la gestión de proyectos sobre el terreno? ¿Qué beneficios y limitaciones se han observado?
- ¿Qué aporta la IA a la eficiencia, calidad y rentabilidad de las obras? ¿Es una ventaja competitiva clave para IDOM frente a otras ingenierías?
- ¿Cómo afecta el marco regulatorio a la innovación y al uso de herramientas predictivas? ¿Cómo garantizan fiabilidad y trazabilidad?
- ¿Qué barreras culturales y organizativas percibe en entornos de construcción? ¿Cómo está cambiando el perfil profesional?
- ¿Qué mecanismos de validación interna utiliza IDOM para adoptar herramientas basadas en IA en sus procesos de Site Management?
- ¿Qué tecnologías tienen más potencial en los próximos 5-10 años en gestión de obras? ¿Qué recomendaciones daría a un cliente que busque digitalizar sus proyectos?

ANEXO III: Transcripciones de las entrevistas

Entrevista 1 — David Martínez Veciana (ANAV)

Entrevistado: David Martínez Veciana — Jefe de Ingeniería, Planta de Ascó; Responsable del Proceso de Fiabilidad de Equipos (*Ascó y Vandellòs*); Miembro del Comité de Gobernanza y Estrategia de IA (CGEIA) de ANAV.

Contexto: Entrevista realizada en el marco del caso de estudio de este TFG sobre la adopción de IA en centrales nucleares españolas. La entrevista se desarrolló en formato semiestructurado, con siete bloques temáticos alineados con los objetivos e hipótesis del trabajo.

P1. Estado actual de adopción de IA en ANAV:

Martínez Veciana describe el estado actual de ANAV como una fase de «maduración responsable». La organización ha evolucionado desde una visión exploratoria centrada en pilotos conceptuales hacia un enfoque más sistemático donde priman la seguridad, la trazabilidad y la gobernanza tecnológica. En su propio análisis, el sector nuclear no puede hablar de adopción masiva o disruptiva, dado que el marco regulatorio exige que cualquier tecnología con capacidad de influir en decisiones operativas esté sometida a procesos muy estrictos de validación técnica. Actualmente, la IA está presente en ANAV en tres ámbitos: apoyo al análisis de datos históricos (tendencias, correlaciones, anomalías), herramientas digitales no intrusivas que ayudan a clasificar y priorizar información, y casos de uso internos no vinculantes a la operación, como análisis predictivo en fiabilidad y exploración de visión artificial. Las áreas con mayor potencial identificadas son el mantenimiento predictivo, el

análisis de señales complejas (vibraciones, ruido ultrasónico, temperatura), el procesamiento de lenguaje natural aplicado a experiencia operativa (EO), la clasificación documental y el soporte a la toma de decisiones. El entrevistado subraya que «la IA no sustituye la ingeniería, sino que multiplica nuestra capacidad de procesar información y tomar decisiones».

P2. Proyectos e iniciativas implementadas:

ANAV ha explorado diversos pilotos bajo una filosofía de «bajo riesgo y alto aprendizaje». Entre ellos destacan modelos de predicción de fallos basados en históricos de OSISOFT/PI y SAP, herramientas de visión artificial para identificar corrosión y fisuras superficiales, modelos de priorización inteligente en el proceso de fiabilidad, NLP para análisis de informes de mantenimiento y EO, y exploración de gemelos digitales para sistemas no nucleares. Algunos pilotos fueron descartados por insuficiente explicabilidad; otros continúan evolucionando. Los beneficios más tangibles incluyen mayor capacidad de anticipación frente a modos de fallo complejos, menor carga analítica para los equipos y mejor priorización de decisiones. Las limitaciones identificadas son la exigencia de explicabilidad («la IA no es aceptable si no es explicable»), la complejidad de integrar sistemas modernos con infraestructuras industriales antiguas, la ciberseguridad y la calidad del dato.

P3. Impacto estratégico y rentabilidad:

El entrevistado cuantifica el impacto con ejemplos concretos: un aumento del 0,1 % de disponibilidad puede significar cientos de miles de euros al año, y la prevención de un fallo en un equipo crítico puede suponer ahorros de millones. La IA ayuda a «reducir incertidumbre, y la incertidumbre es costosa». Sobre si constituye una ventaja competitiva sostenible, se muestra categórico: sí, pero no por la tecnología en sí misma, sino por la capacidad de gestionar los datos, integrar la IA en procesos existentes y preparar los equipos. Concluye que «la tecnología no es el reto; el reto es la organización y la gobernanza».

P4. Marco regulatorio, gobernanza y riesgos:

El marco regulatorio actúa simultáneamente como acelerador y freno: marca el camino, pero obliga a avanzar solo cuando todo está bajo control. Los principales riesgos gestionados son la falta de explicabilidad (modelos de caja negra), la ciberseguridad (cada conexión es una superficie de ataque), el riesgo reputacional y la dependencia excesiva de algoritmos. Para garantizar trazabilidad, el CGEIA aplica el principio innegociable de que «ningún modelo puede tomar decisiones autónomas», que todo modelo sea auditable, que todo dato tenga dueño y ciclo de vida definido, y que toda recomendación quede registrada.

P5 y P6. Cultura organizativa, talento y rol del CGEIA:

La principal barrera cultural es la confianza: el sector nuclear depende profundamente del control humano y de procedimientos extremadamente precisos. Sin embargo, cuando el personal comprueba que la IA no quita control, sino que proporciona más información, la actitud cambia radicalmente. El perfil profesional evoluciona hacia una combinación de ingeniería tradicional y competencias digitales. El CGEIA cumple tres funciones clave: definir

el marco de gobernanza y principios éticos, priorizar y evaluar casos de uso, y coordinar cultura, talento y formación.

P7. Perspectiva de futuro y recomendaciones:

Las tecnologías con mayor potencial en los próximos 5-10 años son los gemelos digitales integrados con datos en tiempo real, la visión artificial para inspecciones complejas, los sistemas de NLP para análisis de documentación masiva y la IA explicable (XAI). Sus recomendaciones estratégicas: empezar pequeño y pensar en grande, establecer gobernanza sólida desde el primer día, invertir en talento y cultura, medir con KPIs claros e integrar la IA en procesos ya robustos. Síntesis final: «la IA no es un fin, es un medio para mejorar seguridad, eficiencia y toma de decisiones».

Entrevista 2 — Javier Barroso Martín (Westinghouse Electric Company)

Entrevistado: Javier Barroso Martín — *Customer Solutions Manager, Digital Transformation & Business Development in Nuclear, Westinghouse Electric Company*.

Contexto: Entrevista realizada en el marco del caso de estudio de este TFG. Westinghouse es uno de los principales proveedores tecnológicos globales del sector nuclear, con presencia activa en más de 30 plantas PWR a nivel mundial. Barroso Martín se ocupa específicamente de la comercialización de soluciones digitales basadas en IA para clientes de la industria nuclear.

P1. Estado actual de la IA en Westinghouse y el sector nuclear global:

El entrevistado caracteriza la IA como «tanto un reto como una oportunidad»: un reto porque cambia los procesos y las formas de trabajar, y una oportunidad porque permite hacer cosas nuevas y ser más eficientes. Westinghouse está adoptando medidas mitigadoras ante los riesgos, entre ellas la creación de un comité de gobernanza de IA, procedimientos internos, cursos formativos para concienciar sobre los riesgos asociados al uso de la tecnología, y el desarrollo de una infraestructura propia que garantiza que los datos no acaben en manos de terceros.

P2. Soluciones e iniciativas para clientes nucleares:

Westinghouse trabaja en dos líneas principales. La primera es la búsqueda inteligente de información: han desarrollado un piloto —actualmente en fase de escala— que carga documentación histórica generada por el grupo de propietarios de PWR durante más de 20-25 años, permitiendo a los usuarios localizar información relevante con una rapidez y exhaustividad que supera la búsqueda manual. La segunda iniciativa, dirigida a clientes estadounidenses, es la integración de IA en su solución digital para el desarrollo de paquetes de modificación de diseño, incorporando agentes que proporcionan recomendaciones históricas basadas en modificaciones similares, responden preguntas y realizan cálculos. El beneficio principal identificado es la «difusión de información»: la capacidad de buscar e identificar documentación de forma rápida es, según el entrevistado, «el gran diferencial». Se utiliza también *Copilot* como herramienta corporativa generalista para tareas administrativas.

P3 y P4. Impacto estratégico y marco regulatorio:

El impacto de la IA en los procesos es comparable, en su analogía, al de una fórmula en Excel: si se introduce mal la pregunta, el resultado será incorrecto; si se redacta bien, el resultado puede ser extraordinariamente útil. Westinghouse implementa todos sus desarrollos bajo el principio del «*human-in-the-loop*»: siempre habrá una persona que deba revisar los resultados, comprobando que la fórmula, los datos de entrada y la salida son coherentes. El regulatorio afecta al ritmo de innovación de forma análoga a como lo hace en cualquier proceso de digitalización, siendo el factor determinante «cuánto quieras cambiar tus procesos». En jurisdicciones como Finlandia, donde la legislación impide que ningún dato salga del país, los plazos de adopción son marcados por las limitaciones legales.

P5 y P6. Barreras culturales, perfil profesional y gobernanza:

Las barreras culturales están asociadas a la gestión del cambio y a la percepción de la IA como «caja negra». La barrera se produce cuando el primer resultado no es el esperado y el usuario concluye que «no vale». El trabajo de superación de esta barrera consiste en enseñar a formular bien las preguntas y a dotar a la IA de la documentación adecuada. En cuanto al perfil profesional, el entrevistado advierte que aún es pronto para sacar conclusiones sobre la IA generativa, cuya visibilidad extensiva tiene apenas dos años. El impacto sobre los perfiles administrativos será significativo, aunque en el sector nuclear la adopción es más baja y el impacto más aislado. En cambio, en Estados Unidos muchas plantas se han convertido en empresas de IT, con una presencia creciente de ingenieros informáticos y de sistemas. El comité de supervisión y gobernanza de Westinghouse es multidisciplinar e incluye áreas de inteligencia artificial, ciberseguridad, legal, control de exportaciones, formación y calidad, reforzando la idea de que la IA tiene implicaciones que van mucho más allá de la tecnología y el usuario.

P7. Perspectiva de futuro y recomendaciones:

Todos los trabajos basados en conocimiento se verán afectados por la IA en mayor o menor medida. La duda no es si se adoptará, sino cuáles son los plazos. La principal recomendación del entrevistado es tener muy claro qué se quiere conseguir antes de identificar cómo abordarlo: distinguir entre herramientas generalistas (*Copilot* para tareas administrativas) y sistemas propietarios con mayor control y trazabilidad para documentación técnica sensible. En síntesis: «tener claro qué quieres conseguir, qué tipo de documentación vas a utilizar, cuál es el riesgo de que se filtre y, en base a eso, decidir cuál es el mejor enfoque para esa adopción».

Entrevista 3 — Xavier Amorós Trías (IDOM)

Entrevistado: Xavier Amorós Trías — *On-site Manager, IDOM Consulting, Engineering, Architecture.*

Contexto: Entrevista realizada en el marco del caso de estudio de este TFG. IDOM es una firma global de ingeniería y arquitectura con presencia en proyectos de alta complejidad técnica,

incluyendo infraestructuras críticas. Amorós Trías aporta la perspectiva de la gestión de proyectos sobre el terreno y la integración de sistemas de IA en entornos de construcción e ingeniería, lo que complementa y contextualiza los hallazgos obtenidos en las entrevistas con ANAV y Westinghouse.

P1. Estado actual de adopción de IA en ingeniería y construcción:

El entrevistado estima que el nivel de adopción de IA/ML en el sector podría cifrarse en torno al 40 %, entendido como la proporción de profesionales que la usan de forma habitual en su trabajo diario, incluyendo IA perceptiva, generativa, agéntica y física. En el ámbito de la ejecución y supervisión de obra, las áreas con mayor potencial de beneficio son: la prevención de riesgos laborales, la gestión de desviaciones e incidencias, la gestión de la configuración durante la obra (en intersección con el gemelo digital) y la estructuración de información no estructurada.

P2. Iniciativas concretas e IDOM:

En IDOM no se parte de las soluciones o herramientas, sino de los casos de uso, de los que han identificado varios centenares. Un caso de uso se define como un reto —técnico, organizativo, de gestión— para el que se identifica un sistema de IA que soluciona o mejora significativamente los resultados. Actualmente tienen varias decenas de iniciativas en marcha. Para la gestión de proyectos sobre el terreno, los sistemas de IA se están aglutinando en: gestión de la configuración en modelos BIM durante la construcción, etiquetado automático de fotografías de obra, gestión administrativa (transcripción automática y generación de actas de reunión) y prevención de riesgos laborales. Los beneficios más tangibles se dan en la gestión administrativa y en el seguimiento y cumplimiento normativo. Las limitaciones reales incluyen la fragmentación de datos, estándares y plataformas, la conectividad de los sistemas on-site y las restricciones del Reglamento de IA de la UE para el uso de sistemas de IA en el diseño de componentes de seguridad de instalaciones críticas.

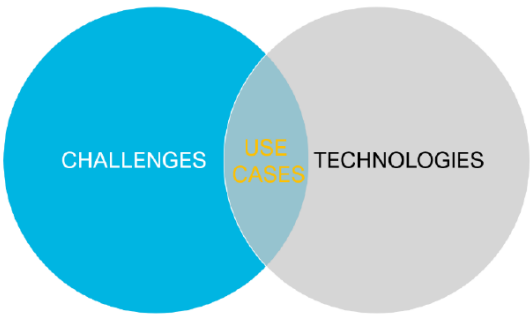


Figura 2. Proporcionada por Xavier Amorós Trías (IDOM)

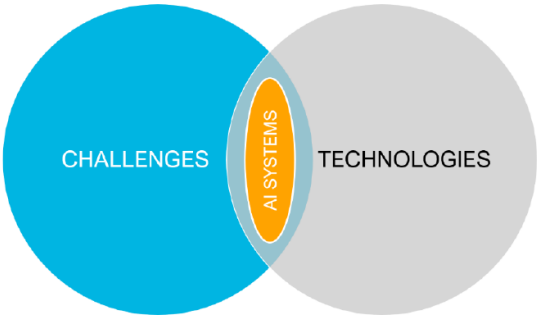


Figura 3. Proporcionada por Xavier Amorós Trías (IDOM)

P3. Impacto estratégico y ventaja competitiva:

Actualmente no se aprecia un impacto significativo en eficiencia, calidad o rentabilidad, ya que muchos procesos de obra se encuentran en la etapa de *Brown field (*adición de IA a procesos

existentes). El mayor impacto se prevé cuando se alcance la etapa de *Green field,* en la que los procesos se diseñen desde cero teniendo en cuenta la IA. IDOM cree que la capacidad de integrar sistemas de IA es y será una ventaja competitiva, pero considera mucho más fundamental conocer bien los casos de uso. El entrevistado ilustra este principio con lo que denomina «efecto Bricomanía»: es más importante saber qué trabajo hay que realizar antes de ir a comprar herramientas caras y complejas que no se sabe dónde aplicar.

P4. Marco regulatorio:

Como empresa europea, IDOM sigue escrupulosamente el Reglamento de IA de la UE, que establece requisitos y directivas sobre el uso de sistemas de IA. Desde hace dos años cuenta con una «Política de uso responsable de sistemas de IA en IDOM» alineada con dicha regulación, con procedimientos específicos para el tratamiento de los diferentes niveles de riesgo (uso inaceptable, riesgo alto, medio y bajo). IDOM está en proceso de obtención de la certificación ISO 42001 «Sistema de gestión de IA», que facilitará la gestión eficaz de todos los aspectos relacionados con fiabilidad, trazabilidad y seguridad.

P5. Barreras culturales y evolución del perfil profesional:

El entrevistado señala que actualmente los sistemas de IA/ML son un producto visible, pero en unos pocos años la IA pasará a ser una funcionalidad invisible integrada en todos los productos y servicios. La barrera de acceso es relativamente alta ahora, pero irá disminuyendo progresivamente. Esto traerá consecuencias muy positivas para equipos multidisciplinares e internacionales en obra, por ejemplo, con el uso de la traducción simultánea para comunicarse en tiempo real, lo que reducirá malentendidos y la necesidad de reingeniería.

P6. Gobernanza interna:

El marco fundamental de IDOM es su «Política de uso responsable de sistemas de IA». A esto se añade la existencia de un centro de excelencia interno (*iHub* de Inteligencia Artificial) compuesto por 20 profesionales con competencias diversas, y una comunidad de prácticas denominada *IDOM AI Beta Testers* con unos 200 profesionales que testean los sistemas antes de su despliegue en producción.

P7. Perspectiva de futuro y recomendaciones:

Las tecnologías con mayor potencial en los próximos 5-10 años dentro de la gestión de obras son: los gemelos digitales mediante tecnología BIM, la visión artificial para el control de progreso y la supervisión de la prevención de riesgos laborales, el reconocimiento de voz para la captura instantánea de incidencias y experiencia operativa, la traducción simultánea para coordinación de equipos multinacionales, y los sistemas de IA física (no solo drones) para el control de progreso y la realización de actividades de riesgo o susceptibles de automatizarse (espacios confinados, soldadura, movimientos de tierras). La recomendación principal para clientes y promotores es abordar la digitalización con un socio que conozca bien tanto los casos de uso del sector como las capacidades y limitaciones reales de los sistemas de IA disponible.

ANEXO IV: Tabla comparativa de las tres entrevistas para realizar el análisis empírico

DIMENSIÓN	ANAV	WESTINGHOUSE	IDOM
Fase de adopción	Maduración responsable; pilotos acotados con alta validación	Adopción activa de herramientas generalistas y desarrollo de sistemas propietarios	~40% de uso habitual; fase *Brown field*, avanzando hacia *Green field*
Áreas prioritarias	Mantenimiento predictivo, visión artificial, NLP en EO	Búsqueda documental, modificaciones de diseño, tareas administrativas	Prevención de riesgos, gestión BIM, gestión administrativa
Ventaja competitiva	Gobernanza de datos, integración en procesos, cultura	Claridad en el caso de uso; herramientas seguras para datos sensibles	Conocimiento de casos de uso («efecto Bricomanía»)
Gobernanza	CGEIA: trazabilidad, auditabilidad, supervisión humana activa	Comité multidisciplinar: legal, ciberseguridad, formación, calidad	Política de uso responsable, *iHub IA*, *Beta Testers*, ISO 42001
Principal riesgo	Explicabilidad insuficiente («caja negra»)	Filtración de información; dependencia de plataformas externas	Fragmentación de datos y plataformas; restricciones regulatorias
Perfil profesional	Ingeniería tradicional + competencias digitales + ciberseguridad	Reducción de perfiles administrativos; más ingenieros IT	IA invisible integrada; traducción simultánea en equipos internacionales
Recomendaciones	Empezar pequeño, pensar grande; gobernanza desde el día 1	Claridad en el objetivo; separar IA generalista de IA técnica	Partir del caso de uso, no de la herramienta

Tabla 3.Tabla comparativa de las tres entrevistas para realizar el análisis empírico. Fuente: elaboración propia a partir de las entrevistas en profundidad realizadas (2025).

ANEXO V: Modelo ilustrativo de impacto financiero de la adopción de IA en una central nuclear genérica

Dado el carácter cualitativo de la investigación, este anexo incorpora un ejercicio de simulación financiera de naturaleza estrictamente ilustrativa y exploratoria. Su finalidad es traducir a magnitudes económicas concretas la valoración cualitativa aportada por el experto de ANAV, David Martínez Veciana, según la cual «un aumento del 0,1 % de disponibilidad puede significar cientos de miles de euros al año» y «si la IA ayuda a evitar un fallo de un equipo crítico, el retorno puede ser de millones»[*].

El modelo se construye sobre una central nuclear genérica de referencia, con parámetros situados en rangos reales del sector para garantizar el realismo del ejercicio:

PARÁMETRO	VALOR ADOPTADO	REFERENCIA / JUSTIFICACIÓN
Potencia neta	1.000 MW	Reactor estándar del sector
Horas anuales	8.760 h	Año natural
Disponibilidad base	90 %	Rango real nuclear español: 83–92 %
Precio de venta	65 €/MWh	Precio medio mercado diario España 2024–2025
Coste variable de generación	8 €/MWh	Coste marginal nuclear muy bajo
Margen de contribución	57 €/MWh	Precio − coste variable

Tabla 4. Supuestos del modelo financiero ilustrativo. Elaboración propia a partir de datos de mercado de dominio público (OMIE/REE, Foro Nuclear).

[*] *Nota.* Las cifras que siguen NO son datos empíricos medidos en ninguna planta concreta. Se trata de un modelo de escenarios construido sobre supuestos explícitos y parámetros de mercado de dominio público (potencia, factor de capacidad y precio eléctrico). El objetivo es demostrar, mediante orden de magnitud, la coherencia económica del testimonio cualitativo, no cuantificar un caso real. Por ello, el modelo se acompaña de un análisis de sensibilidad que muestra cómo varían los resultados ante distintos supuestos

El uso del margen de contribución (57 €/MWh) en lugar del precio íntegro es deliberadamente conservador: cada MWh adicional generado solo añade el coste variable, por lo que es ese margen (y no el precio completo) el que refleja el beneficio económico incremental real para el operador.

V.1. Escenario 1 — Ahorro por mejora de disponibilidad (+0,1 punto porcentual)
Una mejora de 0,1 punto porcentual en la disponibilidad de una planta de 1.000 MW equivale a generar y vender la energía que antes se perdía durante las indisponibilidades evitadas:

1. Energía adicional anual: 1.000 MW × 8.760 h × 0,1 % = 8.760 MWh/año.
2. Beneficio adicional anual: 8.760 MWh × 57 €/MWh = 499.320 €/año.

El resultado, cercano al medio millón de euros anuales por una mejora aparentemente marginal, confirma cuantitativamente la afirmación del experto («cientos de miles de euros al año») y evidencia el efecto palanca de los altos costes fijos del sector: en un entorno donde casi todos los costes están comprometidos, cualquier MWh adicional se traduce casi íntegramente en margen.

MEJORA DISPONIBILIDAD	ENERGÍA ADICIONAL	BENEFICIO ANUAL
+0,05 pp	4.380 MWh	249.660 €
+0,10 pp	**8.760 MWh**	**499.320 €**
+0,20 pp	17.520 MWh	998.640 €
+0,30 pp	26.280 MWh	1.497.960 €
+0,50 pp	43.800 MWh	2.496.600 €

Tabla 5. Sensibilidad del beneficio anual a la mejora de disponibilidad. Elaboración propia.

V.2. Escenario 2 — Prevención de un fallo en un equipo crítico (evento puntual)
El segundo escenario ilustra el ahorro asociado a evitar, mediante mantenimiento predictivo, una parada no programada por fallo de un equipo crítico. Se modela como un evento puntual (no recurrente) con dos componentes: el lucro cesante por la energía no producida y el coste directo de reparación de urgencia.

3. Indisponibilidad evitada: 10 días = 240 horas.
4. Energía no producida evitada: 1.000 MW × 240 h × 90 % = 216.000 MWh.
5. Lucro cesante evitado: 216.000 MWh × 57 €/MWh = 12.312.000 €.
6. Coste de reparación de urgencia evitado (estimado): 1.500.000 €.

Ahorro total por fallo crítico evitado: ≈ 13,8 millones de euros.

Este orden de magnitud valida la segunda afirmación del experto («el retorno puede ser de millones»). Conviene subrayar que se trata de un evento de baja frecuencia y alto impacto: no se produce todos los años, por lo que no debe sumarse linealmente a los beneficios recurrentes. En el modelo de inversión del escenario 3 se trata, por prudencia, fuera del flujo recurrente.

V.3. Escenario 3 — Modelo de inversión a 5 años (VAN, TIR, ROI y payback)

El tercer escenario evalúa un proyecto piloto de IA para mantenimiento predictivo como una decisión de inversión, aplicando las herramientas clásicas de presupuesto de capital. Para mantener el realismo y la prudencia, el flujo de beneficios recurrentes se limita a una mejora sostenida de disponibilidad de +0,1 pp y a un ahorro en mantenimiento correctivo, excluyendo del flujo anual el ahorro extraordinario por fallo crítico (escenario 2), que se trata como un beneficio contingente adicional.

CONCEPTO	VALOR
Inversión inicial — CAPEX (plataforma, sensores, integración, licencias)	1.200.000 €
Coste operativo anual — OPEX (licencias, talento, mantenimiento)	250.000 €/año
Beneficio por disponibilidad sostenida (+0,1 pp)	499.320 €/año
Ahorro en mantenimiento correctivo	180.000 €/año
Beneficio neto anual recurrente (tras OPEX)	**429.320 €/año**
Tasa de descuento aplicada	8 %

Tabla 6. Parámetros del proyecto de inversión. Elaboración propia.

Con estos parámetros, el flujo de caja descontado a cinco años es el siguiente:

AÑO	FLUJO (€)	FLUJO DESCONTADO (€)	ACUMULADO DESCONTADO (€)
0	−1.200.000	−1.200.000	−1.200.000
1	429.320	397.519	−802.481

AÑO	FLUJO (€)	FLUJO DESCONTADO (€)	ACUMULADO DESCONTADO (€)
2	429.320	368.073	−434.409
3	429.320	340.808	−93.601
4	429.320	315.563	221.962
5	429.320	292.188	514.150

Tabla 7. Flujo de caja descontado del proyecto (5 años). Elaboración propia.

Los indicadores de viabilidad resultantes son:

VALOR ACTUAL NETO (VAN) A 5 AÑOS	**514.150 €**
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	**23,1 %**
PERIODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK SIMPLE)	**≈ 2,8 años**
ROI ACUMULADO (5 AÑOS)	**79 %**

Tabla 8. Indicadores de viabilidad del proyecto. Elaboración propia.

El proyecto presenta un VAN positivo y una TIR (23,1 %) muy superior a la tasa de descuento aplicada (8 %), recuperándose la inversión en menos de tres años incluso bajo supuestos deliberadamente prudentes. Si se incorporase el beneficio contingente por prevención de fallos críticos (escenario 2), la rentabilidad se dispararía, pero precisamente por su naturaleza extraordinaria se excluye del flujo base para no sobrestimar el retorno.

Análisis de sensibilidad y conclusión del ejercicio

Para reforzar la honestidad analítica del ejercicio, se evalúa la robustez del VAN ante variaciones en los dos parámetros más inciertos: el precio eléctrico y la magnitud de la mejora de disponibilidad.

PRECIO ELÉCTRICO	BENEFICIO NETO ANUAL	VAN (5 AÑOS)
45 €/MWh	254.120 €	−185.373 €
55 €/MWh	341.720 €	164.389 €
65 €/MWh (base)	**429.320 €**	**514.150 €**
75 €/MWh	516.920 €	863.912 €
85 €/MWh	604.520 €	1.213.673 €

Tabla 9. Sensibilidad del VAN al precio eléctrico. Elaboración propia.

El análisis revela un umbral relevante: por debajo de aproximadamente entre 50-53 €/MWh el proyecto deja de ser rentable (VAN negativo). Esta observación es coherente con la realidad del sector y aporta matiz crítico: la rentabilidad de la IA no es incondicional, sino que depende del contexto de mercado. Lejos de debilitar el argumento, este resultado refuerza la tesis cualitativa del trabajo, según la cual la ventaja competitiva no proviene de la tecnología en sí, sino de su despliegue inteligente y contextualizado.

La simulación, pese a su carácter ilustrativo, cumple una doble función. En primer lugar, dota de orden de magnitud económico a las valoraciones cualitativas de los expertos, mostrando que son internamente coherentes y financieramente plausibles. En segundo lugar, demuestra que la adopción de IA en mantenimiento predictivo puede articularse como una decisión de inversión evaluable con las herramientas estándar del presupuesto de capital (VAN, TIR, payback), tendiendo un puente entre el análisis cualitativo del trabajo y la lógica financiera de la dirección estratégica. No sustituye la necesidad de estudios cuantitativos longitudinales con datos reales —señalada como línea de investigación futura—, pero sí ofrece un marco metodológico replicable para futuras evaluaciones empíricas.

ANEXO VI: Listado de acrónimos y abreviaturas

La siguiente tabla recoge todos los acrónimos y abreviaturas utilizados a lo largo del presente trabajo, agrupados por ámbito temático y ordenados alfabéticamente dentro de cada grupo. Su inclusión tiene por objeto facilitar la lectura y la comprensión del texto, especialmente en los capítulos de mayor densidad técnica[*].

ACRÓNIMO	DEFINICIÓN COMPLETA
1. Inteligencia Artificial y tecnología	
IA / AI	Inteligencia Artificial / Artificial Intelligence
ML	Machine Learning (Aprendizaje Automático)
DL	Deep Learning (Aprendizaje Profundo)
LLM	Large Language Model (Modelo de Lenguaje de Gran Escala)
NLP	Natural Language Processing (Procesamiento del Lenguaje Natural)
XAI	Explainable Artificial Intelligence (Inteligencia Artificial Explicable)
GenAI	Generative Artificial Intelligence (Inteligencia Artificial Generativa)
KMS	Knowledge Management System (Sistema de Gestión del Conocimiento)
BIM	Building Information Modeling (Modelado de Información de la Construcción)
2. Sistemas de control y operación industrial	
DCS	Distributed Control System (Sistema de Control Distribuido)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
CMMS	Computerized Maintenance Management System (Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado)

[*] *Nota.* Esta lista se presenta en el orden en que los acrónimos aparecen por primera vez en el texto o, en su defecto, por orden temático. La primera ocurrencia de cada acrónimo en el cuerpo del trabajo va acompañada de su definición completa entre paréntesis.

ACRÓNIMO	DEFINICIÓN COMPLETA
ERP	Enterprise Resource Planning (Planificación de Recursos Empresariales)
IT	Information Technology (Tecnologías de la Información)
OT	Operational Technology (Tecnologías de Operación)
SecOps	Security Operations (Operaciones de Seguridad)
3. Ciberseguridad y gobernanza tecnológica	
CIA	Confidentiality, Integrity and Availability (Tríada de Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad)
ABPC	Activity-Based Project Costing (Costeo de Proyectos Basado en Actividades)
NIST	National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, EE. UU.)
AI RMF	Artificial Intelligence Risk Management Framework (Marco de Gestión de Riesgos de la IA, NIST)
TRL	Technology Readiness Level (Nivel de Madurez Tecnológica)
4. Sector nuclear y organismos reguladores	
ANAV	Asociación Nuclear Ascó-Vandellós
CGEIA	Comité de Gobernanza y Estrategia de Inteligencia Artificial (ANAV)
ENAI	Ethics of Nuclear and Artificial Intelligence (Ética de las Tecnologías Nucleares y de IA)
NRC	Nuclear Regulatory Commission (Comisión Reguladora Nuclear, EE. UU.)
IAEA / OIEA	International Atomic Energy Agency / Organismo Internacional de Energía Atómica
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear (España)

ACRÓNIMO	DEFINICIÓN COMPLETA
EPRI	Electric Power Research Institute (Instituto de Investigación en Energía Eléctrica)
PWR	Pressurized Water Reactor (Reactor de Agua a Presión)
SMR	Small Modular Reactor (Reactor Modular Pequeño)
5. Finanzas y gestión empresarial	
CAPEX	Capital Expenditure (Gasto de Capital / Inversión en Activos Fijos)
ESG	Environmental, Social and Governance (Criterios Ambientales, Sociales y de Gobernanza)
ROI	Return on Investment (Retorno de la Inversión)
KPI	Key Performance Indicator (Indicador Clave de Rendimiento)
6. Marco normativo y sostenibilidad	
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas)
IEA / AIE	International Energy Agency / Agencia Internacional de la Energía
PwC	PricewaterhouseCoopers
ISO 42001	Norma internacional de sistema de gestión de la Inteligencia Artificial (ISO/IEC 42001)
EU AI Act	Reglamento de Inteligencia Artificial de la Unión Europea