



Energía y Geoestrategia 2026

Instituto Español de Estudios Estratégicos

Comité Español del Consejo Mundial de la Energía

Club Español de la Energía



MINISTERIO
DE DEFENSA





Patrocinador



Energía y Geoestrategia 2026

Instituto Español de Estudios Estratégicos

Comité Español del Consejo Mundial de la Energía
Club Español de la Energía



MINISTERIO
DE DEFENSA



Catálogo de Publicaciones de Defensa
publicaciones.defensa.gob.es



Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
cpage.mpr.gob.es

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autores y editor, 2026

NIPO 083-16-249-2 (edición impresa)
ISSN 2697-2174 (edición impresa)

NIPO 083-18-071-7 (edición en línea)
ISSN 2697-2182 (edición en línea)

Depósito legal M 3928-2014

Fecha de edición: abril de 2026

Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de los autores de la misma. Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

En esta edición se ha utilizado papel procedente de bosques gestionados de forma sostenible y fuentes controladas.



Esta publicación se distribuye bajo licencia CC BY-NC-ND 4.0 que permite compartir el material en cualquier medio o formato con la condición de reconocer adecuadamente la procedencia «Edita: Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica». No se puede modificar. No se puede utilizar con fines comerciales.

publicaciones.defensa.gob.es
cpage.mpr.gob.es

ÍNDICE

	Página
Introducción	11
<i>Claudio Aranzadi</i>	
Referencias	42
Entrevista con Landon Derentz, Vice President for Energy & Infrastructure, Senior Director of the Global Energy Center and Morningstar Chair at the Atlantic Council	45
Capítulo primero	55
La geopolítica del gas natural ante un nuevo orden	55
<i>Ignacio Urbasos</i>	
1 Introducción	60
2 Antecedentes: el espejismo liberal en un mercado en expansión.....	61
2.1 La UE como laboratorio del paradigma liberal	61
2.2 La globalización del gas a través del GNL	62
2.3 La capacidad transformadora de las inversiones transnacionales.....	66
3 El gas natural se convierte en herramienta geoeconómica.....	67
4 Realineamiento geopolítico	70
5 Fragmentación de las cadenas de valor	75
6 Hacia un nuevo orden gasista.....	79
Bibliografía	82
Capítulo segundo	87
La geopolítica de los minerales críticos para la transición energética	87
<i>María del Mar Hidalgo García</i>	
1 Introducción	92
2 Hacia una transición extractiva.....	93
3 Demanda creciente y oferta concentrada.....	95
4 Mercados minerales: menos economía y más geopolítica.....	102

	Página
4.1 Aumento de los controles de exportación.....	103
4.2 Fomento del proteccionismo	106
4.3 Iniciativas internacionales de grupos geopolíticos afines: <i>friendshoring</i>	109
5 Nuevas explotaciones vs reciclaje	113
5.1 Suministro primario de minerales críticos.....	113
5.2 Suministro secundario.....	116
5.3 Sustitución	117
6 La respuesta de UE a los minerales críticos.....	117
7 Minería en España y minerales críticos	120
8 Conclusiones	124
Bibliografía.....	126
Capítulo tercero	127
Energía de fusión	127
<i>Sehila M. González de Vicente</i>	
1 Introducción	132
2 Energía de fusión: innovación, soberanía energética y competitividad global ...	133
3 Estado de la fusión en 2025: de la investigación a la fase preindustrial	137
3.1 ITER y los programas públicos de fusión	138
3.2 Validación de materiales y desarrollo de infraestructuras.....	140
3.3 Impulso y diversificación del sector privado	140
3.4 Nivel de madurez tecnológica y retos pendientes.....	143
3.5 Plazos para la conexión a red.....	144
3.5.1 Programas públicos tipo DEMO (tokamaks basados en ITER)	144
3.5.2 <i>Start-ups</i> basadas en tokamaks con imanes superconductores de alto campo y alta temperatura (p. ej., CFS, Tokamak Energy).....	144
3.5.3 Conceptos basados en configuración de campo invertido (<i>Field-Reversed Configuration</i> , FRC) (p. ej., Helion, TAE)	145
3.5.4 <i>Start-ups</i> basadas en stellarator (p. ej., Proxima Fusion)	145
3.5.5 Energía de fusión inercial (IFE) (p. ej., Xcimer Energy)	146
4 Un elemento clave para la implantación de la energía de fusión: la regulación ..	146
4.1 Diferencias fundamentales entre fusión y fisión.....	147
4.2 Por qué la regulación de la fusión debe ser específica	148
4.3 Impacto de los marcos regulatorios en la implantación de tecnologías de fusión	149
4.4 Estado de la regulación de la fusión en jurisdicciones clave.....	149
5 Tecnologías habilitadoras de la fusión: el papel clave de la inteligencia artificial, la computación de alto rendimiento y la computación cuántica.....	155
5.1 Computación de alto rendimiento y marcos integrados de simulación ...	155
5.2 Inteligencia artificial: del control a la optimización del diseño	156
5.3 IA aplicada a materiales y componentes para fusión	158
5.4 Gemelos digitales: aprendizaje continuo mediante datos y simulación...	159
5.5 Computación cuántica como tecnología habilitadora emergente	159
5.6 Tecnologías computacionales como catalizadores del desarrollo de la fusión	160
6 Dinámicas globales de poder en el desarrollo de la fusión.....	160
6.1 Estados Unidos: la fusión como vector de competitividad industrial y estratégica.....	161

	Página
6.2 China: la fusión como soberanía tecnológica.....	164
6.3 Reino Unido: la fusión como apuesta industrial nacional	165
6.4 Europa: liderazgo científico sin soberanía industrial.....	167
6.5 Japón y Corea del Sur: capacidades clave en la cadena de suministro....	169
Bibliografía.....	171
Anexo: 1. ¿Qué es la energía de fusión?.....	173
La reacción de fusión	175
Principales enfoques tecnológicos.....	180
Capítulo cuarto	183
Inteligencia artificial: el catalizador estratégico para un futuro energético resiliente y descarbonizado	183
<i>Inmaculada Martínez Rubio</i>	
1 Resumen ejecutivo: el imperativo de la IA	188
1.1 Factores fundamentales de la revolución energética de la IA.....	188
1.1.1 Descarbonización	188
1.1.2 Descentralización y digitalización	189
1.1.3 Electrificación	189
1.2 Entendiendo la IA y su poder de transformación	189
1.3 Evolucionando desde la computación de alto rendimiento hacia la IA....	193
1.4 Evolucionando hacia una IA de modelos del mundo	196
1.5 Una IA del siglo xxi segura y de confianza.....	198
1.5.1 Desarrollando modelos de predicción con creatividad renovada ...	198
1.5.2 Un nuevo concepto de infalibilidad en la predicción.....	200
1.5.3 La seguridad de los sistemas de IA en un mundo cada vez más expuesto a vulnerabilidades	200
1.6 Hacia una IA sostenible y de bajo consumo	201
2 El contexto estratégico: impulsores y maduración del mercado	202
2.1 Los primeros años (décadas de 1970 a 1990): sistemas expertos	203
2.2 El auge del aprendizaje automático (década de 1990 – principios de la década de 2010): redes neuronales y pronóstico	203
2.3 La era de las redes inteligentes y el <i>big data</i> (década de 2010 - actualidad): aprendizaje profundo y optimización	204
2.4 Tendencias actuales (enfoque en IA generativa y resiliencia)	205
3 El kit de herramientas de IA	205
3.1 Metodologías fundamentales de IA	205
3.1.1 Aprendizaje automático (ML).....	205
3.1.2 Aprendizaje profundo (DL)	205
3.1.3 IA generativa (GenAI)	206
3.2 Tecnologías que facilitan y amplifican el despliegue y uso de la IA	206
3.2.1 Gemelos digitales.....	206
3.2.2 IoT y redes de sensores.....	207
3.2.3 Computación al borde	207
3.2.4 Conectividad 5G y 6G.....	208
3.2.5 La cadena de bloques	208
4 Aplicaciones transformadoras en toda la cadena de valor energética	208
4.1 Transmisión, distribución y gestión de la red	208
4.1.1 Redes inteligentes.....	208
4.1.2 Detección de fallos y redes autorreparadoras	210

	Página
4.1.3 Gestión de cortes	210
4.2 Mercados y comercio de energía	210
4.3 Gestión de la demanda y compromiso del cliente	211
5 Navegando la paradoja energética de la IA: desafíos, riesgos y gobernanza crítica	212
5.1 El panorama operativo y técnico	212
5.2 Ciberseguridad y resiliencia del sistema	212
5.3 La huella ambiental de la IA	215
5.3.1 Técnicas de «adelgazamiento» algorítmico	215
5.3.2 <i>Hardware: la transición al «borde» (edge computing)</i>	216
5.3.3 Programación consciente de la huella de carbono	217
5.3.4 El impuesto energético del «razonamiento»	217
5.3.5 Despliegue de los primeros desarrollos comerciales de «IA verde»	218
5.4 Consideraciones éticas y sesgo algorítmico	219
6 Marcos geopolíticos y regulatorios: dando forma al futuro de la IA en la energía	220
6.1 El panorama regulatorio en evolución	220
6.2 La carrera geopolítica por la «seguridad informática»	222
7 Recomendaciones estratégicas	224
7.1 Estrategia de tecnología e innovación	224
7.2 Estrategia organizacional y de talento	224
7.3 Gobernanza y gestión de riesgos	225
7.4 Colaboración y desarrollo de ecosistemas	225
Bibliografía	225
Capítulo quinto	229
Infraestructuras portuarias energéticas como pilar de la seguridad energética mundial. Análisis estratégico, riesgos y perspectivas	229
<i>Miguel Golmayo</i>	
1 Introducción	234
2 El desconocimiento del riesgo	237
3 Fortalecer la seguridad portuaria	238
4 Riesgos de la concentración portuaria y la expansión sin diversificación	239
5 Los puertos energéticos y la trampa de la expansión	241
6 Una realidad poco conocida	242
6.1 Función estratégica de los puertos energéticos	242
7 Principales puertos energéticos del mundo	243
7.1 Ras Tanura (Arabia Saudí)	243
7.2 Sabine Pass (EE. UU.)	246
7.3 Róterdam (Países Bajos)	249
7.4 Singapur	253
7.5 Ningbo-Zhoushan (China)	255
8 El caso de España como eje energético marítimo	257
8.1 Puerto de Algeciras (Cádiz)	258
8.2 Puerto de Cartagena (Murcia)	258
8.3 Puerto de Bilbao (País Vasco)	259
8.4 Puerto de Huelva (Andalucía)	259
8.5 Puerto de Barcelona (Cataluña)	260

	Página
8.6 Puerto de Sagunto (Valencia).....	260
8.7 Puerto de Ferrol (Galicia).....	260
8.8 Puerto de Gijón (Asturias).....	260
9 Amenazas, fortalezas y debilidades.....	261
10 Conclusiones.....	262
Capítulo sexto	265
Geopolítica de la energía: una perspectiva desde Canadá	265
<i>Joe Calnan</i>	
1 Introducción.....	270
2 Contexto de la geopolítica energética de Canadá.....	271
3 Geografía, recursos y estructura de la dependencia energética de Canadá.....	272
3.1 Producción de energía.....	275
3.2 Desequilibrios regionales.....	276
3.3 Consumo energético interno.....	277
4 Comercio energético canadiense y vulnerabilidades estratégicas.....	278
4.1 Exportaciones energéticas.....	279
4.2 Importaciones energéticas.....	280
5 Vulnerabilidades estratégicas.....	281
6 Restricciones políticas, jurídicas y sociales de la infraestructura energética.....	284
6.1 Derechos de los pueblos indígenas.....	284
6.2 Clima y oposición pública.....	285
6.3 Federalismo y complejidad regulatoria.....	286
7 La posición internacional de Canadá.....	286
8 La atracción inexorable de la integración energética entre Canadá y Estados Unidos.....	290
9 Diversificación energética de Canadá y Europa: acuerdo de principio.....	294
10 Diversificación energética en la región del Indopacífico: resultados tangibles y escollos políticos.....	296
10.1 China y los límites de la diversificación estratégica.....	296
10.2 Infraestructura del Pacífico y mercados asiáticos.....	298
10.3 Más allá de China: socios del Indopacífico y diversificación progresiva.....	299
11 La energía canadiense en el Ártico.....	301
12 Canadá como una «superpotencia energética».....	305
12.1 Retos para la visión de superpotencia energética.....	307
13 Conclusión.....	309
Bibliografía.....	310
Composición del grupo de trabajo	319
Colaboradores en la edición de esta obra	321

Introducción

Claudio Aranzadi

Esta decimotercera edición de *Energía y Geoestrategia (EyG)* se abre con una entrevista a Landon Derentz (vicepresidente del Atlantic Council). Se incluye, además, un artículo focalizado geográficamente, cuyo autor es Joseph Colman («Geopolítica de la Energía: una perspectiva desde Canadá»), dos artículos que analizan el marco global de recursos primarios a cargo de Ignacio Urbasos («La geopolítica del gas natural ante el nuevo orden») y María del Mar Hidalgo («La geopolítica de los minerales críticos para la transición energética»), otros dos relativos al examen de dos tecnologías clave en el sector energético, cuyas autoras son Sehila M. González de Vicente («Energía de Fusión») e Inmaculada Martínez («Inteligencia artificial: el catalizador estratégico para un futuro energético resiliente y descarbonizado») y un artículo sobre una de las infraestructuras energéticas globales más críticas para el transporte de gas y petróleo a cargo de Miguel Golmayo («Infraestructuras portuarias energéticas como pilar de la seguridad energética mundial»).

En el repaso habitual de la evolución del marco geopolítico global de la energía desde la última publicación de *EyG* hasta la fecha de la actual edición (comienzo de 2026), se presta lógicamente atención a los cambios registrados en el orden internacio-

nal inducidos por la política exterior de la nueva administración americana. El año transcurrido ha aportado a este aspecto un suplemento notable de información, pero también una ampliación de las incertidumbres geoestratégicas. Durante este periodo, se han ido produciendo cambios significativos en el tradicional triema energético (competitividad, seguridad, sostenibilidad): la seguridad (y en concreto la garantía del suministro de recursos primarios) ha adquirido mayor relevancia y la política de descarbonización global no ha recuperado el necesario dinamismo (la parquedad de los resultados de la COP 30 es una manifestación clave). Por otro lado, el clima geopolítico global se ha deteriorado (con una intensificación de la rivalidad y un debilitamiento de la cooperación), las perspectivas de evolución de los mercados de gas y petróleo han experimentado una inflexión y se ha reforzado el énfasis en las políticas industriales como instrumento clave de promoción de la innovación tecnológica y la competitividad en el tejido productivo y más concretamente en el sector energético.

En el número precedente de EyG, se señalaba que

«la administración Trump estaba provocando un cambio sustancial del paradigma que subyacía en la concepción de las relaciones internacionales configuradas en la postguerra mundial, desde la defensa de un mundo «kantiano», respetuoso del derecho y sujeto a reglas, a una visión «hobbesiana» donde “might makes right”, el multilateralismo y las organizaciones multilaterales son desestimadas y las negociaciones bilaterales se ajustan explícitamente a consideraciones transaccionales y relaciones de fuerza».

Las iniciativas políticas, las declaraciones públicas y la publicación de la *National Security Strategy 2025* del Gobierno de los EE. UU. a lo largo del año transcurrido parece confirmar este diagnóstico, que el primer ministro canadiense Mark Carney en la reunión de Davos (enero 2026) sintetiza al afirmar que se está asistiendo no a una transición, sino a una ruptura del orden internacional. No debe olvidarse, sin embargo, que, en el orden dejado atrás, la separación entre ambos paradigmas tampoco era neta; las reglas se violaban en numerosas ocasiones, sobre todo por las grandes potencias, dadas las inherentes limitaciones del derecho internacional.

El prolífico analista del contexto geopolítico durante la guerra fría (además de filósofo y sociólogo), R. Aron (1984) señalaba en este sentido: «el estado de naturaleza (o de guerra potencial)

entre los Estados difiere en esencia del estado civil en el interior de los Estados»/«el sistema interestatal, a diferencia de los sistemas intraestatales, no está sometido a un poder central, a una instancia central de control»/«Los Estados no han salido, en sus relaciones mutuas del estado de naturaleza. No habría teoría de las relaciones internacionales si hubiesen salido». M. Spektor (2026) remitiéndose a las palabras de M. Carney en el foro mencionado, ofrece una explicación más «utilitarista» de la aceptación por parte de los países occidentales de un sistema sujeto a reglas que ellos sabían eran hipócrita en su aplicación: el sistema facilitaba la estabilidad y el poder de EE. UU. suministraba los bienes públicos de los que otros países occidentales dependían. Este diagnóstico, desde luego no pone en cuestión la superioridad del «orden liberal» sujeto a reglas de las últimas ocho décadas: la estabilidad contribuía a la reducción del riesgo geopolítico y los valores que informaban el sistema han jugado el papel de «principio regulador» y referencia moral (su violación como mínimo implicaba una sanción política reputacional).

El nuevo orden internacional, sin embargo, está todavía configurándose y el escenario geopolítico en un mundo no respetuoso de las reglas y sometido al juego de los equilibrios de poder está afectado por una profunda incertidumbre agravada, además, por el necesario reposicionamiento de los principales actores (sobre todo China) al cambio de estructura en las relaciones internacionales inducido por EE. UU. En este contexto, más cercano a la desnuda rivalidad entre Estados de la visión «realista», que, al espíritu de cooperación y respeto a las disciplinas multilaterales propio del orden internacional liberal, se hace más relevante aún la modelización de los comportamientos de cada Estado en sus actuaciones de política exterior. En caso contrario, cualquier previsión supondría la anticipación de los resultados de un choque multidimensional de «cajas negras» estatales en un entorno «anárquico». La calidad de la modelización dependerá de su mayor o menor capacidad de simular el comportamiento estatal en diferentes circunstancias, lo que requiere la identificación de un patrón sistemático de conducta que vaya más allá de la pura descripción factual. Un ingrediente de ese patrón sistemático podría ser la hipótesis de racionalidad.

Mearsheimer y Rosato (2023) consideran que los Estados son normalmente actores racionales cuando elaboran y ponen en práctica su política exterior, es decir, que «fundamentan sus políticas en teorías creíbles y adoptan sus decisiones mediante

un proceso de elaboración política de carácter deliberativo»¹. Para estos autores, la «credibilidad de una teoría se basa en sus supuestos, su lógica causal y su validación empírica» y «una teoría creíble no sólo se fundamenta en supuestos realistas, sino que debe deducirse de ellos mediante una formulación causal lógicamente consistente». Este requisito de racionalidad es muy cercano al habitualmente utilizado en el ámbito económico, en el que se considera como actor racional al individuo que maximiza de forma consistente una función objetivo (o la esperanza matemática de la variable objetivo, en un entorno con incertidumbre); por supuesto en la argumentación geopolítica se puede prescindir de los formalismos y requisitos heroicos que la teoría económica exigiría para definir la «consistencia interna» de una elección racional (Sen, 1998). Debe destacarse que, en ambos contextos, económico y geopolítico, el empleo de la «racionalidad» como criterio normativo no tiene necesariamente una connotación ética ni su valoración deriva de los potenciales resultados de la supuesta actuación racional. Los objetivos podrían ser perversos y no alcanzarse (p. ej. en una guerra injusta y saldada con una derrota). (Sen, 1998; Mearsheimer y Rosato, 2023). Estos últimos autores añaden, además, un requisito para definir la «racionalidad» de un Estado en un contexto geopolítico: la deliberación entre los responsables de la política exterior mediante un debate robusto y sin inhibiciones que debería propiciar un agregado de posturas individuales que conduzca a una decisión final.

¿Cómo debería identificarse, de acuerdo con el criterio antes expuesto, la nueva política exterior del Gobierno norteamericano? La respuesta viene dificultada por el carácter excesivamente abierto de la definición de «racionalidad» de Mearsheimer y Rosato, pero, sobre todo, por la resistencia a desligar un concepto de «racionalidad» estrictamente procedimental (como mecanismo coherente de argumentación y actuación para lograr un objetivo) de la valoración sustantiva de ese objetivo y de la constatación *a posteriori* de los resultados. Los posicionamientos sobre la cuestión lógicamente son múltiples. Cuando Martin Wolf (2026) afirma que «con unos EE. UU. que no son ni pre-

¹ Como los propios autores señalan, esta opinión va contra el emergente «conventional wisdom» en el análisis de las relaciones internacionales. K. Yarhi-Milo (2023) hace una viva crítica del libro de Mearsheimer y Rosato en que estos exponen sus tesis, atribuyéndoles el retorno al antiguo marco conceptual propio del «realismo», en cuya visión los Estados «actúan racionalmente procurando maximizar su poder y protegerse frente a los ataques en un mundo anárquico».

decibles ni están vinculados por ningún principio fundamental de actuación, más allá de algunas ganancias a corto plazo, su credibilidad como socio fiable y aliado está siendo destruida, quizás permanentemente», de forma difícil podría aceptar el calificativo de racional para la política exterior norteamericana, tanto más cuanto que el propio Trump reivindicó explícitamente esa «imprevisibilidad».

En EyG 2025, se examinaba esa reivindicación en el marco de lo que R. Nixon calificó como «teoría del loco». McManus (2025) remonta esta teoría a la doctrina de Maquiavelo en 1517, quien consideraba que en ciertas circunstancias «es muy sensato simular locura» y cita una lista de políticos que supuestamente siguieron este principio maquiavélico (Khrushchev, Sadam Hussein, Gadafi, etc.), con resultados normalmente poco satisfactorios. Este comportamiento, en apariencia irracional, sin embargo, cumpliría con el criterio de racionalidad si se utiliza deliberadamente como un recurso estratégico; de hecho, la elección de una «estrategia mixta» en teoría de juegos puede ser perfectamente racional. Tampoco podrían alegarse como factor de irracionalidad el fracaso histórico de esas iniciativas estratégicas (si se acepta el criterio de racionalidad antes expuesto).

El criterio de racionalidad de los estados de Mearsheimer y Rosato (2023) muestra, sin embargo, debilidades. En primer lugar, como señala Yarhi-Milo (2023), el carácter subjetivo de la definición de «teoría creíble». La política arancelaria impuesta por el gobierno Trump, se definía, en EyG 2025, siguiendo a Blinder (2019) como una actuación inspirada en una mala idea (el mercantilismo) y el rechazo de una buena (el liberalismo). Pero sus defensores podrían considerar que una política proteccionista, supuestamente defensora de los empleos domésticos, se fundamenta en una «teoría creíble». Una indeterminación similar afectaría a la caracterización de la política energética y climática de los EE. UU. La definición de la racionalidad de una estrategia dependería del marco intelectual elegido (una preferencia exógena) y estaría, por tanto, lastrada por un claro relativismo. Esto conduciría a aceptar diversas alternativas racionales, «condicionales» en función de la concepción económica o política escogida, y a desechar la equivalencia entre el concepto de racionalidad y el de justificación de un comportamiento. También critica Yarhi-Milo, el requisito de deliberación entre los responsables políticos mediante un debate y sin inhibiciones, algo de difícil control empírico, sobre todo, en países autoritarios.

Ahora bien, la definición del comportamiento racional de los estados desde una perspectiva instrumental, como la maximización consistente de una función objetivo (independientemente de la aceptabilidad de este), tiene utilidad analítica. Esa hipótesis de racionalidad de los actores estatales es fundamental si se pretende utilizar el marco de la teoría de juegos, aunque sea de forma analógica, para modelizar la rivalidad geopolítica. El examen del asimétrico acuerdo comercial Europa-EE. UU. es un ejemplo. La estrategia europea se asemejaría a la del «cobarde» en el juego del gallina («chicken game») que elige la cesión en vez del enfrentamiento. Esta estrategia puede ser perfectamente racional (corresponde a uno de los tres equilibrios posibles del juego) siempre que la matriz de ganancias considerada sea la correcta. Aunque, desde luego, difiera de la estrategia de China frente a EE. UU. que condujo finalmente a una cesión mutua y a un equilibrio óptimo, pero considerando en este caso una matriz de ganancias correspondiente a un juego de «reciprocidad» («reciprocate game») (Binmore, 2007; 2009). Aun considerando con cautela (y tolerancia teórica) esta comparación², puede utilizarse para ejemplificar la diferente percepción del entorno geopolítico por parte de Europa y de China, tanto en lo que se refiere al poder de cada país como a la capacidad política de soportar un enfrentamiento. Lo ilustrativo de este ejemplo es que cada uno de los actores estatales implicados se habría comportado de forma racional (es decir, intentando maximizar su función objetivo de forma consistente).

Por supuesto, aunque la atribución a los estados de un comportamiento normalmente racional (sin connotaciones éticas o referencias a resultados) puede ser de utilidad para el análisis del entorno geopolítico y la previsión de su evolución futura, es sin embargo insuficiente.

En primer lugar, como pone de manifiesto la economía conductista, el criterio de racionalidad de la principal corriente de la teoría económica no representa adecuadamente el patrón de comportamiento de los individuos en su convivencia económica y social real (Bowles, 2004). Como señala Yarhi-Milo (2023), los responsables de la política exterior (y por consiguiente los Gobiernos) actúan frecuentemente utilizando procedimientos heurísticos; pero, ade-

² Mark Blaug (2002) advierte, incluso en el ámbito de la economía, de las limitaciones descriptivas y predictivas de la teoría de juegos por las insuficiencias que pueden afectar al realismo y robustez de sus modelos aún dentro de su rigor formal.

más, como todos los individuos, están sometidos a limitaciones del patrón estándar de racionalidad por efecto de la aversión a las pérdidas (más allá de la aversión al riesgo), la dependencia de la senda etc. El problema que presenta la economía conductista, sin embargo, es su menor potencial de modelización formalizada en comparación al que ofrece la teoría económica estándar, aunque algunos autores como D. Ariely (2008) afirman que «nuestros comportamientos irracionales no son ni aleatorios ni absurdos. Son sistemáticos y, puesto que se repiten una y otra vez, son predecibles». Pero si esto fuera cierto, se dispondría de un patrón sistemático de comportamiento con el mismo valor predictivo que la racionalidad, lo que parece dudoso.

En segundo lugar, la modelización del comportamiento de los Estados en su política exterior, más allá de su racionalidad, exige tener en cuenta el condicionamiento que sobre la actuación de los Gobiernos imponen su ideología política y el marco institucional e intelectual legado por la historia.

En tercer lugar, Yarhi-Milo menciona factores como las emociones y la psicología de los responsables políticos que pueden provocar desviaciones del supuesto comportamiento racional de los gobiernos; estos argumentos se están utilizando profusamente para explicar la actual evolución de la política exterior de EE. UU., aunque parece dudoso que el psicoanálisis pueda ofrecer una base sólida para los diagnósticos geopolíticos. Por otro lado, cualquier precisión de la evolución futura del sistema de relaciones internacionales exige no solo una modelización del patrón de comportamiento de EE. UU., sino también del de otros actores geopolíticos relevantes como respuesta al giro estratégico norteamericano. China muestra todavía interrogantes, como Europa, que sigue sin encontrar el camino de una promoción más asertiva de su autonomía estratégica. Ha habido una ruptura del equilibrio que caracterizaba el orden internacional de la postguerra mundial pero todavía no se ha alcanzado otro.

En el ámbito estrictamente energético, la nueva orientación de la política exterior de EE. UU., plasmada en la «National Security Strategy 2025» (The White House), reitera la centralidad estratégica del concepto de «dominancia energética» que ya se contemplaba en la «National Security Strategy 2017» definitoria de la estrategia de seguridad nacional en la primera etapa trumpista. La propuesta de la NSS 2025, presentada en noviembre de 2025 era previsible, dado que los colaboradores de la Heritage Foundation (el «think-tank» inspirador de un buen número de ini-

ciativas del gobierno Trump) venían reivindicándola con insistencia a lo largo del año. En julio, D. Fuchtgott-Roth (2025) explica con claridad el sentido de esta estrategia:

«La agenda de dominancia energética de la administración Trump no es una mera política económica sino una doctrina estratégica. Sus objetivos son claros. Uno: Garantizar la independencia energética mediante la utilización de combustibles fósiles y energía nuclear. Dos: Influir en los precios globales de la energía. Tres: Suministrar una energía fiable y accesible a los americanos y sus aliados. Cuatro: Reducir la dependencia de la cadena de suministro de energía verde de China».

La redacción de la NSS 2025 refleja en gran medida el espíritu de estas palabras, y marca un claro abandono de la estrategia más centrada en la política climática de la administración Biden. En aplicación de la política de descarbonización, el presidente Biden restringió el desarrollo del petróleo y del gas natural, e impuso regulaciones para la producción e infraestructura de combustibles fósiles (IEA, 2025a).

Este clima intelectual explica los cambios en el concepto de dominancia energética de la ESS 2025 con relación a la ESS 2017 que señalan Escribano, Lázaro y Urbasos (2025). En la NSS 2025, se plantea que la «restauración de la dominancia energética (en petróleo, gas, carbón y nuclear) y la relocalización doméstica de los componentes energéticos clave es una alta prioridad estratégica»; es significativa la exclusión de las energías renovables, algo que no ocurría en la NSS 2017. Por otro lado, se manifiesta con claridad que «Nosotros rechazamos las ideologías del desastroso "cambio climático" y "Cero netos" que han dañado gravemente a Europa, amenazan a EE. UU. y supone una subvención para nuestros adversarios». Este lenguaje representa un endurecimiento del climaescepticismo de la administración Trump, en relación con la primera etapa presidencial y es coherente con la decisión de salida del Acuerdo de París de 2025.

Como muestra el World Energy Outlook de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2025a), esta reorientación de la política energética de los EE. UU. no implica el freno de todas las opciones descarbonizadoras. La llamada «One Big Beautiful Act» de la presidencia Trump acelera la eliminación de las deducciones fiscales para las energías eólica y solar fotovoltaica y para los vehículos eléctricos, y promueve la producción doméstica de petróleo y

gas. Pero amplía las deducciones fiscales para las tecnologías de captura de CO₂, energía nuclear, energía biotérmica, bioenergía y almacenamiento con baterías. En todo caso, EE. UU. es ahora el primer productor de petróleo y gas natural del mundo y un exportador neto de ambas energías, por lo que preservar esta posición como eje de su dominancia energética es un imperativo estratégico no solo como factor de competitividad, sino también como garantía de seguridad nacional.

A largo plazo, por otro lado, en el escenario de la AIE correspondiente al marco de las políticas actualmente aplicadas (CPS), EE. UU. tendría en 2050 un consumo doméstico de petróleo y gas natural similar al actual, sin apenas sustitución de productos petrolíferos en el transporte y una limitada sustitución del gas natural en la industria y la generación eléctrica. La centralidad estratégica de los combustibles fósiles se mantendría a largo plazo, por tanto, y, en el escenario señalado, la reducción de emisiones de CO₂ en 2050 sería solo un 9 % en un país, como EE. UU., segundo emisor mundial (12 % del total de emisiones en 2024) (IEA, 2025a).

En China, primer emisor mundial de CO₂ (33 % de las emisiones totales en 2024), otro combustible fósil, el carbón, juega un papel fundamental en la garantía de seguridad del suministro energético dado el alto grado de autoabastecimiento de este combustible; la producción doméstica de carbón en 2024 representó el 94 % del consumo (IEA, 2025b). China es un país muy electrificado y con unas expectativas de mantener, sobre todo a medio plazo, un sostenido crecimiento de la demanda eléctrica. Según la AI, en su escenario (CPS), el peso del carbón en la generación eléctrica (un 58 % en 2024) se irá reduciendo tendencialmente (36 % en 2035 y 21 % en 2050), dado su enorme programa de ampliación de capacidad de generación renovable y nuclear, pero a medio plazo (2035) el volumen de producción de generación eléctrica con carbón permanecerá aproximadamente estable. De hecho, están en construcción 200 GW de capacidad de generación con carbón. Se ha justificado esta inversión por el propósito de incorporar la tecnología de captura de CO₂ y por la contribución de esas centrales al «back-up» de la creciente capacidad renovable (la propia AIE reconoce que, para esta función, la alternativa de nuevas centrales de carbón tendrá ventajas de coste en relación con las centrales de gas natural). En este escenario, aunque la AIE prevé una reducción de la demanda de carbón para la siderurgia y el cemento, difícilmente puede esperarse una reducción significativa de las emisiones de CO₂ a medio plazo.

El caso de India (tercer país emisor con un 8 % de las emisiones totales en 2024), aunque a escala muy inferior a la de China, presenta similitudes con este país en cuanto a su dependencia del carbón. Al igual que China, su grado de autoabastecimiento es muy elevado (la producción doméstica representa el 82 % de consumo) y prevé un fuerte aumento de su capacidad de generación eléctrica renovable y nuclear, pero preservando a medio plazo su capacidad de generación con carbón; como en China, el peso de la generación eléctrica con carbón se reduce significativamente en el horizonte de 2035 (pasa del 74 % en 2024 a un 46 % en 2035), pero en volumen experimenta un aumento. (IEA, 2025a; 2025b).

El imperativo de seguridad se ha convertido, por tanto, en un factor central determinante del mantenimiento a largo plazo de un elevado grado de dependencia de las energías fósiles en los tres primeros países emisores de CO₂ (China, EE. UU. e India) que, además, representan el 53 % de las emisiones mundiales. Es cierto que únicamente EE. UU. ha formulado explícitamente una estrategia de «dominancia energética» centrada en los combustibles fósiles, pero basta recordar la intensidad con la que tanto China como India argumentaron, en la querella terminológica de COPs precedentes (defendiendo el «phase down» frente al «phase-out» para caracterizar el abandono del carbón), para ilustrar su posición. También se puede argüir que, a largo plazo, en China (por mucho, el mayor emisor actual), el agudo declive demográfico previsto contribuirá a corregir el peso de sus emisiones (que pasaría del 33 % actual al 25 % en 2050). No obstante, en ese horizonte, India, que sigue la tendencia inversa, representa un significativo contrapeso (pasaría de un 8 % de las emisiones totales en 2024 a un 12 % en 2050), sobrepasando ligeramente a EE. UU., que mantendría un 11 % del total de emisiones en 2050.

Todos estos datos corresponden al escenario de mantenimiento de las políticas actuales (CPS) que ofrece la AIE (IEA, 2025a) y, como la propia agencia advierte, no deben considerarse como una previsión. Pero sí deben tenerse en cuenta, en primer lugar, para recordar la relevancia geopolítica durante un largo periodo de tiempo del ciclo global recursos-producción-comercio-consumo de los combustibles fósiles y, en segundo lugar, para enriquecer la reflexión en torno al desafío que supone, para la política climática global, el papel estratégico atribuido a los combustibles fósiles en las políticas de seguridad de los principales emisores de CO₂.

De hecho, en el año transcurrido desde la última publicación de EyG, el marco internacional en que se desarrolla la política climática ha empeorado. El calentamiento global es una externalidad negativa global y exige, por tanto, para hacerle frente, una política cooperativa global. Difícilmente, puede considerarse que se haya avanzado en ese sentido, con el abandono por parte de EE. UU. del Acuerdo de París, su salida del IPCC y del CMNUCC, y sus propuestas de la NSS 2025; tampoco, desde luego, con la estrategia de escapismo de China, primer emisor, a quien correspondería asumir el papel de liderazgo en el contexto de clima escepticismo en la política energética de EE. UU. Tampoco parece que el clima cooperativo haya prevalecido sobre los conflictos de interés en la COP 30 de Brasil, donde la variedad de las temas tratados (Henderson, 2025) ha ido acompañada de una telaraña de discusiones en la que el desenlace más común ha sido la ausencia de compromisos (en relación con la política de mitigación) o la reiteración y limitada fiabilidad de ejecución de otros ya asumidos (p. ej. en la política de financiación). En este sentido, la atención mediática se ha focalizado en la imposibilidad de lograr un consenso en el comunicado final, relativo al establecimiento de una «hoja de ruta» para el proceso de «transition away» de las energías fósiles que se aprobó en la COP 28, al mismo tiempo que el objetivo global para 2035 de triplicar la capacidad renovable y duplicar la eficiencia. La solución adoptada ha sido, como en otras cuestiones, remitir los debates a foros paralelos a la COP, como método para afrontar la ausencia de unanimidad.

Probablemente, sin embargo, el rasgo más definitorio del carácter de la COP 30 lo apunta Henderson (2025), quien señala que «es la primera vez que Naciones Unidas ha reconocido implícitamente que el objetivo de limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C puede no ser alcanzado»; algo, por cierto, que los escenarios de la Agencia Internacional de la Energía vienen mostrando con creciente alarma los últimos años. En el comunicado final de la Conferencia, «Multirao Global» (Naciones Unidas, 22 de noviembre de 2025), se reconoce que

«para limitar el calentamiento global a 1,5 °C, con un rebasamiento nulo o limitado, es necesario lograr una reducción acusada, rápida y sostenida de las emisiones de gases de efecto invernadero, del 43 % para 2030 y del 60 % para 2035 con respecto a los niveles de 2019, así como alcanzar el cero neto en emisiones de dióxido de carbono de aquí a 2050»,

y se constata que los avances realizados desde el Acuerdo de París 2015,

«han permitido pasar de un aumento previsto de la temperatura mundial de más de 4 °C, según algunas proyecciones anteriores a la aprobación del Acuerdo, a un aumento de entre 2,3 °C y 2,5 °C y a una inflexión en la curva de emisiones, en el supuesto de que se cumpla íntegramente las contribuciones determinadas a nivel nacional más recientes».

Si bien, se señala también que «esto no basta para alcanzar el objetivo referente a la temperatura». Bastan estas citas del «Multirao Global» de la COP 30 para constatar el escepticismo de las partes en la Conferencia con relación a las posibilidades de cumplir con los objetivos de limitación de la temperatura fijados en el Acuerdo de París.

La evolución a largo plazo de las emisiones de CO₂ reflejada en el escenario de la AIE, correspondiente al marco definido por las políticas en vigor (CPS), confirma el escepticismo en relación con el cumplimiento del Acuerdo de París que se expresa en el «Multirao Global» de la COP 30 de Brasil. Es cierto que este escenario puede considerarse como el más pesimista de los escenarios presentados por la Agencia (IEA, 2025a) y que, en general, los compromisos de las nuevas contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) deberán implicar políticas climáticas más estrictas. No obstante, debe tenerse en cuenta también que la autoría de la NDC presentada por EE. UU. corresponde a la presidencia Biden, y que la previsible evolución a medio plazo de las emisiones en este país mostrará una desviación al alza como consecuencia de la nueva política energética y climática de la presidencia Trump.

En el escenario (CPS) de la AIE, se alcanzaría al final de siglo un aumento de la temperatura de 2,9 °C, resultado del mantenimiento de una elevada dependencia de las energías fósiles para cubrir la demanda global de energía. La demanda global de petróleo mantendría a largo plazo una tendencia creciente desde los 100 mb/d en 2024 a 105 mb/d en 2035 y 113 mb/d en 2050; (OPEC, 2025), eleva estas cifras hasta 113,3 mb/d en 2030, y 123 mb/d en 2050; la demanda global de gas natural registraría un significativo crecimiento (30 % en 2050 en relación a 2024) y la demanda global de carbón experimentaría, después de un pico antes de 2030, una limitada caída (-20 % en 2050 con relación a la demanda de 2024). La cobertura de esta demanda exigiría

un aumento de la oferta global de energías fósiles (petróleo, gas, carbón) de un 6 % entre 2024 y 2050. En el mismo periodo, tendría lugar un fuerte incremento de la oferta de energías descarbonizadas (117 %) insuficiente, sin embargo, para corregir significativamente el flujo de emisiones que se mantendría prácticamente constante (caería un 1 %), (IEA, 2025a).

Aunque las cifras anteriores deben ser consideradas con cautela, suponen un indicativo de los desafíos pendientes de la política climática global. En primer lugar, pone de manifiesto que un fuerte incremento de la capacidad renovable (y nuclear) no es suficiente para conducir el sistema energético hacia una senda de emisiones compatible con los objetivos del Acuerdo de París, a menos que se disminuya significativamente la dependencia de los combustibles fósiles. Por eso, puede considerarse como un espejismo la euforia que despertó en la COP 28 de Dubái, el acuerdo de triplicar la capacidad de las energías renovables y duplicar las mejoras de eficiencia energética para 2030 (acuerdo soportado por la AIE e IRENA) como vía para garantizar los objetivos de la política climática. Es cierto que en el escenario examinado se alcanzaría difícilmente esa ampliación de capacidad renovable. La oferta/producción global de energía renovable aumentaría un 71 % hasta 2035 y solo se multiplicaría por 2,6 en 2050 (IEA, 2025a)³. Aun siendo así, dada la evolución de la demanda de combustibles fósiles a largo plazo, el resultado sería un alto nivel de «inversiones varadas», además de un previsible incumplimiento de los objetivos climáticos. En segundo lugar, debe tenerse en cuenta que el calentamiento climático es función de la concentración en la atmósfera de gases de efecto invernadero (una variable «stock») y que, por lo tanto, el perfil temporal de la convergencia hacia una situación de emisiones netas cero es fundamental. Los retrasos en este proceso exigirán esfuerzos suplementarios en posteriores fases e incluso la aplicación de sumideros de mayor potencia. En tercer lugar, la perspectiva de una notable desviación de las temperaturas con respecto a los objetivos del Acuerdo de París convierte a la política de adaptación y cobertura de daños en un ingrediente central de la política

³ La AIE (IEA, 2025c) evalúa en 11 000 GW de capacidad renovable para 2030 el compromiso del acuerdo de la COP 28. Teniendo en cuenta las nuevas NDC (y las presentadas desde 2015) la AIE estima que alcanzaría 1635 GW. Pero considera que las NDC infrarrepresentan los planes actuales de los gobiernos. Su análisis de las políticas existentes, planes y estimaciones para 189 países elevan las cifras de capacidad a 8350 GW.

climática (algo que la COP 30 ha considerado), aunque debe prevenirse un potencial efecto de «moral Hazard» que podría debilitar la política de mitigación.

El perfil temporal de las emisiones de CO₂ descrito, claramente incompatible con los objetivos de descarbonización a largo plazo de la política climática, corresponde, como ya se ha recordado, a un escenario (CPS de la AIE) definido por la continuidad de las políticas actualmente aplicadas. Es, por consiguiente, poco probable, ya que supondría la ausencia total de nuevas políticas correctoras de alcance global, pero es un indicador de las consecuencias de la falta de ambición en la política climática. Pero, además, es una señal de las incertidumbres que afectan a medio y largo plazo a los mercados energéticos y a la evolución de los equilibrios geopolíticos de poder, cuya dinámica se verá condicionada por la mayor o menor intensidad de las políticas de descarbonización puestas en práctica en el futuro para corregir el escenario continuista que se ha expuesto. El año 2025 ha ofrecido precisamente algunas señales de indefinición en las previsiones de la evolución futura de los mercados de petróleo y gas.

Por un lado, el año precedente ha permitido ilustrar con claridad la imprecisa relación causal entre el riesgo geopolítico y los precios del mercado de petróleo que ya se apuntó en EyG 2024, donde se señalaba este fenómeno analizado por Ferrari, Lappe y Röbler (2023), quienes examinaban la evolución histórica de un indicador del riesgo geopolítico (índice de riesgo geopolítico global de Caldara y Iacorello) y de los precios del petróleo, así como la reacción de los mercados del petróleo ante acontecimientos puntuales como los ataques del 11 de septiembre de 2001, la invasión de Rusia a Ucrania en Febrero de 2022 o el ataque terrorista a Israel el 7 de octubre de 2023. Como señalan estos autores, los «shocks geopolíticos pueden tener un impacto en los precios a través de una menor actividad económica o de mayores riesgos de oferta del producto». En última instancia, el riesgo geopolítico influiría en la evolución de los precios del petróleo a través de su efecto sobre los fundamentales del mercado (costes, demanda neta y *stocks*) que, a su vez, dependen también de factores ajenos al riesgo geopolítico.

Esta aseveración se confirma en el examen que sobre la evolución de los precios del petróleo en 2025 realiza Cano (2025), que señala la existencia de picos (p. ej. los suscitados por acontecimientos geopolíticos como las sanciones de Biden a Rusia a comienzos del año, o el conflicto Irán-Israel en junio), seguidos

rápida por un retorno a precios moderados consistentes con un contexto de exceso de oferta en el mercado. Su conclusión es la siguiente:

«2025 sugiere un cambio en la manera en que el riesgo geopolítico se ha reflejado en los precios del petróleo. Los acontecimientos geopolíticos siguen condicionando la volatilidad a corto plazo, pero el fuerte crecimiento de la oferta y los elevados "stocks" han limitado la persistencia de la respuesta de los precios. En consecuencia, los precios del petróleo se han mostrado crecientemente anclados a las subyacentes expectativas de oferta-demanda, con un riesgo geopolítico que influye a través de la volatilidad a corto plazo más que en una dirección sostenida del precio».

Por otro lado, las previsiones de evolución de los mercados de petróleo y gas natural a medio plazo reflejan una notable incertidumbre. Con relación al petróleo, el informe de la AIE (IEA, 2025d) con sus previsiones a medio plazo (2030), señala esta incertidumbre («tiempos turbulentos para los mercados de petróleo» por las tensiones comerciales y geopolíticas), destaca cambios significativos en la estructura del mercado global, y detecta una preocupación creciente por la seguridad, pero anticipa un perfil del mercado con exceso de oferta. Las previsiones de la demanda global son semejantes a las del escenario continuista anteriormente expuesta (105,5 mb/d) pero en un mercado en que los países protagonistas reducen su peso radicalmente. En el período 2015-2024, EE. UU. representó un 90 % del incremento de la oferta global (resultado del fuerte aumento de producción de petróleo no convencional) y China supuso el 60 % de la demanda global. En el período hasta 2030, China moderaría notablemente su demanda (reflejo en gran medida de la expansión del vehículo eléctrico) y EE. UU. aumentaría su producción, pero no en la cuantía de la última década. La AIE prevé, además, un mercado poco tenso, ya que anticipa para ese periodo un crecimiento de la producción de 5,1 mb/d (a cargo principalmente de EE. UU. y Arabia Saudí), netamente superior al aumento previsto de la demanda global (2,5 mb/día), en cierto modo prefigurado por la decisión de la OPEC+ en mayo de 2025 de poner fin a su política de contención de la oferta.

Sin embargo, la propia AIE en un informe posterior (IEA, 2025e) sobre las implicaciones del declino de los pozos de petróleo y gas (la tasa anual a la que la producción decae en los pozos), pone el énfasis en un riesgo de oferta (el declino en la producción de

pozos existentes); que, de no ser corregido por el necesario proceso inversor, podría provocar serios desequilibrios (por exceso de demanda) en los mercados de petróleo y gas. La AIE sugiere diferentes opciones para abordar esta corrección: «inversión en los pozos existentes para ralentizar el declino y/o impulsar la producción; descubrimiento y desarrollo de nuevos recursos convencionales y no convencionales; o reducción de la demanda». El potencial efecto de declino en la oferta de petróleo y gas es importante: la tasa «natural» de declino (si toda la inversión se parase) sería en el petróleo un 8 % anual en la próxima década (la producción global se reduciría en ese porcentaje) y en el gas natural de un 9 % anual.

Es significativo señalar que la AIE (IEA, 2021) indicaba que el perfil de la demanda global de crudo en el escenario de emisiones netas cero (75 mb/d en 2030 y 23 mb/d en 2050) supondría que no se requiera la exploración de nuevos recursos ni más explotaciones que aquellas cuyo desarrollo se haya aprobado. En lo que se refiere al gas natural, no se requerirían nuevas explotaciones más allá de las que se están desarrollando. Al igual que en el sector del petróleo, en el del gas natural se solapa la preocupación, antes señalada, por los efectos en la producción global del declino de los pozos existentes, con la previsión a medio plazo de un mercado con tendencia al exceso de la oferta. M. Fulwood (2026) señala un crecimiento esperado de la oferta de gas natural licuado de en torno al 50 % entre 2025 y 2030, después de un período de mercado tensionado desde 2020 (pandemia del COVID) hasta 2025.

La brecha entre el escenario correspondiente a una política de descarbonización continuista (como la que representa el escenario CPS de la AIE) y el correspondiente a la aplicación de una política climática rigurosa (emisiones netas cero en 2050) es tan amplia que suscita nuevas incertidumbres no solo en cuanto a los efectos del calentamiento climático, sino también con relación a la evolución a medio y largo plazo de variables económicas relevantes como los precios y las inversiones en el sector energético. Basta señalar como ejemplo las hipótesis de evolución de los precios del petróleo en ambos escenarios que maneja la AIE (en el escenario CPS, los precios serían 89 \$/b en 2035 y 106 \$/b en 2050; en el de emisiones netas cero serían 33 \$/b en 2035 y 25 \$/b en 2050).

En cuanto a las inversiones, como se ha señalado, la distancia no es solo cuantitativa, sino cualitativa. Mientras, en el escenario

de emisiones netas cero, las nuevas inversiones en «upstream» petróleo y gasístico deberían cesar, en el escenario «continuista» el riesgo para el suministro, que impone el declino de pozos existentes; podría exigir significativas inversiones en nueva capacidad de producción petrolera y gasística tanto convencional como no convencional. El riesgo de «inversiones varadas» (*stranded investments*) en este contexto de incertidumbre es elevado, no solo en los sectores petrolero y gasístico, sino también en las tecnologías descarbonizadas (renovables y nuclear). Este escenario de incertidumbre se agudiza aún más por el efecto de nuevos factores que amplifican el riesgo geopolítico (guerra arancelaria, creciente utilización de la energía como instrumento de sanción, reforzamiento de las políticas de garantía exterior del suministro de recursos energéticos primarios y minerales críticos, etc.). Ignacio Urbasos, en su artículo de este número de EyG, analiza en profundidad los nuevos determinantes geopolíticos del mercado global de gas natural que han sustituido al patrón predominante en el orden liberal precedente.

A lo largo del período transcurrido desde el anterior número de EyG, han surgido nuevos desafíos e incertidumbres sobre la evolución futura a medio y largo plazo del escenario geopolítica de la energía, pero también se ha reactivado la centralidad de la política industrial (y dentro de ella de la política tecnológica) para hacerlas frente. Esta reactivación ya se examinó en EyG del año pasado, pero ha experimentado un soporte fundamental con la publicación del Fondo Monetario Internacional de su World Economic Outlook 2025, que dedica uno de sus tres capítulos a la política industrial. La doctrina tradicional del FMI atribuía a las reformas estructurales (de carácter esencialmente horizontal, es decir, sin priorizar sectores o empresas) el papel central en el acompañamiento microeconómico de las políticas de crecimiento y equilibrio macroeconómico. Sin embargo, en el citado WEO 2025, el FMI aunque sigue mostrando su preferencia por las reformas estructurales, manifiesta explícitamente su apoyo a una política industrial bien diseñada:

«La política industrial ha vuelto al centro del debate político. Si está bien diseñada y dirigida a corregir los fallos de mercado en la producción, puede mejorar los resultados económicos al nivel sectorial y agregado. La experiencia de países como Corea ilustra que subvenciones cuidadosamente confeccionadas, alineadas con objetivos claros e implementadas en un marco institucional correcto, pueden catalizar una transformación estructural». (IMF, 2025a).

Los Gobiernos utilizan una amplia gama de instrumentos en la aplicación de la política industrial: subvenciones, desgravaciones fiscales, créditos en condiciones privilegiadas, aportaciones de capital público, regulaciones de precios, compras públicas, promoción pública de infraestructuras, proteccionismo comercial, etc. Las críticas a la política industrial se han centrado en su coste fiscal (en aquellas medidas que implican una aportación de fondos públicos); pero, sobre todo, en la distorsión en la asignación de recursos que la actuación de los gobiernos provocaría, con respecto a la que se derivaría de las señales del mercado, sobre todo a través de su elección de los «picking winners» (sectores, o empresas beneficiarios de las medidas de política industrial), que las autoridades públicas acometerían con una peor información que la que suministraría el libre mercado. Esta visión escéptica sobre la política industrial ha sido predominante en los medios académicos en las últimas décadas. Ya se citó en el precedente número de EyG, al Nobel de Economía de 1992, Gary Becker (1985) que, representando la opinión más radical, manifestaba que «la mejor política industrial es ninguna en absoluto». Recientemente, sin embargo, otros dos afamados académicos, Daron Acemoglu (nobel en 2024) y Philippe Aghion (nobel en 2025) hacen una defensa matizada de la política tecnológica y de la política industrial, respectivamente.

Acemoglu (2023) no solo defiende la necesidad de una política tecnológica que corrija la tendencia a subinvertir en innovación de individuos y empresas, sino que, justifica (cuando existen externalidades negativas, diferencias significativas en los márgenes de las tecnologías alternativas, o procesos de «dependencia de la senda») políticas de redirección de la evolución tecnológica correctivas de la trayectoria que inducirían «los incentivos del beneficio, la competencia o las preocupaciones reputacionales de los investigadores».

Aghion (2016) y Aghion, Antonin y Bunuel (2020) señalan que «la cuestión no es dar un “sí” o un “no” a la política industrial; es, más bien: cómo repensar la gobernanza de la política industrial para hacerla más compatible con la competencia y, más generalmente, con el crecimiento por la innovación». En apoyo a esta postura, ofrecen una amplia gama de argumentos, en la misma línea que Acemoglu (externalidades negativas y positivas, «dependencia de la senda», economías de coordinación, etc.), e incluso incluyen como criterio de selección de sectores, en los que intervenir el impuesto por las prioridades economí-

cas y sociales del Gobierno (por ejemplo, la política climática). Aunque ambos autores se distancian de las políticas tradicionales del «picking winners», parece difícil que se puedan poner en práctica las políticas que ellos proponen sin aplicar un importante grado de selectividad.

El diseño correcto de la política industrial (y tecnológica) es fundamental para el sector energético porque permite abordar más eficientemente el tradicional trilema de la política energética (competitividad, sostenibilidad, seguridad) minimizando la intensidad del «trade-off» entre esos objetivos. Parece claro, por ejemplo, que la innovación tecnológica puede tener un impacto positivo transversal en todos ellos, si la elección de la cartera de tecnologías a impulsar es la adecuada. En este sentido, es útil examinar la experiencia de China. La política industrial china ha utilizado de forma intensiva prácticamente todos los instrumentos antes mencionados en una estrategia dirigista y selectiva con relación a los sectores y tecnologías a impulsar. García-Macia, Kotary y Tao (2025) (IMF, 2025) cuantifican el coste fiscal de las medidas de política industrial china en un 4 % del PIB, y estiman el efecto de la distorsión en la asignación de recursos provocada por esta política en una reducción de la productividad de los factores del 1,2 % y del PIB de un 2 %. Estas cifras podrían caracterizar a la política industrial china como de alto coste para las arcas públicas y generadora de ineficiencias. Pero debe tenerse en cuenta que en el análisis mencionado no se considera el impacto de la política industrial en la corrección de fallos de mercado o en la difusión del conocimiento que tendría efectos positivos en la productividad. Además, debe tenerse en cuenta que la selección de sectores y tecnologías a apoyar ha conseguido, por ejemplo, que China alcance el liderazgo global en producción y tecnologías centrales para la política de descarbonización (paneles solares, baterías, vehículo eléctrico, etc. en el ámbito de las energías renovables, y un notable avance en la curva de aprendizaje de la generación eléctrica nuclear).

Por otro lado, el liderazgo en tecnologías renovables de China ha sido resultado en gran medida de la combinación dirigismo-selectividad en la elección de sectores a impulsar, con una fortísima competencia entre empresas del sector elegido; esta es a grandes rasgos la receta de política industrial preconizada por Aghion (2016) y Aghion, Antonin y Bunel (2020). El liderazgo de China en productos y tecnologías descarbonizadoras es, además, un ejemplo del impacto transversal de la política tecnológica en

los objetivos del trilema energético, con efectos positivos en la competitividad (exportaciones y reducción del coste de generación eléctrica), sostenibilidad (contribución a la descarbonización) y seguridad (menor dependencia del suministro energético exterior). De igual manera, es un reto para la política tecnológica en China el avance en la curva de aprendizaje de la tecnología de captura de CO₂, para minimizar el impacto de su fuerte dependencia de la generación eléctrica con carbón en las emisiones de CO₂.

La experiencia China ilustra algunos aspectos relevantes que caracterizan las políticas industriales y tecnológicas aplicadas para alcanzar los objetivos que integran el trilema energético minimizando los «trade-off» entre ellos. En primer lugar, pone de manifiesto que el logro de los objetivos va acompañado de costes y que el balance coste-beneficio es difícil de determinar. En segundo lugar, muestra el carácter idiosincrásico de las políticas industriales (IMF, 2025); su diseño y aplicación depende de las características políticas e institucionales de cada país y de ventajas específicas, como ocurre en China con la escala de un espacio económico que le permite un más rápido avance en la curva de aprendizaje de las nuevas tecnologías, y un mayor aprovechamiento de las externalidades tecnológicas y las economías de coordinación. En tercer lugar, parece claro que, en el marco de interacciones geopolíticas, las políticas industriales se aproximan a los diferentes objetivos del trilema energético de acuerdo con diferentes equilibrios del binomio rivalidad-cooperación. Las políticas de competitividad y seguridad responden a un imperativo de rivalidad (se buscan las ventajas competitivas o las garantías de seguridad frente a otros), mientras que las políticas de sostenibilidad (la descarbonización) persiguen (y necesitan) la colaboración global. Aunque, como se ha señalado, existen factores, como la innovación tecnológica, que pueden tener un efecto positivo transversal para el logro de todos los objetivos del trilema energético, resulta difícil alcanzar, en el nuevo orden internacional, un equilibrio global satisfactorio de rivalidad y cooperación entre estados.

En la Unión Europea, las políticas industriales y tecnológicas con repercusión en el sector energético están siguiendo una orientación diferenciada de la estrategia dirigista de China y clima escéptica de EE. UU. La UE es una entidad política multiestatal y, por tanto, su gobernanza es claramente singular. Sus procesos de decisión son más lentos que los que se adoptan a la cabeza de un Estado, y la deliberación sobre las políticas adoptadas más com-

pleja y sujeta a controversias, lo que, por cierto, convierte a la UE en modelo de cumplimiento de los requisitos de racionalidad, en el comportamiento de los Estados que postulan de Mearsheimer y Rosato (2023) (adopción de las decisiones a través de la deliberación de los responsables políticos mediante un debate robusto y sin inhibiciones). Sin embargo, la dificultad de alcanzar la unanimidad con veintisiete Estados (y el carácter euroescéptico de algunos Gobiernos) va a requerir de forma creciente el recurso a los instrumentos de decisión de geometría variable de los que la UE ya ha dispuesto (como la Unión Monetaria, espacio Schengen, cooperaciones reforzadas o coaliciones voluntarias). Esta singularidad de la gobernanza de la UE explica en gran medida la limitada asertividad de su autonomía estratégica y, como señalaba el anterior Alto Representante J. Borrell, la resistencia a ejercer su poder en numerosas coyunturas geopolíticas. Europa es la primera potencia comercial mundial, pero en la negociación del acuerdo comercial con EE. UU. mantuvo, como ya se señaló anteriormente, la actitud del «débil» en un «chicken game» (si se acepta la analogía de la teoría de juegos).

Los informes Letta y Draghi (examinados en EyG 2025) han inspirado la hoja de ruta de la política industrial de la Comisión Europea a lo largo de 2025 con iniciativas como el «Competitiveness Compass» (European Commission, 2025a), el «Clean Industrial Deal» (European Commission, 2025b) y el «Industrial Decarbonisation Acceleration Act» que la Comisión Europea debe presentar en 2026 (y que ha provocado ya notables controversias). Los tres pilares de la política industrial europea, inicialmente propuestos por Draghi en su informe (y también recogidos en el «Competitiveness Compass») son la reducción de la brecha de innovación con EE. UU., la elaboración de un plan conjunto de descarbonización y competitividad, y la promoción de la seguridad/autonomía estratégica reduciendo la dependencia exterior. Tal como se plantea, además, la estrategia europea se ajusta perfectamente al nuevo «conventional wisdom» relativo a las políticas industriales definido por el FMI y los nobeles de economía D. Acemoglu y Ph. Aghion, ya que propone una combinación equilibrada de reformas estructurales de carácter horizontal con iniciativas sectoriales de carácter selectivo.

Entre las reformas estructurales horizontales planteadas, pueden señalarse la profundización en el mercado único (con un énfasis especial en el mercado de capitales), la corrección de la fragmentación regulatoria actual y el avance en la simplificación y

desburocratización administrativa, así como la propuesta de un «vigésimo octavo régimen legal», es decir, el establecimiento de una especie de área «off-shore» virtual que «simplificaría las reglas aplicables y reduciría el coste de la quiebra, incluyendo aspectos relevantes del derecho mercantil, concursal, laboral y fiscal» (Competitiveness Compass E.C., 2025a). Pero, al mismo tiempo, la política industrial europea plantea una actuación selectiva focalizada en determinados sectores y tecnologías (defensa, energía y nuevas tecnologías de digitalización y descarbonización) que requiere la definición de «sectores estratégicos» a apoyar y, por tanto, responde a una lógica de intervención vertical cercana a la de los «picking winners», aunque Draghi (2024) rechace esta caracterización. La aversión a la etiqueta de defensor de la estrategia de «picking winners» es cuasigeneralizada incluso, con matices, en quienes como D. Acemoglu y Ph. Aghion aceptan un cierto grado de selectividad en la política industrial.

La política industrial europea, por otro lado, minimiza de forma más completa los «trade-offs» entre los objetivos del trilema energético. Como ya se ha señalado, EE. UU. cifra su «dominancia energética», una de sus claves en su estrategia de seguridad nacional, en su posición de liderazgo en la oferta global de petróleo y gas natural y, además, rechaza doctrinalmente los fundamentos de la política de descarbonización, lo que no solo afecta a su política energética doméstica sino también a su comportamiento en relación con la política climática global (abandono del Acuerdo de París).

En cuanto a China, aun planteando un fuerte programa de expansión de su capacidad descarbonizada (renovable y nuclear) y la explotación, tanto doméstica como internacional de su liderazgo en las tecnologías descarbonizadas, prevé una fuerte dependencia del carbón, que, dado su alto grado de autoabastecimiento en este combustible, es un factor estratégico de seguridad.

Por el contrario, en Europa, pobre en recursos primarios de energía y altamente dependiente del exterior para el suministro de combustibles fósiles, el requisito de descarbonización (sostenibilidad) es también un imperativo de seguridad. Por eso, a diferencia de la evolución prevista a largo plazo de las emisiones de CO₂ en China y EE. UU. ya mencionada, claramente incompatible con los objetivos de la política climática global (si no se corrigen las actuales políticas), los objetivos de la Unión Europea (reducción de un 55 % de las emisiones en 2030 y de un 90 % en 2040) son consistentes con los imperativos de la política de

descarbonización global. Así se plasma en los términos del compromiso («Nationally Determined Contributions») presentado en la COP 30 (European Council, 2025) y en la agregación de los PNIEC, de los países miembros (European Commission, 2025c), que reflejan la trayectoria para cumplir con esos objetivos a medio y largo plazo.

La ambición de la política climática de la Unión Europea se ha criticado, en primer lugar, por el pequeño peso de Europa en las emisiones globales (6 %) cuando se compara con el de China (33 %) y EE. UU. (12 %) y, en segundo lugar, por la utilización de recursos domésticos para beneficiar a los países «free riders» que se aprovecharían del impacto global resultante del esfuerzo europeo. Sin embargo, Bilan y Känzig (2025) afirman en su trabajo que una descarbonización unilateral suficientemente amplia, sobre todo en economías de cierto tamaño, puede conducir a un beneficio doméstico (daño evitado en la economía considerada) superior al coste de la reducción de emisiones y que, según sus estimaciones, una descarbonización unilateral del 86 % en EE. UU. y del 84 % en Europa conduciría a un saldo coste-beneficio positivo en ambas economías.

Como se ha visto, la política industrial europea plantea una contención más intensa del *trade-off* entre el imperativo de seguridad y el de descarbonización que la que resultaría de la aplicación de las políticas industriales en EE. UU. y China. Esto no supone lógicamente la eliminación del *trade-off* tradicional de la política energética (competitividad, seguridad, descarbonización). De hecho, como muestran los debates en torno al borrador del «Industrial Decarbonisation Acceleration Act», nuevos dilemas aparecen cuando se tiene en cuenta el contexto de rivalidad del escenario geopolítico que afecta no solo al comercio internacional, sino también al control tecnológico y, de forma más general, a la propia competencia entre políticas industriales. El plan conjunto de competitividad y descarbonización, sobre el que Draghi insiste en su informe, y que es un eje fundamental de la política industrial europea, constituye sin duda el *trade-off* más característico.

Es cierto que, con la incorporación como un pilar de esta política de la innovación tecnológica (con efectos positivos en todos los objetivos del trilema energético), este *trade-off* se relativiza. Aún más, si en la selección de sectores y tecnologías se tiene en cuenta el «coste social» de las emisiones (daño actualizado de una emisión marginal de CO₂); si el sobre coste de mitigación (reducción de emisiones) es inferior al «coste social», y si la incorporación de

la tecnología descarbonizadora es una elección racional en aplicación de criterio coste-beneficio (quedaría, por supuesto, la elección de la cartera óptima de tecnologías descarbonizadoras en función de sus costes y riesgos respectivos). Como ya se señalaba en la publicación del año precedente, la cuantificación del «coste social» de las emisiones ha recibido numerosas críticas a la precisión y robustez de las estimaciones (que, además, han sido extraordinariamente variadas). Tampoco es precisa la cuantificación de los costes de mitigación de las diferentes tecnologías, ya que es necesario tener en cuenta las externalidades positivas (p. ej. la difusión del conocimiento), y el calendario previsto de maduración y avance en la curva de aprendizaje. Pero aun así, la consideración cualitativa de ambas variables es una guía útil para la asignación selectiva de recursos por parte de la política industrial.

Más controvertida resulta la inclusión dentro de la política industrial europea, como parece deducirse de las informaciones sobre el borrador de la IAA Act, de conceptos como la «preferencia europea» o «el contenido local europeo» en los mecanismos de adjudicación de las compras públicas, o en la condicionalidad para la autorización de inversiones directas extracomunitarias en sectores estratégicos (requisitos de transferencia de tecnología, porcentaje de valor añadido y mayorías accionariales europeos, etc.). Esto consagraría la centralidad de la noción «sector estratégico» en la política industrial, algo que resulta consistente con el nuevo «conventional wisdom», pero que abre un nuevo margen de discrecionalidad en su designación.

Autores como García, McWilliams, Poitiers y Tagliapietra (2025), que aceptan la nueva concepción de la política industrial («debe concentrar recursos allí donde Europa tenga potencial competitivo», pero «también promover una competencia saludable de forma que las empresas tengan incentivos para innovar»), critican, sin embargo, la lógica de la «preferencia europea». Aunque aceptan las restricciones que por razones de seguridad se imponen a productos o inversiones exteriores (p. ej. para evitar la excesiva dependencia de un solo suministrador o inversor), consideran algunos requisitos restrictivos incompatibles con las reglas de la OMC o compromisos con países con los que existen tratados de libre comercio. Por otro lado, estiman que esa estrategia selectiva puede impedir el aprovechamiento de la estructura de ventajas comparativas internacionales e inducir ineficiencias en las cadenas de oferta de las empresas exportadoras. Estos autores, por tanto, abogan por mantener la descarbonización como criterio

selectivo, pero desaprueban (excepto por motivos de seguridad) la aplicación de los requisitos de «preferencia europea».

En esta discusión, se enfrentan dos lógicas diferentes. Por un lado, un planteamiento estrictamente librecambista que propiciaría el aprovechamiento de las ventajas de coste de los países más competitivos para importar *inputs* necesarios en la industria europea a precios bajos. Por otro, un planteamiento cercano al de la política de «industria naciente», dirigido a configurar una industria que, protegida transitoriamente, pudiese convertirse en competitiva a medio plazo, preservándola así del abuso de posición dominante de potenciales suministradores cuasimonopolistas (como fue el caso del apoyo europeo a Airbus en la construcción aeronáutica). Esta dualidad de planteamientos se refleja en algunas propuestas actuales, que sugieren aplicar el primero de ellos a la industria de paneles solares y el segundo a la configuración de una cadena de oferta europea de baterías. Por supuesto, existen también planteamientos mixtos dirigidos a localizar en Europa actividades productivas en colaboración con líderes tecnológicos internacionales, mediante empresas conjuntas que incorporen transferencia de tecnología y recursos humanos europeos.

Parece lógico que, en el actual contexto de rivalidad geopolítico, la política industrial europea adopte criterios pragmáticos y no doctrinarios, y aplique con firmeza el principio de reciprocidad. Al fin y al cabo, la política industrial de EE. UU. (sin utilizar esa denominación) ha utilizado tradicionalmente la política de compras públicas (sobre todo, del Ministerio de Defensa) para apoyar a su propia industria. Por otro lado, China ha usado masivamente, como se ha señalado, toda una batería de ayudas públicas para alcanzar su liderazgo tecnológico en una serie de sectores, entre los que se encuentran los productos y tecnologías descarbonizadoras (provocando, en este caso, además, un exceso de capacidad generador de una estrategia comercial exterior extremadamente agresiva). La política industrial europea debe contemplar las exigencias de colaboración internacional (sobre todo, en el ámbito de la política climática que enfrenta una externalidad negativa global), pero también abordar eficazmente su reacción en los entornos de rivalidad en los que la mejor respuesta no es necesariamente la que correspondería al óptimo de un mundo unificado, homogéneo y armónico.

Los artículos incluidos en el presente número de *Energía y Geoestrategia* ofrecen una amplia información relativa a factores de gran relevancia para anticipar la evolución a medio y largo

plazo del escenario geopolítico de la energía. Joseph Colman en su artículo «Geopolítica de la Energía: una perspectiva desde Canadá» hace una detallada exposición de la posición de Canadá en la geopolítica energética mundial. Esta cuestión es de un notable interés en la actualidad, dados los cambios en esa posición, suscitados por las tensiones comerciales y políticas con EE. UU., los gestos de acercamiento a Europa y el renovado interés por el Ártico (nuevas rutas de transporte, acceso a recursos primarios, desafíos militares, etc.), área geográfica en la que Canadá juega un papel central. El artículo de Colman subraya las características específicas que explican la singularidad de Canadá en el contexto de la geopolítica de la energía: factores geológicos y geográficos, desarrollo histórico de las infraestructuras energéticas, pero, sobre todo, la enorme dependencia de EE. UU. Como el autor señala, «en el centro de esta cuestión se encuentra la integración económica y de seguridad excepcionalmente estrecha entre Canadá y EE. UU., así como la forma en que la geografía, la economía y la demografía han sobredeterminado la integración de sus sistemas energéticos». El autor que subraya «la renovada ambición de Carney de posicionar a Canadá como una «superpotencia energética», explora en este contexto «vías de diversificación energética: al este, en dirección a Europa; al oeste, hacia el Indo-Pacífico; y al norte, hacia el Ártico», aunque considera que «la región de Indo-Pacífico se perfila como la alternativa más viable a medio plazo para la diversificación».

En este número de EyG, se recogen dos artículos referentes a la geoestrategia de los recursos primarios, uno de ellos relativo al gas natural y otro a los minerales críticos. Ignacio Urbasos, en el primero de ellos, «La geopolítica del gas natural ante un nuevo orden», dentro de una visión panorámica de décadas de la evolución de la geopolítica del gas natural, focaliza su atención en la ruptura del orden liberal internacional que, indica el autor, había propiciado la creación de «un mercado interconectado y relativamente eficiente, regulado por instituciones multilaterales y operado principalmente por empresas, en el que la interdependencia compleja parecía haber desplazado a la geopolítica». Urbasos considera a la Unión Europea como el laboratorio de este paradigma liberal, desde que en los años noventa del siglo pasado, «se embarcó en el largo y complejo proceso de desregular, homogeneizar e integrar los diferentes mercados energéticos de los Estados miembros, dominados por monopolios estatales que regían su dimensión interna, con los consumidores y externa, con los suministradores». Este orden liberal, orientado

hacia un mercado más liberalizado y globalizado, habría sustituido, además, a un marco caracterizado por contrataciones a largo plazo, indexación de precios con referencia a los precios del petróleo, cláusulas de destino y peso más elevado del transporte a distancia por gaseoducto. Había incluido también, como señala Urbasos, un sensible aumento de los suministros de GNL y la incorporación tecnológica del «fracking» que propició el acceso de EE. UU. al liderazgo global en el sector.

El autor señala la fecha de 24 de febrero de 2022, con la invasión rusa a Ucrania, como el momento más significativo de la ruptura del orden liberal, ya que «se desmorona la arquitectura de seguridad energética europea y, con ello, el gas natural se posiciona en el centro de competición entre grandes potencias». En este nuevo contexto geopolítico, afirma Urbasos,

«las nuevas reglas del juego son la instrumentación de la interdependencia, la fragmentación y el alineamiento geopolítico. Los ganadores son las grandes potencias, que imponen sus intereses, y los perdedores, aquellos que apostaron por un sistema basado en reglas, cooperación e integración. El nuevo orden gasista es un reflejo del emergente orden realista que está sustituyendo al orden liberal: es ahora la geoconomía la que se impone sobre los paradigmas de la interdependencia y la integración».

El segundo artículo dedicado al análisis de la geopolítica de los recursos primarios está a cargo de María del Mar Hidalgo, autora de «La geopolítica de los minerales críticos para la transición energética». En su completo estudio, Hidalgo expone los rasgos específicos del tipo de recursos primarios (minerales críticos como el cobre, litio, níquel, cobalto y tierras raras) que exige el desarrollo de las tecnologías descarbonizadas, después de un largo periodo de dependencia energética de la extracción de recursos de hidrocarburos como el carbón, petróleo y gas. Como señala Hidalgo,

«el paso de un sistema energético intensivo en combustibles fósiles a otro intensivo en minerales introduce nuevas vulnerabilidades estructurales, derivadas no tanto de su escasez geológica, sino de la concentración extrema de la producción, el procesamiento y la fabricación en un número muy reducido de países».

La autora indica que

«la elevada concentración de la producción y, sobre todo el refinado —con China como actor claramente dominan-

te— convierte a los minerales críticos en instrumentos de poder geopolítico. Si bien, la interrupción del suministro de minerales críticos en el sector energético no tendría unas consecuencias a corto plazo, sus efectos a largo plazo implicarían la ralentización de la transición energética impidiendo el cumplimiento de los objetivos climáticos».

Pero, en su artículo, Hidalgo advierte que

«ninguna estrategia basada exclusivamente en la apertura de nuevas explotaciones mineras puede resolver los cuellos de botella a corto plazo, debido a los largos plazos de desarrollo, la volatilidad de los precios y la incertidumbre regulatoria y social. En este sentido, el reciclaje, la economía circular, la innovación tecnológica y la sustitución de materiales emergen como pilares indispensables para reducir la presión sobre el suministro primario, aunque su contribución seguirá siendo limitada en el corto plazo. La transición energética exige, por tanto, una planificación industrial de largo alcance, acompañada de mecanismos públicos de financiación, apoyo a la inversión y gestión del riesgo que permita estabilizar los mercados de minerales estratégicos».

También se incluyen, en este número de EyG, dos artículos sobre dos tecnologías, la fusión nuclear y la inteligencia artificial, con procesos de maduración y horizontes de explotación comercial diferentes, pero con un potencial disruptivo enorme a largo plazo en el sector energético. Incluso en los momentos actuales, ambas autoras señalan la contribución de la inteligencia artificial en los avances que está registrando la investigación en la tecnología de fusión.

Sehila M. González de Vicente, autora del artículo «Energía de Fusión», además de ofrecer en el anexo una introducción técnicamente sólida a esta tecnología rompe con un cuasiseccular escepticismo con respecto a las posibilidades de que la «fusión-nuclear» forme parte del mix energético en un horizonte determinado. La autora reconoce que el proceso de maduración de la tecnología está todavía en una fase preindustrial, pero, al mismo tiempo, expone una serie de hitos técnicos que han revitalizado la confianza en el futuro de la energía de fusión, lo que se ha plasmado, más allá de la iniciativa pública (como el ITER), en un fuerte aumento de las inversiones privadas; como señala la autora, «en 2025 más de 50 empresas privadas se dedicaban al desarrollo de

tecnologías de fusión, con una inversión acumulada cercana a los 10.000 millones de dólares desde 2021)».

González de Vicente explica los desafíos tecnológicos y analiza los hitos que han marcado la revitalización de la investigación a la fusión nuclear:

«El desarrollo de la energía de fusión exige un nivel de sofisticación tecnológica excepcional. Para que una reacción de fusión produzca energía neta es necesario alcanzar la denominada "ignición del plasma", un estado en el que el propio proceso de fusión se autosostiene. Lograrlo implica calentar un plasma hasta temperaturas de cientos de millones de grados centígrados, confinarlo mediante campos magnéticos extremadamente intensos y mantener estas condiciones durante el tiempo suficiente para que la energía producida supere a la energía invertida. Este hito se alcanzó por primera vez en diciembre de 2022, en un experimento del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en EE. UU. marcando un punto de inflexión histórico en la credibilidad científica de la fusión como fuente energética».

Pero añade un segundo factor fundamental: «el avance de las tecnologías habilitadoras —desde nuevos materiales hasta capacidades computacionales avanzadas— que reducen de forma significativa las barreras técnicas y económicas que han existido históricamente». Aunque la tecnología de «fusión nuclear» comparta con la «fisión nuclear» el carácter descarbonizado y la alta firmeza en la operación del sistema eléctrico, esta última aventaja a la tecnología de «fisión», por el menor impacto ambiental de los residuos y la mayor accesibilidad de los combustibles utilizados. Como señala la autora, «los combustibles de fusión —principalmente isótopos del hidrógeno— están ampliamente disponibles: el deuterio es extraíble del agua del mar y el tritio se autogenerará dentro de los propios sistemas de fusión».

En el segundo artículo de contenido tecnológico, Inmaculada Martínez, autora de «Inteligencia artificial: el catalizador estratégico para un futuro energético resiliente y descarbonizado», ofrece una amplia exposición del avance tecnológico de la IA en las últimas décadas y de su estado actual (todavía sometido a una fuerte pulsión de desarrollo de creciente complejidad), así como de las soluciones que la IA aporta a los nuevos requerimientos de la evolución del sector energético, sobre todo del eléctrico, sector fundamental en el proceso de descarbonización y donde,

además, los centros de datos que exige la IA van a representar un fortísimo «shock» de demanda. La autora detalla el proceso de escalación de esta tecnología:

«la inteligencia artificial ha evolucionado desde que en décadas pasadas se desarrollaba a través de modelos de estadística y de planificación de escenarios, hacia la computación de alto rendimiento (HPC) y el entrenamiento de modelos algorítmicos de aprendizaje automático durante la década de los 2000. Pero esta trayectoria, casi lineal, ha sido recientemente retada por los modelos de IA avanzada, que han disruptido la innovación tecnológica del sector energético con modelos más allá de los algoritmos matemáticos de datos estructurados».

Como Martínez señala,

«la IA hoy en día es ya más que una tecnología, y se desarrolla como sistema de sistemas que abarca los diferentes tipos de IA avanzada —Generativa, Agéntica, de aprendizaje profundo (Deep Learning)— y Modelos frontera —Fundacionales, Grandes de Lenguaje, Multimodales, Capacidades Emergentes y Estado del Arte—, formando un ecosistema interdependiente, al que se une, en el universo de datos a procesar, el software y el hardware que se emplean en llevar a cabo esta tarea, así como los semiconductores de procesamiento que se requieren para ejecutar las acciones requeridas en la gestión y distribución de la energía».

Por otro lado, la autora considera que

«la IA en 2026 se asienta en dos objetivos a conseguir: crear un nuevo marco de valor en la innovación más allá de la computación de alto rendimiento, y garantizar que no solo es segura desde el punto de vista de la ética y las garantías de gobernanza de datos, sino que es una IA de confianza. Es decir, técnicamente apropiada para el uso al que se la destina y estandarizada, y certificada para emplearla en sectores industriales y en la sociedad».

La autora expone la contribución de la IA como herramienta en distintas áreas del sector energético. Señala, como González de Vicente, su aplicación en los desarrollos de la innovación en la tecnología de fusión nuclear y, también menciona el sector de petróleo y gas (que habrían utilizado en el pasado de manera abundante la supercomputación). Pero lógicamente dedica más

atención a su papel en el sector eléctrico, donde la creciente sofisticación de los mercados de energía y capacidad, los requisitos de inteligencia de unas redes que deben incorporar de forma creciente recursos distribuidos de generación variable y almacenamiento y una operación del sistema con exigencias cada vez más complejas, definen un campo de aplicación de la IA de enorme amplitud. Martínez destaca además los desafíos específicos que plantea la IA, en rápida evolución, para una regulación eficiente y segura, sometida a riesgos crecientes y poco conocidos como los inducidos por la IA agéntica.

En su artículo, Miguel Golmayo, autor de «Infraestructuras portuarias energéticas como pilar de la seguridad energética mundial», realiza un minucioso análisis de los retos de seguridad asociados a los centros de carga y descarga portuarios de hidrocarburos, infraestructuras fundamentales en el transporte marítimo de petróleo y gas, pero que normalmente, como señala Golmayo, han quedado desatendidos por la atención pública centrada preferentemente en otros puntos estratégicos de las rutas marítimas, conocidos como «Chokepoints» (Canal de Panamá, entradas en el mar Rojo, estrecho de Gibraltar, estrecho de Malaca, estrecho de Bab el-Mandeb, etc.). El autor señala que, sin embargo, la sustituibilidad estratégica de los puertos es menor que la de las rutas marítimas (que ofrecen alternativas). Además, subraya que otros rasgos específicos, como la concentración de instalaciones energéticas en su entorno y la localización de población en su cercanía, añaden una vulnerabilidad potencial mayor que la de otras infraestructuras, «especialmente en un contexto de crecientes amenazas de todo tipo, terrorismo físico, cibernético, tensiones geopolíticas, fenómenos naturales externos, conflictos armados, etc.». El autor expone de forma detallada los riesgos específicos de las infraestructuras portuarias que desempeñan un papel crucial en la logística del petróleo, gas y productos petrolíferos. En el tráfico de petróleo, se refiere a Rotterdam en Europa, Houston en EE. UU., Ras Tanura en Arabia Saudita y Singapur en Asia. En el del GNL, destaca a Ras Laffan en Qatar, Sabine Pass en EE. UU., Sines en Portugal, Yamal en el Ártico Ruso, Dahel en la India, Incheon en Corea del Sur, y Yokohama en Japón.

Referencias

- Acemoglu, D. (2023). Distorted Innovation: Does the Market Get the Direction of Technology Right? *AEA Papers and Proceedings*. Vol. 113, pp. 1-28.
- Aghion, P. (2016). *Repenser la croissance économique*. Collège de France/Fayard. N.º 256.
- Aghion, P., Antonin, C. y Bunel, S. (2020). *Le Pouvoir de la destruction créatrice*. Odil Jacob.
- Ariely, D. (2008). *Predictably Irrational: The hidden forces that shape our decisions*. HarperCollins Publishers.
- Aron, R. (1984). *Paix et guerre entre les nations*. Calmann Lévy.
- Becker, G. (1985). The Best Industrial Policy Is None At All. *Business Week*.
- Binmore, K. (2007). *Playing for Real: a text on game theory*. Oxford University Press.
- . (2009). *Rational Decisions (The Gorman Lectures in Economics)*. Princeton University Press.
- Bilan, A. y Känzig, D. (2025). Does Decarbonization Pay for Itself? *AEA Papers and Proceedings*. Vol. 115, pp. 369-373.
- Blaug, M. (2022). Ugly Currents in Modern Economics. En: Mäki, U. (ed.). *Facts and Fictions in Economics*. Cambridge University Press, pp. 35-56.
- Blinder, A. S. (2019). The Free Trade Paradox. *Foreign Affairs*. 98(1), pp. 119-128.
- Bowles, S. (2004). *Microeconomics: Behavior, Institutions, and Evolution*. Princeton University Press.
- Cano, N. (2025). Oil Prices Reflect Fundamentals More Than Geopolitical Headlines. Aegis Market Insights.
- Draghi, M. (2024). Address by Mr. Draghi Presentation of the report on the future of European competitiveness. European Parliament.
- Escribano, G. Lázaro, L. y Urbasos, I. (2026). Energía y Clima. En: Arnal, J. et al. (ed.). *Claves de la nueva Estrategia de Seguridad Nacional de EE. UU*. Real Instituto Elcano.
- European Commission. (2023). EU-wide assessment of the draft updated National Energy and Climate Plans. An important step towards the more ambitious 2030 energy and climate objectives under the European Green Deal and RePowerEU. European Union.

- . (2025a). *Competitive Compass*. European Commission.
- . (2025b). *Clean Industrial Deal*. European Commission.
- European Council. (2025). EU submission of the updated NDC to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). European Council.
- Ferrari M., Lappe M. S. y Röbler, D. (2023). Geopolitical risks and oil prices. European Central Bank.
- Fuchtgott-Roth, D. (2025). Why American energy dominance is a strategic imperative. *The Heritage Foundation*.
- Fulwood, M. (2026). *The LNG market in 2026/2027: Where will it go?* The Oxford Institute for Energy Studies.
- García, I. *et al.* (2026). 'Make with Europe', not 'Made in Europe', should guide EU industrial policy. Bruegel.
- García-Macia, D., Kothari, S. y Tao, Y. (2025). Industrial Policy in China: Quantification and impact on misallocation. *IMF Working Papers*. N.º 155.
- Henderson, J. (2025). Reflections on COP 30: fighting to keep the multilateral process alive. The Oxford Institute for Energy Studies.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Net zero by 2050*. París, IEA.
- . (2025a). *World Energy Outlook 2025*. París, IEA.
- . (2025b). *Coal 2025*. París, IEA.
- . (2025c). *COP28 Tripling Renewable Capacity Pledge*. París, IEA.
- . (2025d). *Oil 2025: Analysis and forecast to 2030*. IEA.
- . (2025e). *The Implications of Oil and Gas Field Decline Rates*. París, IEA.
- International Monetary Fund (IMI). (2025). *World Economic Outlook*. IMI.
- McMannus, R. (2025). The limits of the Mad Theory. *Foreign Affairs*.
- Mearsheimer J. J. y Rosato, S. (2023). *How states think. The rationality of foreign policy*. Yale University Press.
- Naciones Unidas. (2023). *Multivao Global*. Naciones Unidas.
- Organization of the Petroleum Exporting Countries. (2025). *World oil outlook 2050*. OPEC.
- Sen, A. (1998). Rational Behaviour. En: *The new Palgrave. A dictionary of economics*. Palgrave Publisher.

Spektor, M. (2026). The world will come to miss western hypocrisy. *Foreing Affairs*.

Wolf, M. (2025). The world ´s past, present and future. *Financial Times*.

Yarhi-Milo, K. (2023). Why smart leaders do stupid things. Is foreign policy rational?. *Foreing Affairs*.

Entrevista con Landon Derentz, Vice President
for Energy & Infrastructure, Senior Director
of the Global Energy Center and Morningstar
Chair at the Atlantic Council

En un diálogo en el marco de una institución como el Atlantic Council, es casi obligatorio iniciar esta entrevista preguntando por su visión sobre el futuro del vínculo transatlántico entre Europa y Estados Unidos, tanto en su dimensión militar como en su dimensión económica, comercial y energética.

La relación transatlántica sigue siendo fundamental para la seguridad y la prosperidad de Estados Unidos y Europa, incluso cuando está claramente bajo tensión. No debería sorprendernos. Las instituciones, los supuestos económicos y los marcos de seguridad que definieron la asociación en los últimos ochenta años se construyeron en un contexto geopolítico y tecnológico muy diferente. Lo que vemos ahora no es tanto una ruptura del vínculo, sino una renegociación de cómo debería funcionar en el futuro. En muchos casos, el desafío no es que estas instituciones hayan fracasado, sino que fueron diseñadas para una era diferente y están luchando por adaptarse en un contexto en el que la competencia geopolítica, el cambio tecnológico y la política industrial cobran protagonismo.

Incluso en Washington, entre los responsables políticos, que son escépticos sobre aspectos de la Unión Europea, todavía hay un

amplio reconocimiento de que Estados Unidos es más efectivo cuando trabaja con Europa. Como sugirió el secretario de Estado Marco Rubio en la Conferencia de Seguridad de Múnich este año, los desacuerdos transatlánticos no evidencian una ruptura permanente, sino que es una señal de que dos socios maduros se están adaptando a un mundo cambiante. Estados Unidos está preparado, si es necesario, para actuar solo, dijo Rubio en su discurso, pero es la «preferencia de Estados Unidos y es nuestra esperanza hacer esto junto con ustedes, nuestros amigos aquí en Europa», subrayó.

Las tensiones actuales no derivan tanto de un debilitamiento de la asociación como de un creciente reconocimiento de que muchos pilares del sistema de posguerra necesitan una renovación para seguir siendo efectivos en un mundo más competitivo y menos predecible. Instituciones como Naciones Unidas, el Fondo Monetario Internacional, el Banco Mundial y la OTAN siguen siendo esenciales para mantener el orden mundial, pero su influencia depende de su capacidad para adaptarse con mayor rapidez y realismo. La postura actual de Estados Unidos, que incluye tácticas económicas concisas y retórica confrontacional en torno a Groenlandia, ha sacudido innegablemente a Europa. Sin embargo, a largo plazo, esta conmoción puede resultar constructiva.

Una postura de defensa europea más sólida, incluido un movimiento serio hacia un mayor gasto en defensa, fortalece a la OTAN en lugar de debilitarla. Nuestras bases industriales de defensa siguen profundamente entrelazadas; basta con examinar las cadenas de suministro detrás del F-35 Lightning II para ver cómo la dependencia mutua ya define la seguridad transatlántica.

La política energética refleja una dinámica similar. La búsqueda de una transición energética sigue siendo el enfoque que adoptan la mayoría de los países, pero se ve limitada por la realidad de que los combustibles fósiles aún sustentan la estabilidad del sistema, la asequibilidad y la competitividad industrial. Por lo tanto, la acción climática debe proceder de manera que no debilite la posición estratégica de Europa y Estados Unidos frente a competidores como China, que continúa aprovechando la energía convencional a escala como una herramienta de influencia geopolítica.

Los recientes cambios en las políticas de los Estados Unidos, incluida la retirada del proceso de la CMNUCC, la salida del Acuerdo de París y la reconsideración del Hallazgo de Peligro de

la EPA (determinación legal de 2009 de que los gases de efecto invernadero amenazan la salud pública, que constituye la base de la regulación climática federal), deben entenderse no como el final de la cooperación climática transatlántica, sino como parte de una recalibración de mayor duración.

Con el tiempo, Estados Unidos y Europa aún tendrán que alinearse en materia de seguridad energética, política industrial y riesgos climáticos, porque ninguno de esos desafíos se gestiona por sí solo.

¿Qué características, en su opinión, distinguen las políticas energéticas implementadas en Europa de las aplicadas en Estados Unidos? ¿Y qué recomendaría para impulsar una política energética en Europa que apoye la mejora de la competitividad de su estructura productiva?

La diferencia más fundamental entre la política energética europea y la estadounidense comienza con la geografía. Estados Unidos se beneficia de una gran y diversa base de recursos nacionales —petróleo, gas natural, carbón, potencial nuclear y una importante capacidad renovable— que da a los responsables políticos más flexibilidad para equilibrar la asequibilidad, la seguridad y la competitividad industrial. Europa opera bajo restricciones geológicas y físicas más estrictas. La mayor dependencia de las importaciones ha impulsado la política europea hacia la diversificación, la eficiencia y la gestión de la exposición a proveedores externos.

Otra diferencia radica en el ecosistema de innovación que sustenta el sistema energético. Estados Unidos tiende a pasar más rápidamente de la investigación a la implementación, respaldado por mercados de capitales profundos y la integración de instituciones públicas de investigación como los laboratorios nacionales del Departamento de Energía. Esa estructura permite a Estados Unidos seguir múltiples vías tecnológicas simultáneamente, desde la nuclear avanzada y la fusión hasta la geotérmica y los sistemas de almacenamiento. Europa tiene una sólida capacidad de investigación propia, pero la innovación a menudo avanza de manera más desigual entre los Estados miembros, lo que refleja las diferencias en las prioridades políticas nacionales.

Para Europa, mantener un sistema energético asequible y confiable al tiempo que se preserva la capacidad industrial requerirá un enfoque pragmático de los recursos y las cadenas de suministro. Donde existan recursos autóctonos, deben utilizarse estratégi-

camente. La producción continua de gas natural en el mar del Norte, por ejemplo, puede proporcionar estabilidad y complementar las importaciones de GNL, incluso las de Estados Unidos, mientras Europa gestiona los riesgos de suministro a largo plazo.

Europa también debe priorizar las tecnologías energéticas cuyas cadenas de suministro puedan afianzarse en gran medida dentro del continente y de los socios estratégicos. La energía nuclear es un ejemplo claro: proporciona energía firme, apoya la electrificación y reduce la exposición a proveedores de energía externos, de una forma que las fuentes intermitentes por sí solas no pueden, especialmente en la medida en que las cadenas de suministro de energía limpia dependen de China. El fortalecimiento de las capacidades nacionales de fabricación y del ciclo del combustible en torno a estas tecnologías contribuiría directamente a la competitividad.

Por último, la mejora de la competitividad energética dependerá no solo de las opciones tecnológicas, sino también de la agilidad institucional. Tanto Europa como Estados Unidos tienen sistemas regulatorios que fueron diseñados para mejorar el desempeño ambiental, pero ahora corren el riesgo de desacelerar el desarrollo de infraestructuras, la expansión de la red y las necesidades de fabricación en un momento en que la demanda de energía está aumentando. La respuesta de Europa a la crisis energética tras la invasión rusa de Ucrania mostró que es posible una acción más rápida. La rápida construcción de terminales de importación de GNL en Alemania demostró que cuando la seguridad energética se vuelve urgente, se pueden superar las barreras de permisos e inversión, esa mentalidad debe estar más generalizada en todos los esfuerzos para frenar la desindustrialización.

Cada vez más, las políticas energéticas priorizan la seguridad por encima de los requisitos de sostenibilidad, competitividad y asequibilidad. ¿Qué consecuencias prevé?

No se trata tanto de que la política energética de repente priorice la seguridad sobre la sostenibilidad, la asequibilidad o la competitividad. Más bien, los responsables políticos están redescubriendo algo que había sido más fácil de pasar por alto durante el período de relativa estabilidad geopolítica posterior a la Guerra Fría: los sistemas energéticos siempre se configuran, ante todo, por consideraciones de seguridad. Durante muchos años, los flujos comerciales estables y las cadenas de suministro aparentemente predecibles permitieron a los gobiernos

asumir que la eficiencia del mercado y los objetivos ambientales podrían avanzar sin grandes *tradeoffs* estratégicos. Esa premisa es cada vez más difícil de conciliar con los asuntos internacionales de hoy.

La invasión rusa de Ucrania demostró lo rápido que la dependencia energética puede convertirse en una vulnerabilidad estratégica. Al mismo tiempo, la concentración de cadenas de suministro de minerales críticos —especialmente en China, que representa la mayor parte de la capacidad mundial de procesamiento de muchos materiales clave—, pone de relieve que la transición a las nuevas tecnologías energéticas no elimina el riesgo geopolítico, sino que lo desplaza a otros lugares. En conjunto, estos avances obligan a los gobiernos a volver a centrarse en cómo la infraestructura energética, las cadenas de suministro de combustibles y los insumos tecnológicos respaldan de manera fundamental la resiliencia nacional.

Otro factor que refuerza este cambio son las perspectivas de la demanda. El consumo de electricidad está aumentando en las economías avanzadas, impulsado por la electrificación, la infraestructura digital, la relocalización de la fabricación y las tendencias demográficas en algunas regiones. Se espera que la expansión de la inteligencia artificial por sí sola añada un crecimiento significativo de la demanda en la próxima década. A medida que esta aumenta, se intensifica la presión política para garantizar la seguridad y la asequibilidad, lo que dificulta que los Gobiernos reduzcan sus opciones de energía demasiado rápido.

La consecuencia más probable no es el abandono de los objetivos de sostenibilidad, sino un enfoque más pragmático de los mismos. Los combustibles convencionales seguirán formando parte del sistema durante más tiempo del que muchas proyecciones suponían, especialmente cuando apoyan la estabilidad de la red o la competitividad industrial. Al mismo tiempo, es probable que los países inviertan más en asegurar las cadenas de suministro para las tecnologías de nueva generación, desde minerales críticos hasta sistemas nucleares y de almacenamiento avanzados, a menudo a través de asociaciones entre aliados y proveedores de confianza.

En términos prácticos, esto apunta hacia un sistema energético en general más consciente de la seguridad: en el que la diversificación, la redundancia y la capacidad nacional tienen mayor peso en las decisiones políticas.

Gracias a la apertura de nuevas rutas marítimas y el acceso a nuevos recursos minerales, el Ártico se ha convertido en un factor geopolítico de primer nivel, y su importancia se intensificará a medida que avance el calentamiento climático. ¿Cómo describiría los impactos más relevantes a corto, medio y largo plazo?

El Ártico está pasando de ser un espacio estratégico periférico para convertirse en un escenario geopolítico central. No solo está cambiando el acceso a los recursos o a las rutas marítimas, sino un enfoque cada vez mayor en el grado en que los estados consideran la región como crucial para su seguridad nacional, sus cadenas de suministro y su seguridad energética a largo plazo.

A corto plazo, los impactos más visibles son de carácter securitario. A medida que el hielo estacional retrocede y la región se vuelve más navegable, los Estados árticos y sus aliados están priorizando la presencia activa y el despliegue de infraestructuras, en lugar de la mera expansión comercial. Para Rusia, el Ártico ha sido una prioridad estratégica durante años, ha reforzado las instalaciones militares y enfatizado el control sobre la Ruta Marítima del Norte, mientras que China está incrementando su actividad mediante inversiones, investigación y las ambiciones vinculadas al transporte marítimo. Esa dinámica está empujando a los miembros de la OTAN y a sus socios a prestar más atención al Ártico, incluso a través de nuevos ejercicios y esfuerzos de coordinación como la misión Arctic Sentry, porque la inacción podría suponer ceder influencia en la región a los adversarios.

A más largo plazo, la importancia del Ártico estará cada vez más ligada a los recursos y al posicionamiento estratégico. Es probable que la región contenga importantes reservas de hidrocarburos y depósitos minerales, aunque la extracción a gran escala sigue siendo costosa y técnicamente exigente. Lo que importa a corto plazo es que la expectativa de un acceso futuro ya está condicionando la forma en que los países se posicionan, anticipándose a lo que podría volverse viable en las próximas décadas.

Para las empresas que ya operan en entornos árticos, esa experiencia previa supone un valor estratégico. Probablemente, empresas como Repsol, que operan en Alaska y están familiarizadas con el marco regulatorio y ambiental de la región, así como con su relación con las poblaciones indígenas, estarán mejor posicionadas a lo largo del tiempo que los nuevos actores que intenten entrar en el Ártico a medida que evolucionen las condiciones.

La AIE destaca una reactivación de los proyectos de generación de energía nuclear en todo el mundo, pero los nuevos reactores de tercera generación siguen enfrentándose a problemas de sobrecostes. ¿Cuál es su opinión sobre los retos tecnológicos y la necesidad de avanzar en la curva de aprendizaje para que estos reactores sean competitivos?

Los sobrecostes en los nuevos proyectos nucleares reflejan cómo la industria gestiona la complejidad, el riesgo financiero y la ejecución. Tanto si hablamos de grandes reactores de agua ligera como de pequeños reactores modulares (de Generación III+ o de Generación IV), la construcción nuclear exige plazos largos, componentes altamente especializados y estabilidad regulatoria durante décadas. Cuando las cadenas de suministro fallan, los requisitos regulatorios cambian o el respaldo político se debilita, los costes se disparan rápidamente porque se acumulan los retrasos a lo largo de períodos de construcción tan largos.

La madurez del diseño es otro problema persistente. Los proyectos de reactores nucleares requieren que el diseño esté completamente finalizado antes de iniciar la construcción. Incluso pequeños ajustes de ingeniería realizados durante la fabricación pueden desencadenar sobrecostes significativos. Los desarrolladores de reactores de nueva generación están tratando de simplificar los diseños y estandarizar componentes precisamente para reducir este riesgo, pero la industria todavía se encuentra en una fase temprana de esa transición.

En última instancia, la competitividad de la nueva energía nuclear depende de pasar de proyectos pioneros a un despliegue sistemático. Las primeras plantas de su tipo inevitablemente conllevarán costes más elevados porque los inversores incorporan en el precio el riesgo de construcción, la incertidumbre regulatoria y unas cadenas de suministro no probadas. Por lo tanto, el desafío para los responsables políticos no consiste tanto en demostrar que la tecnología funciona, sino en crear las condiciones que permitan construir múltiples unidades para que los efectos del aprendizaje, la estandarización y la confianza en la financiación puedan reducir los costes con el tiempo.

Un factor clave en el desarrollo de la política de descarbonización es garantizar el suministro de minerales críticos. ¿Cuál es su opinión sobre los cambios en las cadenas de suministro globales que esto implica y qué impacto cree que puede tener en los equilibrios geopolíticos?

Garantizar el suministro de minerales críticos no tiene tanto que ver con la descarbonización por sí sola, como con la autonomía estratégica en un mundo en el que las cadenas de suministro se utilizan cada vez más como herramienta de presión geopolítica. El cambio que estamos observando no apunta hacia la autosuficiencia, algo poco realista, sino hacia la resiliencia, es decir, la capacidad de tomar decisiones estratégicas, incluso en situaciones de tensión.

El predominio de China explica por qué se está produciendo este cambio. Controla aproximadamente el 60 % de la producción mundial de minerales críticos y alrededor del 85 % de la capacidad de procesamiento, incluyendo casi el 90 % del refinado de tierras raras. Esa concentración importa más que la mera geología, porque los principales cuellos de botella a menudo se sitúan más abajo en la cadena: en el refinado, la fabricación de componentes y la producción de imanes. En términos prácticos, una interrupción en la capacidad de procesamiento puede paralizar industrias enteras, desde los vehículos eléctricos hasta los sistemas de defensa avanzados, independientemente de dónde se extraigan las materias primas.

Como consecuencia, las cadenas de suministro mundiales se están reorganizando en dos vías paralelas. En primer lugar, los países están tratando de diversificar la producción y el procesamiento a través de alianzas con socios como Australia, Canadá y Argentina. En segundo lugar, los Gobiernos están invirtiendo intensamente en capacidad nacional de refinado, reciclaje y fabricación de componentes, no para sustituir los mercados globales, sino para asegurarse de no depender por completo de un único proveedor.

Esta reestructuración ya está remodelando los equilibrios geopolíticos. Los minerales se consideran cada vez más activos estratégicos, y las relaciones de suministro se están convirtiendo en instrumentos de influencia. China ha demostrado su disposición a utilizar controles a la exportación sobre materiales como el galio, el grafito y los elementos de tierras raras, lo que refuerza la percepción de que las cadenas de suministro de minerales se sitúan ahora, junto con la energía y los semiconductores, entre los instrumentos del poder estatal.

Al mismo tiempo, la escala de China puede acabar generando incentivos para que el resto del mundo innove en torno a estas dependencias. Los esfuerzos por desarrollar materiales sustituti-

vos, reducir la intensidad de uso de tierras raras en los imanes, ampliar el reciclaje y rediseñar las cadenas de suministro se están acelerando precisamente porque los riesgos de concentración son muy altos. En ese sentido, el predominio de China puede resultar, a la vez, una vulnerabilidad a corto plazo y un catalizador de diversificación a largo plazo.

El resultado probable es un sistema más fragmentado, pero también más resiliente, en el que las cadenas de suministro estén determinadas tanto por alianzas y prioridades estratégicas como por el coste. Los minerales críticos ya no son solo insumos para las tecnologías de energía limpia; se están convirtiendo en elementos centrales de la forma en que los Estados conciben la política industrial, la preparación en materia de defensa y la capacidad de influencia geopolítica.

¿Qué opina sobre el impacto de la inteligencia artificial en las políticas energéticas?

Es probable que la inteligencia artificial afecte primero a la política energética como una cuestión de demanda, no como una cuestión tecnológica. La rápida expansión de los centros de procesamiento de datos, la infraestructura digital y la fabricación avanzada ya está acelerando el consumo de electricidad en las economías avanzadas, tras años de demanda relativamente estable. Ese cambio está obligando a los responsables políticos a afrontar una realidad estructural: satisfacer el aumento de la demanda a corto plazo exige una nueva capacidad de generación, redes más robustas y un despliegue de infraestructura más rápido.

Por lo tanto, a corto plazo, la inteligencia artificial está actuando como catalizador de decisiones políticas que, de otro modo, podrían haber tardado años en adoptarse. En Estados Unidos, se ha intensificado la atención sobre los cuellos de botella en la transmisión, la estabilidad de la red y la reforma de los procesos de autorización, puesto que la magnitud y la rapidez del aumento previsto de la demanda de electricidad dejan poco margen para desarrollos lentos. También plantea riesgos en términos de asequibilidad. Si la inversión en infraestructuras y la expansión de la oferta no avanzan al ritmo de la demanda, los consumidores percibirán un aumento del precio de la electricidad, lo que puede traducirse rápidamente en presión política.

A más largo plazo, la inteligencia artificial podría contribuir a mejorar la eficiencia de los propios sistemas energéticos. La

modelización avanzada, el mantenimiento predictivo, la optimización de redes y el descubrimiento acelerado de materiales ofrecen el potencial de mejorar la fiabilidad al tiempo que reducen costes. No obstante, estos beneficios son condicionales: solo se materializarán si el sistema dispone, en primer lugar, de capacidad suficiente para absorber el aumento de la demanda.

En su opinión, ¿cuáles son las causas del liderazgo de China en áreas clave de las tecnologías para la descarbonización?

El liderazgo de China en tecnologías clave para la descarbonización no tiene tanto que ver con el resultado de un avance tecnológico repentino como con décadas de estrategia industrial deliberada. Pekín invirtió pronto en recursos *upstream*, procesamiento *downstream* y capacidad de fabricación a gran escala en un momento en el que muchas economías occidentales se sentían cómodas externalizando industrias intensivas en recursos. Esa combinación de geología, capital paciente y coordinación de políticas permitió a China construir cadenas de suministro verticalmente integradas en baterías, imanes de tierras raras, componentes solares y equipos para redes eléctricas.

Un factor crítico ha sido el predominio de China en el procesamiento de minerales en lugar de solo en la extracción. Controlar aproximadamente el 85 % de la capacidad mundial de procesamiento de muchos materiales críticos otorga a las empresas chinas de influencia a lo largo de toda la cadena de valor, desde las materias primas hasta las tecnologías finales. Las empresas occidentales contribuyeron inicialmente a este ascenso mediante empresas conjuntas y transferencia tecnológica, pero China desarrolló de forma progresiva capacidades técnicas propias y restringió la participación extranjera una vez que dichas capacidades maduraron.

China también se benefició de marcos regulatorios y financieros que respaldaron horizontes de inversión prolongados y despliegues a gran escala. El resultado no es solo competitividad de costes, sino ecosistemas de fabricación difíciles de replicar rápidamente. Reequilibrar esa ventaja exigirá tiempo, coordinación entre aliados y un énfasis en la reconstrucción de la capacidad de procesamiento, no solo en la extracción.

Capítulo primero

La geopolítica del gas natural ante un nuevo orden

Ignacio Urbasos

Resumen

Bajo el orden liberal internacional, el gas natural se integró plenamente en la globalización a través de la expansión del mercado de GNL, el aumento de las inversiones transnacionales, la consolidación de instituciones internacionales de gobernanza energética y la liberalización del sector en buena parte del mundo. Este proceso dio lugar a un mercado interconectado y relativamente eficiente, regulado por instituciones multilaterales y operado principalmente por empresas, en el que la interdependencia compleja parecía haber desplazado a la geopolítica. La invasión rusa de Ucrania y la posterior instrumentalización del gas natural suponen una ruptura definitiva con este paradigma. Desde entonces, la lógica geopolítica se ha impuesto a los intereses comerciales, erosionando pilares fundamentales del orden liberal como el uso del dólar y del sistema financiero estadounidense, el respeto por los mecanismos de arbitraje o la protección de las inversiones transnacionales. El resultado es un mercado crecientemente fragmentado, en el que los flujos energéticos responden cada vez más al alineamiento geopolítico que a criterios de eficiencia económica. Este nuevo orden gasista se caracteriza por la instrumentalización de la interdependencia, una mayor fragmen-

tación y un aumento de la volatilidad, reflejando el avance de un orden internacional más competitivo y realista.

Palabras clave

Geopolítica, Gas natural, Orden internacional, Realismo, Interdependencia.

The geopolitics of natural gas facing a new order

Abstract

Under the international liberal order, natural gas became fully integrated into globalisation through the expansion of the LNG market, increased transnational investment, the consolidation of international energy governance institutions, and the liberalisation of the sector in much of the world. This process gave rise to an interconnected and relatively efficient market, regulated by multilateral institutions and operated mainly by companies, in which complex interdependence seemed to have displaced geopolitics. Russia's invasion of Ukraine and the subsequent instrumentalisation of natural gas represent a definitive break with this paradigm. Since then, geopolitical logic has prevailed over commercial interests, eroding fundamental pillars of the liberal order such as the use of the dollar and the US financial system, the respect for arbitration mechanisms and the protection of transnational investments. The result is an increasingly fragmented market, in which energy flows respond more to geopolitical alignment than to criteria of economic efficiency. This new gas order is characterised by the instrumentalisation of interdependence, greater fragmentation and increased volatility, reflecting the advance of a more competitive and openly realistic international order.

Keywords

Geopolitics, Natural gas, International order, Realism, Interdependence.

LA GEOPOLÍTICA DE UN NUEVO ORDEN GASISTA

ESTADOS UNIDOS

- EEUU SE HA CONVERTIDO EN EL MAYOR EXPORTADOR DE GAS DEL MUNDO.
- LA UE ES SU PRINCIPAL DESTINO, JUNTO CON SUS ALIADOS ASIÁTICOS: JAPÓN, COREA DEL SUR Y TAIWÁN.
- BAJO LA LÓGICA DEL "DOMINIO ENERGÉTICO", TRUMP HA INSTRUMENTALIZADO LAS EXPORTACIONES DE GAS PARA OBTENER CONCESIONES GEOPOLÍTICAS.

CHINA

- HACE UNA DÉCADA, CHINA ESTABA POSICIONADA PARA SER UN GRAN MERCADO PARA EL GAS ESTADOUNIDENSE.
- SIN EMBARGO, CHINA HA IMPUESTO ARANCELES COMO RESPUESTA A LA GUERRA COMERCIAL INICIADA POR TRUMP.
- ACTUALMENTE, CHINA ES EL PRINCIPAL MERCADO PARA EL GAS RUSO Y SE ESPERA QUE ESTE COMERCIO SE INTENSIFIQUE EN LOS PRÓXIMOS AÑOS.
- PARA CHINA, EL GAS RUSO ES MÁS ECONÓMICO QUE OTRAS ALTERNATIVAS Y SE COMERCIALIZA EN YUANES, REDUCIENDO SU EXPOSICIÓN AL SISTEMA FINANCIERO OCCIDENTAL.

UNIÓN EUROPEA

- HASTA 2022, LA UE ERA EL PRINCIPAL MERCADO PARA EL GAS RUSO. DESDE ENTONCES, LAS IMPORTACIONES PROCEDENTES DE RUSIA HAN CAÍDO UN 90% Y SE ESPERA QUE SE ELIMINEN POR COMPLETO EN 2028.
- COMO PARTE DE LA GUERRA GEOECONÓMICA, LA UE HA INCAUTADO ACTIVOS RUSOS EN EUROPA Y HA IMPUESTO SANCIONES A SUS EMPRESAS ENERGÉTICAS, ROMPIENDO CON DÉCADAS DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA.
- ACTUALMENTE, NORUEGA Y ESTADOS UNIDOS SON LOS PRINCIPALES PROVEEDORES DE GAS DE LA UE.

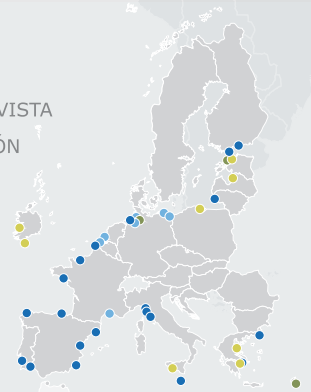
RUSIA

- TRAS LA INVASIÓN DE UCRANIA, RUSIA HA TRATADO DE BASCULAR SUS EXPORTACIONES DE GAS DE LA UE HACIA CHINA.
- RUSIA HA CONFORMADO UNA FLOTA "FANTASMA" DE METANEROS PARA TRANSPORTAR GAS DEL ÁRTICO A CHINA, DESAFIANDO LAS SANCIONES OCCIDENTALES.
- CON LA CONSTRUCCIÓN DEL GASODUCTO PODER DE SIBERIA 2, RUSIA PODRÁ REDIRIGIR HACIA CHINA RESERVAS QUE TRADICIONALMENTE SE DESTINABAN A EUROPA.



PLANTAS DE GNL EN LA UE

- OPERATIVA
- OPERATIVA Y AMPLIACIÓN PREVISTA
- EN CONSTRUCCIÓN
- PREVISTA



Fuente: Gas Infrastructure Europe

PLANTAS DE GNL DE RUSIA

1 SAKHALIN-2

2 YAMAL LNG

3 CRYOGAS-VYSOTSK

4 YAMAL LNG, IV LINE

5 PORTOVAYA LNG

6 ARCTIC LNG 2

7 UST LUGA LNG

● OPERANDO

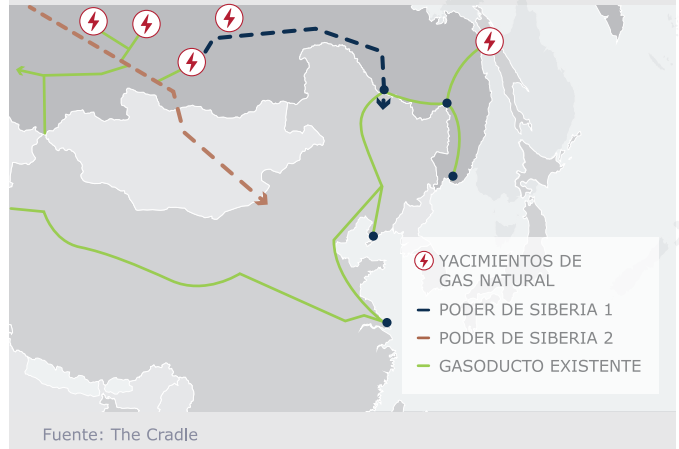
● EN CONSTRUCCIÓN



GASODUCTOS RUSIA-EUROPA



GASODUCTOS RUSIA-CHINA



1 Introducción

En el año 2026 es evidente que el sistema internacional se encuentra en plena transición del orden liberal que había caracterizado el periodo posterior a la Guerra Fría. El final del momento unipolar estadounidense viene acompañado de profundas transformaciones en las relaciones entre Estados con el retorno de la competición entre grandes potencias, la instrumentalización de la interdependencia, una revisión del proceso de globalización bajo la lógica de suma cero y, en definitiva, el retorno de un orden eminentemente realista (Mearsheimer, 2019).

La energía siempre ha estado en el centro de la pugna geopolítica. Sin embargo, el espejismo de un orden liberal hegemónico parecía ofrecer una vía cooperativa gracias a la consolidación de nuevos marcos de gobernanza energética y a los beneficios asociados a la interdependencia compleja (Keohane y Nye, 1973; 1987). Desde la caída de la Unión Soviética, la industria energética había experimentado un proceso de acelerada globalización, impulsado por la liberalización de los mercados, la privatización de empresas estatales y el avance tecnológico, con el Tratado de la Carta de la Energía como pináculo del multilateralismo (Westphal, 2006). La desregulación permitió la entrada de actores privados en sectores previamente controlados por monopolios estatales y con el fin de la Guerra Fría se abrió una nueva geografía de oportunidades para la inversión transnacional. El comercio de hidrocarburos, realizado en su mayoría en dólares, se presentaba como la clave de bóveda de la hegemonía estadounidense, que, a cambio de garantizar el libre comercio y la seguridad marítima, gozaba del denominado *privilegio exorbitante* de emitir la moneda global (Priest, 2012). La *financiarización* de los mercados de las materias primas elevó el comercio de energía a un nuevo nivel de complejidad, proliferando los intermediarios (*traders*) y mercados de futuros. Con la aparición de nuevas economías emergentes, especialmente China, se produjo un rápido aumento del comercio internacional de petróleo, gas natural y carbón, que, junto con la construcción de nuevas infraestructuras, generó nuevos flujos energéticos que superaban los viejos patrones de un sur global exportador y un norte consumidor.

El gas natural representaba un caso paradigmático de esta inserción de la energía y su geopolítica en la globalización bajo el prisma liberal. Los grandes proyectos gasistas eran desarrollados por consorcios internacionales, se construyeron gasoductos de miles de kilómetros de longitud que cruzaban varios países y se creía en el potencial

transformador de la integración energética a través del gas, desde el norte de África, el Cono Sur o las relaciones entre la Unión Europea (UE) y Rusia. El desarrollo tecnológico había logrado la proeza de generalizar el transporte de gas natural por barco, licuarlo a -162 °C y regasificarlo en destino, permitiendo el consumo de gas natural en países como Japón o Corea del Sur, auténticas islas energéticas a miles de kilómetros de las reservas más cercanas de este hidrocarburo. A diferencia del petróleo, el gas natural se consideraba un combustible más seguro geopolíticamente sin la existencia de un gran cártel como la OPEP que manipulara los precios o episodios marcados por su instrumentalización con fines geopolíticos, como las crisis del petróleo de los años setenta (Goldthau y Witte, 2010). Además, en el contexto de la descarbonización, el gas natural venía a jugar un papel central como vector energético de transición, respaldo de las renovables y como el combustible fósil más limpio, tanto en términos de emisiones de gases de efecto invernadero como contaminación del aire (Gürsan y Gooyert, 2021).

Sin embargo, el 24 de febrero de 2022, cuando las tropas rusas invaden Ucrania, se desmorona la arquitectura de seguridad energética europea y, con ello, el gas natural se posiciona en el centro de la competición entre grandes potencias. La invasión rusa de Ucrania transforma para siempre la geopolítica del gas natural y su empleo como herramienta coercitiva por parte de Moscú, unida a la posterior respuesta occidental en forma de sanciones e incautaciones, dan paso a un nuevo orden gasista alineado con la realidad internacional.

2 Antecedentes: el espejismo liberal en un mercado en expansión

Antes de la invasión de Ucrania, el mercado del gas se presentaba como el paradigma energético de la hegemonía liberal. De ser un mercado fuertemente regulado y relativamente regionalizado, la tecnología y la liberalización lo habían insertado en la globalización. Se pueden identificar tres grandes catalizadores de este proceso: el desarrollo normativo de la UE, el efecto transformador de la expansión del mercado de GNL liderado por Estados Unidos y la inversión transnacional a través de empresas multinacionales.

2.1 La UE como laboratorio del paradigma liberal

Desde la primera directiva del gas de 1998 se dieron los primeros pasos en la liberalización del mercado comunitario, integrando

progresivamente a los proveedores externos en su órbita regulatoria e ilustrando el efecto Bruselas en la gobernanza energética global. Al dismantelar monopolios e imponer el acceso de terceros a las infraestructuras, el segundo y especialmente el tercer paquete energético demostraron la fuerza regulatoria de la UE, obligando a sus suministradores, como Rusia, Noruega, Argelia o Catar, a adaptarse a las exigencias normativas que imponía Bruselas a cambio de acceder al mayor y más lucrativo mercado de gas del mundo (Westphal, 2006). Un caso paradigmático es el de Gazprom, que, tras perder diversos arbitrajes, tuvo que ceder en cuestiones esenciales como la formación de precios o la estructura de sus filiales europeas, aceptando el acervo comunitario en materia de energía (Stern, 2015).

Esta liberalización aceleró la creación de una profunda red de interdependencia entre la UE y sus suministradores que supuestamente se fundamentaba en los principios del libre mercado y del imperio de la ley. Durante este proceso, empresas extranjeras adquirieron participaciones en activos europeos del mercado del gas, como almacenamientos y actividades de comercialización, integrándolos en el mercado interior y dándoles acceso a los beneficios económicos de toda la cadena de valor. Gazprom, por ejemplo, antes de 2022, además de ser el primer proveedor de gas en la UE, era el primer operador de almacenes subterráneos de gas en suelo europeo, operaba una de las principales comercializadoras de gas y era accionista de algunos de los gasoductos más importantes del continente (Jirušek y Kuchyňková, 2018). La aproximación de la UE a la seguridad energética trataba de garantizar el funcionamiento eficiente de los mercados internacionales (Chester, 2010) frente al enfoque geopolítico tradicional centrado en el acceso físico a los recursos. Mediante mercados eficientes operados por empresas privadas y reglas claras, se esperaba despolitizar los flujos energéticos en favor de la eficiencia, desincentivando la instrumentalización de la interdependencia bajo una lógica ganar-ganar (Escribano, 2011).

2.2 La globalización del gas a través del GNL

Tradicionalmente, el gas natural se ha comercializado sobre todo a escala regional, con mercados concentrados en torno a las zonas productoras o a regiones próximas, debido en gran medida a los elevados costes de transporte. Durante décadas, la forma más eficiente y preferida de transportar gas a largas distancias fue el gasoducto, una opción sujeta a importantes limitaciones

geográficas, económicas y geopolíticas. Aunque desde la década de 1960 el desarrollo de tecnologías para enfriar el gas natural y transformarlo en gas natural licuado permitió su transporte por vía marítima de manera comparable al del petróleo crudo, el proceso de licuefacción, transporte y regasificación ha sido significativamente más costoso, intensivo en energía y capital. Como consecuencia, no ha existido un único mercado global del gas natural, sino que los intercambios han permanecido en gran medida regionalizados, dando lugar a marcadas diferencias de precios entre regiones en función de sus condiciones específicas de oferta y demanda.

Sin embargo, en los últimos veinticinco años el mercado del GNL ha experimentado un proceso de crecimiento y transformación sin precedentes, impulsado por el mismo paradigma liberal de competencia empresarial y desregulación. El sector ha pasado de ser un espacio de exportación limitado —dominado por tres países: Argelia, Indonesia y Malasia— a configurarse como un sistema mucho más diversificado, con dos grandes exportadores consolidados: Catar y Australia, y, de manera especialmente significativa, con la incorporación de Estados Unidos desde 2016 (Mañé-Estrada y Albinyana, 2023).

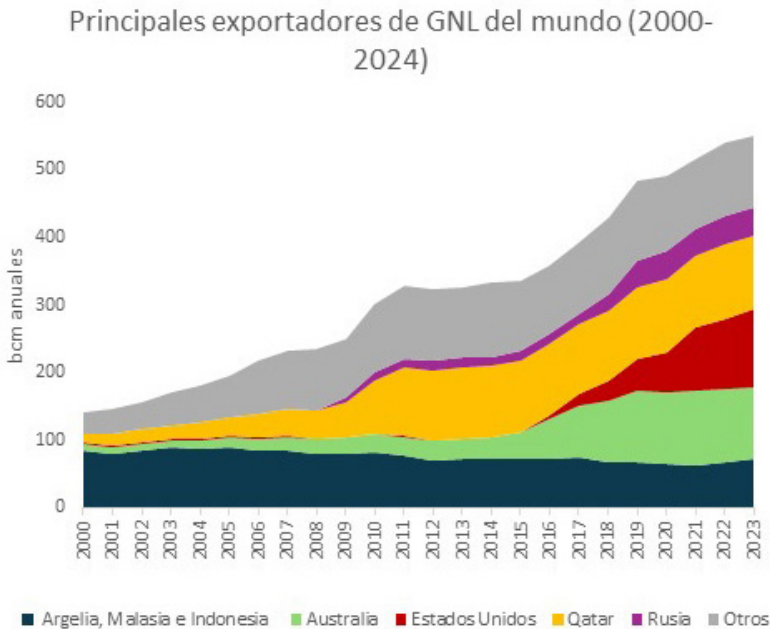


Figura 1. Fuente: The Energy Institute (2025). Bcm = mil millones de metros cúbicos de gas natural

A diferencia del mercado petrolero, donde desde hace décadas el transporte marítimo se consolida como la modalidad dominante y en 2024 concentraba cerca del 77 % del comercio internacional (EIA, 2024), en el caso del gas natural el comercio de GNL representaba en el año 2000 apenas el 27 % del mercado mundial y, antes de la invasión de Ucrania, no superaba el 47 %. De aquí al final de la década, la entrada en funcionamiento de nueva capacidad de exportación de GNL, principalmente en Estados Unidos, Catar y Canadá, consolidará esta tendencia al incrementar en más de un 50 % la capacidad disponible, sin que se espere un crecimiento sustancial del comercio por gasoductos (IEA, 2025).

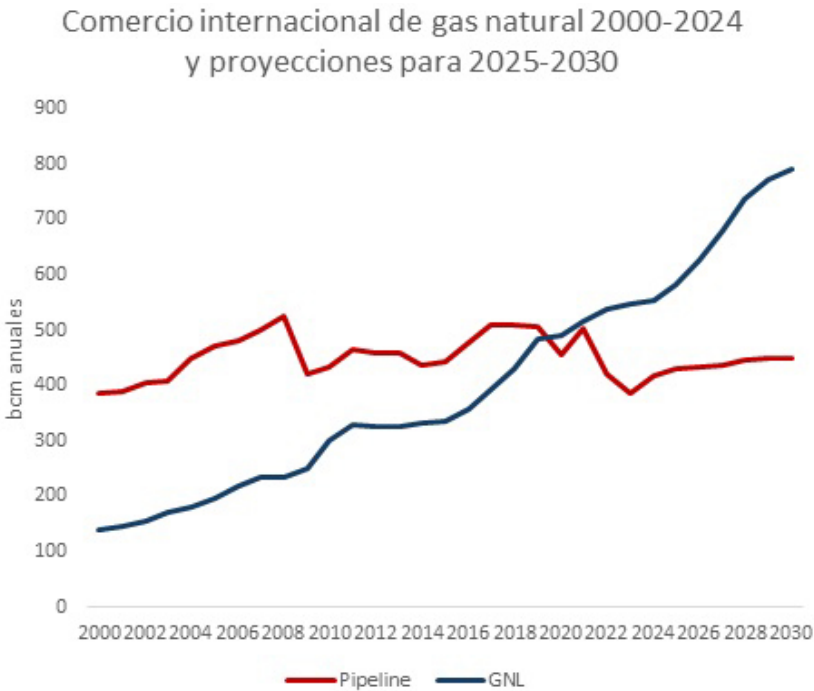


Figura 2. Fuente: The Energy Institute (2025), IEA (2025)

En paralelo, la propia operativa del GNL ha evolucionado hacia un modelo de mayor flexibilidad tanto para compradores como para vendedores, lo que refuerza el proceso de interdependencia de los mercados gasistas en un proceso de *desregionalización* del mercado de gas (Mañé-Estrada, 2022). El negocio del GNL se había desarrollado tradicionalmente sobre la base de contratos de largo plazo, generalmente de entre veinte y veinticinco años, que resultaban necesarios para poder financiar las inversiones en plantas de licuefacción y terminales de regasificación, tanto

desde la perspectiva del vendedor como del comprador. Estos contratos solían incluir estrictas cláusulas de destino, en virtud de las cuales el vendedor garantizaba un volumen de gas por contrato que el comprador estaba obligado a recibir en una o varias terminales específicas. De esta manera, los contratos replicaban la lógica contractual de los gasoductos, configurando auténticos corredores marítimos que, debido a sus características, operaban como tuberías virtuales.

La irrupción de Estados Unidos como superpotencia gasista gracias a la revolución del *fracking* (Bros, 2012) ha tenido un efecto transformador en la operativa del mercado internacional del gas. Los contratos de GNL firmados hace una década con terminales estadounidenses introdujeron innovaciones disruptivas en un mercado tradicionalmente rígido y dominado por acuerdos de largo plazo. De acuerdo con Tagliapietra (2022), esta flexibilidad contractual se ha sustentado en dos factores principales. En primer lugar, la eliminación de las cláusulas de destino, que permite a los compradores decidir el mercado final del gas adquirido. En segundo lugar, el ascenso de los denominados agregadores o *portfolio players*, compañías energéticas que combinan volúmenes de GNL procedentes de múltiples orígenes y los redistribuyen entre sus clientes según sus necesidades, ya sea mediante contratos a plazo o en el mercado *spot*.

El porcentaje de contratos con cláusulas de destino flexible pasó de una media del 34 % en el periodo de 2015 a 2017 a un 64 % en el de 2018 a 2020, impulsado principalmente por la irrupción de los proyectos estadounidenses de GNL, que también dominan los nuevos acuerdos firmados en esta década (Tagliapietra, 2022). Este marco contractual ha favorecido la creciente «petrolización» (Mañé-Estrada, 2022) del mercado del gas: los flujos se orientan con mayor arbitraje y oportunismo en función de la evolución de los distintos índices de precios globales, integrando a nuevos intermediarios, con un peso creciente de las transacciones en el mercado *spot*, que ya supone cerca de un 40 % de las operaciones (IGU, 2024), frente a la tradicional preferencia por el largo plazo.

En este contexto, el *Title Transfer Facility* (TTF), índice de referencia en Países Bajos, se ha consolidado como el valor clave para Europa y el Henry Hub para Estados Unidos, del mismo modo que el barril de Brent lo es para el petróleo europeo o el *West Texas Intermediate* (WTI) para el petróleo en Norteamérica. El TTF ofrece una señal de precios líquida y transparente, que com-

pite con su contraparte asiática, el índice JKM, emulando para el gas la operatividad del mercado a corto plazo del petróleo crudo (Heather, 2021). Los índices gasistas han permitido *desindexar* el precio del gas natural del del petróleo crudo, la práctica dominante en la industria hasta la liberalización del mercado europeo y la llegada del GNL estadounidense. La consecuencia es un mercado mucho más interconectado que en el pasado. Así, un repunte de la demanda de GNL en Asia provocado por una ola de frío puede atraer hacia esa región los cargamentos que los *traders* o *portfolio players* tienen por todo el mundo, lo que obliga a los operadores europeos a ofrecer precios más altos para asegurar su suministro. El resultado es una reconfiguración del mercado del gas, que transita de la fragmentación a la interconexión, con mayores niveles de volatilidad y exposición a los eventos geopolíticos, pero también con un incremento notable de su liquidez y flexibilidad.

2.3 La capacidad transformadora de las inversiones transnacionales

Las grandes transformaciones del mercado internacional del gas se han producido de la mano de las grandes compañías multinacionales, tanto públicas como privadas, y de sus inversiones transnacionales. A diferencia del sector petrolero, más marcado por el nacionalismo de los recursos, los grandes exportadores de GNL en el siglo XXI, Catar, Australia, Rusia y Estados Unidos, han desarrollado sus capacidades, cada uno con sus propias particularidades, bajo esquemas relativamente abiertos a la participación de capital internacional. Existen ejemplos paradigmáticos de estos flujos de inversión: la francesa TotalEnergies mantiene participaciones accionariales en los cuatro grandes exportadores de GNL, la estadounidense ExxonMobil está presente en Estados Unidos, Australia y Catar, y CatarEnergy, pese a su naturaleza estatal, combina inversiones en Catar y Estados Unidos con acuerdos de suministro a largo plazo con empresas australianas. La mayor complejidad tecnológica de la cadena de valor del gas natural incentivó a que los Estados con reservas de gas natural abrieran sus mercados a la inversión extranjera y la menor renta asociada a este hidrocarburo previno del nacionalismo de los recursos que ha dominado la política petrolera en el último siglo (Xu *et al.*, 2024).

Los grandes gasoductos desarrollados en las últimas décadas también se impulsaron mediante consorcios internacionales orientados a equilibrar intereses y mitigar el riesgo geopolítico.

El gasoducto Magreb-Europa, que atraviesa Argelia, Marruecos, España y Portugal, fue promovido por un accionariado que incluía, en sus distintos tramos, al menos una entidad de cada uno de los Estados implicados. De forma similar, Nord Stream integró a Gazprom con grandes empresas europeas consumidoras de gas. Aunque hoy ambas infraestructuras se han visto afectadas por la nueva realidad internacional y la integración de intereses empresariales resultó insuficiente para evitar su instrumentalización con fines geopolíticos, en el momento de su construcción se concibieron como proyectos destinados a generar espacios de prosperidad compartida, emulando el espíritu de cooperación económica que inspiró la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (Hernando de Larramendi y Thieux, 2025).

3 El gas natural se convierte en herramienta geoeconómica

La invasión rusa de Ucrania destruyó el principal flujo comercial de esta materia prima, obligando a una reconfiguración sin precedentes del mercado gasista que ha desatado una crisis de precios que continúa, aunque mitigada, hasta la actualidad. Esta ruptura del mercado ruso-europeo del gas natural por gasoducto ha tenido como resultado el advenimiento de nuevos corredores gasistas, tanto marítimos como terrestres, y la aparición de nuevas vulnerabilidades, dependencias y posibles puntos de ahogamiento. El enfrentamiento entre Rusia y Occidente no se ha producido exclusivamente en la dimensión militar y el espacio geoeconómico, en concreto el energético, ha sido un elemento central de esta confrontación.

La UE y Estados Unidos han tratado de dañar la economía rusa por medio de incautaciones de activos y sanciones sobre las principales compañías y entidades de la Federación Rusa, mientras Rusia respondió con medidas equivalentes con los activos occidentales bajo su control soberano (Urbasos, 2025). Las sanciones han fragmentado un mercado gasista que había experimentado en las últimas décadas un rápido proceso de convergencia, tanto de intercambios comerciales como tecnológicos, regulatorios y de inversión.

En concreto, los gasoductos que unían a Rusia con Europa constituían el símbolo más claro del estatus de Moscú como superpotencia energética fósil y de su capacidad de proyección sobre la UE (Bros, 2012). La gestión de su dimensión geopolítica había sido históricamente compleja para los Estados miembros y la

cohesión europea, dado que cada uno de ellos mantenía intereses y perspectivas divergentes (Urbasos, 2024). A través de una diplomacia comercial efectiva, Gazprom había logrado impulsar nuevas infraestructuras, como TurkStream y Nord Stream, que permitían sortear a los países de tránsito considerados poco amistosos, principalmente Ucrania y Polonia. De esta manera, construyó una red de transporte con una capacidad muy superior a las necesidades y al potencial real de intercambio entre Europa y Rusia.

La instrumentalización de esta dependencia por parte de Rusia puso en cuestión uno de los pilares de la teoría económica liberal: la premisa de que la interdependencia económica contribuye a la paz. Las principales potencias europeas, con Alemania a la cabeza, habían apostado por la interdependencia gasística con Rusia como un mecanismo para generar un «colchón de intereses» capaz de contener una eventual escalada geopolítica. La idea promovida por Berlín desde la caída de la Unión Soviética, según la cual la interdependencia económica y energética entre la UE y Rusia favorecería una aproximación de esta última hacia los postulados de la democracia liberal, quedó desacreditada definitivamente el 22 de febrero de 2022 (Steimberg, Urbasos y Escribano, 2025). En términos energéticos, la principal víctima de esta «ilusión liberal» (Barbieri, 2009) fue el flujo bilateral de gas natural entre Rusia y la UE, un mercado milmillonario que se extendía a través de una profunda red de gasoductos, empresas intermediarias, infraestructuras de almacenamiento y contratos a largo plazo.

De esta forma, si en 2021 los gasoductos rusos suministraban el 38,5 % de las importaciones de gas de la UE, consolidando una posición dominante en numerosos mercados cautivos (Henderson y Chyong, 2023), después de la invasión, como resultado del sabotaje del Nord Stream y el cierre de los corredores ucraniano y polaco, el gas ruso por gasoducto tan solo representaba, en 2025, un 5 % de las importaciones de la UE. En términos económicos, esta relación comercial ha pasado de estar valorada en más de 50 000 millones de dólares en 2021 a menos de 3000 millones en 2025 (Raghunandan, 2025). A finales de 2025, la UE acordó la hoja de ruta definitiva para el cese de estas importaciones y se espera que para finales de 2027 ya no entre ninguna molécula de gas ruso al mercado europeo.

La ruptura de este mercado ha tenido un efecto transformador en toda la economía global. Ante la pérdida del gas ruso, especialmente después del cierre y posterior sabotaje de Nord Stream,

las empresas de la UE se vieron obligadas a buscar nuevos suministradores de gas, encontrando en el GNL una alternativa que, aunque más cara, era mucho más rápida y modular que la tradicional vía de suministro del continente: el gasoducto. La transición hacia un mercado europeo mixto de gasoductos y GNL se ha materializado en cuestión de meses: en 2021 el gas licuado representaba el 21 % de las importaciones, en el segundo trimestre de 2025 alcanzó el 44 %. Esta transformación ha convertido a la UE en el principal importador del mundo de GNL, absorbiendo toda la nueva oferta disponible del mercado internacional, en ocasiones desplazando a países en desarrollo, y generando nuevos corredores energéticos que han reconfigurado la geografía del gas natural. En el nuevo mapa gasista de la UE, Rusia ha sido sustituida por mayores volúmenes desde Noruega por gasoducto, pero especialmente por el GNL proveniente de Estados Unidos.

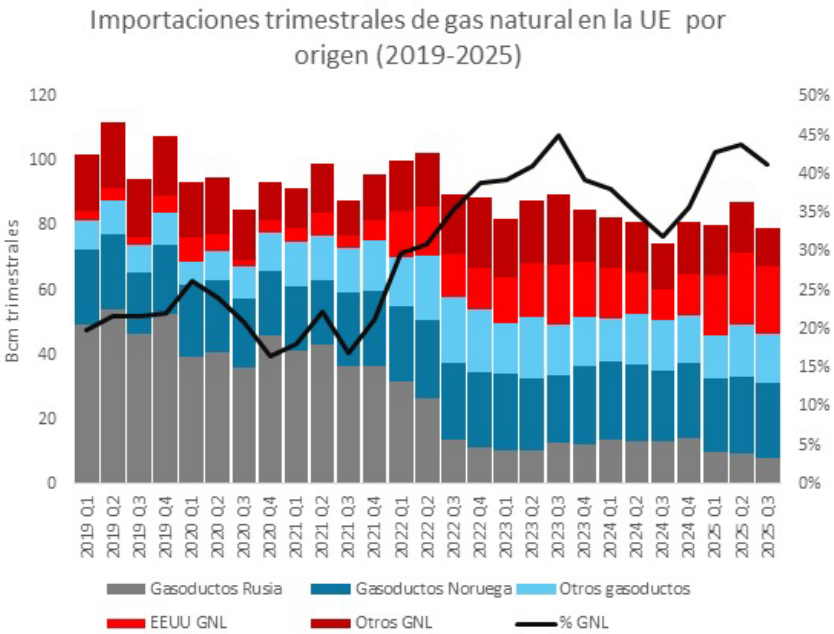


Figura 3. Fuente: Bruegel (2026)

La guerra en Ucrania no solo ha desarticulado el comercio internacional de gas, sino que también ha desmantelado el sistema de arbitraje que durante décadas reguló las disputas energéticas entre empresas europeas y rusas. Los laudos recientes relativos al corte de suministro de gas a través de Nord Stream o a la imposición del pago del gas en rublos han ofrecido decisiones dis-

pares, aunque con consecuencias especialmente gravosas para Gazprom, que se enfrenta a indemnizaciones millonarias. Para evitar nuevos fallos adversos y la ejecución de estas sentencias, Rusia ha recurrido a sus tribunales nacionales con el fin de impedir que sus empresas acaten decisiones arbitrales extranjeras, al tiempo que ha impuesto sanciones a compañías europeas que tratan de utilizar estos mecanismos para obtener compensaciones (Urbasos, 2024).

Paralelamente, tanto Rusia como varios Estados europeos han procedido a la nacionalización de activos energéticos por razones estratégicas, erosionando décadas de confianza e inversión cruzada. Este proceso ha contribuido al colapso del entramado institucional que sustentaba el comercio internacional de gas sobre la base de los principios del libre mercado. Esta evolución, en la que la soberanía estatal parece imponerse sobre las normas compartidas y los intereses de actores no estatales, como las empresas, encaja con lo que la literatura identifica como un retorno a una lógica neowestfaliana (Esteban, 2025). Desde esta perspectiva neowestfaliana, el sistema energético tendería a estructurarse en torno a los Estados, con primacía de la soberanía estatal sobre los derechos individuales, incluidas las personas jurídicas, y sobre las instituciones supranacionales. Además de la erosión del sistema de arbitraje, otra manifestación de esta deriva es la retirada de la propia UE del Tratado de la Carta de la Energía en 2024, tras constatar que se trataba de un instrumento de gobernanza propio de un orden energético liberal y basado en los combustibles fósiles que ha quedado desfasado. Igualmente, el rechazo frontal de Estados Unidos y Catar al reglamento sobre metano o la directiva sobre la diligencia debida en materia de sostenibilidad empresarial (CS3D) de la UE es una prueba de las crecientes reticencias de los Estados a ceder soberanía en materia de gobernanza energética.

4 Realineamiento geopolítico

El fin del orden liberal gasista construido bajo la lógica de la interdependencia ha dado paso a una nueva fórmula en las relaciones comerciales que prioriza el alineamiento geopolítico y la seguridad de suministro frente a la eficiencia económica o la diversificación. Este nuevo modelo tiende a reforzar el papel de las grandes potencias, en particular Estados Unidos y China, que cuentan con la capacidad de proyectar sus preferencias energéticas sobre sus respectivas áreas de influencia.

El ejemplo más claro de este paradigma emergente es la convergencia transatlántica de los flujos de gas natural hacia la UE, que tras la invasión rusa de Ucrania ha llegado a absorber más del 60 % de las exportaciones estadounidenses de gas natural licuado (EIA, 2025). Para Estados Unidos, ha sido una prioridad desde el inicio de sus exportaciones de GNL en 2016 garantizar que el mercado europeo del gas natural se mantuviera abierto. Washington ha observado tradicionalmente con escepticismo la relación gasista entre la UE y Rusia y, ya en la década de 1980, la Administración Reagan trató de impedir, mediante sanciones, la construcción de una red de gasoductos destinada a abastecer por primera vez el mercado de Europa occidental, en lo que constituía la prolongación energética de la *Ostpolitik* impulsada por Willy Brandt (Forsberg, 2016).

Esta oposición se intensificó tras la anexión ilegal de Crimea por parte de Rusia en 2014 y volvió a reforzarse ante la decisión de construir Nord Stream 2 en 2015. En este contexto, el Congreso de Estados Unidos aprobó la *Protecting Europe's Energy Security Act*, introduciendo sanciones contra las empresas implicadas en la construcción del gasoducto. De forma paralela, la primera Administración Trump promovió activamente las exportaciones estadounidenses de GNL a Europa bajo la etiqueta de «gas de la libertad» (Jong, 2023).

Con la invasión rusa de Ucrania en 2022 y la consiguiente crisis europea del gas, se produjo un fuerte incremento de las compras de GNL estadounidense. Estas respondieron en gran medida a dinámicas de mercado, pero fueron también incentivadas políticamente bajo la Administración Biden a través de la creación de la *EU-US Task Force on Energy Security*, que contribuyó a coordinar suministros y a estabilizar el mercado europeo (Steimberg, Urbasos y Escribano, 2025).

Desde la llegada de Trump, el GNL también se ha integrado en la agenda neomercantilista que impone Washington al resto del mundo. En el último acuerdo comercial entre la UE y Estados Unidos, uno de los compromisos más llamativos fue la adquisición por parte de Bruselas de hasta 750 000 millones de dólares en productos energéticos estadounidenses, incluidos GNL, petróleo y combustibles nucleares, entre 2026 y 2028. Aunque estas cifras resultan difícilmente realizables por su magnitud, ilustran con claridad hasta qué punto la geopolítica está moldeando la configuración de los nuevos flujos energéticos. Otro ejemplo similar es el de los compromisos de inversión y compra de gas natural

estadounidense por parte de Japón, Corea del Sur y Taiwán para apaciguar las exigencias comerciales y mantener los compromisos en defensa de Washington.

En este contexto, las exportaciones de gas natural se han consolidado como una palanca central de la política exterior estadounidense. Las distintas administraciones han utilizado esta capacidad de manera diferente, oscilando entre el énfasis en la flexibilidad contractual y la seguridad de suministro con Biden o la integración del gas en las negociaciones comerciales con Trump. Sin embargo, la lógica subyacente se mantiene: Estados Unidos busca consolidarse como un suministrador clave para sus aliados, convirtiendo sus recursos fósiles en un instrumento de influencia internacional que refuerce su estatus como superpotencia. Siguiendo esta lógica, la estrategia de seguridad de Estados Unidos de 2025 es clara en su definición de la nueva doctrina de dominancia energética (*energy dominance*): «Ampliar nuestras exportaciones netas de energía también profundizará las relaciones con nuestros aliados, al tiempo que reducirá la influencia de nuestros adversarios, protegerá nuestra capacidad para defender nuestras costas y, cuando y donde sea necesario, nos permitirá proyectar nuestro poder» (White House, 2025).

De esta forma, Estados Unidos se ha convertido en el mayor exportador de gas natural del mundo, tanto por gasoducto, cuyo destino principal son México y Canadá, como en forma de GNL. Esta nueva proyección de poder energético se concentra en sus aliados: la UE, Reino Unido, Japón, Corea del Sur y Taiwán, que desde 2022 han absorbido alrededor del 80 % de las exportaciones estadounidenses de GNL. Como consecuencia, estas economías han desarrollado una nueva dependencia estratégica respecto de Estados Unidos que se suma a la tradicional dependencia en materia de seguridad y defensa.

Al otro lado del Pacífico se observa un fenómeno similar de realineamiento geopolítico. Atraídas por la flexibilidad contractual del GNL estadounidense y por el rápido crecimiento de la demanda de gas en el país, las empresas energéticas chinas comenzaron a interesarse por este suministro a partir de 2016. Sin embargo, la guerra comercial impulsada por la primera Administración Trump en 2019 interrumpió por completo las importaciones, ya que Pekín identificó el petróleo y el gas de Estados Unidos como bienes políticamente sensibles e impuso aranceles como medida de presión (Corbeau y Downs, 2025).

Exportaciones de gas de EEUU por destino (2015-2025)

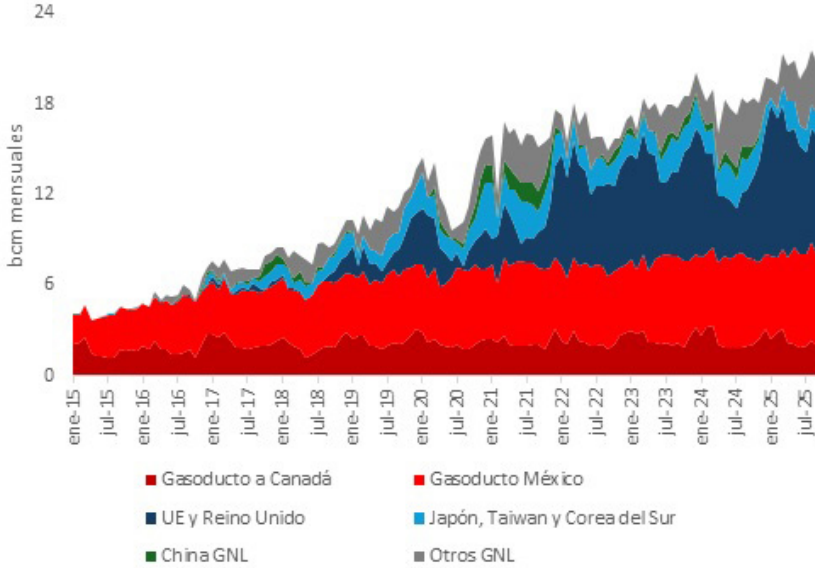


Figura 4. Fuente: US EIA (2025)

Las negociaciones comerciales de 2020 y 2021 incentivaron la firma de numerosos contratos de suministro a largo plazo por parte de empresas chinas, lo que contribuyó a un repunte de las compras. No obstante, el deterioro progresivo de las relaciones bilaterales bajo la Administración Biden y, sobre todo, con el retorno de Trump y su ofensiva arancelaria, llevó a Pekín a reactivar los aranceles sobre el GNL estadounidense, reduciendo de nuevo a cero las importaciones. Pese a ello, China afronta un dilema estratégico: los contratos firmados entre 2021 y 2023, que han comenzado a entrar en vigor en 2025, equivalen a seis veces los volúmenes importados desde Estados Unidos en 2024 o un tercio de las importaciones de GNL de China ese mismo año. Esto, unido a la creciente instrumentalización geopolítica de los flujos de gas, ha despertado preocupación entre las élites políticas chinas por una eventual dependencia del GNL estadounidense, con posibles implicaciones para su seguridad energética. Todo apunta a que la tensión económica entre ambas potencias persistirá y a que China seguirá recurriendo a los aranceles sobre los hidrocarburos estadounidenses como instrumento de presión, profundizando la fragmentación del mercado mundial del gas.

Contratos de GNL entre compradores chinos y proyectos estadounidenses

	Vendedor	Comprador	Volumen anual (bcm)	Duración (años)
2018	Cheniere	PetroChina	1,7	25
2021	Cheniere Energy	ENN	1,2	13
		Sinochem	2,5	18
		Foran	0,4	20
	Venture Global	Sinopec	5,6	20
		UNIPEC	1,4	3
		CNOOC	2,8	20
		CNOOC	0,7	3
2022	Energy Transfer LNG	ENN NG	2,5	20
		ENN Energy	1,3	20
		China Gas	1	25
	NextDecade	ENN	2,1	20
		China Gas	1,4	20
		Guangdong Energy	2,1	20
	Cheniere Energy	PetroChina	2,5	25
2023	Venture Global	China Gas Holdings	1,4	20
		China Gas Holdings	1,4	20
	Cheniere	ENN	2,5	20
		Foran	1,2	20
			35,8	

Fuente: Adaptación¹ de Corbeau y Downs (2025).

Como respuesta, China y Rusia han profundizado en sus relaciones energéticas, con el gas natural como un elemento central de esta simbiosis. En 2025, ambos países firmaron un

¹ Nota metodológica: algunos volúmenes o fechas se han simplificado y están sujetos a actualizaciones en el futuro.

acuerdo histórico para aumentar el comercio de gas natural a través de los gasoductos existentes y para construir el gasoducto Poder de Siberia 2. Este gasoducto tendrá una capacidad equivalente a la de Nord Stream y conectará por primera vez las reservas de gas de Siberia Occidental con el mercado chino a partir de 2030. Dichas reservas eran las que tradicionalmente abastecían al mercado europeo y que, desde 2022, Gazprom no había podido comercializar internacionalmente (Meidan y Yermakov, 2025). Según el consejero delegado de Gazprom, Alexéi Miller, las exportaciones se estructurarán mediante un contrato de treinta años, denominado en rublos y yenes, y con un precio inferior al que pagaba tradicionalmente Europa², lo que demuestra que, una vez más, la geopolítica se impone sobre los intereses comerciales (Meidan y Yermakov, 2025).

China ve en la construcción de este gasoducto un paso decisivo para reducir sus importaciones de GNL estadounidense y la dependencia de una arquitectura financiera y comercial dominada por Washington, apoyándose en Rusia como socio alternativo. Para Rusia, China ya se convirtió en 2025 por primera vez en el principal destino de sus exportaciones de gas, sustituyendo al tradicional mercado de la UE. A ello se suma que, tras el cese de las importaciones de GNL ruso en la UE en 2027, se espera que China pase a ser también el principal mercado receptor, lo que reforzará la creciente dependencia rusa del mercado chino para monetizar sus reservas de gas natural. Este proceso confirma la ruptura del mercado euroasiático en dos, redirigiendo las reservas de gas de Rusia hacia China en la configuración de un nuevo espacio geoenergético dominado por la geopolítica más que por los intereses comerciales.

5 Fragmentación de las cadenas de valor

Desde 2014, pero especialmente desde 2022, los países del G7 han aplicado sucesivas rondas de sanciones contra el sector del gas natural ruso con el propósito de reducir los ingresos derivados de sus exportaciones y restringir el acceso a tecnología y financiación que pudieran sostener su desarrollo.

² En 2025, la estatal china CNPC pagó a Gazprom por el gas un precio medio de 6,5 dólares/mmbtu, un 45 % por debajo del precio medio de referencia de la UE, el TTF, durante ese periodo. Gazprom vendía en Europa bajo diferentes fórmulas que solían estar fuertemente indexadas al TTF.

En el ámbito financiero, las medidas más relevantes han sido la incautación de activos rusos en el extranjero, en particular los de Gazprom en la UE, y la congelación de las reservas internacionales del Banco Central de Rusia. En paralelo, empresas energéticas como Gazprom Neft, Surgutneftegas, Novatek y Rosneft, así como bancos especializados en operaciones del sector como Sberbank y Gazprombank, han sido designadas como entidades sancionadas por Estados Unidos, la UE o el Reino Unido. Aunque estas compañías están sujetas a distintos regímenes, en la práctica todas han quedado excluidas de los mercados financieros occidentales, incluidos los sistemas de pago internacionales como SWIFT³, lo que limita su acceso al dólar estadounidense y al euro en sus transacciones internacionales.

Estas medidas han roto una dinámica dominante desde la desintegración de la Unión Soviética y un elemento central en la consolidación del orden liberal, en la que prácticamente todas las transacciones internacionales en el mercado del gas natural se realizaban a través del sistema SWIFT y en dólares o, para los intercambios entre Gazprom y las empresas europeas, el euro. Las sanciones impuestas tras la invasión de Ucrania han alterado de raíz este sistema y han empujado a Rusia y sus clientes a buscar mecanismos alternativos de pago. En concreto, Moscú y Pekín han intensificado la «cooperación monetaria bilateral», bajo el discurso de la «democratización del sistema financiero internacional», estableciendo un esquema de transacciones mixto en rublos y yuanes que excluye el uso del dólar y el euro como monedas de intercambio (Kluge, 2024).

Desde 2022, Rusia ha eliminado ambas divisas de sus exportaciones de hidrocarburos a India, China y Turquía, mientras que los préstamos concedidos por bancos chinos a desarrolladores de proyectos energéticos rusos se formalizan principalmente en yuanes. En el caso del gas, tras las primeras sanciones financieras de marzo de 2022, Moscú comenzó a exigir el pago en rublos a sus clientes europeos y asiáticos. Varias compañías europeas accedieron y las empresas asiáticas vinculadas al proyecto de GNL Sajalín-2 adoptaron progresivamente un modelo mixto que combina rublos, yuanes, yenes o wones, según la moneda nacional de cada comprador. Más allá de Rusia, y como efecto colateral

³ El sistema SWIFT (Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication) es una red global de mensajería segura que utilizan bancos e instituciones financieras para intercambiar información y órdenes de pago de forma estandarizada, facilitando las transferencias internacionales de dinero.

de las sanciones, esta tendencia se ha extendido también al mercado del GNL, que había operado tradicionalmente en dólares. En 2023, la Compañía Nacional de Petróleo de Abu Dabi (ADNOC) y la china CNOOC completaron una transacción de GNL suministrado por TotalEnergies y liquidada en yuanes (LNG Prime, 2023), marcando una de las primeras operaciones internacionales de GNL fuera del sistema financiero estadounidense.

Otro efecto relevante de las sanciones ha sido la ruptura de la cadena de valor tecnológica del sector del gas natural. Hasta 2022, se trataba de un mercado con pocos actores, muy globalizado y con cadenas de valor de alta especialización. Un caso paradigmático son los dos proyectos en el Ártico desarrollados por la empresa rusa Novatek, primero Yamal LNG y posteriormente Arctic LNG 2, junto con un consorcio de compañías internacionales. Ambos proyectos se convirtieron en símbolos de la innovación en ingeniería ártica, resultado del trabajo conjunto de empresas como la francesa Technip, las japonesas JGC y Chiyoda o la alemana Linde, que desarrollaron soluciones pioneras para la licuefacción en condiciones de frío extremo y sobre terreno de permafrost. También se construyeron buques metaneros rompehielos de última generación, construidos por Daewoo Shipbuilding en Corea del Sur y equipados con cascos diseñados en Finlandia.

Sin embargo, esta densa red de interdependencia tecnológica se deshizo con las sanciones occidentales impuestas a partir de 2022. La retirada de los socios europeos, japoneses y surcoreanos redujo el acceso de Novatek a su ingeniería y equipamiento, obligando a la empresa a recurrir tanto a soluciones nacionales como a proveedores chinos e iraníes para reanudar la construcción de estos proyectos. Por primera vez, Rusia ha desarrollado soluciones tecnológicas que controlaban históricamente, a través de patentes y conocimiento técnico, empresas occidentales, japonesas o coreanas. El resultado ha sido una profunda fragmentación de la cadena de valor mundial del GNL, que demuestra cómo las sanciones no solo han alterado los flujos comerciales, sino que también han desmantelado los ecosistemas tecnológicos transfronterizos que habían sostenido el rápido crecimiento del sector en las últimas décadas.

Una tercera transformación ha sido la aparición de una incipiente flota fantasma de buques de GNL (Urbasos, 2025). A diferencia del mercado del petróleo crudo, donde el contrabando y el transporte de cargamentos sometidos a sanciones mediante buques de propiedad opaca o sin garantías de aseguramiento es

una práctica habitual desde hace décadas, el comercio del GNL nunca había experimentado un fenómeno similar. Los metaneros son buques mucho más valiosos y técnicamente complejos, cuya operación está restringida a un reducido número de compañías, generalmente multinacionales, especializadas. Además, el mercado del GNL es significativamente más pequeño: existen casi 8000 petroleros frente a tan solo 772 metaneros en servicio, contruidos y mantenidos en una decena de astilleros y operados y asegurados por unas pocas compañías. A ello se suma que la mayoría de los astilleros, armadores, compañías aseguradoras y terminales de GNL están controlados por empresas occidentales o con una fuerte presencia internacional. Este hecho explica por qué Irán, pese a su larga experiencia en la evasión de sanciones y el contrabando de petróleo, no ha logrado desarrollar con éxito proyectos de exportación de GNL, a pesar de compartir el enorme yacimiento South Pars/North Dome con Catar, desde donde CatarEnergies exporta alrededor del 20 % del GNL mundial.

Cuando Estados Unidos y la UE decidieron sancionar en 2024 el proyecto Arctic LNG 2, prohibiendo cualquier transacción que pudiera contribuir a su desarrollo, la medida parecía especialmente contundente, ya que se esperaba que ningún operador del sector estuviera dispuesto a asumir el riesgo de sanciones secundarias que los excluyeran del sistema financiero internacional y de sus operaciones globales. Durante varios meses, la construcción de Arctic LNG 2 se detuvo por completo después de que el consorcio internacional de ingeniería responsable del proyecto se retirara. Solo las empresas rusas, con la asistencia técnica de ingenieros chinos, permanecieron en el lugar, tratando de finalizar el proyecto.

Sin embargo, los acontecimientos de 2025 evidenciaron los límites de esa estrategia. A finales de agosto, Rusia logró terminar parcialmente el proyecto y China recibió su primer cargamento procedente del Arctic LNG 2. La operación, repetida en las semanas siguientes, ha marcado un punto de inflexión en la efectividad del régimen sancionador: nunca antes un proyecto designado como entidad sancionada por Estados Unidos había conseguido realizar operaciones comerciales (Urbasos, 2025). Además, los propios metaneros utilizados para el transporte también estaban sujetos a sanciones occidentales, configurando los primeros casos de lo que podría convertirse en una flota fantasma del GNL, análoga a la ya consolidada en el mercado del petróleo crudo (Muñoz Abad, 2025). La flota fantasma de petroleros es una de las prin-

cipales herramientas de Irán, Venezuela y Rusia para operar en el mercado petrolero pese a las sanciones. El destino final suele ser China, que ha desarrollado todo un complejo de refinerías independientes ubicadas en la provincia de Shandong, dedicadas a la compra con descuentos de petróleo sancionado (Velázquez, 2025). Esta estructura paralela de comercio de petróleo entraña importantes riesgos medioambientales, ya que los buques de la flota fantasma suelen carecer de seguros reconocidos en caso de accidente, estar peor mantenidos y llevar muchos años en operación. Por tanto, la aparición de una flota fantasma para el comercio del GNL rompería con la «excepcionalidad» del sector, acostumbrado a operar en un entorno muy legalista y bajo los máximos estándares operacionales.

En conjunto, esta triple transformación —la desdolarización del comercio del gas natural, la creación de una nueva cadena de valor tecnológica paralela al conocimiento occidental y la aparición de una flota fantasma de GNL— apunta hacia un futuro marcado por la fragmentación del mercado internacional del gas, provocada por, y al mismo tiempo a pesar de, las sanciones internacionales. En realidad, esta fragmentación de la cadena de valor del gas no es una excepción y se inscribe en el proceso de desglobalización y repliegue de las cadenas de valor que parecen imponerse en el nuevo espacio geoeconómico global. El nuevo orden gasista es un reflejo del orden realista que sustituye el orden liberal y es la geoeconomía la que se impone a la interdependencia y la integración (Mearsheimer, 2019; Farrell y Newmann, 2025).

6 Hacia un nuevo orden gasista

Este análisis ha tratado de presentar las transformaciones que se produjeron bajo el orden liberal internacional en el sector del gas natural, destacando su inserción en la globalización a través de la expansión del mercado de GNL, las inversiones transnacionales y el proceso de desregulación impulsado por Bruselas, que terminó por extenderse a otros proveedores. Estos procesos, independientes entre sí pero unidos por sustentarse en los principios y valores del paradigma liberal, dieron lugar a un mercado interconectado y altamente eficiente. Las instituciones parecían haber sustituido a la geopolítica y eran las empresas quienes operaban el mercado en función de la maximización de sus beneficios económicos, en lugar de los Estados con base en cálculos de poder. El resultado fue una amplia comunidad de exportadores e impor-

tadores que compartían reglas, tecnología, conocimiento y, en definitiva, un colchón de intereses comunes que generaban una interdependencia compleja llamada a producir beneficios conjuntos y dinámicas cooperativas.

Aunque es evidente que este orden gasista comenzó a erosionarse antes de 2022, fue en febrero de ese mismo año cuando se hizo patente que la geopolítica se impondría a los intereses comerciales y que el paradigma liberal de la interdependencia compleja había sido, en gran medida, un espejismo. La guerra geo-económica que se ha librado en los márgenes del frente ucraniano entre la UE y Rusia ha tenido entre sus principales víctimas a las instituciones liberales y multilaterales que sostenían el mercado internacional del gas. En este trabajo se han mencionado algunas de ellas, como el uso del dólar y el euro como divisas, los pagos a través del sistema SWIFT, las inversiones transnacionales, los flujos de tecnología o el sistema internacional de arbitraje.

El final de un orden liberal para el gas natural da paso a un escenario marcadamente fragmentado, en el que la geopolítica determina los flujos comerciales con mayor intensidad que la eficiencia económica. La consecuencia más evidente de esta nueva realidad es la ruptura del comercio gasista entre la UE y Rusia, sustituido por los crecientes flujos de GNL entre Europa y Estados Unidos. Washington no oculta la dimensión geopolítica de sus exportaciones de gas y las identifica en su última estrategia de seguridad nacional como un instrumento más de proyección de poder hacia rivales y aliados. Los flujos energéticos dejan de ser meras transacciones comerciales; ahora exigen alineamiento geopolítico y, llegado el caso, aquiescencia estratégica. El principal actor ya no son las empresas multinacionales, sino los Estados soberanos y sus intereses en una lógica neowestfaliana.

La otra gran transformación en la geopolítica del gas natural es la consolidación de la alianza energética entre Rusia y China. Tras la pérdida del mercado europeo, Rusia no ha tenido más opción que aceptar las duras condiciones que impone China para acceder a su mercado. Gazprom ha debido ajustarse a los plazos y términos fijados por Pekín para la construcción del gasoducto Poder de Siberia 2, un proyecto llamado a reconfigurar para siempre los flujos globales de gas, ya que redirigirá hacia China las reservas que hasta 2022 abastecían a la UE. China se presenta, junto con Estados Unidos, como uno de los principales ganadores de esta transformación. El gas ruso no solo es más económico que las alternativas, sino que se comercia en yuanes, lo que con-

tribuye a la estrategia china de erosión del dólar y de la hegemonía occidental en los mercados financieros. Además, permite a Pekín recalibrar las decisiones adoptadas por sus empresas gasistas entre 2021 y 2022, cuando firmaron numerosos contratos de suministro a largo plazo con plantas exportadoras de GNL en Estados Unidos. Lo reciente de estos acuerdos ilustra la velocidad de los cambios en curso y muestra cómo un instrumento que podía servir para acercar a Pekín y Washington, el comercio de GNL, hoy se percibe en China como una potencial amenaza para la seguridad de suministro. Esta es la nueva realidad de la geopolítica del gas.

La UE, junto con Rusia, se perfila como una de las grandes perdedoras de este nuevo escenario y debe adaptarse a una realidad que no se ajusta a su naturaleza multilateral y normativa. Tanto la UE como sus Estados miembros deben recalibrar sus estrategias de seguridad de suministro, monitorizar la aparición de nuevas dependencias y mantener una estrategia de diversificación sólida y sostenida en el tiempo. La UE debe seguir apostando por la transición energética, pero no puede, como pretendió desde la publicación del Pacto Verde Europeo, ignorar que la diplomacia energética también pasa por garantizar el suministro de combustibles fósiles como el gas, que será un pilar central de su economía hasta, al menos, 2050.

Al igual que resulta difícil predecir con exactitud la naturaleza del sistema internacional que sucederá al orden liberal, ocurre algo similar con la geopolítica del gas natural. Sabemos con relativa claridad qué ha quedado atrás, pero persiste la incertidumbre respecto a lo que está por venir. Este trabajo ha tratado de esbozar algunas posibilidades⁴. La primera es que, en el futuro, la instrumentalización de la interdependencia se convertirá en la norma para los flujos comerciales, los servicios financieros y el acceso a la tecnología. La segunda es que la fragmentación, utilizada como mecanismo de protección frente a esta instrumentalización, revertirá parte del proceso de globalización e integración que ha definido las últimas décadas. La tercera es que, frente a la relativa estabilidad en precios y flujos que caracterizó al mercado

⁴ Aunque este trabajo ha decidido no incorporarlo a su análisis, la transición energética ejercerá un efecto transformador sobre la geopolítica del gas natural. Reducirá parte de su demanda en los países desarrollados, pero podría generar nuevos consumidores en el mundo en desarrollo. La forma en que interactuarán la nueva geopolítica del gas y su papel como vector de transición es una cuestión que excede el objeto de este estudio.

del gas natural durante gran parte del orden liberal, se verán mayores episodios de volatilidad y disrupciones comerciales, dificultando la capacidad de los inversores para anticipar los equilibrios futuros de oferta y demanda.

Las nuevas reglas del juego son la instrumentalización de la interdependencia, la fragmentación y el alineamiento geopolítico. Los ganadores son las grandes potencias, que imponen sus intereses, y los perdedores, aquellos que apostaron por un sistema basado en reglas, cooperación e integración. El nuevo orden gasista es un reflejo del emergente orden realista que está sustituyendo al orden liberal: es ahora la geoconomía la que se impone sobre los paradigmas de la interdependencia y la integración.

Bibliografía

- Barbieri, K. (2009). *The liberal illusion: Does trade promote peace?*. University of Michigan Press.
- Bros, T. (2012). *After the US shale gas revolution*. Editions Technip.
- Chester, L. (2010). Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy*. 38(2), pp. 887-895. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.039>
- Corbeau, A. S. y Downs, E. (2025). *What China's retaliatory tariff means for US-China LNG trade*. Columbia University SIPA.
- Corbeau, A. S., Downs, E. y Mitrova, T. (2025). *Power of Siberia 2: Russia's pivot, China's leverage, and global gas implications*. Center on Global Energy Policy, Columbia University SIPA.
- EIA. (2024). *World oil transit chokepoints*. EIA. U.S. Energy Information Administration.
- . (2025) *U.S. Natural Gas Exports and Re-Exports by Country, Data*. EIA. U.S. Energy Information Administration.
- Energy Institute. (2025). *Statistical review of world energy 2025*. Londres, Energy Institute.
- Escribano, G. (2011). Market or geopolitics? The Europeanization of EU's energy corridors. *International Journal of Energy Sector Management*. 5(1), pp. 39-59.
- Esteban, M. (2025). *La gobernanza global según Xi Jinping: entre Westfalia y la corte imperial* [en línea]. Real Instituto Elcano. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.realinstituto-elcano.org/analisis/la-gobernanza-global-segun-xi-jinping-entre-westfalia-y-la-corte-imperial/>

- Farrell, H. y Newman, A. (2025). The weaponized world economy: Surviving the new age of economic coercion. *Foreign Affairs*. 104, p. 8.
- Forsberg, T. (2016). From Ostpolitik to 'frostpolitik'? Merkel, Putin and German foreign policy towards Russia. *International Affairs*. 92(1), pp. 21-42.
- Goldthau, A. y Witte, J. M. (2010). The role of rules and institutions in global energy: An introduction. En: Goldthau, A. y Witte, J. M. (eds.). *Global energy governance: The new rules of the game* (pp. 1-24).
- Gürsan, C. y Gooyert, V. de (2021). The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 138, 110552.
- Heather, P. (2021). *European traded gas hubs: TTF now a global gas benchmark*. OIES Paper, NG.
- Henderson, J., & Chyong, K. (2023). Do future Russian gas pipeline exports to Europe matter anymore? *Energy Insight* 131.
- Hernando de Larramendi, M. y Thieux, L. (2025). La rivalidad entre Marruecos y Argelia y su relación con la UE. *Afkar-Ideas*. Otoño-Invierno.
- IEA. (2023). *The oil and gas industry in net zero transitions*. International Energy Agency.
- . (2025). *Gas 2025: Analysis and forecast to 2030*. International Energy Agency.
- International Gas Union. (2024). *World LNG report 2024*. <https://www.igu.org/igu-reports/2024-world-lng-report>
- Jirušek, M. y Kuchyňková, P. (2018). The conduct of Gazprom in central and eastern Europe: A tool of the Kremlin, or just an adaptable player? *East European Politics and Societies*. 32(4), pp. 818-844.
- Jong, M. (2023). LNG: Saviour or a new problem in the making. *GIES Occasional Paper*.
- Keohane, R. O. y Nye Jr, J. S. (1973). Power and interdependence. *Survival*. 15(4), pp. 158-165.
- . (1987). Power and interdependence revisited. *International Organization*. 41(4), pp. 725-753.
- Kluge, J. (2024). *Russia-China economic relations: Moscow's road to economic dependence*. Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP).

- LNG Prime. (2023). CNOOC and Engie complete yuan-settled LNG deal [en línea]. LNG Prime. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://lngprime.com/asia/cnooc-and-engie-complete-yuan-settled-lng-deal/95104/>
- Mañé-Estrada, A. (2022). Efectos de la crisis hispano-argelina en el contexto mundial de la petrolización del gas. *Revista de Estudios Internacionales Mediterráneos*. 32, pp. 49-62.
- Mañé-Estrada, A. y Albinyana, R. (2023). Revisiting rentierism through the lens of Algerian gas. *Revue internationale des études du développement*. 251, pp. 35-62.
- Mearsheimer, J. J. (2019). Bound to fail: The rise and fall of the liberal international order. *International Security*. 43(4), pp. 7-50.
- Meidan, M. y Yermakov, V. (2025). *China–Russia: The gas hedge*. Oxford Institute for Energy Studies.
- Muñoz Abad, R. J. (2025). *El fenómeno de la flota fantasma y sus riesgos para España* [en línea]. Real Instituto Elcano. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/el-fenomeno-de-la-flota-fantasma-y-sus-riesgos-para-espana>
- Priest, T. (2012). The dilemmas of oil empire. *The Journal of American History*. 99(1), pp. 236-251.
- Raghuandan, V. (2025). *November 2025. Monthly analysis of Russian fossil fuel exports and sanctions* [en línea]. Centre for Research on Energy and Clean Air. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://energyandcleanair.org/november-2025-monthly-analysis-of-russian-fossil-fuel-exports-and-sanctions/>
- Steimberg, L., Urbasos, I. y Escribano, G. (2025). Crisis energética europea y reconfiguración de la relación transatlántica. *Revista de economía mundial*. 69, pp. 225-244.
- Stern, J. (2015). Gazprom: A long march to market-based pricing in Europe? *Oxford Energy Forum*, 50. Oxford Institute for Energy Studies.
- Tagliapietra, S. (2022). The geopolitics of energy in Europe: Short-term and long-term issues. *Papeles de Energía*. 17, pp. 83-102.
- Urbasos, I. (2024). *El futuro del gas ruso en la Unión Europea*. Real Instituto Elcano. Policy Paper.

- . (2025). *La flota fantasma de GNL en el nuevo orden gasista*. Real Instituto Elcano. ARI.
- Velázquez, S. (2025). Los límites a las sanciones internacionales. El caso de la energía. En: Ministerio de Defensa. (ed.). *Energía y Geoestrategia 2025*. IEEE.
- Westphal, K. (2006). Energy policy between multilateral governance and geopolitics: Whither Europe? *Internationale Politik und Gesellschaft*. 4(4), pp. 44-63.
- White House. (2025). *National Security Strategy of the United States of America*. The White House.
- Xu, D., Dou, S., Zhu, Y. y Cheng, J. (2024). Resource nationalism: The intersection of politics and economics. *Humanities and Social Sciences Communications*. 11(1), pp. 1-15.

Capítulo segundo

La geopolítica de los minerales críticos para la transición energética

María del Mar Hidalgo García

Resumen

La transición energética y digital está disparando la demanda de minerales que contienen litio, cobalto, tierras raras, níquel o cobre, entre otros. El desequilibrio entre la oferta y la demanda de estos minerales —así como de sus productos procesados— está creando una nueva geopolítica de recursos donde el control y suministro de estos materiales se convierte en un factor clave de poder económico, de competencia estratégica y de seguridad nacional.

El acceso a estos minerales críticos se está volviendo cada vez más complejo. El dominio de China en la producción y procesado, el auge del proteccionismo y los controles de exportación contribuyen a que los mercados de estos minerales se vean profundamente alterados por la geopolítica. En este contexto, además de fomentar la apertura de nuevas minas, es preciso reconfigurar las políticas industriales y fomentar las alianzas internacionales con países afines para asegurar unas cadenas de suministro resilientes y diversificadas de estos minerales críticos.

Por lo que respecta a una posible interrupción de suministro de materias primas en el sector energético, a pesar de que no ten-

dría unas consecuencias a corto plazo, sus efectos se verían a largo plazo, afectando al desarrollo futuro de las energías limpias y al cumplimiento de los objetivos de descarbonización.

Palabras clave

Minerales críticos, Litio, Tierras raras, Descarbonización.

The geopolitics of critical minerals for energy transition

Abstract

The energy and digital transitions are driving up demand for minerals containing lithium, cobalt, rare earth elements, nickel, and copper, among others. The imbalance between supply and demand for these minerals—as well as their processed products—is creating new geopolitics of resources where control and supply of these materials are becoming key factors in economic power, strategic competition, and national security.

Access to these critical minerals is becoming increasingly complex. China's dominance in production and processing, the rise of protectionism, and export controls are contributing to the profound geopolitical disruption of these mineral markets. In this context, in addition to encouraging the opening of new mines, it is essential to reconfigure industrial policies and foster international alliances with like-minded countries to ensure resilient and diversified supply chains for these critical minerals.

Regarding a potential disruption in the supply of raw materials in the energy sector, although it would not have immediate short-term consequences, its effects would be felt in the long term, impacting the future development of clean energy and the achievement of decarbonization goals.

Keywords

Critical minerals, Lithium, Rare earth elements, Decarbonization.

GEOPOLÍTICA DE LOS MINERALES CRÍTICOS EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA ES UNA TRANSICIÓN EXTRACTIVA

- LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA NO SOLO ES TECNOLÓGICA Y CLIMÁTICA, ES TAMBIÉN:

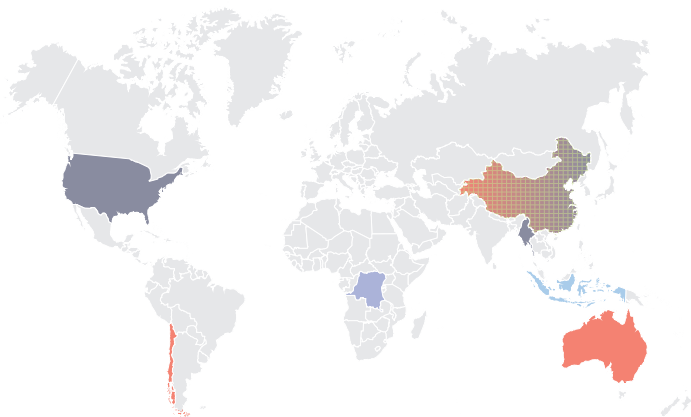


- ENERGÍAS RENOVABLES, VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, DIGITALIZACIÓN Y DEFENSA DEPENDEN DE MINERALES CRÍTICOS:



DEMANDA EN RÁPIDO CRECIMIENTO Y OFERTA CONCENTRADA

- LA **DEMANDA DE MINERALES** PARA ENERGÍA LIMPIA SE **TRIPLICARÁ** HACIA 2040.
- PRODUCCIÓN MINERA CONCENTRADA EN POCOS PAÍSES:



RIESGOS A LA INTERRUCCIÓN AL SUMINISTRO MUNDIAL DE MINERALES CRÍTICOS



1 CONTROL DE MINERALES = SEGURIDAD NACIONAL

- ENERGÍA, DEFENSA, IA Y DIGITALIZACIÓN COMPITEN POR LOS MISMOS MINERALES.
- RIVALIDAD CHINA-EE. UU. REDEFINE LOS MERCADOS: MENOS ECONOMÍA, MÁS GEOPOLÍTICA.
- LOS MINERALES CRÍTICOS SON YA UN ACTIVO ESTRATÉGICO.



2 PROTECCIONISMO Y CONTROLES

- PROHIBICIONES DE EXPORTACIÓN, ARANCELES Y NACIONALIZACIONES EN AUMENTO.
- INTRODUCCIÓN DEL ACCESO A LOS MINERALES COMO MONEDA DE CAMBIO EN LOS PROCESOS DE RESOLUCIÓN DE CONFLICTOS (POR EJEMPLO: EN UCRANIA).

DISMINUCIÓN DE LOS RIESGOS



ALIANZAS ESTRATÉGICAS (FRIENDSHORING)



EE.UU., UE, CHINA IMPULSAN RESHORING, FRIENDSHORING Y SUBSIDIOS



APERTURAS DE NUEVAS MINAS



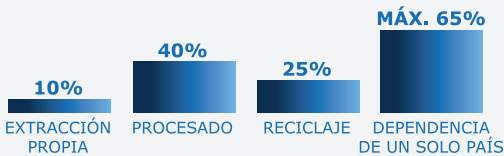
RECICLAJE



INNOVACIÓN Y SUSTITUCIÓN DE MATERIALES

RESPUESTA DE LA UNIÓN EUROPEA

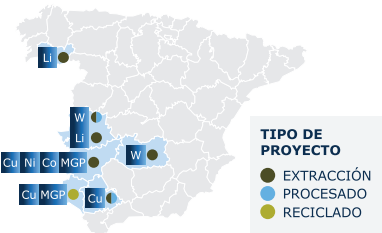
LEY EUROPEA DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS (2024)



PLAN REsourceEU Y NUEVAS INVERSIONES ESTRATÉGICAS

ESPAÑA Y MINERALES CRÍTICOS

- **7 PROYECTOS ESTRATÉGICOS** DE LA UE ESTÁN EN ESPAÑA.
- **RETOS:** ACEPTACIÓN SOCIAL, SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.
- **PLAN DE ACCIÓN** DE MATERIAS PRIMAS MINERALES 2025-2029.
- **MINERALES CLAVE:** VÉASE EL MAPA.



Li LITIO Cu COBRE Ni NÍQUEL Co COBALTO W WOLFRAMIO MGP METALES DEL GRUPO DEL PLATINO

PRODUCCIÓN Y RESERVAS DE TIERRAS RARAS

PRODUCCIÓN

EE.UU	41.600	41.600
AUSTRALIA	16.000	13.000
BRASIL	140	20
BIRMANIA	43.000	31.000
CANADÁ	-	-
CHINA	255.000	270.000
GROENLANDIA	-	-
INDIA	2.900	2.900
MADAGASCAR	2.100	2.000
MALASIA	310	130
NIGERIA	7.200	13.000
RUSIA	2.500	2.500
SUDÁFRICA	-	-
TANZANIA	-	-
TAILANDIA	3.600	13.000
VIETNAM	300	300
OTROS	1.440	1.100
TOTAL	376.000	390.000

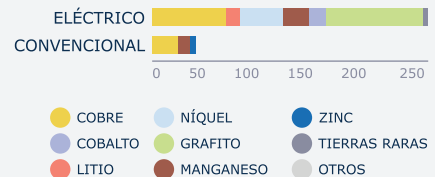
RESERVAS

EE.UU	1.900.000
AUSTRALIA	5.700.000
BRASIL	21.000.000
BIRMANIA	NA
CANADÁ	830.000
CHINA	44.000.000
GROENLANDIA	1.500.000
INDIA	6.900.000
MADAGASCAR	NA
MALASIA	NA
NIGERIA	NA
RUSIA	3.800.000
SUDÁFRICA	860.000
TANZANIA	890.000
TAILANDIA	4.500
VIETNAM	3.500.000
OTROS	NA
TOTAL	90.000.000

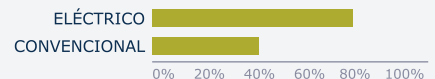
● 2023 ● 2024

TRANSPORTE - VEHÍCULOS

INTENSIDAD MINERAL (KG/VEHÍCULO)



EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)



Fuente: IEA

1 Introducción

Desde que la Revolución Industrial dio inicio a la era de los recursos basados en el carbono, gran parte del suministro energético global ha dependido de la extracción de grandes cantidades de hidrocarburos como carbón, petróleo y gas. Sin embargo, en el siglo XXI, las políticas climáticas y la búsqueda de la independencia energética están haciendo que los sistemas energéticos se estén electrificando, digitalizando e interconectando, con *un profundo impacto* en la seguridad energética. Si antes el debate sobre las energías renovables se centraba en los costes de la tecnología y los retos de la integración, ahora el debate se centra en cómo fomentarlas e integrarlas para ser un componente fundamental de la soberanía y la seguridad energéticas de muchas naciones con el objeto de reducir significativamente el riesgo de interrupciones en el suministro energético.

Desde vehículos eléctricos hasta paneles solares y aerogeneradores, el despliegue de tecnologías de energía limpia avanza rápidamente y depende en gran medida de minerales críticos como cobre, litio, níquel, cobalto y tierras raras¹. Este auge de fuentes de energía renovables —que se desarrollan a un ritmo más rápido que cualquier otro combustible en la historia— hace que se esté asistiendo no solo a una transición energética, sino también a una transición extractiva.

El desequilibrio entre su oferta y su demanda, la alta concentración de su producción y su procesado, así como la posible interrupción de sus cadenas de suministros, hacen que algunos de estos minerales —o, más exactamente, determinados metales contenidos en formas minerales— sean considerados críticos porque, además, son imprescindibles no solo para la transición energética y digital, sino también para el sector de la defensa y el aeroespacial.

Los mercados de minerales se están viendo afectados por la adopción de políticas impuestas por motivos de seguridad nacional. La principal consecuencia es que el acceso a estos minerales críticos está alterando el equilibrio económico y geopolítico a nivel

¹ Las tierras raras son un grupo de diecisiete metales que son esenciales para la tecnología moderna. Se usan desde teléfonos inteligentes y vehículos eléctricos hasta turbinas eólicas, aviones de combate y sistemas de guiado de misiles. Sus propiedades magnéticas, luminiscentes y conductoras únicas las hacen irremplazables en la electrónica de alto rendimiento y las aplicaciones de energía limpia.

mundial contribuyendo a configurar un panorama muy complejo enmarcado en la rivalidad estratégica entre China y EE. UU. En este contexto, los minerales y sus cadenas de suministro se han convertido en un arma geopolítica.

En el ámbito específico de las energías renovables, la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) considera, aunque los minerales críticos podrían potencialmente convertirse en armas, que el efecto de tal disrupción sería limitado. Podría ralentizar el despliegue de tecnologías de energía limpia, pero es poco probable que paralice sistemas energéticos enteros. Sin embargo, esta visión es solo una parte de la realidad, ya que el acceso continuado de minerales estratégicos se ha convertido en una cuestión de seguridad nacional debido a su uso en tecnologías emergentes en el ámbito digital y el de la defensa.

Muchos de los minerales que necesitan el sector energético, el digital y el de la defensa son comunes y esto abre grandes incertidumbres tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda. Al convertirse en el centro de las disputas comerciales y hegemónicas entre China y EE. UU., puede que el sector de las energías renovables sea el gran afectado a largo plazo.

En este contexto, es preciso analizar cuáles son los retos de la transición energética desde el punto de vista de los requisitos de empleo de minerales críticos. El aumento de la demanda, la concentración de la oferta, las políticas proteccionistas y arancelarias, la explotación de nuevos espacios o las cuestiones sociales y medioambientales de la minería son factores que pueden socavar el tránsito hacia economías alejadas del uso de combustibles fósiles. Sin una gestión adecuada, la creciente demanda de minerales críticos corre el riesgo de perpetuar la dependencia de las materias primas, agravando las tensiones geopolíticas y los desafíos medioambientales y sociales².

2 Hacia una transición extractiva

Los riesgos de dependencia y la dinámica de suministro de minerales críticos difieren fundamentalmente de los de los combustibles fósiles debido a sus características y patrones muy distintos.

Desde 2010, ha habido un aumento del 50 % en la cantidad media de minerales necesarios para una nueva unidad de gene-

² Ver: <https://www.un.org/en/climatechange/critical-minerals>

ración eléctrica, según un informe de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Para 2040, la demanda de minerales para generar energía más limpia se habrá triplicado. Esencialmente, la transición energética «significa un cambio de un sistema intensivo en combustible a uno intensivo en minerales»³.

La noción actual de seguridad energética gira en torno a un acceso continuo a fuentes de energía. En el caso de la UE, la guerra de Ucrania ha puesto de manifiesto su vulnerabilidad energética por su alta dependencia de los combustibles fósiles de Rusia y las repercusiones en la economía y competitividad de la Unión. Por lo tanto, *en el corto plazo, las repercusiones de una interrupción de combustibles fósiles son mucho mayores sobre la seguridad energética que las interrupciones en el suministro de los minerales necesarios para construir energías renovables, ya que las tecnologías ya construidas podrían seguir funcionando durante décadas*. Por lo tanto, el riesgo asociado a interrupciones en el suministro de materiales críticos es menor que el riesgo asociado a interrupciones de suministro de combustibles fósiles en el corto plazo.

Un segundo aspecto es que comercio de materiales críticos es muchos órdenes de magnitud menor en valor que el comercio de fósiles combustibles. Los combustibles fósiles alcanzaron en 2021 un valor de 2 billones de dólares, mientras que el mercado de los minerales relacionados con energías renovables (litio, cobalto, tierras raras, níquel y cobalto) alcanzó un valor de 96 000 millones de dólares⁴. A diferencia del petróleo, la mayoría de los materiales críticos no se negocian ampliamente en las bolsas. Aunque esto limita oportunidades para hacer frente a la volatilidad de precios, permite a los *traders* de materias primas desempeñar un papel clave emparejando productores y consumidores.

La tercera diferencia reside en la tasa de reciclaje. Los combustibles fósiles se consumen, mientras que los elementos incorporados en las energías renovables pueden alcanzar una elevada tasa de reciclaje. La vida media es también muy distinta: los combustibles fósiles desaparecen cuando se utilizan, mientras que la vida media de la utilidad de los minerales utilizados en las instalaciones de energías se sitúa en torno a los 10-30 años.

³ Ver: <https://www.mining-technology.com/features/mining-energy-transition-minerals/?cf-view>

⁴ Ver: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials>

Por lo que respecta a la comparación entre las reservas de minerales y de combustibles fósiles, hay que mencionar que no hay escasez de reservas para minerales de transición energética. De 2013 a 2022, los resúmenes del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) revelan que, en conjunto, las reservas conocidas de cobalto, litio y níquel están aumentando, al igual que las reservas conocidas de otros minerales críticos, por lo que el suministro global de minerales críticos es, en cierta medida, elástico, pero sí es cierto que capacidades para la obtención y el refinado son más limitadas en comparación con los combustibles fósiles. Esta incertidumbre en el suministro podría desacelerar la transición hacia las energías renovables por la falta de inversión en el mercado de minerales, *mucho más opaco que el de los combustibles fósiles y de mucho mayor riesgo*.

Todos estos factores implican que, para avanzar hacia la descarbonización y el cumplimiento de los objetivos climáticos, hay que avanzar también en un enfoque actualizado en la seguridad energética, diferente al empleado con los combustibles fósiles. De esta forma se podrán minimizar los riesgos asociados a la inversión en los proyectos de obtención de minerales críticos necesarios para las energías renovables. En 2021, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) identificó una inminente descoordinación entre la demanda de minerales críticos y su disponibilidad. Los hallazgos de la AIE sirvieron a Gobiernos y empresas de todo el mundo para desarrollar estrategias e inversiones en minerales críticos.

3 Demanda creciente y oferta concentrada

Según el informe de la AIE, *Renewables 2025. Analysis and forecasts 2025*, las energías renovables representarán casi el 45 % de la generación eléctrica para 2030, pasando de 9900 TWh en 2024 a 16200 TWh en 2030. Según el citado informe, la energía solar fotovoltaica por sí sola representa más del 60 % de este aumento, seguida de la eólica, con un 32 %. Por lo que respecta a la demanda global de electricidad relacionada con la IA, el crecimiento inicial exponencial se volverá más lineal con el tiempo, alcanzando el 11 % de la demanda eléctrica para 2060⁵.

⁵ Ver: https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/2025/?utm_source=google&utm_medium=search&utm_campaign=eto_2025_download/&gad_source=1&gad_campaignid=23088436235&gclid=EAIaIQobChMI-eTPtIptkQMVsch5BB0cyTu1EAAAYASAAEgLUSPD_BwE

Este incremento de energías renovables continúa impulsando el crecimiento de la demanda de determinados metales. Según el informe de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), *Global Critical Minerals Outlook*, publicado en 2025, la demanda de litio aumentó casi un 30 %, manteniendo el fuerte incremento observado en 2023 y superando significativamente la tasa de crecimiento anual del 10 % registrada en la década de 2010. La demanda de níquel, cobalto, grafito y tierras raras aumentó entre un 6 % y un 8 % en 2024. El cobre también experimentó un sólido crecimiento de la demanda de alrededor del 3 %, superando el ritmo de los dos años anteriores alcanzando las 12 millones de toneladas. La rápida expansión de la inversión en redes eléctricas en China fue el principal factor de crecimiento de la demanda durante esos dos años. También los vehículos eléctricos seguirán siendo uno de los mayores catalizadores de demanda de metales, dado que utilizan cuatro veces más cobre que sus homólogos de combustión interna. Por este motivo, se prevé que, por ejemplo, el consumo de cobre en los vehículos eléctricos aumente de 200 000 toneladas en 2020 a 3,4 millones de toneladas en 2035, lo que supone una tasa media anual de crecimiento del 14 % entre 2025 y 2035⁶.

En el Escenario de Políticas Declaradas (STEPS) de la AIE, la demanda de litio se quintuplicará de aquí a 2040, mientras que la de grafito y níquel se duplicará. La demanda de cobalto y tierras raras también crece con fuerza, aumentando entre un 50 % y un 60 % para 2040 (AIE, 2025).

A pesar de esta alta demanda, probablemente haya suficientes minerales críticos en la corteza terrestre para cubrir la necesidad mundial. Pero la realidad es que el acceso a ellos puede ser muy complejo. Algunos minerales críticos, como el aluminio y el paladio, tienen reservas estables en tierra que pueden satisfacer la demanda mundial hasta 2050 y probablemente más allá. Para otros, como el cobre, el níquel y el cobalto, las reservas encontradas actualmente pueden ser insuficientes, por lo que hará falta una combinación de más exploración, avances tecnológicos e incentivos económicos para aumentar la oferta (Qiu *et al.*, 2024).

Si se lograra un aumento de las tasas de crecimiento históricas en la oferta de minerales estratégicos por un factor de 3 a 4, los desarrollos en el sector energético para 2050 permanecerían en

⁶ Ver: <https://www.mining.com/over-60-of-critical-minerals-demand-met-through-global-trade-ief/>

gran medida sin afectarse. Sin embargo, este aumento seguiría siendo insuficiente para suministrar los materiales necesarios para las grandes ampliaciones de capacidad a corto plazo, lo que resultaría en una tasa de electrificación más lenta y un mayor uso de combustibles fósiles en algunos sectores (Schulze *et al.*, 2024). En particular, los mercados de cobre y níquel podrían enfrentar déficits materiales a mediados de la década de 2030, mientras que el suministro de litio sigue concentrado en solo unos pocos países⁷.

Más del 60 % de la demanda global de minerales críticos se satisface mediante el comercio internacional, lo que subraya la profunda interdependencia estructural entre las economías productoras y consumidoras a medida que se acelera el despliegue de energía limpia⁸. Incluso en un mercado bien abastecido, la dependencia de un pequeño número de proveedores aumenta la vulnerabilidad a choques e interrupciones con el riesgo de desacelerar la transición energética. Por ejemplo, si se produjera una interrupción en el suministro de grafito, el precio aumentaría diez veces y los precios medios de los paquetes de baterías a nivel mundial aumentarían un 45 %, reduciendo sustancialmente la competitividad de las empresas que los utilizan⁹. Los precios de las baterías ya varían considerablemente según la región, con precios medios en 2024 mucho más altos en Estados Unidos (un 30 %) y en Europa (un 50 %) que en China. Un aumento pronunciado en los precios del grafito ampliaría aún más la brecha de precios entre los nuevos vehículos eléctricos vendidos en Estados Unidos o Europa y los vendidos en China, haciéndolos casi el doble de caros en Estados Unidos y un 75 % más caros en Europa¹⁰.

Por lo tanto, el principal problema actual relacionado con la oferta de minerales críticos es su alta concentración —mucho más que los combustibles fósiles— tanto en la producción como en el procesamiento. Indonesia representa más de la mitad del suministro mundial de níquel y la República Democrática del Congo produce

⁷ Ver: https://www.ief.org/_resources/files/reports/a-critical-minerals-enabled-energy-future.pdf

⁸ Ver: https://www.ief.org/_resources/files/reports/a-critical-minerals-enabled-energy-future.pdf

⁹ Ver: <https://www.iea.org/commentaries/growing-geopolitical-tensions-underscore-the-need-for-stronger-action-on-critical-minerals-security>

¹⁰ Ver: <https://www.iea.org/commentaries/growing-geopolitical-tensions-underscore-the-need-for-stronger-action-on-critical-minerals-security>

aproximadamente el 70 % del cobalto. La minería de litio sigue estando dominada por Australia, Chile y China, que juntos representaron más de tres cuartas partes de la producción mundial en 2022. Esta concentración en la producción está lejos de finalizar a corto/medio plazo, ya que alrededor del 75 % de los proyectos previstos para litio, níquel y cobalto refinados, y más del 90 % para proyectos de grafito de calidad para baterías se están desarrollando en los tres principales productores actuales (AIE, 2025).

En cuanto al grupo de metales de las tierras raras, los principales productores fueron China, EE. UU. y Canadá. Cabe destacar el considerable aumento de la producción de Nigeria y Tailandia¹¹.

	Mine production ^a		Reserves ¹¹
	2023	2024	
United States	41,600	45,000	1,900,000
Australia	¹² 16,000	¹² 13,000	¹³ 5,700,000
Brazil	140	20	21,000,000
Burma	¹² 43,000	¹² 31,000	NA
Canada	—	—	830,000
China	¹⁴ 255,000	¹⁴ 270,000	44,000,000
Greenland	—	—	1,500,000
India	2,900	2,900	6,900,000
Madagascar	¹² 2,100	¹² 2,000	NA
Malaysia	¹² 310	¹² 130	NA
Nigeria	¹² 7,200	¹² 13,000	NA
Russia	2,500	2,500	3,800,000
South Africa	—	—	860,000
Tanzania	—	—	890,000
Thailand	¹² 3,600	¹² 13,000	4,500
Vietnam	¹² 300	¹² 300	3,500,000
Other	1,440	1,100	NA
World total (rounded)	376,000	390,000	>90,000,000

Figura 1. Principales productores y reservas de tierras raras. Fuente: USGS

Si bien la producción de minerales críticos puede parecer algo diversificada, esta ventaja se desvanece cuando se trata del refinado y procesado de estos minerales, donde China ocupa una posición claramente dominante. La posición de China se basa únicamente en la escala y el control a lo largo de la cadena de suministro, más que en la abundancia geológica o la extracción de mineral en bruto. China refina alrededor del 90 % de los metales del grupo de las tierras raras. También refina 19 de los 20 minerales clave relacionados con la energía, con una cuota media de mercado global de alrededor del 70 %. Para muchos minerales de alta demanda como el litio, el níquel y el cobalto, la cuota de extracción de China se sitúa solo entre el 10-30 %, pero su cuota en refinado y procesamiento alcanza entre el 60 % y el 70 %¹².

¹¹ Ver: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf>

¹² Ver: <https://www.iea.org/commentaries/with-new-export-controls-on-critical-minerals-supply-concentration-risks-become-reality>

En la actualidad, China produce el 99 % del grafito para baterías, más del 60 % de los productos químicos de litio, el 40 % del cobre refinado, el 70 % del cobalto refinado y más del 80 % de las tierras raras procesadas¹³. Hoy en día solo hay cinco refinerías de tierras raras fuera de China en funcionamiento, en construcción o en proceso de reactivación. Estas refinerías se encuentran en EE. UU., Malasia, Francia, Estonia y Australia.

Por lo que respecta al material manufacturado, China por sí sola representa un 80 % de cuota en las distintas etapas de fabricación de paneles solares¹⁴, incluyendo el procesamiento de materias primas y la producción de polisilicio (AIE, 2022). China produce dos tercios de los vehículos eléctricos (VE) del mundo, el 85 % de las producciones de celdas de batería, el 90 % de la capacidad de producción de cátodos y el 98 % de los materiales anódicos a nivel mundial. Lidera la producción de paneles solares, turbinas eólicas y electrolizadores de hidrógeno y domina toda la cadena de suministro de ánodo de grafito de principio a fin¹⁵. Las cifras son abrumadoras.

Al controlar todas las etapas, China ha construido el cuasimonopolio que sustenta su dominio en la fabricación global de energía limpia. Este dominio es resultado de una política estatal diseñada pensando en el largo plazo. Desde los años ochenta, Pekín ha apoyado la inversión temprana en extracción y procesamiento de minerales, ha otorgado subvenciones tanto a empresas estatales como privadas en minería, refinación y producción de materiales imanes o de baterías y ha aplicado normas medioambientales más flexibles que países como Estados Unidos y Australia.

En concreto, el auge de China como potencia en el sector de las tierras raras ha sido producto de la especialización global. China aumentó la producción de tierras raras de aproximadamente 31 000 toneladas métricas en 1994 a 270 000 toneladas métricas en 2024. Durante este periodo, los proveedores chinos ofrecieron precios más bajos que los productores estadounidenses gracias al apoyo estatal, estándares ambientales más bajos¹⁶

¹³ Ver: <https://www.mining-technology.com/features/a-deep-dive-into-chinas-role-as-critical-mineral-monolith/>

¹⁴ Ver: <https://www.energynews.es/amenaza-fotovoltaica-china-controla-el-46-de-la-capacidad-mundial-y-el-80-del-mercado-de-paneles/>

¹⁵ Ver: <https://www.mining-technology.com/features/a-deep-dive-into-chinas-role-as-critical-mineral-monolith/?cf-view>

¹⁶ El procesamiento de tierras es muy contaminante, ya que se generan residuos radiactivos.

y mano de obra más barata¹⁷, lo que provocó el cese en 2002 de la actividad de la mina estadounidense de Mountain Pass, que hasta entonces era reconocida como la piedra angular de la producción mundial de tierras raras al constituir la fuente más rica y fiable del mundo¹⁸.

La importancia de los minerales críticos para China ha impulsado una aceleración de la inversión china en el sector minero, tanto a nivel nacional como internacional, asegurándose activos mineros extranjeros en países en desarrollo a través de la Iniciativa de la Franja y la Ruta (BRI), en África y Latinoamérica. Entidades respaldadas por China han invertido casi 57 000 millones de dólares en proyectos minerales en diecinueve países (Escobar *et al.*, 2025). La inversión de China en metales y minería, a través de su Iniciativa de la Franja y la Ruta (BRI), alcanzó un récord de 21 400 millones de dólares en 2024, un aumento del 10 % con respecto a 2023¹⁹. Esto garantiza que las materias primas fluyan hacia la industria de refinación china, reforzando su papel como centro de procesamiento global de minerales.

En los últimos años, China ha adquirido importantes activos mineros africanos, incluyendo la mina de cobre Khoemacau en Botsuana (2023), la mina de litio Goulamina en Malí (2024) y la mina de tierras raras Ngualla en Tanzania (2025). En muchos países africanos, ahora mismo son las empresas chinas las que explotan estos recursos, no el país en sí.

En los países africanos, la inversión se ha centrado en la creación de nuevas cadenas de suministro de litio, donde, de los siete activos de litio en África que se espera que comiencen la producción para 2027, cinco tienen al menos un 50 % de participación accionaria de empresas chinas²⁰. La empresa china BYD —el mayor fabricante mundial de vehículos eléctricos— participa en seis minas africanas de litio, asegurándose suficientes materias primas hasta 2032²¹.

La ventaja de China en minerales críticos no puede explicarse exclusivamente por el apoyo estatal al sector de extracción y pro-

¹⁷ Ver: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf>

¹⁸ Ver: <https://mpmaterials.com/history/>

¹⁹ Ver: <https://theoregongroup.com/investment-news/chinas-mining-investments-under-belt-and-road-initiative-hit-record-high-in-2024/>

²⁰ Ver: <https://www.mining-technology.com/features/a-deep-dive-into-chinas-role-as-critical-mineral-monolith/?cf-view>

²¹ Ver: <https://africacenter.org/spotlight/china-africa-critical-minerals/>

cesamiento de minerales. Es el resultado de una política industrial vertical desarrollada hace décadas en la que se hace un esfuerzo de integración de todos los sectores implicados desde la educación, la investigación, la industria y los objetivos estratégicos de capacidades de la defensa. En el caso de los vehículos eléctricos, Pekín amplió las subvenciones a los consumidores y exigió a las empresas extranjeras que entraran en empresas conjuntas con fabricantes automovilísticos nacionales. Distribución de la producción de minerales refinados por países:

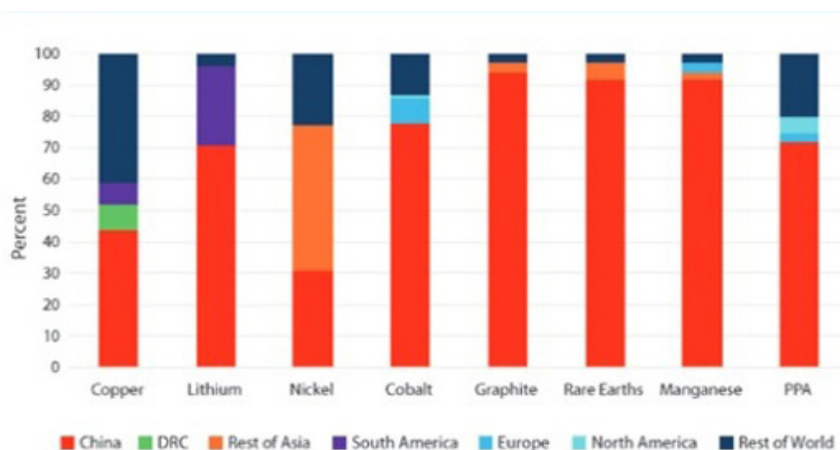


Figura 2. Distribución del refinado de minerales críticos. Fuente: <https://africacenter.org/spotlight/china-africa-critical-minerals/>

Esta elevada concentración de producción y procesado de minerales críticos de China crea vulnerabilidades en la cadena de suministro que trascienden el ámbito económico para trasladarse al ámbito de la geopolítica.

Para estudiar esta vulnerabilidad, se puede aplicar la evaluación N-1²² que se utiliza en los mercados de gas natural y en los sistemas energéticos. Si se realiza esta evaluación en el contexto de minerales críticos para examinar cómo se ve el sistema cuando el mayor proveedor queda excluido de los balances globales de oferta y demanda, se observa que el níquel, cobalto y grafito parecen tener suficiente suministro a nivel global.

Sin embargo, si se excluye el mayor proveedor y su demanda (China para litio, cobalto y grafito e Indonesia para níquel), los

²² El suministro restante tras excluir al mayor proveedor se conoce como suministro N-1.

suministros restantes de N-1 quedarían significativamente por debajo de la demanda de N-1. Para cobalto y grafito, los suministros restantes cubrirían solo entre el 25 % y el 30 % de la demanda de N-1 en 2035, totalmente insuficiente para cubrir las necesidades minerales en el sector de las energías renovables. El suministro de N-1 cubre el 55 % de la demanda de níquel de N-1, pero la proporción podría ser mucho menor si también se interrumpen los suministros de sulfato de níquel de grado para baterías, principalmente de China. Para el litio, la brecha es menos pronunciada, pero el suministro restante de N-1 sigue cubriendo solo el 60 % de la demanda de N-1. Esto enfatiza que, incluso donde el equilibrio global está razonablemente bien abastecido, las cadenas de suministro de minerales críticos pueden ser muy vulnerables a choques de oferta, ya sea por fenómenos meteorológicos extremos, interrupciones comerciales o geopolítica²³.

4 Mercados minerales: menos economía y más geopolítica

China ha comprendido desde hace tiempo el valor estratégico de su dominio en la producción de tierras raras. Como se refleja en la cita de Deng Xiaoping de 1992, «Oriente Medio tiene petróleo, China tiene tierras raras», China reconoció hace varias décadas el valor de estos minerales como activos geopolíticos. Desde 2017 ha ido reforzando gradualmente su control sobre las tierras raras y otros minerales críticos, imponiendo requisitos de licencias y regulación, limitando el acceso de empresas extranjeras a la minería, al procesamiento y a tecnología relacionada.

Por otro lado, el sector de la defensa y la digitalización de las economías, en donde la IA juega un papel fundamental, necesitan determinados minerales, muchos de ellos también necesarios para el sector energético. Por ejemplo, los vehículos eléctricos y los aerogeneradores requieren los mismos imanes especializados que los sistemas de propulsión de los barcos y los actuadores de misiles guiados.

Esta competencia sectorial depende en gran medida de las prioridades que tengan determinados países. Para EE. UU., tal y como se refleja en la *Estrategia de Seguridad Nacional 2025* y en la iniciativa *Pax Silica*, el binomio de seguridad económica-seguridad nacional parece ser indisoluble. En este caso del acceso a los

²³ Ver: <https://www.iea.org/commentaries/growing-geopolitical-tensions-underscore-the-need-for-stronger-action-on-critical-minerals-security>

minerales estratégicos necesarios desde el punto de vista de la defensa y el desarrollo tecnológico, marcarán en mayor extensión las políticas e iniciativas que la Administración de Trump lleve a cabo para reubicar sus cadenas de suministro y minimizar su dependencia de China. Para China, su prioridad es posicionarse en el mercado mundial como líder en la exportación de productos para la transición energética, pero fomentando también el desarrollo de la tecnología en otros ámbitos como el de la defensa y la IA.

La competencia entre ambas potencias para alzarse con la hegemonía mundial constituye un riesgo para el acceso seguro y sostenible de los minerales estratégicos necesarios para llevar a cabo la transición energética hacia energías renovables. En este complejo contexto geopolítico, puede primar más el impedir que una potencia tenga acceso a los minerales críticos que el libre comercio, contribuyendo con ello a que los mercados de minerales sean manejados por la geopolítica bajo la perspectiva de seguridad nacional.

4.1 Aumento de los controles de exportación

China ha utilizado en múltiples ocasiones su «casi monopolio» en minerales estratégicos como herramienta geopolítica, especialmente en 2010, cuando detuvo las exportaciones a Japón tras la colisión entre un buque pesquero chino y un buque de la Guardia Costera de Japón cerca de las islas Senkaku, lo que hizo que el precio de las tierras raras se disparara hasta diez veces (Kang, Lee y Oh, 2025).

En 2023, China impuso nuevos requisitos de licencia para las exportaciones de galio y germanio. Las exportaciones de galio cayeron de casi 6900 kilogramos en julio a cero en septiembre y los envíos de germanio bajaron de unos 8000 kilogramos a solo 1 kilogramo. Según las cuotas de producción de 2022, esto eliminó efectivamente alrededor del 60 % del suministro global de germanio y el 90 % del suministro de galio de los mercados internacionales²⁴, alterando las cadenas de suministro de chips y defensa y demostrando la capacidad de Pekín para convertir en armas las licencias de exportación. En diciembre de 2024, China prohibió la exportación de galio, germanio y algunos otros mate-

²⁴ Ver: <https://www.reuters.com/world/china/china-exported-no-germanium-gallium-aug-due-export-curbs-2023-09-20/>

riales a Estados Unidos. A esto le siguieron anuncios adicionales de control de exportación en febrero de 2025 sobre una variedad de materiales, incluyendo wolframio, telurio, bismuto, indio y molibdeno, minerales claves utilizados, principalmente, en aplicaciones de defensa y alta tecnología. El 9 de octubre de 2025, China amplió los controles de exportación incluyendo el holmio, erbio, tulio, europio e iterbio, así como las tecnologías de minería y procesamiento asociadas.

Sin embargo, la implementación de estas nuevas restricciones y controles quedaron suspendidas durante un año tras negociaciones con Trump el 30 de octubre. Unos días después, China anunció que suspendía otras restricciones antiguas, como la prohibición de la exportación de galio y germanio a Estados Unidos. Estados Unidos suspendió entonces la aplicación de la Regla de Afiliados durante un año²⁵, además de hacer otro tipo concesiones relacionadas con la venta de determinados chips a China. Estas negociaciones dejan claro que los minerales críticos y, en concreto, las tierras raras son una herramienta geopolítica muy eficaz.

Al controlar sus exportaciones, China podría así alterar las cadenas de suministro globales de una serie de sectores estratégicamente importantes, como la energía y la automoción, pero también la defensa y la aeroespacial. El dominio de China en el procesamiento de minerales críticos le ha permitido reducir los precios por debajo de cualquier nivel igualable, aumentando la dependencia del resto del mundo de las exportaciones chinas de estos minerales.

Estas acciones demuestran que los mercados de minerales se rigen cada vez más por la geopolítica y menos por la economía. Este cambio es el reflejo del nuevo paradigma geopolítico mundial en el que el orden establecido tras la Segunda Guerra Mundial se está resquebrajando. Muestra de ello es la pérdida del multilateralismo como herramienta para resolver disputas internacionales. Si en 2010 EE. UU., Japón y la UE pudieron elevar su queja ante la OMS por las restricciones de exportación de tierras raras tras el incidente de las islas Senkaku, en la actualidad no es

²⁵ La Regla de Afiliados se refiere a una regulación del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (BIS) que amplía las Regulaciones de Administración de Exportaciones (EAR) al someter a las empresas no estadounidenses que son propiedad en un 50 % o más de entidades incluidas en la Lista de Entidades o la Lista MEU a los mismos requisitos de licencia, con el objetivo de cerrar lagunas y prevenir el desvío de tecnología estadounidense.

posible hacer nada cuando las restricciones a las exportaciones se realizan alegando motivos de seguridad nacional. Esto cambia totalmente las reglas del juego.

Esta situación hace que durante los últimos años haya habido un aumento en las restricciones de exportación de determinados bienes, con un aumento considerable de las que afectan a los minerales estratégicos. Los controles de exportación conllevan desafíos únicos en comparación con otros controles comerciales. Aunque, al igual que los aranceles, suelen formar parte de amplias negociaciones diplomáticas, los controles de exportación suelen estar impulsados por preocupaciones de seguridad nacional. En consecuencia, los Gobiernos a veces implementan restricciones a la exportación de forma unilateral e inmediata, generando mucha incertidumbre a las empresas²⁶.

El mayor número de restricciones a la exportación entre 2019 y 2023 relacionadas con los minerales necesarios para la transición energética fueron impuestas por países como la República Democrática del Congo, Mongolia, India, Burundi y Zambia. Estas restricciones se dirigen principalmente a minerales clave como el cobre (notablemente en la República Democrática del Congo,

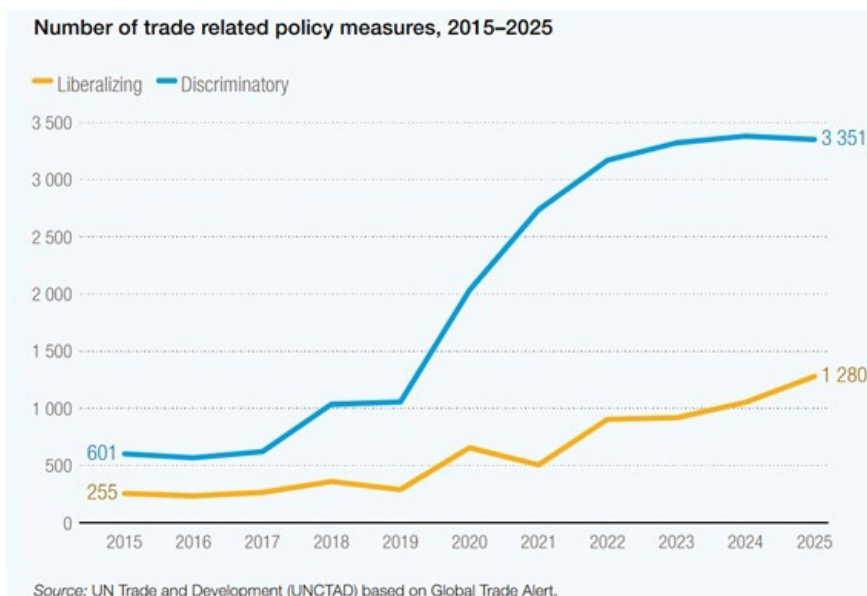


Figura 3. Número de políticas comerciales 2015-2025. Fuente: UNCTAD

²⁶ Ver: <https://www.mckinsey.com/capabilities/geopolitics/our-insights/restricted-how-export-controls-are-reshaping-markets>

Mongolia, Zambia y Argentina), el molibdeno (Mongolia) y un grupo de minerales de alta tecnología o estratégicos como galio, germanio, indio, niobio, tántalo y vanadio (especialmente en Burundi y Etiopía). El zinc también ha estado sujeto a restricciones, especialmente en India, Burundi y Etiopía²⁷.

4.2 Fomento del proteccionismo

Las recientes interrupciones en la cadena de suministro han llevado a muchos países y regiones a buscar una reubicación de las cadenas de suministro para una mayor autonomía estratégica y para reducir la dependencia de posibles adversarios. A medida que los países avanzan para proteger su seguridad nacional e independencia energética, los minerales críticos se han convertido en los protagonistas en la formulación de políticas en sectores estratégicos. Los objetivos principales de estas políticas son fomentar que las industrias estratégicas se reubiquen o establezcan nuevas operaciones en sus países de origen (*reshoring*), en regiones cercanas (*nearshoring*) o en naciones aliadas de confianza (*friendshoring*)²⁸. Estas medidas interrumpen los flujos globales y son un indicativo de cómo la política estatal puede redirigir la oferta.

Según estimaciones del International Energy Forum (IEF), el número de políticas de minerales críticos emitidas desde 2020 casi duplicó el total combinado de las dos décadas anteriores, con los países recurriendo cada vez más a la planificación estratégica, controles de exportación y mandatos de procesamiento nacional para proteger las cadenas de suministro. Por citar algunos ejemplos, Indonesia, con el 21 % de las reservas mundiales de níquel y del 37 % de la producción minera de este metal, ha ido restringiendo progresivamente las exportaciones. En 2020 prohibió la exportación de mineral de níquel para forzar la fundición local, atrayendo una gran inversión en refinerías. Zimbabue ha restringido las exportaciones de cromo para impulsar el procesamiento en el país y en Filipinas se ha aprobado un proyecto de ley para prohibir la exportación de mineral de níquel sin procesar para 2030 y así promover el procesamiento nacional²⁹. En Latinoamérica, el presidente chileno Gabriel Boric ha dado pasos

²⁷ Ver: <https://sdgpulse.unctad.org/critical-minerals>

²⁸ Ver: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transition-Critical-Materials#page-4>

²⁹ Ver: https://legacy.senate.gov.ph/press_release/2025/0203_escudero1.asp

para nacionalizar la industria del litio de su país, que representa el 26 % de las reservas mundiales³⁰.

En los últimos meses, la Administración Trump ha realizado esfuerzos para reducir la dependencia de Estados Unidos del suministro chino, lanzando iniciativas para financiar proyectos mineros nacionales, agilizar los permisos y asociarse con aliados para diversificar la cadena de suministro. En cuestión de meses, la Administración Trump ha reescrito las reglas de la política comercial de Estados Unidos. Ha impuesto aranceles generales a casi todos los países, comenzando en el 10 % y aumentando hasta el 50 %. Los gravámenes sobre una serie de productos, como el acero, el aluminio, los automóviles y las piezas de automóviles, han elevado aún más estas barreras comerciales. A una tasa efectiva promedio de alrededor del 18 %, los impuestos a la importación de Estados Unidos son ahora los más altos en casi un siglo³¹. Estas acciones cambiarán la posición de Estados Unidos en la economía mundial, desligando al país, al menos en parte, de las cadenas de suministro globales.

En los últimos años, el apoyo a los nuevos proyectos de minerales críticos en EE. UU. se ha realizado con base en acuerdos de compra entre fabricantes de automóviles y empresas nacionales de extracción mineral. General Motors (GM), por ejemplo, realizó una inversión accionaria de 650 millones de dólares en Lithium Americas, obteniendo acceso exclusivo a la producción de la fase 1 desde una nueva mina en Thacker Pass, Nevada³². Este acuerdo habría apoyado la elección de GM para recibir incentivos fiscales al consumidor para vehículos eléctricos producidos nacionalmente.

La Administración Trump ha dado un paso más y ha centrado su atención en políticas para aumentar el suministro de minerales, incluyendo aranceles a la importación, desregulación e inversión federal directa a través del Departamento de Defensa. La orden ejecutiva de marzo de 2025 sobre «Medidas Inmediatas para Aumentar la Producción Mineral Estadounidense»³³ estableció el «Consejo Nacional de Dominio Energético³⁴», amplió la lista

³⁰ Ver: <https://cncls.cl/estrategia-nacional-del-litio-impulso-para-chile/>

³¹ Ver: <https://www.infobae.com/america/mundo/2025/08/07/los-impuestos-a-las-importaciones-en-estados-unidos-alcanzaron-el-mayor-nivel-en-casi-cien-anos/>

³² Ver: <https://www.greencars.com/es-us/noticias/gm-invierte-650-millones-de-dolares-en-la-produccion-de-litio>

³³ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/03/immediate-measures-to-increase-american-mineral-production/>

³⁴ Entre las funciones de este consejo está la de asesorar al presidente sobre la mejora de los procesos para la obtención de permisos, producción, generación, dis-

de minerales críticos para incluir uranio, cobre, potasa y oro, y ordenó a las agencias acelerar los permisos y movilizar financiación. En abril de 2025, una segunda orden ejecutiva lanzó una estrategia de minerales marinos, ordenando a la Oficina de Gestión de Energía Oceánica (BOEM) y a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) a inventariar los yacimientos de níquel, cobalto, cobre, manganeso, titanio y tierras raras, y solicitar permisos de vía rápida para la exploración y minería en la plataforma continental exterior de EE. UU. También pide fortalecer la capacidad de refinación nacional, integrar los minerales del lecho marino en la planificación de seguridad nacional y asociarse con aliados para desarrollar los recursos del lecho marino de forma responsable, contrarrestando la influencia china.

A mediados de julio de 2025, el Departamento de Comercio de EE. UU. intervino en el mercado del grafito natural, imponiendo un arancel del 160 % sobre el material activo de ánodo de grafito chino³⁵. El 30 de julio, la Administración anunció un arancel del 50 % sobre las importaciones de productos de cobre y productos intensivos en cobre, con acciones adicionales para exigir que el 25 % de los minerales de cobre, chatarra y concentrados producidos en Estados Unidos se vendan a nivel nacional³⁶.

Además de los aranceles, la estrategia de Trump también contempla incluir subsidios para la producción y el procesado de los minerales estratégicos. Esto sería especialmente importante en industrias donde los mercados han fallado, como la industria de las baterías, en donde los subsidios chinos han incrementado la capacidad de fabricación de baterías hasta el punto de superar con creces la demanda global total. Parece que Trump busca jugar con las mismas reglas utilizando un pragmatismo inusual en las democracias occidentales. Además, la iniciativa Mina del Futuro proporciona casi 100 millones de dólares en la financiación para acelerar la investigación, tecnologías mineras innovadoras y comercialización³⁷. También, Donald Trump, utilizando la Ley de Producción de la Defensa de 1950, firmó en marzo de 2025

tribución, regulación, transporte y exportación de todas las formas de energía estadounidense, incluidos los minerales críticos.

³⁵ Ver: <https://source.benchmarkminerals.com/article/chinese-aam-imports-into-the-us-face-160-tariff-following-antidumping-investigation-ruling>

³⁶ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/07/adjusting-imports-of-copper-into-the-united-states/>

³⁷ Ver: <https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-actions-secure-american-critical-minerals-and-materials-supply>

un decreto destinado a aumentar inmediatamente la producción estadounidense de minerales críticos como uranio, cobre, potasa y oro, entre otros.

En julio, el Departamento de Defensa (DOD) firmó un acuerdo de colaboración con MP Materials para una operación integrada verticalmente desde la extracción de tierras raras hasta la producción de imanes, lo que se conoce como estrategia «de la mina al imán». El acuerdo incluye inversión de capital por parte del DOD; un acuerdo garantizado de compra de 7000 toneladas métricas de imanes de tierras raras al año, algo más del 40 % de la demanda estadounidense de estos materiales en 2020 y a un precio garantizado aproximadamente el doble que el precio de mercado de 2025. Esta acción debería reducir la dependencia de Estados Unidos de China cuando la planta entre en funcionamiento en 2028³⁸.

Por su parte, la UE también avanza hacia un mayor proteccionismo con la aprobación de la Ley de Materias Primas Críticas, con la que pretende establecer una cadena de valor segura y fiable de minerales críticos para el bloque. En ella se establece la dependencia de un solo país proveedor al 65 % y fomenta la minería, el procesamiento y el reciclaje en Europa.

4.3 Iniciativas internacionales de grupos geopolíticos afines: *friendshoring*

Las alianzas de China a través de su Iniciativa de la Franja y la Ruta, que apoya el desarrollo de infraestructuras principalmente en economías en desarrollo y emergentes, han sido fundamentales para dominar el procesamiento mineral³⁹.

Capítulo 2 Figura 4

Por ello, Estados Unidos y sus aliados están recurriendo al *friendshoring*, que consiste en construir cadenas de suministro a través de socios de confianza. Este enfoque se está promoviendo a través de una serie de alianzas y acuerdos en el ámbito multilateral y también bilateral. Estos acuerdos entre Gobiernos proporcionan señales positivas en el mercado y aprovechan el apoyo político

³⁸ Ver: <https://mpmaterials.com/news/mp-materials-announces-transformational-public-private-partnership-with-the-department-of-defense-to-accelerate-u-s-rare-earth-magnet-independence>

³⁹ Ver: <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-explained>



Figura 4. Ubicación de minas operativas en el extranjero que contienen minerales críticos como producto principal, propiedad de empresas estadounidenses o chinas. 2023. Fuente: <https://mine.nridigital.com>

que catalizan más inversión privada y aseguran que los proyectos lleguen desde el anuncio hasta la producción.

Desde el punto de vista multilateral destacan las iniciativas encuadradas en el G7⁴⁰ y en el G20⁴¹, así como la Asociación de Seguridad Mineral (MSP), creada en 2022. Esta iniciativa es un mecanismo de cooperación internacional para ampliar la diversificación y el comercio del suministro mineral. Gran parte del enfoque de la MSP se ha centrado en promover la transparencia empresarial y política en países en desarrollo ricos en minerales, incluyendo políticas en apoyo a prácticas mineras ambiental y socialmente sostenibles. Prueba de ello es la iniciativa del corredor Lobito en el África occidental.

Pero es el marco bilateral en donde se están produciendo más avances entre países afines para lograr asegurar las cadenas de suministro de minerales críticos y contrarrestar la dependencia de China. Aunque implique una diversificación global a menor escala, estas asociaciones bilaterales pueden traer beneficios mutuos de forma más ágil y eficiente. Por ejemplo, en 2010, los precios de algunas tierras raras aumentaron significativamente por miedo a que China estuviera restringiendo sus suministros debido a una disputa no relacionada con Japón. El país nipón

⁴⁰ Ver: <https://www.consilium.europa.eu/media/rwkj3dls/minerals-en.pdf>

⁴¹ Ver: <https://www.iied.org/critical-minerals-reflections-g20-leaders-summit>

contrató a Australia para la extracción adicional de estos materiales, estableció un acuerdo con Malasia para nueva capacidad de procesamiento, promovió el reciclaje de minerales y financió investigaciones sobre alternativas a tierras raras. En la última década, la dependencia japonesa de las tierras raras chinas cayó del 90 % al 60 %⁴².

En este sentido, cabe mencionar el acuerdo entre EE. UU. y Australia y los recientemente firmados con Japón, Malasia y Tailandia. También hay que mencionar los acuerdos de paz a los que está llegando Trump con determinados países en la resolución de conflictos que, si bien no son afines, tienen recursos minerales críticos. Es el caso de Ucrania o la República del Congo.

Pero quizá la apuesta más prometedora de Trump es la recientemente anunciada iniciativa Pax Sílica, con la que pretende establecer asociaciones con países que contribuyan a reforzar su independencia de China en determinados materiales estratégicos y avanzar en el desarrollo tecnológico. De momento, la iniciativa es una declaración de principios compartidos —todavía sin mecanismo de aplicación— sobre los cuales se asentará la cooperación futura. Los primeros en incorporarse a la iniciativa han sido: Japón, Australia, Singapur, Corea del Sur, Reino Unido e Israel. Posteriormente se han unido Catar y Emiratos Árabes Unidos y probablemente India se sume en las próximas semanas. No se descarta que, en un futuro, Trump invite a otros países a formar parte de ella. Lo más significativo de esta iniciativa es que es la primera vez que los países se organizan en torno a la computación, los semiconductores, los minerales y la energía como activos estratégicos compartidos.

De momento, tanto la UE como Canadá han quedado fuera de esta iniciativa, a pesar de que Canadá posee yacimientos de más de la mitad de los minerales de la lista crítica de EE. UU., incluyendo litio, grafito, níquel, cobalto, cobre y tierras raras. Es la única nación occidental con todas las materias primas necesarias para baterías avanzadas de vehículos eléctricos. Canadá está expandiendo proactivamente su capacidad para la minería y el procesamiento. Por ejemplo, su *Estrategia de Minerales Críticos 2022* busca acelerar la exploración, agilizar la concesión de permisos y ampliar el procesamiento nacional.

⁴² Ver: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/japans-responses-chinas-supply-chain-dominance#:~:text=Japan%20empowered%20the%20Japan%20Organization,from%2095%25%20to%2060%25>

Todos estos acuerdos multilaterales se ven reforzados por colaboraciones que se mueven entre el ámbito gubernamental y empresarial. Entre ellos se pueden mencionar, por ejemplo, la nueva empresa conjunta entre el Departamento de Guerra de EE. UU., la empresa MP Materials y la empresa Maaden, que es propiedad en un 67 % del Fondo de Inversión Pública de Arabia Saudí. El objetivo es construir una refinería de tierras raras en Arabia Saudí. Esta asociación representa un paso fundamental hacia el equilibrio de la cadena de suministro global de tierras raras y está alineada con los intereses económicos y de seguridad nacional de EE. UU. Según el acuerdo, el Departamento de Guerra financiará completamente el 49 % de la parte estadounidense, mientras que MP Materials aportará la experiencia técnica y Maaden mantendrá el 51 % restante de la participación⁴³.

Arabia Saudí ofrece un panorama regulatorio muy favorable. Ha introducido un marco regulatorio moderno para acelerar el desarrollo de su sector minero y apoyar sus ambiciones más amplias en minerales críticos que se exponen en la Visión 2030. En 2021, Arabia Saudí promulgó la Ley de Inversión Minera, un conjunto de reformas profundas destinadas a atraer inversiones y agilizar los procesos en la industria minera. Las licencias mineras en Arabia Saudí pueden obtenerse en 180 días, en marcado contraste con Estados Unidos, donde normalmente se necesitan entre 7 y 10 años para obtener los permisos necesarios para poner en funcionamiento una mina⁴⁴.

Por su parte, la UE, al amparo de su estrategia Global Gateway⁴⁵, ha puesto en marcha proyectos relacionados con el acceso a minerales críticos entre los que cabe destacar los firmados con varios países como Zambia, Namibia, Ghana, Kazajistán y la República Democrática del Congo, con su aportación al desarrollo del corredor Lobito⁴⁶.

A la vista de todas estas iniciativas, lo que se percibe es un mosaico de relaciones gubernamentales y empresariales con

⁴³ Ver: <https://es.marketscreener.com/noticias/mp-materials-y-el-departamento-de-guerra-de-ee-uu-se-asocian-con-maaden-para-desarrollar-una-refine-ce7d5ed9d98ff325>

⁴⁴ Ver: <https://www.arabnews.com/node/2223726/business-economy>

⁴⁵ Esta iniciativa se puso en marcha en 2021 para competir con la Nueva Ruta de la Seda china e impulsar el desarrollo de infraestructuras en Latinoamérica, el sudeste asiático y África. En cuatro años se han movilizado más de 306 000 millones de euros y es probable que se superen los 400 000 millones de euros para 2027.

⁴⁶ Ver: https://international-partnerships.ec.europa.eu/policies/global-gateway/climate-and-energy_en?page=2

objetivos e intereses geopolíticos afines. Sin embargo, algunos autores señalan que lo que falta es una institución capaz de coordinar políticas, mediar disputas y promover una gestión responsable de los recursos. La idea de una Agencia Internacional de Materiales (IMA) —propuesta por el Panel Internacional de Recursos de la ONU y, más recientemente, por la Comisión Global de Inversores en Minería 2030— ofrece precisamente ese mecanismo. Al igual que la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se creó en respuesta a los choques petroleros de los años setenta, una IMA ofrecería una plataforma de cooperación entre Gobiernos e industria, reforzando la transparencia de los datos y el acceso equitativo a recursos minerales cruciales para la transición energética y digital⁴⁷.

5 Nuevas explotaciones vs reciclaje

Aumentar el suministro de materiales es vital para satisfacer la demanda futura de materiales en el sector energético. Este aumento puede realizarse mediante la expansión del suministro primario o secundario. El suministro primario podría incrementarse mediante la expansión de la extracción y el procesamiento de los minerales críticos. Respecto a las fuentes secundarias, el reciclaje podría contribuir de forma significativa a diversificar las fuentes de suministro para evitar las vulnerabilidades generadas por la excesiva dependencia de países exportadores.

5.1 Suministro primario de minerales críticos

En cuanto al suministro primario, los recursos se clasifican en función de la confianza de los geólogos en la existencia y el tamaño de los depósitos. Se convierten en reservas cuando la extracción económica es posible bajo las condiciones técnicas y de mercado actuales. La frontera entre ambos es fluida, ya que está sujeta a muchos factores, incluyendo precios de materias primas, infraestructuras, marcos regulatorios, decisiones políticas, innovación tecnológica e incluso la existencia de situaciones de seguridad y conflicto que puedan afectar a la zona de extracción.

Hace diez años, el 50 % de todos los yacimientos conocidos de tierras raras estaban en China. Hoy en día, esa cifra ha bajado

⁴⁷ Ver: <https://www.theparliamentmagazine.eu/news/article/europes-chance-to-lead-on-critical-minerals>

al 34 %⁴⁸, lo que indica el interés puesto en la exploración de nuevas en los últimos años. A principios de este año, Suecia descubrió los mayores yacimientos de tierras raras de Europa⁴⁹ y recientemente se hallaron entre 20 y 40 millones de toneladas de litio en un cráter volcánico a lo largo de la frontera entre Nevada y Oregón⁵⁰, lo que lo convierte potencialmente en el mayor yacimiento del mundo. Respecto al cobalto, por ejemplo, Australia tiene las segundas mayores reservas, con alrededor del 15 % del total mundial y con una producción hasta la fecha solo del 2 %.

A finales de la próxima década, hay motivos para esperar descubrimientos adicionales que profundicen en la comprensión de las diversas fuentes potenciales de suministro⁵¹. Sin embargo, las exploraciones para encontrar nuevos yacimientos son muy costosas y pueden considerarse un fondo perdido si no se obtienen resultados satisfactorios, constituyendo la primera barrera para fomentar las inversiones en el sector minero.

Aunque la demanda de minerales críticos puede aumentar drásticamente en solo unos años, aumentar la oferta poniendo en funcionamiento una nueva mina suele llevar una década o más. Esta brecha entre la rápida adopción tecnológica y el desarrollo lento de recursos pone a Gobiernos y empresas bajo una presión constante para asegurar nuevas fuentes de suministros. Abordar estos riesgos requiere tanto respuestas a corto plazo como planificación industrial a largo plazo.

El principal problema para la apertura de nuevos yacimientos es la gran incertidumbre que rodea en torno a su rentabilidad. En este sentido, la colaboración público-privada y el apoyo de la financiación estatal resulta imprescindible si se pretende avanzar hacia una cadena de suministro segura relacionada con las energías renovables y evitar las dependencias de terceros países y en especial de China.

Los precios de algunos minerales han oscilado bruscamente en la última década, impulsados menos por los fundamentos de la

⁴⁸ Ver: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/resource-realism-the-geopolitics-of-critical-mineral-supply-chains>

⁴⁹ Ver: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>

⁵⁰ Ver: <https://www.earth.com/news/worlds-largest-lithium-deposit-lies-under-a-supervolcano-in-the-us/>

⁵¹ Ver: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/resource-realism-the-geopolitics-of-critical-mineral-supply-chains>

oferta y la demanda que por comportamientos estratégicos, ya sea por el dominio de China en las cadenas de suministro o por los controles de exportación y las medidas proteccionistas. El precio no debe ser el motor que sirva para poner en marcha nuevos yacimientos. Si este es el único factor, en determinados minerales no será posible la diversificación de la oferta.

Por ejemplo, en 2022, Jervois abrió la única mina de cobalto de Estados Unidos en Idaho, solo para cerrarla al año siguiente cuando los precios se desplomaron. Entre mayo de 2022 y mayo de 2025, los precios del cobalto cayeron un 59,5 %. Esta fuerte caída coincidió con que China Molybdenum Company Limited (CMOC) casi duplicara su producción anual de cobalto en 2024, alcanzando niveles récord de producción a pesar de que los precios de mercado cayeron más del 60 %⁵².

Esta situación indica que la inversión gubernamental en acciones proporciona una vía para el capital necesario y reduce los riesgos para las empresas. También los mecanismos de apoyo a precios y otras herramientas políticas podrán hacer viables los proyectos mineros estratégicos para la seguridad nacional.

Por lo que respecta a las inversiones en países en desarrollo y ricos en recursos minerales, la inversión extranjera directa desempeña un papel clave en ayudar a los países ricos en recursos a construir capacidades locales de refinación y procesamiento y a ascender en la cadena de valor mineral. La transición energética ofrece a las economías en desarrollo una gran oportunidad para impulsar el desarrollo ascendiendo en la cadena de valor de minerales críticos⁵³.

Recientemente, nuevas regiones están surgiendo como puntos conflictivos en la competencia por los recursos minerales. Poseen grandes reservas poco desarrolladas y están atrayendo interés geopolítico. Su importancia como fuentes de minerales críticos otorga a estas zonas una importancia estratégica adicional. Es el caso del Ártico, las aguas profundas o la minería espacial.

Groenlandia posee yacimientos de 39 de los 50 minerales incluidos en la lista de minerales críticos de EE. UU. Estos incluyen tierras, grafito, metales del grupo del platino y niobio. Las reservas de REE de Groenlandia son de aproximadamente 1,5 millones de

⁵² Ver: <https://source.benchmarkminerals.com/article/cobalt-price-slump-hits-first-new-us-cobalt-mine-in-decades>

⁵³ Ver: <https://sdgpulse.unctad.org/critical-minerals/>

toneladas métricas, cerca del total de EE. UU. Si se desarrollan, estas reservas podrían cubrir una gran parte de la demanda global⁵⁴. Tanto Estados Unidos como China han mostrado interés en los recursos de Groenlandia durante los últimos años, pero ahora Trump ha dado un paso más al pretender anexionarse esta enorme isla.

5.2 Suministro secundario

Las tecnologías emergentes de reciclaje y recuperación de materias primas críticas aún no están suficientemente desarrolladas para satisfacer la demanda actual. Su implementación industrial a gran escala requiere validación tecnológica, ambiental y económica.

Los niveles actuales de reciclaje varían significativamente según el material. El acero, el aluminio y el cobre se reciclan comúnmente, con tasas promedio superiores al 60 %, por lo que podría haber grandes volúmenes de suministros secundarios de estos materiales disponibles para reemplazar una parte de su producción primaria y aliviar la presión para expandir aún más sus cadenas de suministro. Por el contrario, otros materiales, como el litio, el grafito y las tierras raras, rara vez se reciclan (tasa de reciclaje del 1 %), principalmente debido a la falta de flujos considerables al final de su vida útil.

A largo plazo, existe un gran potencial para mejorar las tasas de reciclaje de estos materiales a medida que un número creciente de infraestructuras energéticas contemporáneas llegan al final de su vida útil. Por lo tanto, también se necesitan acciones proactivas para apoyar la I+D de las medidas de gestión de residuos y las tecnologías de reciclaje de estos materiales, de modo que estén disponibles y se puedan ampliar para gestionar los crecientes volúmenes de tecnologías energéticas al final de su vida útil que se necesitarán en el futuro (Qiu *et al.*, 2024).

Lo más conveniente es que toda la vida del producto —desde su diseño hasta la finalización de uso— se realice bajo un punto de vista de un posterior reciclaje y de circularidad. En la actualidad, muchos productos no están diseñados para una recuperación fácil de materiales. A menudo se crean pensando en la funcionalidad y los costes de producción en lugar de la sostenibilidad. Por ejem-

⁵⁴ Ver: <https://www.csis.org/analysis/greenland-rare-earths-and-arctic-security>

plo, algunos productos contienen adhesivos o recubrimientos que complican aún más la recuperación de materiales. La falta de normas claras de diseño para el reciclaje agrava el problema, haciendo que la transición hacia una economía circular sea aún más complicada (Ries, Wartzack y Zipse, 2023).

5.3 Sustitución

Los avances tecnológicos pueden impulsar la reducción de la intensidad del uso de minerales críticos y su sustitución, aliviando así los impactos de una posible escasez de suministro de materiales en el futuro relacionados con los minerales estratégicos. La innovación tecnológica que reduce la intensidad del uso de materiales en tecnologías energéticas como la solar fotovoltaica, la eólica y el almacenamiento en baterías ya está en marcha. También se están llevando a cabo sustituciones de materiales y tecnologías, como el abandono de las turbinas eólicas basadas en imanes permanentes y la adopción de baterías de flujo redox de vanadio. Si bien estas estrategias podrían reducir la demanda de materiales con limitaciones de suministro como el Li, Co y tierras raras, podría aumentar la demanda de otros materiales debido a la sustitución de tecnologías y materiales (p. ej., el aumento de la demanda de Na o V debido a la sustitución de baterías de iones de litio por baterías de flujo redox de iones de sodio o vanadio, o la sustitución de Cu por Al en cables). Es esencial realizar evaluaciones exhaustivas de estas compensaciones para garantizar un suministro suficiente de materiales alternativos en caso de que se produzcan dichas sustituciones (Qiu *et al.*, 2024).

6 La respuesta de UE a los minerales críticos

La UE está intentando fortalecer poco a poco su autonomía en «sectores estratégicos» como la energía limpia y la inteligencia artificial a través de una estrategia de diversificación y reducción de los riesgos de una excesiva interdependencia de otros países (*de-risking*), pero evitando la desvinculación comercial con ellos (*decoupling*), que implicaría una desglobalización con enormes costes económicos para los Estados miembros.

Para ello, la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales, aprobada por la UE en 2024, fija para 2030 el objetivo de lograr la extracción local de un 10 % de los materiales críticos que el bloque necesite y alcanzar el 40 % del procesamiento, además

de cubrir un 25 % de la demanda con reciclaje y no depender de un solo proveedor en más de un 65 %.

En cumplimiento de esta ley, la UE ha aprobado 47 proyectos de interés que van a contar con ventajas para su puesta en marcha principalmente en la agilización de los permisos necesarios para llevarlos a cabo. De ellos, siete se encuentran en España.

Recientemente, la Comisión ha propuesto un nuevo plan de acción denominado RESourceEU para acelerar la diversificación del suministro a través de instrumentos concretos de financiación, seguimiento del mercado y mitigación de riesgos. El plan de acción RESourceEU acelerará el despliegue de proyectos de materias primas en Europa y en los países socios.

La Comisión está dando prioridad a los proyectos estratégicos con potencial para reducir rápidamente las dependencias de la UE. Para lograrlo, la Comisión está movilizando cerca de 3000 millones de euros de financiación de la UE en los próximos 12 meses para proyectos de materias primas fundamentales. También se espera que la Comisión proponga permisos más sencillos para las materias primas fundamentales a fin de permitir el rápido despliegue de los proyectos, respetando al mismo tiempo las normas medioambientales, sociales y de gobernanza de la UE.

La financiación sigue siendo un importante cuello de botella para los proyectos a lo largo de toda la cadena de valor de las materias primas fundamentales. En los últimos años, la Comisión y los Estados miembros han apoyado proyectos de materias primas fundamentales, por ejemplo, a través del Fondo de Innovación o del Fondo de Transición Justa. La planta de imanes de tierras raras de Neo Performance Materials en Narva, Estonia —cuya construcción comenzó en 2023— ha sido una de las primeras beneficiarias del fondo para una transición justa de la UE. Su capacidad de producción en la fase 1 es de 2000 toneladas anuales, con planes de expandirla posteriormente a 5000 toneladas anuales⁵⁵.

La garantía InvestEU también ha ayudado a socios ejecutantes como el BEI a financiar proyectos. Algunos Estados miembros también han empezado a crear fondos específicos para las materias primas fundamentales. Pero se necesita más acción y por eso el plan RESourceEU está centrado fundamentalmente en la financiación. La Comisión desbloqueará el apoyo a través de ayudas

⁵⁵ Ver: https://ec.europa.eu/regional_policy/whats-new/panorama/2025/09/17-09-2025-green-jobs-local-roots-global-reach-the-baltic-sea-region-road-to-innovation_en

directas mediante subvenciones de la UE y movilizará el apoyo canalizando las inversiones.

Dentro de este plan RESourceEU, la UE pretende crear el Centro Europeo de Materias Primas Fundamentales en 2026. Este centro proporcionará una supervisión estratégica que permitirá a la UE garantizar el acceso de las industrias europeas a las materias primas fundamentales, garantizando al mismo tiempo la resiliencia y la sostenibilidad. Desarrollará información sólida sobre las cadenas de valor de las materias primas fundamentales y los mercados primario y secundario, que servirá de base para las estrategias nacionales y de la UE en materia de inversión, almacenamiento y compra conjunta.

También se va a establecer un mecanismo para las materias primas en el marco de la Plataforma de la UE sobre Energía y Materias Primas, que actuará como herramienta de búsqueda de contactos, permitiendo la agregación de la demanda y facilitando la compra conjunta privada de materias primas estratégicas.

Además, la Comisión, junto con los Estados miembros, también pondrá en marcha un proyecto piloto de almacenamiento de materias primas fundamentales para crear un enfoque eficaz de las reservas de materias primas, centrándose en los retos logísticos y de financiación para mejorar la resiliencia industrial.

El plan RESourceEU también acelerará la diplomacia de las materias primas profundizando y ampliando las asociaciones estratégicas de la UE con países ricos en recursos y afines, y reforzando la cooperación en foros multilaterales. La Comisión, los Estados miembros y los países socios seguirán poniendo en práctica las asociaciones estratégicas ya existentes establecidas a través de la estrategia Global Gateway acelerando el apoyo a proyectos en terceros países a través de instrumentos de asistencia técnica, garantía y financiación mixta. Tras el Memorando de Entendimiento con Sudáfrica, la Comisión también iniciará negociaciones con Brasil para apoyar proyectos conjuntos, creación de valor local y empleo, y normas ASG (ambientales, sociales y gobernanza), de investigación e innovación más estrictas a lo largo de toda la cadena de valor⁵⁶.

El plan RESourceEU insta a los Estados miembros que aún no lo hayan hecho a que establezcan ventanillas únicas de contacto y se aseguren de que estas funcionen de manera eficiente, a fin

⁵⁶ Ver: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_25_2755

de ayudar a establecer plazos claros para la concesión de permisos y reducir los riesgos para los promotores de proyectos. Con el fin de mejorar el marco regulador, la Comisión presentará una propuesta sobre la aceleración de la concesión de permisos medioambientales, que incluirá disposiciones para acelerar la concesión de permisos para proyectos de materias primas fundamentales.

Un aspecto muy importante es que la UE debe garantizar que la inversión extranjera aporte un valor añadido real al mercado único y se ajuste a los objetivos de seguridad económica. Teniendo en cuenta el carácter estratégico de la cadena de valor de las materias primas fundamentales, la Comisión integrará los proyectos estratégicos como «proyectos o programas de interés para la Unión» en el marco del reglamento sobre inversión extranjera directa, lo que proporcionará un mayor control sobre la inversión extranjera en la cadena de valor de las materias primas fundamentales de la UE por motivos de seguridad. Para salvaguardar aún más los proyectos estratégicos, la Comisión también restringirá la participación de entidades extranjeras no recíprocas, incluidas las entidades controladas por China, en la investigación financiada por la UE.

7 Minería en España y minerales críticos

A medida que la demanda de energías renovables sigue aumentando, el sector minero se enfrenta a importantes desafíos y oportunidades para satisfacer la demanda de minerales críticos necesarios, abordando al tiempo las preocupaciones medioambientales y adoptando los avances tecnológicos.

España es un país con tradición minera y puede jugar un papel destacado por su geodiversidad y por existencia de minerales considerados críticos. En este contexto, España puede aportar capacidad extractiva y de procesamiento de minerales al mercado nacional y a la UE. De hecho, 7 de los 45 proyectos prioritarios de la UE han sido asignados a España, con minas ubicadas en Extremadura, Galicia, Andalucía y Castilla-La Mancha. En Extremadura, las minas de Aguablanca (Badajoz) y Las Navas (Cáceres) estarán destinadas a la extracción de minerales para baterías, mientras que en La Parrilla (Cáceres) se extraerá wolframio, mineral clave para la industria aeroespacial y de defensa, actividad que también se desarrollará en Abenójar (Ciudad Real). En Doade (Ourense) se extraerá litio y en Andalucía se desarro-

lizarán proyectos de obtención de minerales mediante economía circular.

Los proyectos seleccionados podrán beneficiarse del respaldo financiero de la Comisión Europea, los Estados miembros y diversas instituciones, además de un proceso de tramitación de permisos más ágil. En este sentido, el plazo máximo para la concesión de permisos de explotación minera se reducirá a 27 meses, mientras que el de transformación y reciclaje será de 15 meses, frente a los cinco o diez años que solía durar el proceso.

Mina de Doade

Ubicada en Galicia, la mina de Doade es la única explotación minera de litio aprobada en la región. Gestionada por Recursos Minerales de Galicia, S. A., el proyecto contempla la construcción de una mina subterránea y una planta de tratamiento de los minerales extraídos en la zona de Doade-Beariz (Ourense).

Mina de Las Navas

Lithium Iberia, S. L. lidera este proyecto, que se centra en la extracción de litio a cielo abierto en la zona de Dehesa Boyal de las Navas, en Cáceres. Este yacimiento se encuentra en una ubicación sensible desde el punto de vista ecológico, al estar situado entre las ZEPA (zonas de especial protección para las aves) de Monfragüe y Canchos de Ramiro - Ladronera, dentro de la Red Natura 2000.

Mina de La Parrilla

Situada entre los municipios extremeños de Almoharín y Miajadas, la mina de La Parrilla ha recibido el respaldo de la Comisión Europea para su reapertura. Iberian Resources Spain busca extraer tungsteno, un metal crítico con aplicaciones en la industria tecnológica y de defensa, ya que se emplea en la fabricación de componentes para electrodomésticos, automóviles e incluso equipamiento militar.

El modelo de explotación aprobado es un proyecto integrado que combinará la extracción con el procesado del mineral, lo que supone una ventaja estratégica al reducir la dependencia de terceros países en la cadena de suministro de tungsteno.

Mina de Aguablanca

Ubicada en Monesterio (Badajoz), la mina de Aguablanca se centra en la extracción de una variedad de minerales estratégicos como níquel, cobre, cobalto, platino, paladio y oro. Esta explotación, gestionada por Rio Narcea Recursos S. A., ya había operado en el pasado a cielo abierto, pero el nuevo proyecto plantea una explotación subterránea, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental.

Mina de El Moto

Este yacimiento situado en Ciudad Real, gestionado por Abenójar Tungsten S. L., se centra en la extracción de wolframio y oro. Tras 14 años de investigación y la obtención de los permisos ambientales y mineros, el proyecto ha sido aprobado con una concesión de explotación por 90 años.

Proyecto CirCular

A diferencia de los demás proyectos, el proyecto CirCular, promovido por Atlantic Copper SLU, no consiste en una explotación minera, sino en una innovadora planta de reciclaje de metales. Esta instalación, ubicada en Huelva, tendrá la capacidad de procesar hasta 60 000 toneladas anuales de residuos electrónicos y eléctricos, permitiendo la recuperación de materiales valiosos como cobre, oro, plata, platino y paladio.

Proyecto PMR Las Cruces

Cobre Las Cruces S. A. U. lidera este ambicioso proyecto en la Faja Pirítica Ibérica, que abarca zonas de Badajoz, Huelva y Sevilla. Se trata de una mina subterránea que explotará un nuevo yacimiento polimetálico situado bajo el que fue explotado entre 2009 y 2020.

Además de la extracción, el proyecto incluye la construcción de la primera refinería polimetálica del mundo, que producirá cobre, zinc, plomo y plata mediante una tecnología patentada por la empresa.

Figura 5. Proyectos de interés estratégico de la UE en España.

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/del-litio-al-cobre-los-siete-proyectos-mineros-que-transformaran-espana/>

España se enfrenta a una profunda paradoja: posee un notable potencial geológico, reconocido por la Unión Europea con la designación de estos siete proyectos estratégicos para la autonomía del continente, pero carece de una visión de Estado unificada para sus recursos minerales (Van den Hurk, 2025).

En cumplimiento de la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales, España ha presentado el Programa Nacional de Exploración Minera 2025-2029. El problema es que ni cuenta con un presupuesto claro ni depende enteramente del Gobierno, pues las competencias en materia minera están transferidas a las autonomías. Quizá la novedad más relevante que introduce el nuevo plan de acción es la aprobación de una nueva ley de minas.

La ley de minas vigente es de 1973 y supuso un impulso para la minería abordando la necesidad de que esta actividad se desarrollase buscando un equilibrio con cierta protección de valores ambientales. Una posible reforma ofrecería la oportunidad para

que la actividad minera fuese más sostenible, integrada en la economía circular y comprometida en la lucha contra el cambio climático (Ramírez, 2023).

La minería actual y futura se enfrenta a desafíos sociales y medioambientales en términos generales y en concreto en España. La sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental son identificados como los principales retos de la minería en España en un estudio de opinión llevado a cabo por Knauf⁵⁷, en el que se concluye que existe una brecha significativa entre la realidad de la minería moderna y la percepción que tiene la sociedad. En el estudio, el 63 % de los encuestados considera que la minería es una industria que debería impulsarse en España, pero 8 de cada 10 encuestados cree que no tiene suficiente apoyo gubernamental.

Casi la mitad de los españoles (49 %) no tiene una opinión clara sobre cómo reaccionaría si un proyecto minero se desarrollara cerca de su localidad, lo que demuestra que la percepción de la minería en España es aún compleja y, en muchos casos, existe un gran desconocimiento. El 57 % de los españoles cree que genera empleo y desarrollo en estas áreas, mientras que un 22 % considera que tiene un impacto económico general. Esta visión positiva sobre su contribución económica, sin embargo, coexiste con un importante desconocimiento sobre el alcance real de su impacto laboral, 8 de cada 10 españoles no sabe que la minería genera más de 320 000 empleos de calidad en las regiones mineras españolas.

Respecto al impacto medioambiental, cabe mencionar que se están ofreciendo soluciones para compatibilizar la producción minera con una gestión sostenible del medioambiente. En este sentido, conviene mencionar las técnicas que permiten desarrollar explotaciones con un impacto mínimo, incluso integrándolas totalmente en el paisaje, generando nuevos ecosistemas. Ejemplo de ello lo constituye el Grupo de Restauración Geomorfológica de la UCM, liderado por José Francisco Martín Duque.

Con respecto al impacto social, es necesario contar con la participación de las comunidades locales y grupos de interés para que la actividad minera suponga un beneficio para la población local. Es importante también que el proyecto minero vaya acompañado de otros proyectos de la cadena de valor, desde la investigación en

⁵⁷ Ver: <https://knauf.com/es-ES/knauf/sobre-knauf/noticias/estudio-mineria>

las universidades hasta la implantación de sistemas productivos. De esta forma la generación de *clusters* contribuye a mejorar el desarrollo de las poblaciones y generar riqueza a largo plazo, aun cuando la actividad minera ha cesado.

La estrategia sobre minerales críticos de Reino Unido ofrece una visión muy interesante, ya que afronta el reto del aumento de la capacidad minera propia asociándola a su propia industria, e incluso se propone un renacimiento industrial mediante la minería, el procesamiento y el reciclaje de minerales⁵⁸.

8 Conclusiones

El futuro de la tecnología verde depende de suministros sostenibles de minerales críticos. Por este motivo, la transición energética global no puede entenderse únicamente como un cambio tecnológico o ambiental, sino como una profunda transformación geoeconómica y geopolítica marcada por una creciente dependencia de estos minerales.

El paso de un sistema energético intensivo en combustibles fósiles a otro intensivo en minerales introduce nuevas vulnerabilidades estructurales, derivadas no tanto de su escasez geológica, sino de la concentración extrema de la producción, el procesamiento y la fabricación en un número reducido de países. En este contexto, la seguridad energética deja de estar asociada exclusivamente al acceso a fuentes de energía y pasa a depender de cadenas de suministro minerales complejas, largas y altamente expuestas a riesgos políticos y estratégicos.

Este capítulo pone de manifiesto que, aunque el suministro global de minerales críticos podría ser suficiente para sostener la transición energética, el verdadero desafío reside en el acceso estable a estos recursos. La elevada concentración de la producción y, sobre todo, del refinado —con China como actor claramente dominante— convierte los minerales críticos en instrumentos de poder geopolítico. Si bien la interrupción del suministro de minerales críticos en el sector energético no tendría unas consecuencias a corto plazo, sus efectos a largo plazo implicarían la ralentización de la transición energética, impidiendo el cumplimiento de los objetivos climáticos.

⁵⁸ Ver: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-critical-minerals-strategy/vision-2035-critical-minerals-strategy>

Los controles de exportación, las restricciones comerciales y las políticas industriales dirigidas por los Estados están transformando mercados que tradicionalmente respondían a lógicas económicas en cuestiones de seguridad nacional, debilitando el multilateralismo y aumentando la fragmentación geoeconómica.

La rivalidad estratégica entre Estados Unidos y China actúa como eje vertebrador de esta nueva geopolítica mineral. Mientras China consolida su liderazgo mediante una integración vertical de las cadenas de valor y una estrategia de inversión global a largo plazo, Estados Unidos y sus aliados optan por políticas de reindustrialización, proteccionismo selectivo y *friendshoring* para reducir dependencias críticas. Estas dinámicas, aunque orientadas a reforzar la resiliencia nacional, corren el riesgo de ralentizar el despliegue de tecnologías limpias, encarecer los costes de la transición energética y generar nuevas tensiones entre los objetivos climáticos y los imperativos de seguridad y defensa. La ausencia de una gobernanza global efectiva de los minerales críticos sigue siendo una de las principales debilidades del sistema internacional actual.

Frente a estas limitaciones, el documento evidencia que ninguna estrategia basada exclusivamente en la apertura de nuevas explotaciones mineras puede resolver los cuellos de botella a corto plazo debido a los largos plazos de desarrollo, la volatilidad de los precios y la incertidumbre regulatoria y social. En este sentido, el reciclaje, la economía circular, la innovación tecnológica y la sustitución de materiales emergen como pilares indispensables para reducir la presión sobre el suministro primario, aunque su contribución seguirá siendo limitada en el corto plazo. La transición energética exige, por tanto, una planificación industrial de largo alcance, acompañada de mecanismos públicos de financiación, apoyo a la inversión y gestión del riesgo que permitan estabilizar los mercados minerales estratégicos.

La transición energética solo será viable si se acompaña de una gestión estratégica, responsable y cooperativa de los minerales críticos que la hacen posible. En este sentido, la respuesta de la Unión Europea refleja un intento de equilibrio entre autonomía estratégica y apertura económica, apostando por la diversificación, el *de-risking* y el fortalecimiento de capacidades internas sin recurrir a una desvinculación completa del comercio global. Iniciativas como la Ley Europea de Materias Primas Fundamentales y el plan ResourceEU representan avances relevantes.

Finalmente, el caso de España ilustra tanto las oportunidades como los retos de este nuevo escenario. La existencia de recursos minerales críticos y la inclusión de varios proyectos estratégicos en el marco europeo sitúan al país en una posición relevante dentro de la cadena de valor comunitaria. No obstante, el desarrollo de una minería sostenible, socialmente aceptada y alineada con los objetivos climáticos requiere una actualización profunda del marco normativo, una mayor coordinación entre administraciones y una integración real de la minería en una visión de economía circular.

Bibliografía

- AIE. (2022), *Solar PV Global Supply Chains* [en línea]. París, IEA. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- . (2025). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. IEA.
- Escobar, B. et al. (2025). *Power Playbook: Beijing's Bid to Secure Overseas Transition Minerals*. Williamsburg (VA), AidData at William & Mary
- Kang Y., Lee, Y. y Oh, H. (2025). Navigating geopolitical risks: The impact of the Senkaku/Diaoyu Islands dispute on global rare earth markets and diversification strategies. *Resources Policy*. 106.
- Qiu, Y. et al. (2024). The impacts of material supply availability on a transitioning electric power sector. *Cell Reports Sustainability*. 1(10). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100221>
- Ramírez Sánchez-Maroto, C. (2023). Apuntes ambientales de la ley de minas de 21 de julio de 1973, en su cincuentenario, y la necesidad de actualizaciones. *Actualidad Jurídica Ambiental*. 139.
- Ries, L. y Wartzack, S. y Zipse, O. (2023). Creating Sustainable Products: The Road to Circularity. En: Zipse, O. et al. (eds.). *Road to Net Zero*. Doi: 10.1007/978-3-031-42224-9_5
- Schulze, K. et al. (2024). From fossil fuels to metals and minerals: Navigating global resource challenges in the energy transition. *Cell Reports Sustainability*. 1(10).
- Van den Hurk, Arnoldus M. (2025). *La Nueva Geopolítica del Siglo XXI: La Doctrina TESIS como Pilar de la Soberanía Mineral y la Seguridad Nacional de España*. Documento de Opinión IEEE.

Capítulo tercero

Energía de fusión

Sehila M. González de Vicente

Resumen

La energía de fusión, proceso natural que alimenta al Sol y sostiene los sistemas climáticos y biológicos del planeta, se ha convertido en un reto científico de primer orden y en un activo estratégico clave en la competencia geoeconómica global. Replicar este mecanismo en la Tierra requiere unas condiciones muy exigentes desde el punto de vista de la ciencia y la tecnología. Esto se logró por primera vez en 2022 en la National Ignition Facility de Estados Unidos.

El interés renovado por la fusión responde a dos dinámicas estructurales: el progreso de tecnologías habilitadoras críticas — materiales avanzados, superconductividad, inteligencia artificial y computación de alto rendimiento— y la creciente demanda de energía firme, descarbonizada y escalable para sostener economías altamente electrificadas y digitalizadas.

En 2025, más de cincuenta empresas privadas se dedicaban al desarrollo de tecnologías de fusión, con una inversión acumulada cercana a los 10 000 millones de dólares desde 2021. La ventaja estratégica vendrá dada por el liderazgo industrial, la capacidad de fabricación avanzada y la integración coherente de políticas

públicas, regulación, financiación y capital humano. Los países que logren traducir el liderazgo científico en capacidad productiva consolidarán su posición en el nuevo orden energético global.

Palabras claves

Energía de fusión, Transición energética, Soberanía energética, Geopolítica de la energía, Competencia tecnológica.

Fusion power

Abstract

Fusion energy, the natural process that feeds the Sun and sustains the planet's climate and biological systems, has become a major scientific challenge and a key strategic asset in global geoeconomic competition. Replicating this mechanism on Earth requires very demanding science and technology conditions. This was first achieved in 2022 at the US National Ignition Facility.

Renewed interest in fusion responds to two structural dynamics: the progress of critical enabling technologies—advanced materials, superconductivity, artificial intelligence and high-performance computing—and the growing demand for firm and decarbonized energy, scalable to support highly electrified and digitized economies.

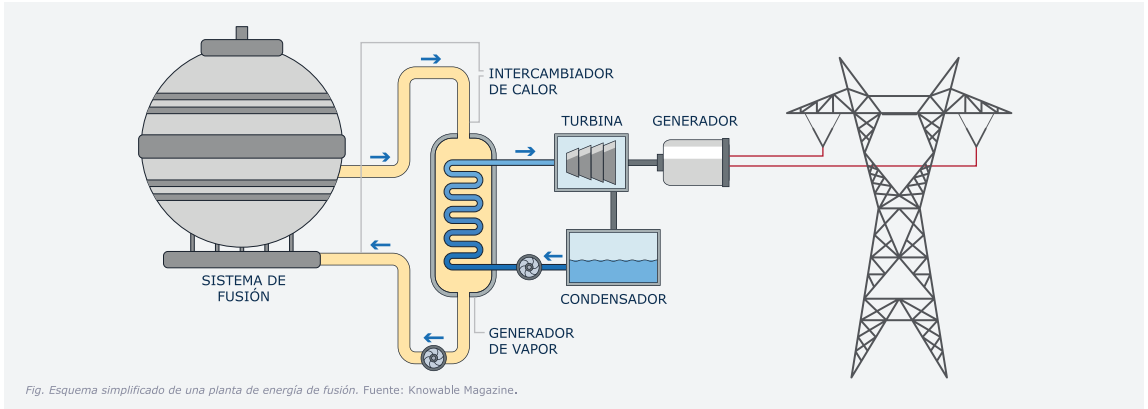
In 2025, more than 50 private companies were engaged in the development of fusion technologies, with a cumulative investment close to \$10 billion since 2021. The strategic advantage will be given by industrial leadership, advanced manufacturing capacity and coherent integration of public policy, regulation, financing and human capital. Countries that succeed in translating scientific leadership into productive capacity will consolidate their position in the new global energy order.

Keywords

Fusion energy, Energy transition, Energy sovereignty, Energy geopolitics, Technology competition.

ENERGÍA DE FUSIÓN

LA ENERGÍA DE FUSIÓN YA NO ES ÚNICAMENTE UNA CUESTIÓN DE FÍSICA AVANZADA SI NO UN VECTOR ESTRATÉGICO DE PODER ECONÓMICO, INDUSTRIAL Y TECNOLÓGICO, CUYA EVOLUCIÓN TENDRÁ IMPLICACIONES PROFUNDAS PARA LA GEOPOLÍTICA DE LA ENERGÍA EN LAS PRÓXIMAS DÉCADAS.



VENTAJAS DE LA ENERGÍA DE FUSIÓN



LIMPIA Y LIBRE DE EMISIONES: LAS REACCIONES DE FUSIÓN NO PRODUCEN CO₂ NI OTROS CONTAMINANTES ASOCIADOS A LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES.



ENERGÍA FIRME Y FIABLE: PROPORCIONA SUMINISTRO ENERGÉTICO CONTINUO Y ESTABLE, LAS 24 HORAS DEL DÍA, COMPLEMENTANDO A LAS ENERGÍAS RENOVABLES INTERMITENTES COMO LA SOLAR Y LA EÓLICA.



SEGURIDAD INTRÍNSECA: NO EXISTE RIESGO DE FUSIÓN DEL NÚCLEO, LO QUE GARANTIZA UN ALTO NIVEL DE SEGURIDAD OPERATIVA.



RESIDUOS DE BAJA ACTIVIDAD: GENERA RESIDUOS RADIATIVOS DE BAJA ACTIVIDAD Y VIDA CORTA, LO QUE SIMPLIFICA SU GESTIÓN.



ABUNDANCIA DE COMBUSTIBLE: EL DEUTERIO, EXTRAÍDO DEL AGUA, Y EL TRITIO OFRECEN EL POTENCIAL DE DISPONER DE RECURSOS PRÁCTICAMENTE ILIMITADOS.

DOS FACTORES ESTRUCTURALES CONVERGEN PARA SITUAR A LA FUSIÓN EN EL CENTRO DEL DEBATE ENERGÉTICO CONTEMPORÁNEO:

1



AVANCE DE TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

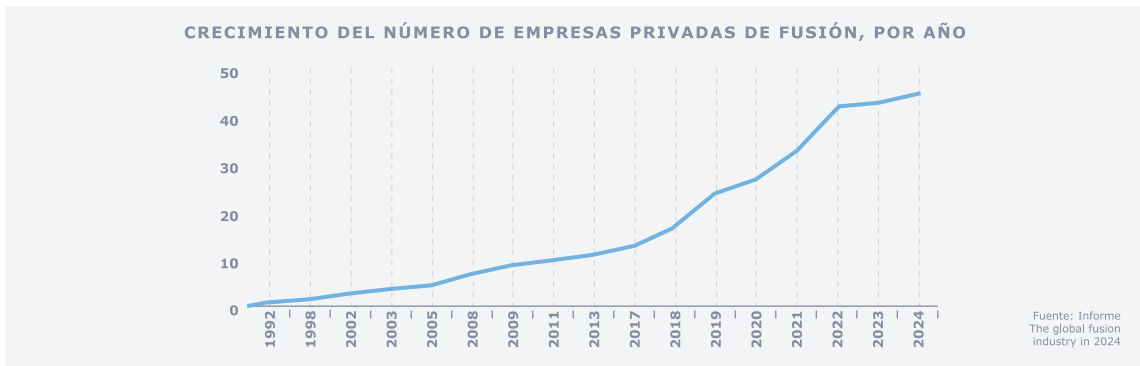
-DESDE NUEVOS MATERIALES HASTA CAPACIDADES COMPUTACIONALES AVANZADAS-

2

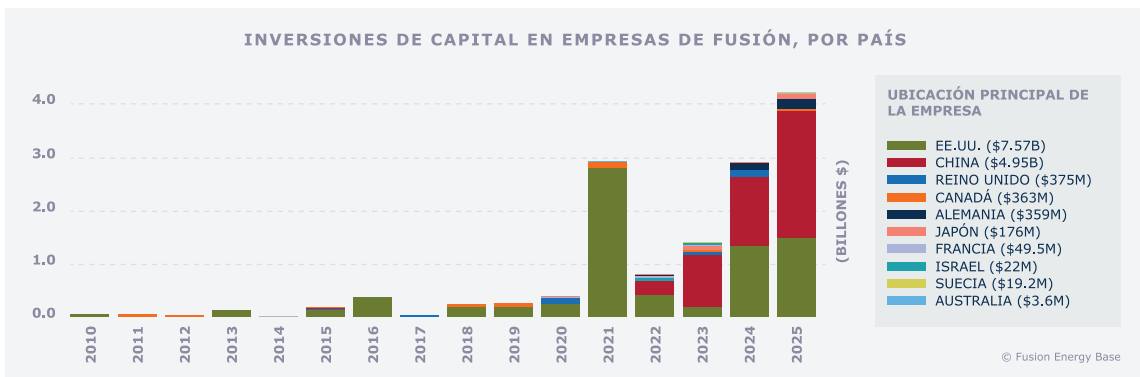


LA NECESIDAD CRECIENTE DE FUENTES DE ENERGÍA FIRMES, DESCARBONIZADAS Y ESCALABLES

EXISTEN MÁS DE 50 COMPAÑÍAS PRIVADAS EN TODO EL MUNDO QUE DESARROLLAN DIVERSOS CONCEPTOS DE FUSIÓN.



FINANCIACIÓN DE INICIATIVAS PRIVADAS: CON UN CRECIMIENTO ANUAL DEL 178% RESPECTO AL AÑO ANTERIOR Y UNA INVERSIÓN TOTAL CERCANA A LOS 10.000 MILLONES DE DÓLARES AMERICANOS DESDE 2021.



PLAZOS PARA LA CONEXIÓN A RED

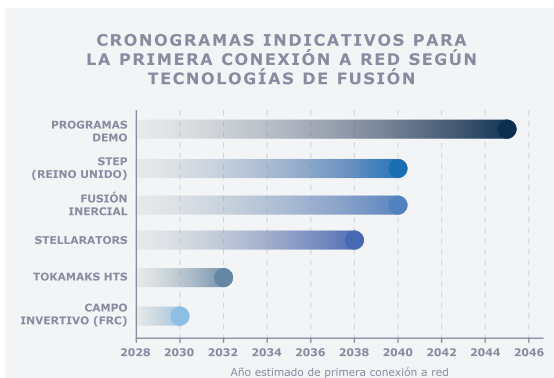
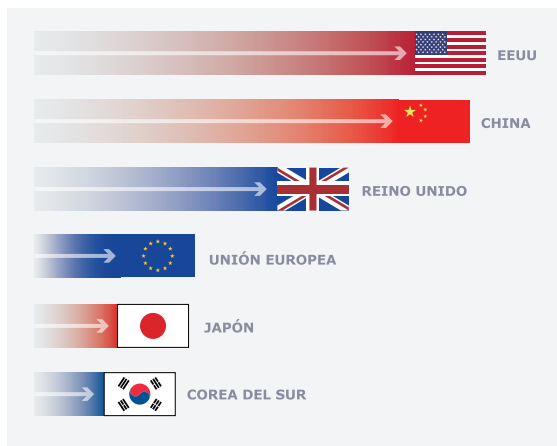


Fig. Plazos indicativos para la primera conexión a red de las principales líneas de desarrollo de energía de fusión.

LA CARRERA GLOBAL HACIA EL LIDERAZGO EN ENERGÍA DE FUSIÓN



1 Introducción

La energía de fusión no es una promesa abstracta ni una construcción teórica: es un fenómeno físico que ocurre de manera constante en la naturaleza y que constituye la base misma de la vida en la Tierra. La radiación solar que sostiene los sistemas climáticos, biológicos y económicos del planeta es el resultado directo de reacciones de fusión en el núcleo del Sol. Reproducir ese proceso de forma controlada en la Tierra representa, por tanto, uno de los mayores desafíos tecnológicos de la historia moderna, pero también una de las mayores oportunidades estratégicas para los sistemas energéticos del futuro.

El desarrollo de la energía de fusión exige un nivel de sofisticación tecnológica excepcional. Para que una reacción de fusión produzca energía neta es necesario alcanzar la denominada *ignición del plasma*: un estado en el que el propio proceso de fusión se autosostiene. Lograrlo implica calentar un plasma hasta temperaturas de cientos de millones de grados centígrados, confinarlo mediante campos magnéticos extremadamente intensos y mantener estas condiciones durante el tiempo suficiente para que la energía producida supere a la energía invertida. Este hito se alcanzó por primera vez en diciembre de 2022 en un experimento del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en Estados Unidos, marcando un punto de inflexión histórico en la credibilidad científica de la fusión como fuente energética.

Sin embargo, el renovado interés global por la fusión no se explica únicamente por este logro experimental. Dos factores estructurales convergen para situar la fusión en el centro del debate energético contemporáneo. El primero es el avance de tecnologías habilitadoras —desde nuevos materiales hasta capacidades computacionales avanzadas— que reducen de forma significativa las barreras técnicas y económicas que han existido históricamente. El segundo es la necesidad creciente de fuentes de energía firmes, descarbonizadas y escalables, capaces de complementar a las energías renovables intermitentes y de sostener economías altamente electrificadas sin dependencia de combustibles fósiles.

Un ejemplo paradigmático de esta transformación tecnológica es el desarrollo de imanes superconductores de alta temperatura y alto campo magnético. Estos imanes permiten aumentar de forma sustancial la intensidad del campo magnético, lo que a su vez reduce drásticamente el tamaño de los dispositivos de fusión necesarios para confinar el plasma. Esta reducción de escala

tiene implicaciones directas en costes, tiempos de construcción y viabilidad industrial. Mientras que ITER —el mayor experimento de fusión del mundo— emplea bobinas superconductoras «tradicionales» que generan campos de alrededor de 5 teslas en una máquina con un radio mayor a 6,2 metros, nuevos dispositivos como SPARC, desarrollado por Commonwealth Fusion Systems, utilizan superconductores de alta temperatura y alto campo capaces de alcanzar 12 teslas (y probados hasta 20 teslas) en una máquina con un radio aproximado de 1,85 metros. Esta diferencia no es meramente técnica: refleja un cambio de paradigma que acerca la fusión del ámbito de la gran ciencia internacional al de la ingeniería industrial y la competencia geoeconómica.

En este contexto, la energía de fusión deja de ser únicamente una cuestión de física avanzada para convertirse en un vector estratégico de poder económico, industrial y tecnológico, cuya evolución tendrá implicaciones profundas para la geopolítica de la energía en las próximas décadas.

Este capítulo analiza la energía de fusión no solo como una promesa tecnológica, sino como un factor emergente de transformación del sistema energético global y de las relaciones de poder económico entre Estados. A diferencia de otros capítulos centrados en tecnologías maduras, este aborda una tecnología aún en fase preindustrial, pero cuya trayectoria de desarrollo ya está influyendo en decisiones regulatorias, industriales y estratégicas a escala global.

El capítulo se estructura en cinco grandes bloques que conectan tecnología, regulación, capacidades computacionales avanzadas y competencia geopolítica, con el objetivo de mostrar cómo la fusión puede convertirse en un elemento central de la geoeconomía de la energía en las próximas décadas y cómo la carrera por el control de esta tecnología ha comenzado ya.

2 Energía de fusión: innovación, soberanía energética y competitividad global

La energía siempre ha sido un pilar central de la geopolítica. El control sobre los recursos energéticos, las tecnologías y las cadenas de suministro ha configurado las relaciones internacionales, el desarrollo económico y la seguridad nacional durante más de un siglo. Desde el carbón y el petróleo hasta el gas natural y la fisión nuclear, cada gran transición energética ha reconfigurado los equilibrios de poder globales, generando nuevas dependencias

y redefinido la influencia estratégica. En el contexto del siglo XXI —marcado por el cambio climático, la fragmentación geopolítica y la aceleración tecnológica—, la fusión se percibe cada vez más no solo como una ambición científica, sino como un activo estratégico potencial con profundas implicaciones geopolíticas.

La energía de fusión ocupa una posición única en el panorama energético mundial. A diferencia de los combustibles fósiles, promete emisiones operativas de carbono prácticamente nulas; a diferencia de las fuentes renovables, ofrece la perspectiva de una generación continua y gestionable, independiente del clima o la geografía, y, a diferencia de la fisión nuclear, presenta características de seguridad intrínsecamente distintas y perfiles de residuos a largo plazo muy diferentes. Estas particularidades sitúan la fusión en la intersección de la política climática, la seguridad energética, la estrategia industrial y la soberanía tecnológica. Como resultado, la fusión está emergiendo como un tema de interés estratégico para los Gobiernos incluso antes de su despliegue comercial.

En 2025, la fusión ha alcanzado un punto de inflexión crítico. Décadas de investigación financiada con fondos públicos —en grandes programas internacionales como ITER— han sido complementadas por un sector privado en rápida expansión. Logros científicos, como la operación sostenida de plasmas de alto rendimiento; resultados relevantes para la ignición del plasma en fusión inercial, y avances en superconductores de alta temperatura han hecho que la energía de fusión pase de ser considerada una promesa lejana a una tecnología preindustrial con una consideración estratégica (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021). Esta transición altera fundamentalmente la forma en que debe entenderse la fusión en el contexto energético: ya no únicamente como un esfuerzo de investigación a largo plazo, sino como un componente emergente de los sistemas energéticos y de la competencia industrial.

Desde una perspectiva geoestratégica, el atributo más distintivo de la fusión es su potencial para desvincular la producción de energía de la geopolítica tradicional de los recursos. Los combustibles de fusión —principalmente isótopos de hidrógeno— están ampliamente disponibles: el deuterio es extraíble del agua de mar y el tritio se autogenerará dentro de los propios sistemas de fusión. Si bien la disponibilidad de tritio representa una limitación estratégica a corto y medio plazo, la visión a largo plazo de ciclos de combustible autosostenibles contrasta radicalmente con las reservas geográficamente concentradas de petróleo, gas

y minerales críticos que dominan la geopolítica energética actual. Cuando se materialice a gran escala, la fusión podría reducir significativamente la exposición a la volatilidad de los precios de los combustibles y las interrupciones del suministro (AIE, 2023).

Al mismo tiempo, la fusión introduce nuevas dependencias estratégicas distintas a las anteriores. Más que el acceso al combustible, la ventaja geopolítica vendrá determinada por el liderazgo en la fabricación avanzada, la ciencia de materiales, las tecnologías superconductoras, los sistemas de control digital y la computación de alto rendimiento. En este sentido, la fusión se alinea claramente con otros factores clave en la competencia estratégica en tecnología como son la energía, la digitalización, la inteligencia artificial y los materiales avanzados. Los países que logren dominar estas tecnologías habilitadoras —y traducir el liderazgo científico en capacidad industrial— obtendrán no solo seguridad energética, sino también influencia económica y tecnológica. El liderazgo en fusión dependerá no solo de avances técnicos, sino de la capacidad para integrar políticas, regulación, financiación, desarrollo de capital humano e industria en estrategias nacionales y regionales coherentes.

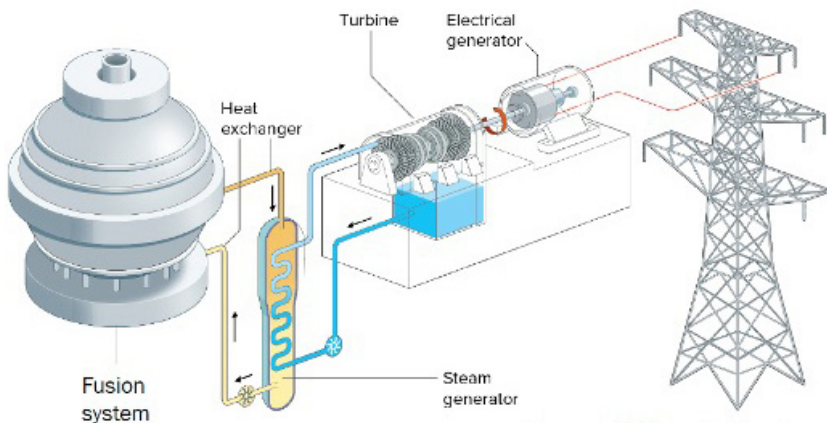


Figura 1: Esquema simplificado de una planta de *fusión*. Fuente: Knowable Magazine

La relevancia estratégica de la fusión también debe entenderse en el contexto de la descarbonización global. A medida que los países persiguen compromisos de cero emisiones netas, las limitaciones de las tecnologías energéticas existentes se hacen cada vez más evidentes. Las fuentes de energía renovable requieren almacenamiento a gran escala y refuerzo de redes; la fisión nuclear enfrenta desafíos

políticos, regulatorios y problemas relacionados con los residuos en muchas regiones. Por último, las tecnologías de captura de carbono siguen siendo inciertas a gran escala. Por ello, la fusión se perfila cada vez más como una opción de «energía firme y limpia» capaz de complementar las renovables en futuros sistemas bajos en carbono (Comisión Europea, 2023). Este enfoque posiciona la fusión no como una curiosidad científica, sino como un posible pilar de las estrategias climáticas y energéticas a largo plazo.

Asimismo, la energía de fusión tiene el potencial de desempeñar un papel transformador para satisfacer la demanda de electricidad en rápida expansión durante las próximas décadas. A medida que las sociedades electrifican el transporte, la industria y los edificios, y que las nuevas tecnologías digitales —especialmente la inteligencia artificial (IA) y los centros de datos— impulsan incrementos sin precedentes en el consumo eléctrico, los sistemas energéticos necesitarán una capacidad de base significativamente mayor, fiable y baja en carbono. Se prevé que la demanda global de electricidad continúe aumentando con fuerza hasta mediados de siglo, con escenarios que indican que el consumo total podría incrementarse en más de lo equivalente a añadir el consumo anual de Japón cada año hasta finales de la década de 2020, impulsado por la electrificación y el crecimiento digital (AIE, 2025). El crecimiento del consumo eléctrico podría más que duplicarse entre 2023 y 2050 a medida que la electrificación se expanda a nuevos sectores, la demanda asociada a la IA y la

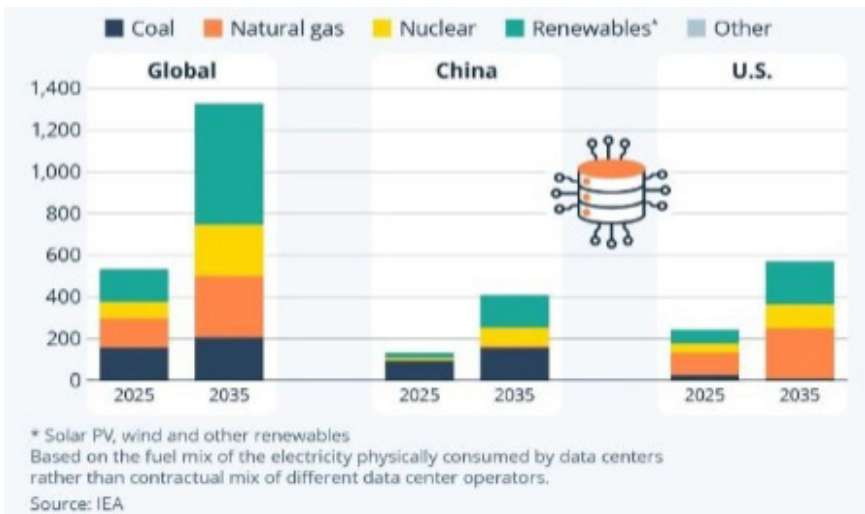


Figura 2: Generación de electricidad para proveer a los centros de datos (en TWh). Fuente: IEA

computación en la nube. Se prevé que la demanda de centros de datos se duplique para 2030 hasta casi 1000 TWh anuales debido a la IA y tecnologías relacionadas (McKinsey & Company, 2024). Al proporcionar energía firme que puede operar las 24 horas sin la variabilidad del viento o el sol, la fusión podría ayudar a garantizar la estabilidad de la red y respaldar la columna vertebral del sistema energético necesaria para satisfacer el creciente apetito global por fuentes de electricidad firmes.

El auge de las empresas privadas de fusión reconfigura aún más el panorama estratégico. A diferencia de generaciones anteriores de tecnología nuclear, la comercialización de la fusión se está impulsando mediante *start-ups* respaldadas por capital riesgo que operan en múltiples países. Esto introduce nuevas cuestiones sobre propiedad intelectual, controles de exportación, marco regulatorio y apoyo estatal. Los Gobiernos se enfrentan ahora a decisiones estratégicas: actuar principalmente como financiadores de investigación, como configuradores del mercado mediante regulación y contratación pública o como socios activos en la comercialización. Estas decisiones influirán no solo a nivel interno, sino también en la competitividad internacional y en las alianzas que se puedan llevar a cabo.

En este contexto, la energía de fusión es relevante desde el punto de vista geoestratégico no porque vaya a transformar inmediatamente la matriz energética global, sino porque las decisiones que se tomen en la década de 2020 determinarán quién controla el conocimiento, la infraestructura, los estándares y la capacidad industrial que sustentan la futura implantación de la fusión. Como en transiciones energéticas anteriores, el posicionamiento estratégico en las primeras fases probablemente generará ventajas a largo plazo. Comprender la fusión desde una perspectiva geoestratégica es, por tanto, esencial para navegar en un sistema energético global cada vez más complejo, competitivo y descarbonizado.

3 Estado de la fusión en 2025: de la investigación a la fase preindustrial

En 2025, la energía de fusión ha alcanzado una etapa en la que la investigación científica y el desarrollo de la ingeniería se superponen cada vez más con las primeras estrategias industriales y la planificación de la comercialización. Tras décadas de investigación básica en física de plasmas y de inversiones en grandes instalacio-

nes internacionales, la fusión ya no se percibe únicamente como un objetivo científico a largo plazo. En su lugar, se sitúa en una fase intermedia en la que se están validando tecnologías clave, múltiples prototipos se encuentran en construcción y un sector privado emergente se está posicionando de cara a una implantación futura.

3.1 ITER y los programas públicos de fusión

A la vanguardia del esfuerzo público se mantiene el *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*, la mayor infraestructura científica jamás construida para conseguir la fusión mediante confinamiento magnético. Ubicado en Cadarache, Francia, ITER está diseñado para demostrar la viabilidad física y tecnológica para producir energía neta a partir de reacciones de fusión usando como combustible deuterio-tritio, con el objetivo de alcanzar una ganancia energética diez veces superior ($Q \approx 10$), pero sin conectar esa energía a la red, previsto para 2039¹.

El objetivo de ITER es operar a 500 MW (durante al menos 400 segundos de forma continua) con una potencia de calentamiento del plasma de 50 MW. ITER no generará electricidad y será



Figura 3: Vista aérea con dron del tokamak de ITER y del emplazamiento en construcción. 14-05-2025 - Foto: ITER Organization/EJF Riche.

¹ Ver: <https://www.iter.org/sites/default/files/media/2025-11/exe-ra-2024-ok-web.pdf>

una máquina experimental. El Tokamak de ITER será el mayor jamás construido, con un volumen para el plasma de 830 m³ y un radio mayor de 6,2 metros.

ITER está financiado y será operado por siete miembros: China, la Unión Europea (UE), India, Japón, Rusia, Corea del Sur y Estados Unidos. Suiza participó a través de Euratom y F4E hasta 2021, aunque se espera que se reincorpore en 2026, tras negociaciones posteriores con la UE. ITER también mantiene acuerdos de cooperación técnica con Australia, Canadá, Kazajistán y Tailandia².

El proceso de diseño del proyecto ITER comenzó tras el lanzamiento de la idea en 1985, con una fase conceptual en 1988 y con la aprobación del diseño final en 2001, aunque la ingeniería detallada continuó, dando lugar al acuerdo formal para su construcción en 2007 y al inicio de las obras en 2013.

ITER ha experimentado múltiples retrasos en el calendario y aumentos de costes. Las proyecciones iniciales sugerían que la construcción se completaría en 2016, con los primeros experimentos en 2020, a un coste total de 10 000 millones de dólares americanos (ajustado por inflación).

En 2016, el calendario se amplió hasta 2025, con la entrada en funcionamiento completa prevista para 2035, añadiendo 5200 millones de dólares americanos adicionales (ajustados por inflación) al coste total. En julio de 2024, ITER anunció que la instalación no estaría operativa hasta 2039 y que supondrá un coste final de 22 000 millones de dólares americanos³.

La construcción de ITER y la entrega de componentes —como la instalación de los enormes imanes superconductores de niobio-estaño— subrayan tanto la magnitud tecnológica como los retos temporales del desarrollo de la fusión. A pesar de los reiterados ajustes en el calendario y los incrementos del presupuesto, el progreso de ITER genera información muy valiosa sobre la fabricación de componentes, el control de calidad, los problemas en la fase de ensamblaje, así como ha dado lugar a la formación de una incipiente cadena de suministro para la fusión.

En paralelo a ITER, programas regionales como EUROfusion en Europa⁴ coordinan la investigación y el diseño hacia un dispositivo posterior a ITER (a menudo denominado DEMO) que ejem-

² Ver: <https://www.iter.org/about/iter-members>

³ Ver: <https://www.congress.gov/crs-product/R48362>

⁴ Ver: <https://euro-fusion.org/>

plifique una planta de fusión capaz de producir electricidad. Estos programas van más allá de la ciencia pura del plasma e incluyen la ciencia de materiales, sistemas de mantos fértiles (*blankets*), ciclos de combustible de tritio y pruebas de componentes, todos ellos esenciales para reducir la distancia entre los dispositivos experimentales y las plantas industriales.

3.2 Validación de materiales y desarrollo de infraestructuras

Un obstáculo técnico fundamental sigue siendo el comportamiento de los materiales bajo intensa irradiación neutrónica y altos flujos térmicos. Los sistemas de energía de fusión producen espectros y flujos de neutrones no habituales en reactores de fisión ni en plantas convencionales, lo que convierte la cualificación de materiales en una prioridad internacional.

Una iniciativa estratégica en 2025 es el proyecto IFMIF-DONES en España⁵. Una fuente de neutrones de alto flujo basada en aceleradores, diseñada para ensayar materiales para plantas de fusión. España, la Comisión Europea y socios internacionales han comprometido cientos de millones de euros para su construcción y operación, reflejando el enfoque global en la preparación de materiales como requisito previo para disponer de una flota operativa de plantas de fusión.

3.3 Impulso y diversificación del sector privado

Históricamente, la investigación en fusión ha estado dominada por instituciones públicas y colaboraciones multilaterales como ITER. Sin embargo, en 2025, las empresas privadas de fusión han crecido en número, ambición y financiación. El informe de 2025 de la Fusion Industry Association⁶ indica que existen más de cincuenta compañías privadas en todo el mundo que desarrollan diversos conceptos de fusión, desde tokamaks compactos y configuraciones de campo invertido hasta sistemas de confinamiento alternativos y enfoques basados en láser.

Los datos de inversión muestran un aumento récord en la financiación de estas iniciativas privadas, con un crecimiento anual del 178 % respecto al año anterior y una inversión total cercana a los 10 000 millones de dólares americanos desde 2021.

⁵ Ver: <https://ifmif-dones.es/>

⁶ Ver: <https://www.fusionindustryassociation.org/fusion-industry-reports/>



Figura 4: Distribución de las start-ups de Fusión en 2025. Fuente: informe 2025 de la Fusión Industry Association[ASP1.1].12

Aunque los requisitos de capital siguen siendo elevados, esta afluencia de fondos privados demuestra tanto confianza en las perspectivas de la fusión como interés estratégico por parte de inversores comerciales e institucionales. Capital riesgo, inversores corporativos estratégicos y, cada vez más, fondos soberanos e institucionales están configurando el sector. Se observa un cambio de tendencia de la financiación especulativa inicial hacia rondas de inversión más grandes, fundamentadas en la evidencia de consecución de logros técnicos necesarios para el desarrollo de la fusión.

En la siguiente tabla se muestran las cinco *start-ups* de energía de fusión con mayor capitalización en 2025:

Empresa	Financiación total (aprox.)	Sede	Concepto / Tecnología	Prototipo / Proyecto principal	Principales inversores
Commonwealth Fusion Systems (CFS)	~3000 millones USD+	Devens, Massachusetts, EE. UU.	Tokamak de alto campo (imanes HTS)	SPARC y futura planta ARC	Breakthrough Energy Ventures; Eni; Google; Temasek
TAE Technologies	~1300 millones USD+	Foothill Ranch, California, EE. UU.	Configuración de campo invertido (FRC)	Copernicus / Da Vinci (planificado)	Google; Chevron; (Prefusión) Rusnano
Helion Energy	~1030 millones USD	Everett, Washington, EE. UU.	Fusión magneto-inercial / FRC	Prototipo Polaris	Sam Altman; Reid Hoffman; Peter Thiel's Mithril Capital Management
Pacific Fusion	~900 millones USD	Fremont, California, EE. UU.	Fusión inercial / pulsos electromagnéticos	Prototipo basado en pulsos electromagnéticos (impulso por hitos)	No divulgados en su totalidad/ basado en hitos (los principales inversores aún no se han publicado ampliamente)
SHINE Technologies	~778 millones USD	Janesville, Wisconsin, EE. UU.	Ensayos de neutrones y soporte isotópico	Instalaciones de prueba y producción de isótopos	Energy Ventures Group; Koch Disruptive Technologies; Nucleation Capital

Tabla 1. Resumen de las cinco start-ups de energía de fusión con mayor capitalización en 2025

Un ejemplo reciente es TAE Technologies, una compañía americana que desarrolla conceptos alternativos de fusión y que ha colaborado con la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido para comercializar tecnologías auxiliares como sistemas de haces neutros, con aplicaciones a más corto plazo en medicina e industria. En diciembre de 2025, TAE se fusionó con Trump Media & Technology Group en una transacción valorada en más de 6000 millones de dólares americanos⁷.

⁷ Ver: <https://tae.com/trump-media-and-technology-group-to-merge-with-tae-technologies/>

Total funding

(annual increase in brackets)

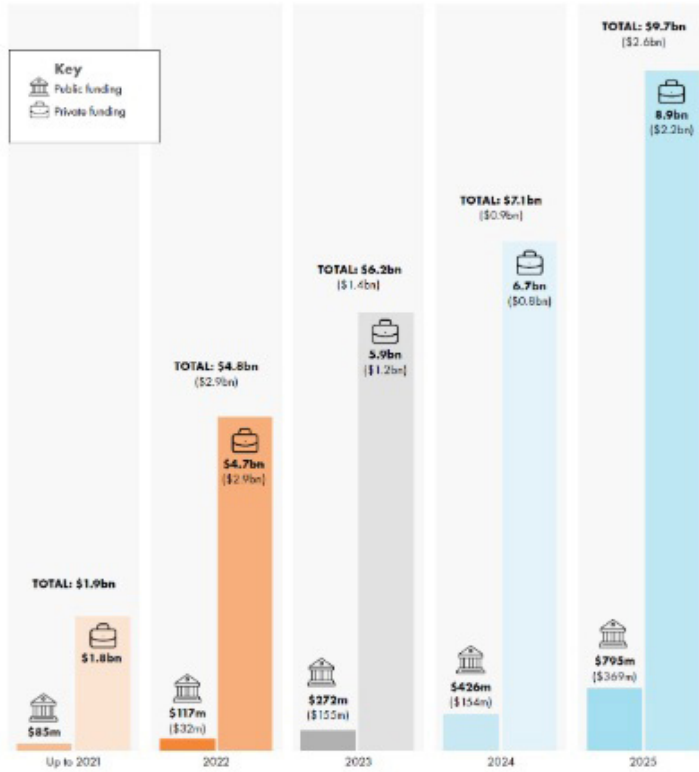


Figura 5: Fondos totales destinados al desarrollo de la fusión. Fuente: informe 2025 de la Fusion Industry Association[ASP2.1].12

3.4 Nivel de madurez tecnológica y retos pendientes

La fusión aún requiere desarrollos tecnológicos significativos. No se ha logrado la producción neta de electricidad ni la operación continua. Los ensayos de materiales, la integración del ciclo de combustible —en particular la producción y gestión del tritio— y la fabricación de componentes a un coste viable para la explotación comercial a gran escala siguen siendo desafíos clave.

La próxima década será decisiva para transformar la fusión en un sector industrial capaz de ofrecer soluciones energéticas reales.

La inteligencia artificial (IA) puede acelerar significativamente el desarrollo de la energía de fusión abordando algunos de los retos más complejos como son el manejo masivo de datos en múltiples aspectos del diseño y la operación de las plantas industriales.

Desde el control en tiempo real del plasma mediante aprendizaje por refuerzo y redes neuronales para gestionar activamente la forma, posición y estabilidad del mismo hasta alcanzar objetivos RAMI (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, inspeccionabilidad) en futuras plantas mediante la optimización del ciclo de combustible, la gestión del tritio y todas las operaciones asociadas al funcionamiento de estas instalaciones.

3.5 Plazos para la conexión a red

El desarrollo de la energía de fusión sigue múltiples líneas temporales en paralelo, determinadas en gran medida por el concepto de confinamiento elegido, el enfoque de desarrollo adoptado y el equilibrio entre el riesgo asociado a los límites de la física de plasmas y la complejidad de la ingeniería. Más que una única «fecha de la fusión», el sector se caracteriza por un conjunto de trayectorias con distintos perfiles de riesgo y retorno.

3.5.1 Programas públicos tipo DEMO (tokamaks basados en ITER)

Los programas públicos centrados en ITER y seguidos por máquinas DEMO representan la vía más conservadora y validada desde el punto de vista de la física. Estas iniciativas priorizan la demostración completa del comportamiento del plasma, la producción de tritio, la cualificación de materiales y la aceptación regulatoria antes de la conexión a la red.

- Fortalezas: alta confianza en la física, sólida gobernanza internacional, credibilidad regulatoria.
- Limitaciones: cronogramas largos, difícil integración de innovaciones, coordinación internacional compleja, máquinas de gran tamaño, altamente intensivos en capital.
- Conexión indicativa a red: ~2045-2050.

3.5.2 Start-ups basadas en tokamaks con imanes superconductores de alto campo y alta temperatura (p. ej., CFS, Tokamak Energy)

Las *start-ups* de tokamak con imanes superconductores de alto campo y alta temperatura aprovechan los avances en superconductores de alta temperatura (HTS) para reducir significativamente el tamaño de las máquinas y acelerar los ciclos de

iteración. Estas empresas buscan tender puentes entre el conocimiento científico presente en la esfera pública y el foco en el producto final propio del sector privado, mitigando riesgos clave en la física que rige el funcionamiento de los dispositivos mientras comprimen los plazos de ingeniería.

- Fortalezas: base física sólida, iteración más rápida que las máquinas del tamaño de ITER, máquinas más pequeñas, enfoque ágil.
- Limitaciones: vida útil de materiales, sistemas de tritio, integración.
- Conexión indicativa a red: ~2035.

3.5.3 Conceptos basados en configuración de campo invertido (Field-Reversed Configuration, FRC) (p. ej., Helion, TAE)

Los conceptos basados en FRC se basan en diseños compactos, pulsados y, a menudo, semineutrónicos, en ocasiones evitando los ciclos de vapor mediante conversión directa de energía. Estos enfoques priorizan la velocidad y la simplicidad, aceptando un mayor riesgo en la física que gobierna las distintas configuraciones del plasma.

- Fortalezas: potencialmente una vía más rápida, máquinas más pequeñas, menor coste de capital.
- Limitaciones: estabilidad del plasma, frecuencia de repetición y electricidad neta aún no demostradas.
- Conexión indicativa a red: ~2031-2033.

3.5.4 Start-ups basadas en stellarator (p. ej., Proxima Fusion)

Los conceptos avanzados de stellarator buscan explotar configuraciones de plasma intrínsecamente estables aplicando técnicas de diseño computacional moderno y fabricación avanzada. Aunque la física en estos conceptos está bien establecida, la complejidad en el ámbito de la ingeniería sigue siendo elevada.

- Fortalezas: estabilidad intrínseca del plasma, operación en régimen estacionario.
- Limitaciones: complejidad de fabricación, experiencia operativa limitada a gran escala, conceptos menos maduros que los tokamaks.
- Conexión indicativa a red: ~2037.

3.5.5 Energía de fusión inercial (IFE) (p. ej., Xcimer Energy)

La energía de fusión inercial se basa en los avances conseguidos en el Laboratorio Nacional de Fusión de Lawrence Livermore hasta la fecha. Sin embargo, este concepto aún enfrenta desafíos en la frecuencia de repetición de los pulsos, la fabricación de los «pellets de combustible» y la eficiencia energética. Aunque científicamente prometedora, en esta línea aún existen brechas en la ingeniería de los dispositivos que hay que construir para poder operar plantas de energía utilizando esta tecnología.

- Fortalezas: alta densidad de potencia, diseño muy modular.
- Limitaciones: escalabilidad industrial, coste e integración del sistema.
- Conexión indicativa a red: ~2040-

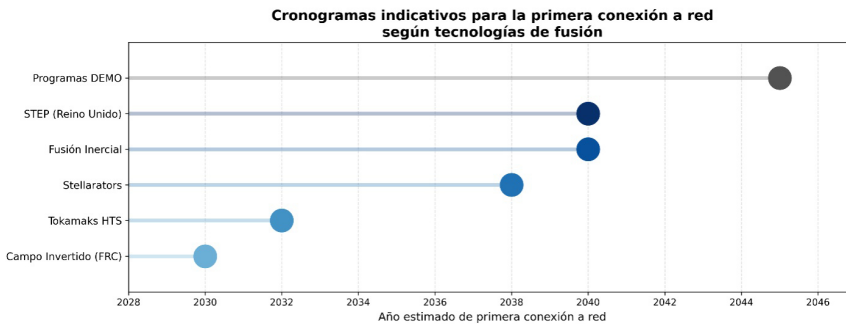


Figura 6: Plazos indicativos para la primera conexión a red de las principales líneas de desarrollo de energía de fusión

4 Un elemento clave para la implantación de la energía de fusión: la regulación

A medida que la energía de fusión progresa desde la fase de prototipos hacia las primeras plantas de carácter comercial, la regulación emerge como uno de los factores no técnicos más determinantes para su éxito. El marco regulatorio que gobierne la fusión moldeará no solo los resultados en materia de seguridad, sino también las decisiones de inversión, la ubicación de las instalaciones, el ritmo de implantación de esta tecnología y la competitividad industrial a largo plazo.

Se están diseñando instalaciones destinadas a conectarse a la red, abastecer mercados eléctricos y operar en condiciones

comerciales. Estos sistemas deben ser autorizados, asegurados, financiados y aceptados por la sociedad. En este contexto, la regulación debe lograr un equilibrio entre garantizar la protección de los trabajadores, del público y del medio ambiente, a la vez que mantiene una proporcionalidad con el perfil real de riesgo de las tecnologías de fusión.

La historia demuestra que la desalineación regulatoria puede retrasar significativamente las transiciones energéticas. Marcos excesivamente conservadores aumentan los costes, prolongan los plazos y desincentivan el capital privado. Por el contrario, una regulación clara, predecible y basada en un mayor conocimiento de los riesgos puede acelerar el aprendizaje fundamentado en la práctica, fomentar la innovación y consolidar nuevos ecosistemas industriales. Para la energía de fusión —donde múltiples líneas tecnológicas avanzan en paralelo—, la claridad regulatoria es ahora una necesidad estratégica, no una preocupación futura.

4.1 Diferencias fundamentales entre fusión y fisión

La necesidad de adoptar un enfoque regulatorio diferenciado para la fusión se sustenta en diferencias físicas y operativas fundamentales entre los sistemas de fusión y los de fisión nuclear.

En los reactores de fisión se producen reacciones en cadena controladas, que requieren sistemas de ingeniería complejos para gestionar la reactividad, el calor residual y los escenarios de accidente. Las reacciones de fusión, en cambio, son intrínsecamente autolimitadas. El proceso de fusión cesa inmediatamente si no se mantienen condiciones precisas de plasma, eliminando la posibilidad de reacciones descontroladas. No existe posibilidad de reacción en cadena.

Las plantas de fisión contienen grandes inventarios de material fisible que deben ser salvaguardados durante décadas. Los sistemas de fusión operan con cantidades muy pequeñas de combustible, principalmente deuterio y tritio. El tritio presenta riesgos radiológicos y ambientales, pero no implica los mismos riesgos de proliferación ni de seguridad a largo plazo que los materiales fisibles. Por ejemplo, la vida media del tritio es de 12,32 años.

La fisión produce residuos radiactivos de alta actividad que requieren aislamiento durante milenios. La fusión no genera productos de fisión; sus residuos consisten principalmente en materiales

activados por neutrones, muchos de los cuales decaen a residuos de baja actividad en cuestión de décadas. Esta diferencia tiene implicaciones importantes para la clasificación de residuos, las vías de eliminación y las responsabilidades a largo plazo.

Los escenarios de accidente creíbles en fusión se limitan a liberaciones localizadas de tritio o polvo activado en lugar de emisiones radiológicas masivas fuera del emplazamiento. Como resultado, los requisitos de planificación de emergencias para instalaciones de fusión son radicalmente distintos de los de los reactores de fisión.

4.2 Por qué la regulación de la fusión debe ser específica

Dado el perfil de riesgo distintivo de la fusión, la regulación debería centrarse en la supervisión basada en los peligros existentes, más que en licencias otorgadas basadas en las características del reactor. Los principales aspectos regulatorios que tener en cuenta son los siguientes:

- Gestión de materiales radiactivos (especialmente tritio)
- Protección radiológica ocupacional
- Emisiones ambientales
- Seguridad industrial convencional

Con este enfoque, la regulación de la fusión se asemeja más a la aplicada a aceleradores de partículas e instalaciones de investigación que a la propia de los reactores nucleares.

Las tecnologías de fusión madurarán conforme se construyen prototipos cada vez más integrados, por lo que la regulación debe ser adaptativa, permitiendo que las lecciones aprendidas en instalaciones iniciales sirvan como base para diseños más avanzados. Normativas excesivamente prescriptivas en las fases iniciales corren el riesgo de fijar prematuramente los diseños e incrementar los costes sin aportar beneficios reales en materia de seguridad.

La inversión privada desempeña ahora un papel central en el desarrollo de la fusión. La incertidumbre regulatoria se traduce directamente en mayores costes de financiación. Vías claras de autorización, plazos definidos y estabilidad regulatoria son esenciales para movilizar el capital necesario para la implantación de la energía fusión.

4.3 Impacto de los marcos regulatorios en la implantación de tecnologías de fusión

Los marcos regulatorios funcionan cada vez más como herramientas de política industrial. Una regulación proporcional permite licencias más rápidas, conexión temprana a la red y un aprendizaje más rápido, mientras que una regulación excesivamente conservadora retrasa proyectos, aumenta costes e incentiva a las empresas a establecerse en jurisdicciones más favorables. El liderazgo regulatorio en fases iniciales permite a los países moldear normas y estándares internacionales, reforzando la competitividad a largo plazo.

Los países que se adelanten en establecer una regulación adecuada para la fusión tienen más probabilidades de atraer instalaciones, inversión en cadenas de suministro y talento especializado: ingredientes clave para una futura industria de fusión. Esto se refleja en la distribución emergente de la industria, con Estados Unidos como líder.

4.4 Estado de la regulación de la fusión en jurisdicciones clave

Estados Unidos

Estados Unidos ha dado los pasos más explícitos para definir un marco regulatorio específico para la fusión. Las instalaciones de fusión se regulan bajo un régimen de materiales (*byproduct materials*), en lugar de ser tratadas como reactores de fisión nuclear.

Elementos clave:

- 2009: la NRC (Nuclear Regulatory Commission) confirma su jurisdicción sobre la fusión.
- 2019-2022: reforma legislativa vía NEIMA (*Nuclear Energy Innovation and Modernization Act*).
- 2023: decisión de la NRC de regular la fusión bajo 10 CFR parte 30 (*Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material*).
- 2024: el *ADVANCE Act* codifica la fusión como aceleradores de partículas en la ley federal.

Este marco permite la obtención de licencias de una forma más rápida manteniendo la seguridad y la protección ambiental.

Reino Unido

Reino Unido ha adoptado uno de los enfoques más proactivos y explícitos del mundo para desarrollar un régimen regulatorio que sea proporcional al perfil real de riesgo de la energía de fusión, evite obstáculos innecesarios y proporcione claridad y confianza tanto a proyectos públicos como privados.

Esta estrategia regulatoria está ahora incorporada en la legislación, respaldada por consultas formales e integrada en los planes energéticos nacionales. Esta combinación otorga a Reino Unido una ventaja sólida por ser el primero en posicionarse respecto a una regulación que permita el desarrollo de estas tecnologías. Este enfoque respalda iniciativas nacionales como el tokamak STEP y posiciona al país como un centro global de fusión.

Una de las innovaciones regulatorias más destacadas de Reino Unido es la exclusión explícita de las instalaciones de fusión del régimen tradicional de licencias nucleares bajo la *Nuclear Installations Act* de 1965. El Gobierno británico ha legislado para garantizar que las instalaciones de fusión no se regulen automáticamente como «instalaciones nucleares», ya que su perfil de riesgo es muy diferente al de los reactores de fisión. Este cambio legal proporciona una claridad y proporcionalidad esenciales para hacer de Reino Unido una jurisdicción que atraiga *start-ups* de todo el mundo a instalarse allí.

Las instalaciones de energía de fusión no requieren una licencia de emplazamiento nuclear bajo la *Nuclear Installations Act*. Por lo tanto, no están reguladas por la Office for Nuclear Regulation (ONR) como sí lo están los reactores de fisión. En su lugar, las instalaciones de fusión seguirán siendo reguladas principalmente por la Environment Agency (EA) y la Health and Safety Executive (HSE).

Unión Europea

En materia de política y desarrollo regulatorio, la Unión Europea está trabajando hacia una estrategia específica para la fusión que podría conducir a un entorno regulatorio más estructurado en 2026, reflejando el creciente reconocimiento del papel potencial de la fusión en el futuro *mix* energético. Los actores implicados —incluidos responsables políticos y grupos industriales— han solicitado principios regulatorios más claros y armonizados que distingan la fusión de la regulación nuclear de fisión para ofrecer certeza a inversores y empresas desarrolladoras. El Parlamento Europeo y la Comisión están participando en consultas y plani-

ficando la integración de la fusión en marcos industriales y de neutralidad climática más amplios (por ejemplo, debates sobre su categorización en la *Net Zero Industry Act*), pero las normas detalladas de licenciamiento para instalaciones comerciales de fusión siguen en fases iniciales de desarrollo o discusión, más que plenamente codificadas en toda la UE.

En resumen, la regulación de la fusión en la UE está evolucionando desde la gobernanza de la investigación básica hacia iniciativas políticas emergentes orientadas a habilitar la futura comercialización, pero aún no existe un régimen regulatorio específico y completo para plantas de energía de fusión; se prevé como parte de la próxima estrategia y planificación legislativa de la UE.

Estados nórdicos (Finlandia, Suecia, Dinamarca y Noruega)

Finlandia se sitúa a la vanguardia del desarrollo regulatorio para la fusión en los países nórdicos, impulsada por su plan de reforma integral de la legislación nuclear y el tratamiento claro de la fusión bajo la normativa de radiación.

En junio de 2025, el Gobierno finlandés envió a consulta pública un borrador de revisión de la ley de energía nuclear. La propuesta representa una reforma sustancial de una ley que llevaba más de 35 años en vigor y había sido modificada repetidamente. La investigación en fusión y el uso experimental de reactores de fusión no quedarían bajo la ley de energía nuclear que regula las instalaciones de fisión; en su lugar, estas actividades se regularían bajo la ley de radiación. Esta distinción refleja en la norma regulatoria que el perfil de riesgo y las necesidades operativas de la fusión difieren de las de los reactores nucleares convencionales.

La Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear (STUK) será la autoridad competente para las actividades reguladas bajo la ley de radiación, mientras que las instalaciones que impliquen reacciones de fisión seguirán reguladas bajo la ley de instalaciones nucleares. El borrador separa las decisiones sobre residuos radiactivos y salvaguardias de las cuestiones técnicas de seguridad, permitiendo licencias modulares y una gobernanza más clara. La ley revisada está programada para entrar en vigor el 1 de enero de 2027, si es aprobada.

Suecia se identifica como el siguiente país en nivel de preparación. Su legislación nuclear existente ya incluye explícitamente las máquinas de fusión, pero esas normas están basadas en

requisitos regulatorios de la fisión. Esto significa que las reglas suecas pueden aplicarse a la fusión, pero los proyectos que decidirán iniciarse en Suecia podrían tener que sortear condiciones centradas en la fisión que no están optimizadas para el perfil de riesgo propio de la fusión, creando cargas adicionales que no aportan ningún valor añadido.

Tanto Dinamarca como Noruega tienen marcos regulatorios nucleares más antiguos que no mencionan específicamente la energía de fusión. Esto genera incertidumbre política y procedimental para los proyectos de fusión, ya que la ausencia de referencias explícitas puede retrasar la claridad en las vías de licenciamiento. Ninguno de los dos países ha adoptado aún lenguaje legal específico para la fusión ni estrategias que hagan su entorno jurídico particularmente atractivo para el desarrollo de esta tecnología⁸.

Japón

La estructura legal relacionada con la energía nuclear en Japón se construyó en torno a la fisión: licencias de reactores, controles de materiales nucleares y regulación de emplazamientos. La consecuencia más importante para la fusión es definicional: los dispositivos de fusión no son «reactores» según el significado legal utilizado para la regulación de fisión, por lo que el principal estatuto centrado en la fisión (la ley de regulación de reactores dentro de la estructura de la ley básica de energía atómica) no se aplica automáticamente a las instalaciones de fusión. El resultado práctico es que las máquinas de fusión japonesas se han gestionado bajo la categoría de dispositivos generadores de radiación/radioisótopos, en lugar del de «reactor» de fisión.

Los dispositivos de fusión en Japón (especialmente las máquinas a escala de investigación donde no suele usarse tritio) se han regulado típicamente bajo la normativa que gobierna radioisótopos y equipos generadores de radiación. Por ejemplo, el JT-60SA, el tokamak operativo más grande del mundo, pero sin tritio, se ha regulado como dispositivo generador de plasma bajo el marco de radioisótopos/radiación.

Según la ley vigente, los dispositivos de fusión pueden regularse como equipos generadores de radiación, pero el marco actual

⁸ *Framework of siting criteria and initial assessment for siting the Novatron 3 facility in Nordic region*, disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/634d70f7acf00f3d7942848e/t/68f5cc3af2297812c492e052/1760939066885/VTT+report.pdf>

presenta limitaciones para ciclos de combustible orientados a la comercialización, especialmente por la presencia de tritio. El uso de tritio como combustible requeriría cambios o actualizaciones para que los generadores de plasma alimentados con tritio puedan ser regulados adecuadamente.

El regulador nuclear japonés (NRA) ha sido cada vez más explícito en que está siguiendo las tendencias tecnológicas emergentes, incluida la I+D en fusión, como parte de su trabajo prospectivo sobre regulación para la prevención de riesgos radiológicos.

China

El avance regulatorio más reciente en China es un aviso del Ministerio de Ecología y Medio Ambiente (MEE) titulado «Aviso sobre cuestiones relativas a la gestión de la seguridad radiológica de dispositivos de fusión», fechado en abril de 2025. La estructura institucional china sitúa la regulación de la seguridad nuclear y radiológica bajo el MEE, incluyendo las funciones de la administración nacional de seguridad nuclear. El aviso de 2025 asigna explícitamente al MEE la responsabilidad de los permisos de seguridad radiológica e indica que las estaciones regionales de supervisión realizan la inspección y supervisión diaria.

El aviso de 2025 declara efectivamente que los dispositivos de fusión están dentro del alcance del sistema regulatorio de seguridad radiológica, proporcionando una clasificación específica para la fusión y una vía administrativa para permisos y evaluaciones de impacto ambiental.

El marco chino para la fusión avanza hacia una regulación graduada basada en una clasificación (un enfoque habitual en la gestión de dispositivos radiológicos en China). El aviso y las presentaciones asociadas describen que los dispositivos de fusión se agrupan en tres categorías: dispositivos experimentales de física de plasma, dispositivos experimentales de fusión de deuterio-tritio y dispositivos con aplicación energética basados en fusión, que luego se gestionarían según el riesgo asociado a cada una de estas categorías y su correspondiente tratamiento regulatorio.

Esto resulta especialmente relevante, ya que se apoya en el principio de proporcionalidad. Es en los experimentos con combustible deuterio-tritio (D-T) y en los dispositivos con aplicación energética donde aparecen inventarios significativos de tritio, materiales activados e interfaces industriales, que constituyen los principales factores de riesgo desde el punto de vista de la

seguridad. En este contexto, la aplicación de un marco normativo uniforme que no incorpore la proporcionalidad podría, por un lado, imponer cargas regulatorias excesivas a dispositivos experimentales de bajo riesgo y, por otro, resultar insuficiente para abordar adecuadamente los requisitos de seguridad de sistemas con perfiles de riesgo más elevados.

El mensaje transmitido en el aviso de 2025 subraya que la fusión no encaja en los esquemas tradicionales de supervisión aplicables a los reactores de fisión y que el regulador está avanzando hacia un marco regulatorio específico para la fusión, basado en la evidencia científica y en el desarrollo de un sistema propio de estándares regulatorios.

Dimensión	Fisión nuclear	Fusión
Comportamiento de la reacción	Reacción en cadena autosostenida	Autolimitada
Inventario de combustible	Grandes inventarios de material fisibles	Pequeñas cantidades (D-T)
Riesgo de proliferación	Alto	Muy bajo
Tipo de residuos	Alta actividad, larga vida	Materiales activados, vida corta
Potencial de accidente	Consecuencias masivas fuera del emplazamiento	Localizadas, limitadas
Planificación de emergencias	Extensa	Limitada, específica del sitio
Regulación adecuada	Licencias basadas en el reactor	Supervisión basada en peligros

Tabla 2. Fusión vs fisión. Diferencias relevantes para la regulación

País/Región	Enfoque regulatorio	Estado
Estados Unidos	Materiales (<i>Byproduct material</i>)/ acelerador	Definido, codificado
Reino Unido	Proporcional, específico para fusión	Definido, en evolución
Unión Europea	Enfoques a nivel nacional	Fragmentado
Finlandia	Proporcional, específico para fusión	En progreso
Japón	Marco nuclear adaptado	Adaptación gradual
China	Proporcional, específico para fusión	En progreso. Centralizado, liderado por el Estado

Tabla 3. Estado de la regulación de la fusión por país (2025)

5 Tecnologías habilitadoras de la fusión: el papel clave de la inteligencia artificial, la computación de alto rendimiento y la computación cuántica

La física y la ingeniería de la fusión presentan una complejidad extraordinaria: plasmas a cientos de millones de grados deben generarse, confinarse y mantenerse estables en el tiempo y los materiales deben soportar cargas intensas de calor, además del impacto de neutrones. Para que la energía de fusión sea viable de forma comercial, los dispositivos de fusión deben operar de forma fiable como plantas de energía industrial. Cada aspecto de este desafío implica física multiescala, no lineal y de alta dimensionalidad, muy por encima del alcance de la intuición humana o de la experimentación tradicional por sí sola.

Los dispositivos de fusión involucran fenómenos fuertemente acoplados y no lineales que abarcan órdenes de magnitud en espacio y tiempo: plasmas turbulentos, imanes superconductores, materiales irradiados por neutrones, ciclos de combustible con tritio, sistemas de conversión de energía y la necesidad de control en tiempo real.

Históricamente, el progreso en fusión ha estado limitado por la velocidad de iteración experimental. Las decisiones de diseño se validaban construyendo máquinas, operándolas durante años, aprendiendo de los fallos y luego construyendo la siguiente generación. Este enfoque no es compatible con los plazos requeridos para la implantación industrial de la energía de fusión que se demanda por parte de la sociedad en la primera parte del siglo XXI.

Por ello, la integración de inteligencia artificial (IA), computación de alto rendimiento (HPC) y la emergente computación cuántica como herramientas fundamentales en el desarrollo de fusión supone un cambio radical. Estas tecnologías permiten pasar de un paradigma limitado por la construcción de equipos a una disciplina de ingeniería acelerada por computación, comprimiendo décadas de aprendizaje en pocos años.

5.1 Computación de alto rendimiento y marcos integrados de simulación

La simulación predictiva de plasmas de fusión requiere resolver ecuaciones cinéticas y magnetohidrodinámicas no lineales a

través de enormes separaciones de escala (Jenko *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2017; Birdsell *et al.*, 2019). La iteración experimental tradicional no puede igualar la amplitud del espacio de parámetros que los modelos HPC pueden explorar. La capacidad de computación a nivel exaescala se reconoce ahora como requisito para modelar el transporte turbulento, el acoplamiento borde-núcleo y los efectos electromagnéticos con una fidelidad cercana a las condiciones experimentales (Birdsell *et al.*, 2019).

Una colaboración reciente entre Commonwealth Fusion Systems (CFS), NVIDIA y Siemens demuestra cómo las bibliotecas modernas de simulación habilitadas por IA y las herramientas de ingeniería digital pueden acortar aún más los ciclos de diseño en fusión.

Según CFS, la combinación de los SDK de IA y simulación de NVIDIA (como cuQuantum, cuFFT, cuBLAS y TensorRT) con las herramientas de gemelo digital Xcelerator de Siemens permiten que *solvers* de física de plasma acelerados por GPU que aprovechan miles de núcleos permitan reducir meses de tiempo de simulación; modelos subrogados asistidos por IA, que reemplazan núcleos numéricos costosos por aproximaciones aprendidas sin pérdida significativa de fidelidad, y flujos de trabajo integrales de ingeniería digital, que conectan simulaciones de plasma con análisis estructurales y electromagnéticos directamente.

Al aprovechar baterías de simulación aceleradas por GPU, CFS ha mostrado mejoras de velocidad de varios órdenes de magnitud frente a flujos de trabajo basados solo en CPU, lo que permite más iteraciones de diseño en el mismo tiempo y mejora la fidelidad de las predicciones del rendimiento integral de la planta (incluyendo imanes, cargas estructurales y comportamiento integrado del plasma)⁹.

5.2 Inteligencia artificial: del control a la optimización del diseño

La IA está ahora integrada en toda la cadena de innovación en fusión, no solo en proyectos aislados.

IA para el control del plasma

Métodos como el aprendizaje por refuerzo profundo han demostrado en investigaciones académicas superar a los controladores

⁹ Ver: <https://blog.cfs.energy/how-nvidia-ai-and-simulation-libraries-and-siemens-tools-can-accelerate-fusion-energy/>

clásicos en el mantenimiento de la forma del plasma y la supresión de inestabilidades (Degrave *et al.*, 2022; Kates-Harbeck, Svyatkovskiy y Tang, 2019). Estos métodos son viables a escala de planta industrial solo si se integran en marcos computacionales que puedan entrenarse con datos simulados y luego generalizar a nuevas condiciones operativas.

La IA se utiliza para:

- Predecir elementos precursores de disrupciones en el plasma, evitando la parada súbita de las operaciones de la máquina de fusión.
- Optimizar estrategias de control en tiempo real de las bobinas magnéticas mediante modelos entrenados con datos simulados y experimentales.
- Informar a los sistemas de control donde los bucles de retroalimentación ajustados manualmente son impracticables.

Estos recursos son esenciales, ya que la prevención de disrupciones y el control activo de la estabilidad influyen directamente en la disponibilidad de la instalación, un factor crítico para la viabilidad comercial de las plantas de energía de fusión (Degrave *et al.*, 2022; Van Milligen *et al.*, 2022).

Diseños acelerados asistidos por IA y modelos subrogados

La IA también potencia de forma decisiva la capacidad de generar diseños de prototipos de plantas de fusión de manera mucho más rápida. Las redes neuronales actúan como modelos sustitutos de física, capturando dependencias complejas (por ejemplo, coeficientes de transporte turbulento, márgenes de estabilidad) a una fracción del coste computacional de los *solvers* completos (Bishop, 2006; Sánchez *et al.*, 2019).

Estas herramientas se pueden integrar en el entorno de gemelo digital permitiendo una valoración más rápida de posibles diseños, la optimización multiobjetivo para rendimiento y el coste y la viabilidad de fabricación, así como la exploración de conceptos de diseño no convencionales que resultarían inviables de ensayar físicamente.

Los modelos subrogados entrenados con conjuntos de datos generados por HPC y almacenados para evaluación en tiempo real permiten bucles de diseño iterativos que hacen posible que lo que antes tomaba meses hoy en día se puedan simular en días u horas.

Ejemplos:

El concepto de máquina de fusión propuesto por la *start-up* Type One Energy se basa en décadas de investigación en optimización de stellarators, donde el confinamiento y la estabilidad del plasma necesarias solo se pueden alcanzar mediante optimización numérica a gran escala de configuraciones magnéticas tridimensionales (Hirshman y Whitson, 1983; Landreman y Paul, 2022; Helander *et al.*, 2012). Sin la computación de alto rendimiento moderna (HPC), el desarrollo comercial de los stellarators sería inviable.

La *start-up* Thea Energy explora configuraciones magnéticas y regímenes operativos para las configuraciones de plasma de su stellarator que requerirían campañas experimentales excesivamente largas, con lo que la presencia de estas nuevas herramientas es fundamental para la viabilidad comercial de este proyecto.

Proxima Fusion es parte del proyecto AI for Fusion Engineering (respaldado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania en colaboración con Forschungszentrum Jülich, la Universidad Técnica de Munich y la Universidad de Bonn). Este proyecto se basa en el uso de *machine learning* geométrico y *deep learning* para abordar problemas complejos de geometría típicos en el diseño de stellarators, aprendiendo a predecir y optimizar el comportamiento del plasma y la calidad del campo mucho más rápido de lo que permiten por sí solos los métodos numéricos existentes.

5.3 IA aplicada a materiales y componentes para fusión

Los materiales que se usan en una máquina de fusión van a estar expuestos a alta fluencia de neutrones, cargas térmicas extremas y tensiones mecánicas simultáneamente.

La IA se utiliza en este campo para acelerar el descubrimiento de nuevas aleaciones que puedan soportar estas condiciones, así como predecir su vida útil. Esto se consigue aprendiendo de respuestas no lineales y complejas bajo condiciones de irradiación y gradientes térmicos. Diversos estudios han demostrado que la selección asistida por inteligencia artificial puede acotar el rango de posibles variantes para el diseño de un material en varios órdenes de magnitud en comparación con los métodos tradicionales de prueba y error (Butler *et al.*, 2018).

5.4 Gemelos digitales: aprendizaje continuo mediante datos y simulación

Los gemelos digitales representan una síntesis de HPC, IA y herramientas de simulación industrial. En fusión, los gemelos digitales adquieren datos provenientes de los diagnósticos instalados en la máquina de fusión en tiempo real, los comparan con modelos físicos y predicen estados futuros del sistema.

Estudios científicos sobre gemelos digitales aplicados a la fusión demuestran que estos sistemas pueden anticipar disrupciones antes de que se produzcan, evaluar en tiempo real múltiples trayectorias de control y proporcionar a los operadores información accionable sobre el estado operativo y el rendimiento de la instalación (Pankin *et al.*, 2019; Rea *et al.*, 2018).

Por ejemplo, el entorno de ingeniería digital mencionado anteriormente, creado por Siemens y utilizado por CFS, extiende estas ideas al contexto industrial, donde los gemelos digitales son herramientas operativas centrales para plantas piloto y futuras plantas comerciales. Al vincular simuladores de plasma, análisis estructural y modelos de control en un único prototipo virtual, el flujo de trabajo garantiza que las decisiones de diseño consideren todo el contexto físico y de ingeniería, reduciendo el riesgo durante la construcción y puesta en marcha de la planta¹⁰.

5.5 Computación cuántica como tecnología habilitadora emergente

Incluso cuando la IA y la HPC impulsan la agenda de fusión a corto plazo, la computación cuántica se perfila como una tecnología de horizonte largo para problemas que escalan de forma combinatoria o implican química cuántica compleja.

Entre los ámbitos en los que los métodos cuánticos podrían superar a los enfoques clásicos se incluyen: modelado de materiales y cálculos de interacción plasma-superficie con fidelidad cuántica completa, así como problemas de optimización con espacios de búsqueda exponencialmente grandes (Preskill, 2018; McArdle *et al.*, 2020).

¹⁰ Ver: <https://blog.cfs.energy/how-nvidia-ai-and-simulation-libraries-and-siemens-tools-can-accelerate-fusion-energy/>

En la práctica, se espera que la computación cuántica se integre mediante flujos de trabajo híbridos cuántico-clásicos, donde subrutinas cuánticas aceleren núcleos (*kernels*) específicos dentro de mayor flujo de trabajo de HPC+IA. Aunque la ventaja cuántica práctica en fusión sigue siendo una frontera abierta de investigación, la implicación de fases iniciales facilitará que la I+D en fusión pueda hacer uso de estas nuevas herramientas en cuanto estén disponibles.

5.6 Tecnologías computacionales como catalizadores del desarrollo de la fusión

El impacto integrado de la IA, la HPC y las herramientas de simulación permite:

- La aceleración del diseño: la exploración digital reemplaza secuencias experimentales más lentas y costosas, permitiendo una convergencia más rápida hacia configuraciones viables de plantas de fusión.
- La mitigación de riesgos: los modelos predictivos identifican modos de fallo en fases iniciales del diseño, reduciendo así los costes que estos podrían haber supuesto de no ser eliminados.
- La fiabilidad operativa: el control basado en IA y los gemelos digitales mejoran la disponibilidad de la planta, prolongan la vida útil de los componentes y controlan su degradación.
- Un uso más eficiente del capital: menos prototipos físicos y experimentos mejor diseñados reducen sustancialmente el tiempo empleado y el coste asociado al desarrollo de una planta de fusión.

6 Dinámicas globales de poder en el desarrollo de la fusión

La energía de fusión ha dejado de concebirse exclusivamente como un proyecto científico de largo plazo para situarse en el terreno de la competencia tecnológica y estratégica, donde la innovación y la capacidad industrial desempeñan un papel central. Aunque todavía no existen centrales comerciales de fusión en operación, la magnitud, la estructura y la orientación de las inversiones evidencian que las principales potencias consideran cada vez más su desarrollo como un elemento clave de la futura fortaleza económica, la seguridad energética y la soberanía tecnológica. En este contexto, la fusión comienza a debatirse junto

con los semiconductores, la inteligencia artificial y la fabricación avanzada como una tecnología con efectos indirectos de amplio alcance.

A diferencia de transiciones energéticas anteriores, el desarrollo de la fusión se produce en un periodo de rivalidad geopolítica sistémica. Los Gobiernos ya no financian la fusión únicamente como un esfuerzo científico orientado al bien público; la integran en estrategias industriales nacionales, doctrinas de seguridad y agendas de competitividad a largo plazo. Como resultado, el panorama de la fusión refleja políticas económicas divergentes: proyectos impulsados por el mercado en Estados Unidos, planificación estatal coordinada en China, gobernanza científica pero fragmentada en Europa y posicionamiento en la cadena de suministro en países con tradición en la fabricación industrial avanzada como Japón y Corea del Sur.

Este subcapítulo describe la fusión desde la óptica del poder y la captura de valor, centrándose no en quién logra la fusión primero, sino en quién controla los ecosistemas industriales, la propiedad intelectual, las cadenas de suministro y los estándares que determinarán la ventaja geopolítica a largo plazo cuando la fusión alcance la madurez comercial.

6.1 Estados Unidos: la fusión como vector de competitividad industrial y estratégica

Estados Unidos ha adoptado un modelo para el desarrollo de la fusión que combina la asunción de riesgos por parte del Gobierno federal con la ejecución en el sector privado. La financiación pública, principalmente a través del Departamento de Energía (DOE), respalda la ciencia fundamental del plasma, la investigación en materiales y las tecnologías habilitadoras, mientras que las empresas privadas impulsan el diseño de sistemas, la construcción y la comercialización.

En 2022, el programa Fusion Energy Sciences (FES) del DOE, históricamente centrado en la ciencia del plasma, fue reorientado a *fusion science and technology* para incluir aspectos tecnológicos como el diseño de plantas piloto, la relevancia para la red eléctrica y la preparación de la cadena de suministro. El gasto federal anual en fusión se sitúa actualmente en torno a 800-900 millones de dólares estadounidenses, distribuidos entre oficinas del DOE, incluyendo FES, ARPA-E y programas de fusión inercial en la Administración Nacional de Seguridad Nuclear. Si se incluyen

infraestructuras auxiliares, computación de alto rendimiento y programas de materiales, la inversión pública efectiva supera los 1200 millones de dólares al año.

Este apoyo público ha catalizado la entrada de capital privado en fusión. Desde 2018, las *start-ups* estadounidenses —como Commonwealth Fusion Systems, Helion Energy, TAE Technologies y Zap Energy— han recaudado de forma conjunta entre 6000 y 7 000 millones de dólares en financiación privada. Estas inversiones no son meramente especulativas; se estructuran en torno a logros en la manufactura de componentes clave, acuerdos de compra de energía y, en algunos casos, aplicaciones vinculadas a defensa. La misión Genesis, anunciada en 2023¹¹, enmarcó la fusión como prioridad estratégica a corto plazo y sirvió como señal a los mercados de que la fusión se sitúa, junto con la IA, los semiconductores y la fabricación avanzada, como elemento clave en la competencia estratégica de EE. UU. Cabe destacar que la necesidad de fuentes de energía para alimentar la IA, la computación cuántica y los sistemas autónomos se menciona explícitamente en el documento de estrategia de seguridad nacional publicado en noviembre de 2025:

«Estados Unidos debe invertir simultáneamente en investigación para preservar y avanzar nuestra ventaja en tecnologías militares y de doble uso, con énfasis en las áreas donde nuestras ventajas son más sólidas. Estos incluyen el ámbito submarino, el espacio y el nuclear, así como otros que decidirán el futuro del poder militar, como la IA, la computación cuántica y los sistemas autónomos, además de la energía necesaria para impulsar estas áreas»¹².

La energía de fusión se integra de forma creciente en las narrativas estadounidenses sobre competencia estratégica, en particular en comparación con China. Informes del Congreso y de estrategias del Poder Ejecutivo vinculan el desarrollo de la fusión a prioridades más amplias como la inteligencia artificial, la fabricación avanzada, la autonomía energética y la seguridad nacional. En este marco, la fusión se concibe no solo como una fuente de energía futura, sino como un vector tecnológico cuyas capacidades habilitadoras —imanes de alto campo, electrónica de

¹¹ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/11/launching-the-genesis-mission/>

¹² Ver: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/12/2025-National-Security-Strategy.pdf>

potencia, *software* de control y materiales avanzados— refuerzan el liderazgo industrial de Estados Unidos en múltiples sectores. El enfoque refleja una lógica ya observada en el ámbito de la IA: la ventaja estratégica no reside únicamente en quién realiza el descubrimiento inicial, sino en quién logra industrializar y escalar la tecnología con mayor rapidez.

La ventaja estadounidense reside en su capacidad para traducir el éxito en laboratorio en empresas con potencial de crecimiento. Los laboratorios nacionales proporcionan validación, mientras que las compañías privadas asumen el riesgo de ingeniería. Este modelo privilegia la velocidad y la diversidad frente a la eficiencia como resultado de la centralización. Sin embargo, también incorpora vulnerabilidades: la fragmentación de proyectos podría duplicar infraestructuras y los plazos requeridos por el sector privado podrían colisionar con las limitaciones de la red eléctrica. Aun así, en 2025, EE. UU. sigue siendo la única jurisdicción donde la fusión se incluye explícitamente como parte del *mix* energético futuro y como un pilar de proyección de poder estratégico.

Las vías de comercialización que se están desarrollando en EE. UU. corresponden a múltiples tipologías. El confinamiento magnético, la fusión inercial, los híbridos magneto-inerciales y los conceptos alternativos, todos ellos reciben financiación en mayor o menor medida, reflejando una preferencia por el desarrollo de diferentes tecnologías. Esto contrasta con las apuestas de décadas anteriores en las que todos los esfuerzos se concentraban fundamentalmente en una única tecnología, el tokamak. Los programas de asociación público-privada basados en consecución de logros que el DOE ha venido financiado con aproximadamente 50-75 millones de dólares por adjudicación durante varios años no están diseñados para «elegir ganadores», sino para reducir riesgos en múltiples vías hasta que surjan elementos de rendimiento relevantes para la red.

Desde la perspectiva de la política industrial, la fusión se alinea cada vez más con las agendas de relocalización. Las técnicas avanzadas de fabricación —fabricación aditiva de grandes componentes, producción nacional de cinta superconductora REBCO y aleaciones tolerantes a neutrones— se enmarcan como capacidades de doble uso con efectos indirectos en los sectores aeroespacial y de defensa. Varias empresas de fusión mantienen relaciones fluidas con el Departamento de Defensa, especialmente en torno a energía pulsada, reactores compactos y propulsión espacial. Aunque estos programas son modestos en

términos presupuestarios, refuerzan la percepción de la fusión como tecnología estratégica más que puramente civil.

El avance de esta tecnología también tiene un componente de política internacional. La fusión es, cada vez más, mencionada en diálogos bilaterales sobre tecnología con aliados, posicionando a las empresas estadounidenses como socios preferentes para futuras plantas de demostración. Esto tiene el efecto de consolidar normas de propiedad intelectual y estándares desde los inicios del desarrollo tecnológico. La postura regulatoria de EE. UU. —la fusión se regula de forma separada de la fisión, con cargas más ligeras asociadas a la obtención de licencias— aumenta su atractivo como centro de desarrollo, acelerando la llegada de talento desde Europa y Asia.

El modelo estadounidense refleja un cálculo estratégico: el liderazgo en fusión lo asegurarán quienes integren ciencia, mercados de capital y ejecución industrial más rápido que sus rivales. En este marco, la habilidad de construir una planta comercial piloto —aunque sea a alto coste— confiere ventajas geopolíticas al consolidar cadenas de suministro y moldear las expectativas globales. EE. UU. se preocupa menos por lograr una fusión económicamente viable en primera instancia que por garantizar que, cuando la fusión sea viable, sus empresas, estándares y alianzas definan el sector.

6.2 China: la fusión como soberanía tecnológica

La estrategia de China en fusión se entiende mejor desde la óptica de la soberanía tecnológica impulsada por el Estado. La fusión se integra en una doctrina más amplia que prioriza el control a largo plazo de tecnologías fundamentales, incluso cuando los retornos económicos a corto plazo son inciertos. A diferencia de los modelos marcados por el mercado, el enfoque chino enfatiza la continuidad, la acumulación de infraestructuras y la integración con los ciclos de planificación nacional.

El programa de fusión de China está incorporado en la planificación nacional de ciencia y tecnología a largo plazo. Se estima que la financiación pública para la fusión asciende a 1200-1700 millones de dólares al año, superando las asignaciones federales recientes de EE. UU. y caracterizándose por estabilidad y continuidad. Esta financiación respalda proyectos nacionales de referencia como EAST (Tokamak Superconductora Avanzada Experimental) y CFETR, concebido como puente entre dispositivos experimentales y una futura planta de energía. A diferencia de

ITER, estas instalaciones están bajo control nacional, lo que permite una iteración más rápida y una integración más estrecha con la industria doméstica.

El desarrollo de la fusión está liderado por instituciones estatales, no por *start-ups* respaldadas por capital riesgo, reflejando la preferencia china por la coordinación centralizada frente a la diversidad emprendedora.

La fusión se enmarca explícitamente como parte de la agenda de autosuficiencia tecnológica de China. El dominio de superconductores, la producción de tritio y los materiales resistentes a altos flujos de calor se consideran estratégicamente equivalentes a los semiconductores o los motores aeroespaciales. Esta visión justifica una inversión sostenida pese a los largos plazos, aislando los programas de fusión de ciclos políticos cortos.

La dimensión civil-militar también es significativa. Aunque China enfatiza públicamente las aplicaciones energéticas pacíficas, la investigación relacionada con la fusión se solapa con intereses militares en energía pulsada, energía dirigida y fuentes compactas de potencia. La doctrina de fusión militar-civil garantiza que los avances en un dominio se transfieran rápidamente al otro, amplificando los retornos estratégicos de la inversión.

A nivel internacional, China aprovecha su participación en fusión para moldear normas mientras mantiene autonomía estratégica. Su implicación en ITER le proporciona acceso a redes científicas globales, pero los programas nacionales paralelos aseguran que el conocimiento crítico no dependa de fuentes externas. El desarrollo de talento es sistemático, con experiencia en fusión cultivada en universidades, laboratorios estatales y centros de investigación industrial.

6.3 Reino Unido: la fusión como apuesta industrial nacional

Reino Unido destaca como el actor europeo con una postura estratégica más decidida en fusión. La fusión se contempla no solo como ciencia, sino como una misión industrial nacional, alineada con la seguridad energética, el desarrollo regional y la identidad tecnológica *postbrent*.

La gobernanza de la fusión reside en la UK Atomic Energy Authority (UKAEA), que funciona no solo como organismo de investigación, sino como promotor de proyectos y referente industrial.

El proyecto de referencia en Reino Unido es el programa STEP (Tokamak Esférico para Producción de Energía). Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un prototipo de fusión conectado a la red a principios de la década de 2040. A diferencia de ITER, STEP está concebido explícitamente como una instalación destinada a suministrar energía a la red eléctrica, con un carácter piloto preindustrial y una función catalizadora para el desarrollo de la cadena de suministro nacional.

West Burton, situado al sur de la ciudad de Sheffield, ha sido seleccionado como emplazamiento para STEP, lo que aporta credibilidad al proyecto y, al mismo tiempo, ha facilitado una campaña de divulgación sobre qué es la energía de fusión a escala nacional en todo Reino Unido¹³.

Reino Unido ha comprometido 410 millones de libras en financiación para 2025, con unos compromisos totales acumulados en fusión a varios miles de millones de libras¹⁴.

Otro elemento de especial relevancia es el avance hacia un marco regulatorio que facilite el desarrollo de la energía de fusión. Reino Unido ha establecido una regulación específica para esta tecnología, evitando de forma deliberada clasificar las instalaciones de fusión como reactores nucleares de fisión. Esta claridad regulatoria constituye un activo estratégico, ya que permite acelerar el despliegue de esta tecnología y, al mismo tiempo, atraer a desarrolladores internacionales al país. En paralelo, parte de esta estrategia se ha orientado a la creación de un polo empresarial para la fusión en el campus de Culham, sede de UKAEA, conocido como The Fusion Cluster, que incluye programas específicos para el desarrollo de una fuerza laboral especializada en tecnologías de fusión.

Desde el punto de acuerdos internacionales, Reino Unido firmo una alianza estratégica con EE. UU. para acelerar el desarrollo de la fusión, centrada en I+D, intercambio de conocimientos y competencias en noviembre de 2023¹⁵. Este acuerdo se ha visto reforzado por el Technology Prosperity Deal (TPD), firmado en septiembre de 2025, en el que la energía de fusión se menciona de forma explícita. El TPD tiene como objetivo facilitar el intercambio de conoci-

¹³ Ver: <https://stepfusion.com/west-burton/>

¹⁴ Ver: <https://www.gov.uk/government/news/25-billion-for-world-first-prototype-fusion-energy-plant>

¹⁵ Ver: <https://www.gov.uk/government/news/uk-and-us-form-major-partnership-to-accelerate-global-fusion-energy-development>

miento, recursos y desarrollos en inteligencia artificial con el fin de acelerar la comercialización de la fusión, a través de colaboraciones en investigación, el acceso compartido a instalaciones para la realización de ensayos y la alineación de los marcos regulatorios¹⁶.

6.4 Europa: liderazgo científico sin soberanía industrial

Europa ocupa una posición paradójica en la dinámica global de la fusión. Conserva conocimiento científico excepcional gracias a ITER y a una densa red de laboratorios nacionales, pero tiene dificultades para transformar este liderazgo en una ventaja industrial. El ecosistema europeo de fusión ha sido moldeado por décadas de gobernanza multilateral, aversión al riesgo y predominio del sector público, una arquitectura optimizada para el consenso científico más que para la velocidad que requiere el sector privado.

ITER sigue siendo la pieza central del ecosistema de fusión europeo. Con un coste total proyectado superior a 20 000 millones de euros a lo largo de su vida útil, ITER ha consolidado el papel de Europa como referente mundial en ciencia de fusión. El siguiente paso después de ITER según la estrategia europea es DEMO, una planta de demostración prevista para la década de 2040. El gasto anual de la UE en fusión, incluyendo programas como Euratom y cofinanciación nacional, se sitúa en torno a 1000-1200 millones de euros, lo que hace que la inversión pública europea sea comparable en escala a la estadounidense.

ITER es un ejemplo de colaboración internacional y capacidad de ingeniería. Sin embargo, también ilustra el desafío estructural europeo: el liderazgo científico a gran escala no se traduce automáticamente en dominio de la industria. ITER no está diseñado para ser un prototipo de una planta de energía ni como vehículo de comercialización; es un experimento.

Este patrón de asignación de recursos, tanto públicos como privados, pone de manifiesto un desequilibrio estructural. El ecosistema europeo de fusión se encuentra fragmentado entre instituciones de la Unión Europea, laboratorios nacionales y un sector privado de dimensión aún limitada. La financiación se concentra principalmente en grandes instalaciones públicas con plazos de eje-

¹⁶ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/09/memorandum-of-understanding-between-the-government-of-the-united-states-of-america-and-the-government-of-the-united-kingdom-of-great-britain-and-northern-ireland-regarding-the-technology-prosperity-de/>

cución muy prolongados, que, además, carecen de mecanismos eficaces para una rápida transferencia industrial. Aunque existen *start-ups* privadas de fusión en Europa —especialmente en Alemania—, estas operan con niveles de capitalización significativamente inferiores a los de sus homólogas estadounidenses.

El gasto público anual en fusión en la UE se estima en 800-1000 millones de euros, dominado por compromisos relacionados con ITER. La inversión privada acumulada en fusión sigue siendo modesta, en torno a 1000-1500 millones de euros, un orden de magnitud menor que los niveles estadounidenses.

Empresa	Fondos recaudados/capitalización	Concepto de fusión (breve)	País	Principales inversores/apoyos
Marvel Fusion	€400 M	Confinamiento inercial mediante láser (láseres de pulso corto/implosión de objetivo)	Alemania (Múnich)	EQT Ventures, Siemens Energy Ventures, EIC Fund, Tengemann, Bayern Kapital, entre otros
Proxima Fusion	≈ €200 M	Stellarator cuasiisodinámico (variante de confinamiento magnético orientada a operación estable)	Alemania (Múnich; vínculos con Max-Planck IPP)	Cherry Ventures, Balderton Capital, UVC Partners, DTCF, redalpine, otros
Focused Energy	≈ €175 M	Fusión inercial basada en láser (prototipo de ingeniería y diseño integrado)	Alemania / EE. UU. (operación dual)	Alianzas estratégicas con RWE, estado de Hesse; inversores privados vinculados a fondos de EE. UU. y UE
Renaissance Fusion	≈ €61,5 M	Stellarator compacto/confinamiento magnético con imanes HTS y paredes de metal líquido (enfoque en materiales)	Francia	Fondos liderados por Crédit Mutuel Impact y participación de inversores climáticos/VC
Gauss Fusion	€10 M (subvención del BMBF)	Tokamak/ambiciones de megaproyecto (planes para gran planta comercial GIGA)	Alemania	Público (BMBF) y apoyos de capital riesgo; asociaciones industriales en desarrollo
Novatron Fusion	≈ €18 M	Confinamiento magnético alternativo tipo espejo (<i>spin-out</i> de investigación sueca)	Suecia	Axon Partners Group, junto con St1 y consorcio de inversores, Santander InnoEnergy Climate Fund

Tabla 4. Lista de *start-ups* europeas de fusión a diciembre de 2025 (datos indicativos, no exhaustivos)

Esta fragmentación limita la capacidad de Europa para alinear financiación, regulación y estrategia industrial¹⁷. La consecuencia geopolítica es un riesgo creciente de que, aun manteniendo el liderazgo científico por algún tiempo, no se tenga soberanía industrial.

6.5 Japón y Corea del Sur: capacidades clave en la cadena de suministro

Japón y Corea del Sur son líderes mundiales en la producción de superconductores, fabricación de componentes de alta precisión y materiales avanzados, capacidades indispensables para cualquier concepto de fusión.

Se estima que el gasto público anual en fusión de Japón asciende a 400-500 millones de dólares, respaldando dispositivos como JT-60SA y una amplia tradición en la investigación de materiales (por ejemplo, el desarrollo de aceros de activación reducida para fusión). Las empresas japonesas dominan segmentos de la cadena de suministro de superconductores de alta temperatura y componentes ultraprecisos, posicionando al país como proveedor crítico independientemente del concepto de fusión que prevalezca. Este dominio en partes de la cadena de suministro constituye una forma de poder estratégico que no requiere necesariamente la capacidad de construir plantas de producción de energía.

Corea del Sur sigue un patrón similar. Con una inversión anual en fusión de aproximadamente 300-400 millones de dólares, centrada en KSTAR y en I+D industrial, Corea integra el desarrollo de la fusión en su estrategia general de fabricación avanzada de componentes industriales. La participación de grandes conglomerados empresariales garantiza una rápida traducción de la investigación en componentes para la industria, reforzando el papel de Corea como socio manufacturero indispensable.

Otros actores, incluidos Suiza e Italia, ocupan también posiciones en la cadena de suministro muy específicas como en tecnología de vacío, criogenia y diagnósticos.

¹⁷ *A Fusion Engine for Growth: A European Industrial Strategy for Fusion Energy*, disponible en: <https://www.catf.us/resource/fusion-engine-growth-european-industrial-strategy-fusion-energy/>

Región/ País	Financiación pública anual (aprox.)	Compromisos públicos acumulados	Inversión privada en fusión (acumulada)	Modelo de financiación dominante	Implicaciones estratégicas
Estados Unidos	0,8-1,5 mil M\$/año (alta volatilidad)	~25-30 mil M\$ (incl. laboratorios)	8-9 mil M\$ (≈50-55 % del capital privado global)	I+D federal + <i>start-ups</i> respaldadas por VC	Liderazgo industrial, iteración rápida, fuerte captura de propiedad intelectual pero vulnerable a oscilaciones presupuestarias
China	1,2-1,7 mil M\$/año (estable)	~20-25 mil M\$ (estimado)	4-5 mil M\$ (fundamentalmente vinculados al Estado)	Programas públicos dirigidos por el Estado	Soberanía a largo plazo, construcción de infraestructuras críticas, progreso más lento pero resiliente
Unión Europea (UE-27)	0,8-1,0 mil M€/año (ITER + I+D)	45-50 mil M€ (ciclo de vida ITER)	1,0-1,5 mil M€	Megaproyectos públicos, VC limitado	Liderazgo científico, riesgo de no transferencia industrial
Reino Unido	250-400 M€/año	2-3 mil M€ (incl. programa STEP)	700 M-1 mil M€	Híbrido público + privado	Política de fusión fundamentalmente orientada a la comercialización
Japón	300-500 M\$/año	~6-8 mil M\$	<500 M\$	I+D público + cadenas de suministro industriales	Dominio de partes de la cadena de suministro (imanes, materiales)
Corea del Sur	200-400 M\$/año	~4-6 mil M\$	<300 M\$	I+D público	Liderazgo en fabricación de componentes
Francia (nacional)	~250-350 M€/año	Incluido en total ITER	<300 M€	Instituciones nucleares públicas	Capacidad técnica en ingeniería, riesgo de no transferencia industrial
Alemania	~200-300 M€/año	~2-3 mil M\$	300-500 M€	Ciencia pública + <i>start-ups</i>	Liderazgo en stellarators, sector privado incipiente
Canadá	<100 M\$/año	~0,5-1 mil M\$	500-700 M\$	Liderado por sector privado (General Fusion)	Nicho de conocimiento en la producción y manejo del tritio
Australia	<50 M\$/año	<500 M\$	<200 M\$	Enfoque en investigación	Física de plasmas y materiales
EAU / Oriente Medio	<50 M\$/año	<500 M\$	<200 M\$	Inversión estratégica/ <i>hosting</i>	Posicionamiento geopolítico a través de inversiones, no liderazgo tecnológico

Tabla 5. Resumen de inversiones en fusión y enfoque empresarial/gubernamental por país.

Bibliografía

- AIE. (2023). *World Energy Outlook 2023*. París.
- . (2025). *World Energy Outlook 2025*.
- Birdsell, J. *et al.* (2019). Exascale computing and fusion energy sciences. *Journal of Physics: Conference Series*. 1258, 012006.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Butler, K. T. *et al.* (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*. 559, pp. 547-555.
- Chang, C. S. *et al.* (2017). Whole-device modelling of plasma transport in fusion plasmas. *Physics of Plasmas*. 24, 055503.
- Comisión Europea. (2023). *State of the Energy Union 2023*. Bruselas.
- Degrave, J. *et al.* (2022). Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning. *Nature*. 602, pp. 414-419.
- Helander, P. *et al.* (2012). Stellarator and tokamak plasmas: a comparison. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 54, 124009.
- Hirshman, S. P. y Whitson, J. C. (1983). Steepest-descent moment method for three-dimensional equilibrium calculations. *Physics of Fluids*. 26, pp. 3553-3568.
- Jenko, F. *et al.* (2000). Electron temperature gradient driven turbulence. *Physics of Plasmas*. 7, pp. 1904-1910.
- Kates-Harbeck, J., Svyatkovskiy, A. y Tang, W. (2019). Predicting disruptive instabilities in controlled fusion plasmas through deep learning. *Nature*. 568, pp. 526-531.
- Landreman, M. y Paul, E. J. (2022). Magnetic fields with precise quasisymmetry for plasma confinement. *Physical Review Letters*. 128, 035001.
- McArdle, S. *et al.* (2020). Quantum computational chemistry. *Reviews of Modern Physics*. 92, 015003.
- McKinsey & Company. (2024). *Global Energy Perspective 2024*.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Bringing Fusion to the U.S. Grid*. Washington, DC, The National Academies Press.
- Pankin, A. *et al.* (2019). Toward digital twins for fusion reactors. *Fusion Engineering and Design*. 146, pp. 140-146.

- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*. 2, p. 79.
- Rea, C. *et al.* (2018). Disruption prediction and avoidance in tokamaks using real-time data. *Fusion Science and Technology*. 74, pp. 1-13.
- Sanchez, R. *et al.* (2019). Gyrokinetic turbulence simulations with reduced models. *Nuclear Fusion*. 59, 056014.
- Van Milligen, B. P. *et al.* (2022). Machine learning control for tokamak plasmas. *Nuclear Fusion*. 62, 056019.

Anexo: 1. ¿Qué es la energía de fusión?

La posibilidad de obtener energía a partir de reacciones nucleares de fusión fue planteada por primera vez en el ámbito científico en la década de 1920. En 1926, el astrofísico británico Arthur Eddington sugirió que los procesos responsables de la enorme energía emitida por las estrellas debían estar asociados a la fusión de núcleos ligeros en otros más pesados. Esta hipótesis abrió un nuevo campo de investigación que impulsó a científicos de distintos países a estudiar tanto la física nuclear como los mecanismos que gobiernan el interior estelar, sentando las bases conceptuales de la fusión como fuente energética.

El primer paso experimental hacia la reproducción de estos procesos en la Tierra se dio en 1932 en la Universidad de Cambridge. Ernest Rutherford y su equipo lograron inducir reacciones de fusión en laboratorio, observando la interacción entre núcleos de deuterio. Estos experimentos no solo confirmaron la posibilidad de fusionar núcleos ligeros, sino que permitieron identificar nuevos productos nucleares, como el helio-3 y el tritio. Rutherford destacó entonces que, aunque cada evento de fusión liberaba una cantidad significativa de energía, la baja probabilidad de que estas reacciones ocurrieran implicaba un balance energético global negativo.

Pocos años después, en 1938, Hans Bethe desarrolló un marco teórico detallado para describir las reacciones nucleares responsables de la producción de energía en las estrellas. Al calcular las probabilidades de interacción de distintas reacciones, Bethe demostró que la energía estelar procede de una compleja cadena de procesos de fusión que, con el tiempo, transforma hidrógeno en helio y posteriormente en núcleos más pesados. Este trabajo consolidó definitivamente la fusión como el mecanismo energético fundamental del universo observable.

A comienzos de la década de 1950, el conocimiento acumulado sobre la física de la fusión de núcleos ligeros permitió formular criterios cuantitativos para evaluar su viabilidad energética en dispositivos terrestres. En este contexto, John Lawson estableció el conocido criterio de Lawson, que define las condiciones mínimas necesarias para obtener energía neta en un sistema de fusión por confinamiento. Dichas condiciones dependen de la temperatura del plasma, la densidad de partículas y el tiempo durante el cual la energía permanece confinada. Así, la temperatura que debía alcanzar esa máquina debía ser de unos 10 keV

(100 millones de grados centígrados), una densidad de electrones de $n_e \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ y un tiempo de confinamiento $\tau_E > 1,5 \text{ s}$. Alcanzar la densidad fue relativamente fácil. La temperatura parecía ser una tarea difícil, pero varios métodos han logrado alcanzar e incluso superar este valor. Sin embargo, el verdadero desafío sería el tiempo de confinamiento de la energía.

Durante este periodo, comenzaron a explorarse distintas configuraciones experimentales para reproducir la fusión en la Tierra. En 1950, los científicos soviéticos Andrei Sájarov e Ígor Tamm propusieron el concepto del tokamak, un dispositivo basado en el confinamiento magnético del plasma en forma toroidal. Poco después, en 1951, Lyman Spitzer presentó en Estados Unidos el concepto alternativo del stellarator. Aunque inicialmente el stellarator atrajo gran parte del interés científico, los avances experimentales liderados por Lev Artsímovich en la Unión Soviética demostraron que el tokamak ofrecía mejores prestaciones en términos de confinamiento, lo que condujo a su adopción generalizada. En estos dispositivos se alcanzaron por primera vez temperaturas del orden del kiloelectronvoltio.

La década de 1950 también estuvo marcada por un cambio en el contexto político de la investigación en fusión. Las conferencias «Átomos para la Paz», organizadas por el Organismo Internacional de la Energía Atómica en 1955 y 1958, promovieron la cooperación internacional en el uso pacífico de la energía nuclear. Como resultado, la investigación en fusión fue desclasificada oficialmente, facilitando el intercambio científico y acelerando el progreso tecnológico.

Un nuevo salto cualitativo se produjo en 1968, cuando los tokamaks soviéticos alcanzaron simultáneamente temperaturas elevadas y tiempos de confinamiento sin precedentes. Estos resultados consolidaron al tokamak como la configuración dominante en la investigación en fusión, posición que mantiene hasta la actualidad como el concepto más avanzado desde el punto de vista experimental.

En la década de 1970 se hizo evidente que el desarrollo de la fusión requeriría esfuerzos a escala internacional. En Europa, esta convicción llevó al diseño del Joint European Torus (JET) en 1973. La construcción de esta instalación, que se convertiría en el mayor experimento operativo de confinamiento magnético, finalizó en 1983 en Reino Unido, logrando sus primeros plasmas ese mismo año y estableciendo un referente mundial en física de plasmas.

Paralelamente, comenzó a tomar forma la idea de un proyecto verdaderamente global para demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión. Esta iniciativa cristalizó en 1985, durante la cumbre de Ginebra entre las superpotencias, cuando se propuso formalmente el proyecto ITER. Tras más de dos décadas de negociaciones, ITER se estableció en Francia en 2007 con el objetivo de demostrar la producción sostenida de energía de fusión en condiciones cercanas a las de una planta industrial.

Mientras tanto, los programas nacionales —especialmente en Europa, China, Japón, Corea del Sur, Reino Unido y Estados Unidos— continuaron avanzando en áreas clave como la física del plasma, los materiales sometidos a neutrones y las tecnologías asociadas. A partir de la década de 2010, el énfasis comenzó a desplazarse gradualmente desde la demostración científica hacia la viabilidad comercial y el diseño de plantas piloto.

Los resultados más recientes refuerzan esta percepción. En 2021, JET estableció un nuevo récord al producir 59 megajulios de energía de fusión, superando su propio récord de 1997. Poco después, en diciembre de 2022, la National Ignition Facility en Estados Unidos logró por primera vez una ganancia neta de energía en un experimento de fusión por confinamiento inercial, alcanzando un factor $Q_{\text{científico}}$ (ganancia) superior a la unidad. Estos hitos no implican aún una aplicación comercial, pero sí confirman que los principios físicos fundamentales están validados.

En la actualidad, cerca de ciento treinta dispositivos experimentales de fusión se encuentran en operación, construcción o fase de planificación en todo el mundo, junto con múltiples diseños de plantas de demostración y reactores piloto. Este conjunto de avances sitúa la fusión en una transición crítica: de ser una aspiración científica de largo plazo, comienza a perfilarse como una opción tecnológica con implicaciones reales para los sistemas energéticos.

La reacción de fusión

Una reacción de fusión nuclear es un fenómeno en el que dos núcleos atómicos de baja masa se unen para dar lugar a un núcleo de mayor masa, proceso que va acompañado de una liberación significativa de energía. Este mecanismo contrasta con la fisión nuclear, en la que núcleos pesados se fragmentan en otros más ligeros para producir energía.

La fusión nuclear está gobernada por la interacción nuclear fuerte, la fuerza fundamental que mantiene cohesionados protones y neutrones dentro del núcleo atómico. Para que dos núcleos puedan fusionarse, deben aproximarse lo suficiente como para que esta fuerza supere la repulsión eléctrica existente entre protones, que poseen carga positiva. A escalas extremadamente pequeñas, la interacción nuclear fuerte domina sobre la repulsión electrostática, permitiendo que los núcleos se unan.

La energía que se libera en una reacción de fusión tiene su origen en una diferencia de masa. El núcleo resultante de la fusión presenta una masa ligeramente menor que la suma de las masas de los núcleos iniciales. Esta diferencia se transforma en energía de acuerdo con el principio de equivalencia entre masa y energía formulado por Albert Einstein, expresado mediante la relación $E=mc^2$.

En términos conceptuales, diversas combinaciones de núcleos ligeros pueden dar lugar a reacciones de fusión con potencial aplicación energética. En principio, cualquiera de las reacciones indicadas en la tabla siguiente podría servir como base para el diseño de un sistema de fusión destinado a la producción de energía, siempre que se cumplan las condiciones físicas y tecnológicas necesarias para su control y aprovechamiento.

Nº	Reacción	Productos
1	D + T	${}^4\text{He}$ (3,5 MeV) + n (14,1 MeV)
2	D + D	T (1,01 MeV) + p (3,02 MeV) (50 %)
		${}^3\text{He}$ (0,82 MeV) + n (2,45 MeV) (50 %)
3	D + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$ (3,6 MeV) + p (14,7 MeV)
4	T + T	${}^4\text{He}$ + 2 n + 11,3 MeV
5	${}^3\text{He}$ + ${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$ + 2 p
6	${}^3\text{He}$ + T	${}^4\text{He}$ + p + n + 12,1 MeV (51 %)
		${}^4\text{He}$ (4,8 MeV) + D (9,5 MeV) (43 %)
		${}^4\text{He}$ (0,5 MeV) + n (1,9 MeV) + p (11,9 MeV) (6 %)
7	D + ${}^6\text{Li}$	2 ${}^4\text{He}$ + 22,4 MeV
8	p + ${}^6\text{Li}$	${}^4\text{He}$ (1,7 MeV) + ${}^3\text{He}$ (2,3 MeV)
9	${}^3\text{He}$ + ${}^6\text{Li}$	2 ${}^4\text{He}$ + p + 16,9 MeV
10	p + ${}^{11}\text{B}$	3 ${}^3\text{He}$ + 8,7 MeV

Tabla 6. Reacciones de fusión posibles para la producción de energía.
Fuente: Fusion Physics, IAEA

Tipos de combustible de fusión

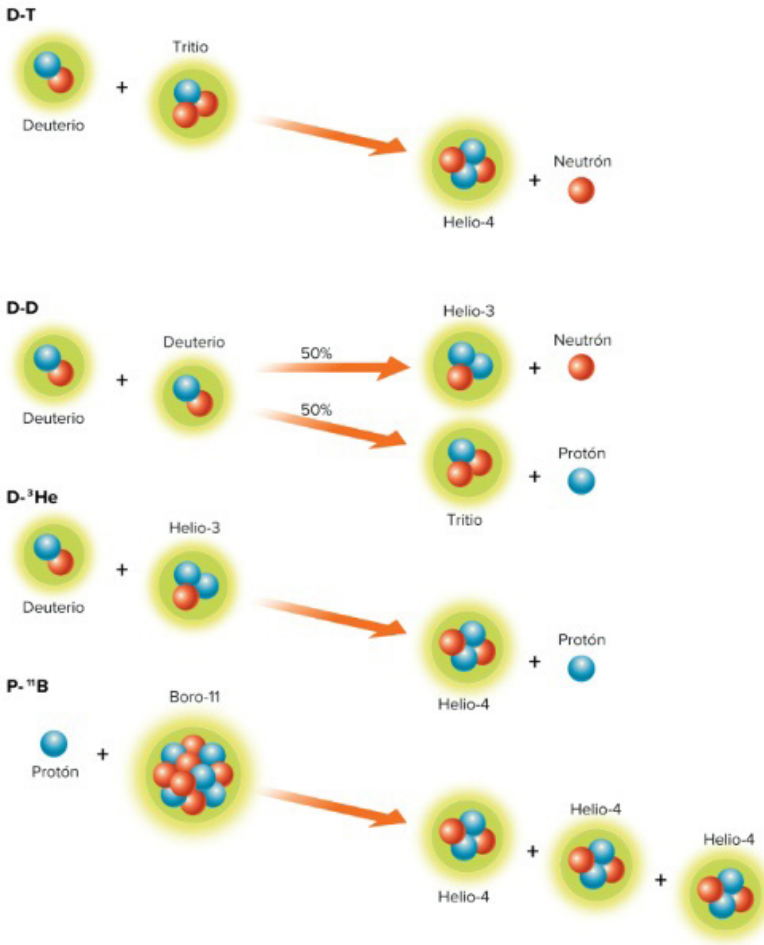


Figura 7: Ilustración de las reacciones de fusión mencionadas en la tabla 1.
Fuente: Infographic/Knowable

La reacción de fusión entre deuterio y tritio (D-T) es la más utilizada en los diseños actuales de dispositivos de fusión, ya que presenta la mayor probabilidad de reacción a temperaturas relativamente «bajas» en comparación con otras posibles combinaciones de combustible. Su sección eficaz alcanza un máximo en el entorno de los 100 keV, mientras que otras reacciones alternativas requieren temperaturas significativamente más elevadas y, aun así, presentan probabilidades de fusión menores. Esta diferencia explica por qué la gran mayoría de los conceptos de reactores de fusión en desarrollo se apoyan en el ciclo D-T.

Como se ha indicado previamente, la viabilidad energética de la fusión está condicionada por el criterio de Lawson, que establece los requisitos mínimos para que un sistema de fusión produzca más energía de la que consume. Este criterio actúa como una referencia fundamental para el diseño y la evaluación de máquinas de fusión, ya que permite identificar los límites físicos que deben superarse para que la fusión pueda convertirse en una fuente de energía útil.

El criterio de Lawson se articula en torno a tres variables clave:

- Temperatura (T): el plasma —un medio ionizado extremadamente caliente— debe alcanzar temperaturas muy elevadas para que los núcleos de combustible tengan suficiente energía cinética como para vencer su repulsión eléctrica y fusionarse.
- Densidad (n): la concentración de iones de combustible en el plasma debe ser lo bastante alta como para incrementar la frecuencia de colisiones y, con ello, la tasa de reacciones de fusión.

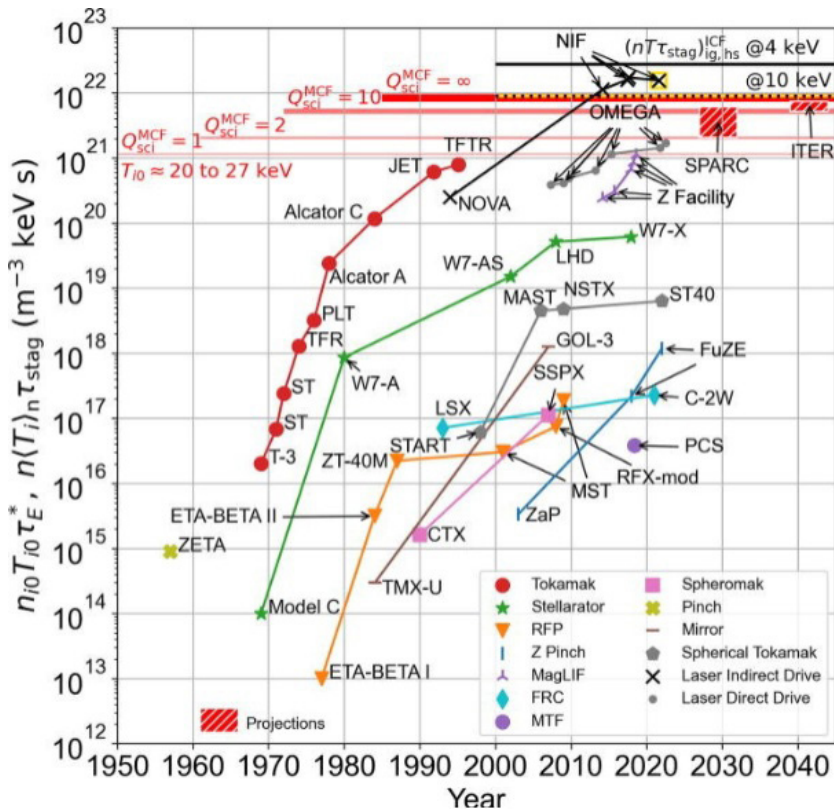


Figura 8: Avances hacia el punto de equilibrio y la ganancia de energía de fusión de diferentes máquinas experimentales de fusión según el criterio de Lawson. Fuente: Phys. Plasmas 32, 112106 (2025)

sostener la reacción sin aportes externos significativos, marcando el umbral hacia una producción neta de energía de fusión.

Principales enfoques tecnológicos

En la actualidad existen múltiples propuestas tecnológicas orientadas a la obtención de energía mediante fusión nuclear. Aunque difieren de forma significativa en su diseño y principios de funcionamiento, todas comparten un objetivo común: alcanzar un régimen de operación capaz de generar energía neta de manera eficiente y controlada.

La mayoría de estos enfoques se basan en dos grandes estrategias para manejar el plasma, el medio en el que se producen las reacciones de fusión. Por un lado, los sistemas de confinamiento magnético emplean campos magnéticos intensos para contener y estabilizar el plasma a altas temperaturas. Por otro, los métodos de confinamiento inercial utilizan impulsos extremadamente rápidos —mediante láseres o corrientes eléctricas— para comprimir el combustible hasta condiciones en las que la fusión puede tener lugar antes de que el plasma se expanda.

Existen también conceptos híbridos que combinan elementos de ambos enfoques, conocidos como sistemas magneto-inerciales, que buscan aprovechar las ventajas de cada técnica. Hasta la fecha, los mayores hitos experimentales en términos de energía de fusión producida se han alcanzado principalmente en dos tipos de dispositivos: los sistemas de confinamiento inercial y los tokamaks, que representan la configuración más madura dentro del confinamiento magnético.

Junto con estos enfoques dominantes, se desarrollan otras alternativas menos avanzadas desde el punto de vista experimental, pero con características potencialmente atractivas. Entre ellas se encuentran conceptos como el z-pinch, que, aunque todavía se encuentran en fases tempranas de desarrollo, continúan evolucionando y ofrecen posibles ventajas en simplicidad de diseño o escalabilidad.

Persisten aún desafíos técnicos de gran envergadura que deben resolverse antes de que la fusión pueda convertirse en una fuente de energía operativa. La generación y el control de plasmas sometidos a temperaturas y presiones extremas imponen exigencias muy elevadas a los sistemas tecnológicos actuales. A ello se suma la dificultad de mantener el plasma estable durante periodos prolongados y de limitar las pérdidas energéticas asociadas

Confinamiento magnético

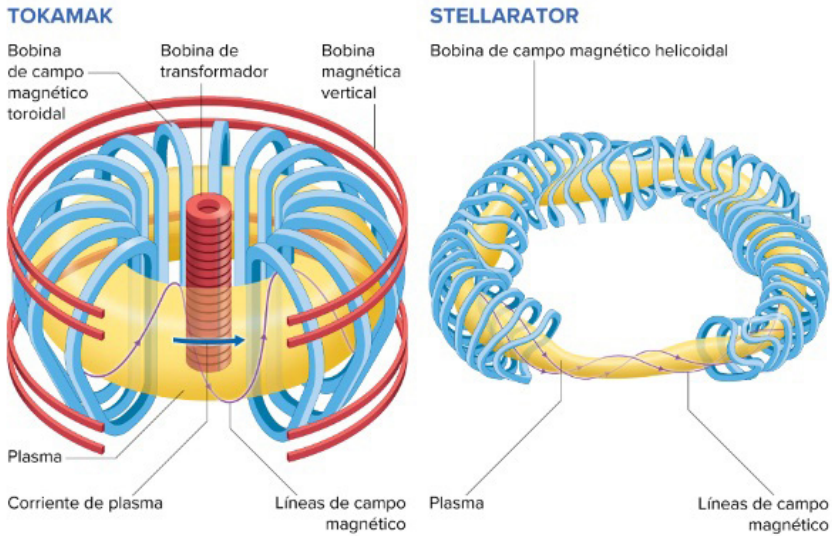


Figura 10: Máquinas de fusión por confinamiento magnético: tokamak (izq) y stellarator (der). Fuente: Infographic/Knowable

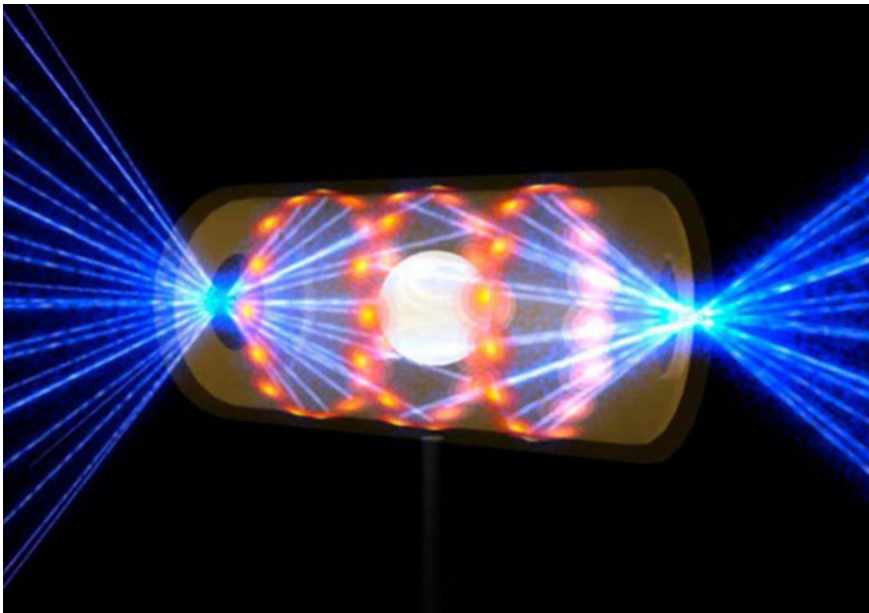


Figura 11: National Ignition Facility (EEUU). Máquina experimental basada en el concepto de fusión inercial en la que los rayos láser de la instalación entran por las aberturas situadas en ambos extremos de un hohlraum donde se encuentra el combustible de fusión, en este caso D-T. Fuente: Lawrence Livermore National Laboratory

a procesos de radiación y transporte térmico, factores que afectan directamente al rendimiento global del sistema. Asimismo, la disponibilidad de materiales capaces de resistir el intenso flujo de neutrones, las altas cargas térmicas y las tensiones mecánicas del entorno de un reactor de fusión constituye un elemento crítico para garantizar su operación continuada y su viabilidad económica a largo plazo.

No obstante, los progresos recientes indican una evolución sostenida. Las mejoras en los esquemas de confinamiento magnético, en particular en configuraciones como tokamaks y stellarators, han permitido incrementar tanto la estabilidad del plasma como los tiempos de confinamiento energético. De forma paralela, la fusión por confinamiento inercial, basada en la compresión rápida del combustible mediante sistemas láser de alta potencia, continúa mostrando resultados relevantes en el ámbito experimental. Además, se exploran ciclos de combustible alternativos, como los basados en reacciones de protones y boro, que, aunque presentan mayores retos tecnológicos, podrían dar lugar a reacciones de fusión con menores residuos y características operativas potencialmente más favorables.

Para una completa descripción de los principios físicos que gobiernan la energía fusión y las implicaciones tecnológicas que ellos conllevan, se recomiendan las siguientes lecturas:

- *Principles Of Fusion Energy: An Introduction To Fusion Energy For Students Of Science And Engineering*. A. A. Harms , D. R. Kingdon, K. F. Schoepf , G. H. Miley. ISBN-13: 978-9812380333
- *Fusion: Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*. Weston M. Stacey. ISBN-13: 978-0471880790
- *Fusion Physics*. IAEA.

Capítulo cuarto

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

Inmaculada Martínez Rubio

Resumen

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

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

Palabras clave

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

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

Abstract

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

Keywords

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

ENERGÍA Y ESTRATEGIA

CIBERSEGURIDAD Y RESILIENCIA DEL SISTEMA



CONTRARRESTANDO LA INGENIERÍA SOCIAL IMPULSADA POR LA IA



PREVENCIÓN DEL "MOVIMIENTO LATERAL" CON MICROSEGMENTACIÓN



DEFENSA CONTRA EL "ENVENENAMIENTO DE DATOS"

BENEFICIOS PARA LAS PLANTAS DE ENERGÍA (2025)

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

LA HUELLA AMBIENTAL DE LA IA



TÉCNICAS DE "ADELGAZAMIENTO" ALGORÍTMICO



HARDWARE: LA TRANSICIÓN AL BORDE



PROGRAMACIÓN CONSCIENTE DE LA HUELLA DE CARBONO



EL IMPUESTO ENERGÉTICO DEL "RAZONAMIENTO"



EL DESPLIEGUE DE LA IA VERDE

RESUMEN

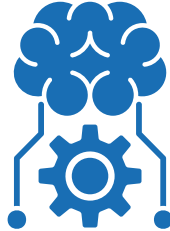
TÉCNICA	POTENCIAL AHORRO ENERGÉTICO	ESTADO (FINALES DE 2025)
MEZCLA DE EXPERTOS (MOE)	~90% REDUCCIÓN	ESTÁNDAR EN LOS NUEVOS MODELOS FRONTERIZOS
CUANTIZACIÓN (1 BIT / 2 BITS)	4X - 8X REDUCCIÓN	SE ESTÁ ADOPTANDO RÁPIDAMENTE PARA LA IA MÓVIL
IA EN EL DISPOSITIVO (DE BORDE)	100X - 1,000X	INTEGRADO EN LA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

IMPACTO DEL MODELO GRANDE VS. PEQUEÑO (2025)

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

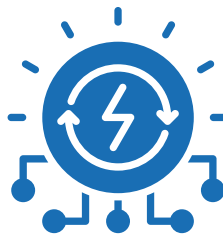
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

EVOLUCIONANDO DESDE LA COMPUTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO HACIA LA IA



HPC COMPARADO CON LA IA

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



LA IA EN EL SECTOR ENERGÉTICO DEL SIGLO XXI

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

1 Resumen ejecutivo: el imperativo de la IA

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

1.1 Factores fundamentales de la revolución energética de la IA

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

1.1.1 Descarbonización

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

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

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

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

1.1.2 Descentralización y digitalización

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

1.1.3 Electrificación

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

1.2 Entendiendo la IA y su poder de transformación

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.3 Evolucionando desde la computación de alto rendimiento hacia la IA

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

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

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

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

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

HPC en el sector eléctrico (La frontera moderna)

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

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

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

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

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

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

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

1.4 Evolucionando hacia una IA de modelos del mundo

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

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

¹¹ *Large Language Models.*

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

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

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

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

1.5 Una IA del siglo XXI segura y de confianza

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

1.5.1 Desarrollando modelos de predicción con creatividad renovada

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

¹³ *Common European Power Market Physics Model.*

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

diversos propósitos y necesidades con soltura y creatividad sin barreras.

1.5.2 Un nuevo concepto de infalibilidad en la predicción

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

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

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

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

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

1.6 Hacia una IA sostenible y de bajo consumo

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

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

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

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

2 El contexto estratégico: impulsores y maduración del mercado

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4 Tendencias actuales (enfoque en IA generativa y resiliencia)

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

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

3 El kit de herramientas de IA

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

3.1 Metodologías fundamentales de IA

3.1.1 Aprendizaje automático (ML)

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

3.1.2 Aprendizaje profundo (DL)

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

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

3.1.3 IA generativa (GenAI)

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

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

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

3.2.1 Gemelos digitales

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

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

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

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

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

3.2.2 IoT y redes de sensores

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

3.2.3 Computación al borde

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

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

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

3.2.4 Conectividad 5G y 6G

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

3.2.5 La cadena de bloques

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

4 Aplicaciones transformadoras en toda la cadena de valor energética

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

4.1 Transmisión, distribución y gestión de la red

4.1.1 Redes inteligentes

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

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

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

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

4.1.2 Detección de fallos y redes autorreparadoras

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

4.1.3 Gestión de cortes

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

4.2 Mercados y comercio de energía

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

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

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

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

4.3 Gestión de la demanda y compromiso del cliente

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

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

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

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

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

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

5.1 El panorama operativo y técnico

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

5.2 Ciberseguridad y resiliencia del sistema

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

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

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

a) Contrarrestando la ingeniería social impulsada por IA

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

b) Prevención del «movimiento lateral» con microsegmentación

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

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

c) Defensa contra el «envenenamiento de datos»

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

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

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

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

5.3 La huella ambiental de la IA

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

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

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

5.3.1 Técnicas de «adelgazamiento» algorítmico

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

DeepSeek y MoE (mezcla de expertos)

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

Cuantización extrema (1 bit y 2 bits)

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

Destilación de conocimiento

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

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

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

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

5.3.3 Programación consciente de la huella de carbono

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

5.3.4 El impuesto energético del «razonamiento»

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

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

Tabla de Resumen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Impacto del modelo grande vs. pequeño (2025)

5.4 Consideraciones éticas y sesgo algorítmico

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

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

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

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

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

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

6.1 El panorama regulatorio en evolución

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6.2 La carrera geopolítica por la «seguridad informática»

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

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

- El «precio de entrada» energético para la soberanía

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

- La «red inteligente» como activo soberano

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

- Cambio en la inversión energética

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

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

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

7 Recomendaciones estratégicas

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

7.1 Estrategia de tecnología e innovación

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

7.2 Estrategia organizacional y de talento

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

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

7.3 Gobernanza y gestión de riesgos

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

7.4 Colaboración y desarrollo de ecosistemas

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

Bibliografía

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

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

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

Capítulo quinto

Infraestructuras portuarias energéticas como pilar de la seguridad energética mundial. Análisis estratégico, riesgos y perspectivas

Miguel Golmayo

Resumen

Las infraestructuras portuarias energéticas se han consolidado como elementos esenciales para la seguridad energética mundial. En un contexto en el que los hidrocarburos, petróleo, gas y carbón continúan representando más del 80 % del consumo energético global, los puertos especializados en la carga, descarga y redistribución de hidrocarburos se convierten en nodos críticos para el funcionamiento de la economía internacional.

Aunque, por lo general, la geopolítica tradicional ha centrado su atención en los grandes puntos de estrangulamiento marítimos (*choke points*) como Panamá, Malaca, Bab el-Mandeb o Gibraltar, este análisis subraya que los puertos energéticos son igual o incluso más estratégicos. A diferencia de las rutas marítimas, estas infraestructuras carecen en muchas ocasiones de alternativas operativas y la interrupción de su funcionamiento tendría un impacto inmediato en el suministro global.

Los riesgos que enfrentan son crecientes y multidimensionales: terrorismo, ciberataques, conflictos regionales, fenómenos climáticos extremos y tensiones geopolíticas. En un escenario de tran-

sición energética lenta y con una dependencia persistente de los combustibles fósiles, la resiliencia, modernización y protección de estas instalaciones se vuelven prioritarias.

Palabras clave

Puerto, Petróleo, Gas natural, Seguridad.

Port energy infrastructure as a pillar of global energy security Strategic analysis, risks and prospects

Abstract

Port energy infrastructures have been consolidated as essential elements for global energy security. In a context where hydrocarbons, oil, gas and coal continue to account for more than 80% of global energy consumption, ports specialized in loading, unloading and redistribution of hydrocarbons become critical nodes for the functioning of the international economy.

Although traditional geopolitics has generally focused its attention on the major maritime bottlenecks (choke points) such as Panama, Malacca, Bab el-Mandeb or Gibraltar, this analysis underlines that energy ports are equally or even more strategic. Unlike maritime routes, these infrastructures often lack operational alternatives and the interruption of their operation would have an immediate impact on global supply.

The risks they face are growing and multidimensional: terrorism, cyber-attacks, regional conflicts, extreme weather events and geopolitical tensions. In a scenario of slow energy transition and persistent dependence on fossil fuels, the resilience, modernization and protection of these facilities become a priority.

Keywords

Port, Oil, Natural gas, Security.

IMPORTANCIA DE LOS PUERTOS DE COMBUSTIBLES FÓSILES PARA LA SEGURIDAD ENERGÉTICA MUNDIAL



¿QUÉ SON ESTOS PUERTOS?



INFRAESTRUCTURAS MARÍTIMAS ESPECIALIZADAS EN CARGAR Y DESCARGAR PETRÓLEO, GAS NATURAL Y CARBÓN.



CONECTAN **PRODUCTORES, REFINERÍAS, ALMACENAMIENTO Y MERCADOS INTERNACIONALES.**



FUNCIONAN COMO **NODOS CRÍTICOS** DE LA CADENA ENERGÉTICA GLOBAL.

POR QUÉ SON ESENCIALES PARA LA SEGURIDAD ENERGÉTICA



PERMITEN QUE LOS PAÍSES **IMPORTEN O EXPORTEN COMBUSTIBLES** SEGÚN SU DEMANDA.



EVITAN INTERRUPCIONES QUE AFECTARÍAN ELECTRICIDAD, TRANSPORTE E INDUSTRIA.



GARANTIZAN EL **FLUJO CONTINUO DE ENERGÍA.**

DIVERSIFICAN RUTAS Y PROVEEDORES



REDUCEN LA DEPENDENCIA DE UN SOLO PAÍS O REGIÓN.



AUMENTAN LA **RESILIENCIA** ANTE CRISIS GEOPOLÍTICAS.

SOSTIENEN LA ESTABILIDAD ECONÓMICA



EL **70%** DEL COMERCIO MUNDIAL DE PETRÓLEO **SE MUEVE POR MAR.**



LOS PUERTOS PERMITEN **PRECIOS MÁS ESTABLES Y ACCESO CONSTANTE A ENERGÍA.**



RIESGOS QUE ENFRENTAN

TENSIONES GEOPOLÍTICAS



BLOQUEOS, SANCIONES O CONFLICTOS PUEDEN PARALIZAR PUERTOS CLAVE.

VULNERABILIDAD FÍSICA



TERRORISMO, CIBERATAQUES O ACCIDENTES PUEDEN DETENER OPERACIONES.



REQUIEREN **ALTOS ESTÁNDARES DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO.**

CÓMO FORTALECEN LA SEGURIDAD ENERGÉTICA

INFRAESTRUCTURA MODERNA



TERMINALES DE **GNL**, **TANQUES DE ALMACENAMIENTO** Y **MUELLES ESPECIALIZADOS.**



CAPACIDAD PARA RECIBIR **BUQUES DE GRAN TAMAÑO** (VLCC, LNG CARRIERS).

COOPERACIÓN INTERNACIONAL



ACUERDOS ENTRE PAÍSES PARA MANTENER RUTAS ABIERTAS.



EJERCICIOS CONJUNTOS DE **SEGURIDAD MARÍTIMA Y SEGURIDAD FÍSICA** EN LOS PUERTOS.

CONCLUSIONES



SIN PUERTOS DE COMBUSTIBLES FÓSILES, EL SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL COLAPSARÍA POR FALTA DE SUMINISTROS.



SON PIEZAS ESTRATÉGICAS QUE SOSTIENEN LA ECONOMÍA MUNDIAL.

1 Introducción

En 2025, el consumo de barriles de crudo supera ligeramente los 103 millones de barriles diarios en todo el mundo, de ellos aproximadamente el 60 %-70 % se transporta por mar. En cuanto al gas natural, en 2025 se esperaba alcanzar los 4 400 millones de metros cúbicos, de los que aproximadamente el 15 % se transporta por mar, y este porcentaje va en aumento: solo en 2025 estaba previsto que la flota de metaneros aumentara en 96 nuevos buques en el mundo.

En 2024, según datos oficiales de CORES¹ y la CNMC², España importó por vía marítima 64,6 millones de toneladas de crudo, equivalentes a unos 473 millones de barriles, lo que representa prácticamente el 100 % del consumo nacional de petróleo, dado que el país carece de producción significativa y de oleoductos internacionales de entrada. En cuanto al gas natural, por los puertos españoles se descargaron aproximadamente 16,8 mil millones de metros cúbicos (bcm) de GNL, mientras que por el gasoducto Medgaz desde Argelia entraron unos 9,9 bcm, cubriendo entre ambos un consumo total de 29 bcm, de los cuales se reexportaron alrededor de 4,4 bcm, consolidando a España como un *hub* energético europeo dependiente de sus infraestructuras portuarias para la entrada y redistribución de combustibles fósiles.

Dados los niveles de consumo de gas y petróleo en el mundo en 2025 y las previsiones para los años venideros, pensar que el mundo se deshará de su empleo a corto o medio plazo no parece realista, lo que lleva a la necesidad de asegurar, entre otras, los puntos de carga y descarga.

Las estimaciones actuales en cuanto al método de transporte de petróleo y gas natural en el mundo, Europa y España son las siguientes³:

¹ CORES; Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos. Es el organismo oficial en España encargado de recopilar y publicar estadísticas de petróleo y gas.

² CNMC; Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Supervisa el sistema gasista y eléctrico.

³ Ver: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?oldid=615492&utm> y https://www.brusselstimes.com/eu-affairs/1889289/eus-petroleum-imports-fall-as-lng-shipments-rise-in-2025?utm_source=copilot.com

PETRÓLEO	MARÍTIMO	OLEODUCTO	FERROCARRIL/ CAMIÓN
Mundial	60-70 %	20-30 %	5-10 %
Europa	70 %	25 %	5 %
España	99-100 %		

GAS NATURAL	MARÍTIMO GNL	GASEODUCTO	FERROCARRIL/ CAMIÓN
Mundial	15-20 %	80-85 %	Marginal
Europa	30-35 %	65-70 %	
España	65-70 %	30-35 %	

Uno de los temas clásicos en la geopolítica de los hidrocarburos ha sido siempre la importancia de los puntos estratégicos en las rutas marítimas, conocidos como *choke points*, como pueden ser, entre otros, el canal de Panamá, las entradas en el mar Rojo, el estrecho de Gibraltar, el estrecho de Malaca y el estrecho de Bab el-Mandeb, este último tan de moda en toda situación convulsa en la que están involucrados Irán y su permanente amenaza de bloquearlo con ayuda de los rebeldes hutíes. Existen, además, numerosos puntos secundarios. Esto son únicamente algunos de los ejemplos que periódicamente salen a escena cuando una crisis o posible conflicto armado amenaza con sumir al mundo en una nueva crisis energética.

Pero existen otros puntos con una importancia vital en el aseguramiento de los suministros de hidrocarburos por el mundo, que, sin salir prácticamente nunca en las noticias, son tan importantes como los puntos estratégicos en las rutas marítimas; se trata en concreto de los puertos de carga y descarga de petróleo y gas natural y sus derivados. Estos, además, cuentan con un hándicap añadido: no tienen alternativa como sí ocurre, en ocasiones, con las rutas marítimas.

En un mundo interconectado, donde la demanda de energía crece de forma sostenida y las fuentes fósiles aún representan más del 80 % del consumo mundial, los puertos de carga y descarga de hidrocarburos desempeñan un papel fundamental. Estos puntos de tránsito permiten la movilización de petróleo crudo, gas natural licuado (GNL), gas licuado de petróleo (GLP) y derivados refinados entre países productores y consumidores.

A pesar de su importancia, los puertos energéticos parece que permanecen en segundo plano. Esta omisión representa una vulnerabilidad estratégica, especialmente en un contexto de crecientes amenazas de todo tipo, terrorismo físico y cibernético, tensiones geopolíticas, fenómenos naturales extremos, conflictos armados, etc.

La seguridad energética ha emergido como un componente esencial de la estabilidad geopolítica y económica global. Algunos de los principales puertos petroleros del mundo desempeñan un papel crucial en la logística energética global, gestionando volúmenes masivos de crudo, gas y productos petrolíferos refinados.

Puertos como el de Róterdam en los Países Bajos, el puerto más grande de Europa y un importante centro de refinado y distribución de petróleo en todo el continente europeo. El puerto de Houston en EE. UU., un actor clave en el corredor energético de la costa del Golfo de EE. UU., que gestiona tanto la importación como la exportación de crudo y productos petrolíferos. Ras Tanura, en Arabia Saudí, una de las terminales de exportación de petróleo más grandes del mundo, o el puerto de Singapur, un centro estratégico de transbordo en Asia, vital para el almacenamiento y el comercio de petróleo, por citar algunos.

Algo parecido se puede decir con respecto a similares infraestructuras, pero en relación con el gas natural licuado (GNL). Algunos de los principales puertos de GNL son cruciales para el comercio energético mundial. Estos puertos están equipados con terminales especializadas para la exportación e importación de GNL, que a menudo implican una enorme infraestructura para la licuefacción y regasificación del gas natural.

La ciudad industrial de Ras Laffan en Catar, con la terminal de exportación de GNL más grande del mundo, gestiona una parte significativa del suministro mundial de GNL. El puerto de Sabine Pass en EE. UU., ubicado en Luisiana, es una de las mayores instalaciones de exportación de GNL de Norteamérica. El puerto de Sines en Portugal es un centro clave para la importación de GNL en Europa, con acceso a aguas profundas y una posición estratégica en el Atlántico. La terminal de GNL de Yamal, Rusia, situada en el Ártico, es un importante punto de exportación de GNL ruso, a pesar de las duras condiciones de trabajo en esa parte del mundo. El puerto de Dahej en la India, una de las terminales de GNL con mayor actividad de la India es crucial para satisfacer la creciente demanda energética del país. El puerto de Incheon en

Corea del Sur es una importante terminal de importación de GNL que presta servicio a uno de los mayores consumidores de GNL del mundo. O el puerto de Yokohama en Japón, principal país importador de GNL a nivel mundial, desempeña un papel clave en su cadena de suministro. Todos ellos son solo algunos ejemplos que tener en cuenta.

2 El desconocimiento del riesgo

Cuando se habla de infraestructuras críticas, muchos expertos e incluso los medios de comunicación parecen atrapados en un bucle: oleoductos, gasoductos y estrechos. Son normalmente los protagonistas indiscutibles de titulares y debates, como si fueran los únicos guardianes de la seguridad energética. Pero esa obsesión es, en realidad, una distracción peligrosa. Al centrar toda la atención en ellos, se dejan en la penumbra otros nodos estratégicos cuya vulnerabilidad podría tener consecuencias devastadoras.

No cabe duda de que los oleoductos y gasoductos, así como las rutas marítimas, son vitales. Sin embargo, convertirlos en el único foco de preocupación es un error. La seguridad energética nacional y global no se reduce únicamente a ellos. Esta mirada sesgada genera una falsa sensación de control y seguridad e impide ver el mapa completo de riesgos.

Pero no solo los puertos petroleros o gasísticos son vitales, porque los puertos en general son la columna vertebral del comercio mundial. Por ellos circula todo lo que sostiene la vida cotidiana: alimentos, combustibles, medicinas, tecnología. Sin embargo, permanecen invisibles en el debate público. ¿Qué pasaría si un puerto clave quedara paralizado por un ataque físico o cibernético o, simplemente, por un accidente? La respuesta es sencilla: cadenas de suministro rotas, mercados desestabilizados y un impacto económico inmediato. La invisibilidad de los puertos no es inocua; es una vulnerabilidad que se está eligiendo ignorar.

La falta de inversión en protección física y digital es otra consecuencia del desconocimiento del riesgo. Mientras los ataques cibernéticos se vuelven más sofisticados y las amenazas físicas más impredecibles, se sigue confiando, en ocasiones, en sistemas obsoletos. Es como dejar la puerta abierta esperando que nadie entre. La brecha entre lo que se cree seguro y lo que realmente está protegido es cada vez más amplia. Qué decir de la seguridad física; solo hay que mirar la situación de muchos aeropuertos europeos durante 2025 con el sobrevuelo de dro-

nes de origen desconocido para darse cuenta de la manifiesta desprotección ante este tipo de posibles ataques en muchos de los puertos.

Quizá el mayor error sea pensar que cada país puede enfrentar estos riesgos por sí solo. La ausencia de cooperación internacional es un lujo que no podemos permitirnos. Las infraestructuras críticas son globales por naturaleza; lo que ocurre en un puerto europeo repercute en Asia y América. Sin alianzas, protocolos comunes y un intercambio real de información, estamos condenados a reaccionar tarde y mal.

El desconocimiento del riesgo no es solo una carencia de información, es una carencia de interés en la información y su análisis, lo que representa una actitud peligrosa. Mientras se siga mirando únicamente hacia los oleoductos y gasoductos o los estrechos, se estará ignorando una parte vital de los verdaderos puntos débiles del sistema. Reconocer la importancia de los puertos, invertir en seguridad y apostar por la cooperación internacional no son opciones, son obligaciones. La pregunta no es si se debe hacer, sino cuánto tiempo más se va a tardar en reaccionar. Es cierto, muchas medidas ya han sido tomadas, pero un estudio más profundo de la situación de muchos puertos lleva a pensar que queda mucho por hacer.

3 Fortalecer la seguridad portuaria

Blindar los puertos es una urgencia global. Como se ha dicho anteriormente, los puertos son mucho más que simples puntos de entrada y salida de mercancías; son auténticos corazones logísticos que sostienen el comercio mundial. Sin embargo, su seguridad sigue siendo un tema relegado en la agenda pública. Ante un escenario de amenazas crecientes, desde ataques cibernéticos hasta sabotajes físicos, es imprescindible plantear medidas concretas para fortalecer su resiliencia. La primera línea de defensa debe ser tanto digital como física.

Desde el punto de vista digital, los puertos dependen de sistemas informáticos para gestionar operaciones, coordinar cargas y garantizar la trazabilidad de mercancías. Sin auditorías periódicas de ciberseguridad, se corre el riesgo de que algunas vulnerabilidades pasen desapercibidas hasta que un ataque paralice toda la actividad. La transparencia y la evaluación constante son claves para anticipar amenazas.

Un puerto no puede depender de un único sistema informático para funcionar. La redundancia —es decir, contar con sistemas alternativos que entren en acción si los principales fallan— es vital para evitar colapsos. En un entorno donde cada minuto de inactividad supone, entre otras cosas, pérdidas millonarias, retrasos y falta de confianza, la capacidad de reacción inmediata marca la diferencia entre la resiliencia y el caos.

Pero, además de la seguridad digital, es necesaria la seguridad física. Los puertos deben blindarse contra intrusiones, sabotajes y amenazas externas mediante controles de acceso más estrictos, vigilancia avanzada y planes de contingencia. La infraestructura física es tan vulnerable como la digital y ambas deben protegerse de manera integrada.

Los riesgos portuarios trascienden fronteras. Un ataque en un puerto estratégico puede repercutir en mercados de varios continentes. Por ello, la cooperación internacional y la creación de protocolos compartidos son esenciales. La seguridad portuaria no puede ser un esfuerzo aislado: requiere coordinación global, intercambio de información y respuestas conjuntas.

La seguridad no depende solo de sistemas y protocolos; son principalmente personas. Invertir en formación especializada para trabajadores portuarios y en campañas públicas de concienciación fortalece la cultura de prevención. Un personal preparado es capaz de detectar anomalías, responder con rapidez y reducir el impacto de cualquier incidente.

Como ya se ha dicho, blindar los puertos no es un lujo, sino una necesidad. Las propuestas aquí planteadas —auditorías digitales, redundancia, protección física, cooperación internacional y formación— no son simples recomendaciones; son pilares imprescindibles para garantizar que el comercio mundial siga fluyendo con seguridad. Ignorar esta urgencia sería apostar por la fragilidad en un mundo que exige resiliencia.

4 Riesgos de la concentración portuaria y la expansión sin diversificación

Volviendo al caso que a este capítulo ocupa, la concentración portuaria en torno al petróleo, sus derivados y el gas natural se ha convertido en una apuesta arriesgada. Lo que en apariencia es eficiencia logística, en realidad es una sobrecarga estratégica que multiplica los riesgos. Cuando demasiados flujos energéticos

dependen de unos pocos nodos, cualquier interrupción —sea por accidente, ataque o crisis geopolítica— puede desencadenar un colapso de alcance global.

Los puertos especializados en hidrocarburos concentran volúmenes gigantescos de crudo y gas natural licuado. Esa concentración convierte cada instalación en un objetivo de alto valor. Un incidente en un puerto clave no solo afecta a la región inmediata: puede paralizar cadenas de suministro enteras y disparar precios internacionales. La eficiencia se transforma en fragilidad.

La dependencia de unos pocos puertos energéticos genera vulnerabilidad sistémica. No se habla solo de riesgos físicos, como sabotajes o desastres naturales, sino también de amenazas híbridas: ciberataques que bloqueen sistemas de gestión, campañas de desinformación que desestabilicen mercados o presiones geopolíticas que utilicen la infraestructura como arma. La concentración portuaria convierte cada amenaza en un riesgo amplificado.

La incorporación del hidrógeno verde y otros combustibles emergentes debería ser una oportunidad para diversificar nodos logísticos. Sin embargo, la tendencia apunta a repetir el mismo patrón: concentrar operaciones en pocos puertos especializados. Esto no solo perpetúa la vulnerabilidad, sino que añade nuevas capas de riesgo en productos aún más sensibles y estratégicos.

La concentración portuaria en petróleo y sus derivados, gas natural y ahora hidrógeno verde es una apuesta que parece eficiente, pero es profundamente peligrosa. Sin diversificación logística, cada puerto se convierte en un cuello de botella y en un blanco perfecto. Blindar estas infraestructuras y expandir la red de nodos energéticos no es una opción: es la única forma de evitar que el corazón del comercio global se convierta en su talón de Aquiles.

Se podría resumir en la siguiente tabla:

Dimensión de riesgo	Puertos concentrados	Puertos diversificados
Impacto ante interrupción	Alto	Bajo
Atracción para amenazas	Alta	Baja
Redundancia operativa	Limitada	Alta
Coste de protección	Elevado, concentrado	Elevado, distribuido
Resiliencia sistémica	Frágil	Robusta

5 Los puertos energéticos y la trampa de la expansión

La construcción de nuevas infraestructuras portuarias dedicadas a hidrocarburos se presenta como una necesidad estratégica en un mundo que aún depende, y dependerá durante muchos años, del petróleo y el gas natural. Sin embargo, el camino hacia esa expansión está plagado de obstáculos que ponen en duda su viabilidad y, sobre todo, su sostenibilidad.

Levantar un puerto especializado en hidrocarburos no es un proyecto menor. Las cifras superan los 10 mil millones de dólares, lo que convierte cada iniciativa en una apuesta de alto riesgo financiero. En un contexto de transición energética, comprometer semejantes recursos en infraestructuras fósiles puede ser visto como una inversión de futuro incierto.

Los proyectos portuarios, en especial los relacionados con energía, suelen enfrentarse a la oposición de comunidades locales y organizaciones ambientales. La construcción implica impacto en ecosistemas costeros, emisiones adicionales y riesgos de contaminación. La resistencia social no solo retrasa los proyectos, sino que también erosiona su legitimidad e influye sobre decisiones políticas, más preocupadas en el voto que en la seguridad energética.

Un puerto no es una isla; necesita conexiones terrestres, ferroviarias y energéticas para ser funcional. La dificultad de integrar estas infraestructuras en territorios ya saturados o con limitaciones geográficas añade complejidad y costes adicionales. Sin una red logística eficiente, el puerto se convierte en un gigante con pies de barro.

La construcción de un puerto energético puede tardar más de una década en completarse. En un mercado global donde la demanda y las tecnologías cambian con rapidez, estos plazos prolongados convierten cada proyecto en una apuesta incierta. Lo que hoy parece necesario, mañana puede ser obsoleto. Los puertos de hidrocarburos están sujetos a tensiones geopolíticas y a la volatilidad de los mercados energéticos. Un cambio de gobierno, una crisis internacional o una caída en los precios del petróleo pueden transformar un proyecto multimillonario en un lastre económico. La falta de estabilidad política y financiera es un obstáculo tan grande como el cemento que sostiene las infraestructuras.

La expansión portuaria centrada en hidrocarburos enfrenta un dilema: ¿vale la pena invertir miles de millones en infraestructu-

ras que podrían quedar obsoletas en la transición hacia energías limpias? Los obstáculos —financieros, sociales, logísticos, temporales, políticos, etc.— no son simples barreras técnicas, son advertencias de que al modelo de concentración fósil, que algunos piensan que está agotado, en realidad le quedan muchos años de vida. La expansión portuaria puede ser una buena opción. Pero algunos piensan que es mejor blindar el presente que afrontar grandes inversiones que hipotecan el futuro. Si algún día, esperamos que no suceda nunca, uno de esos puertos salta por los aires, habrá que ver cómo se reparten las culpas.

6 Una realidad poco conocida

6.1 Función estratégica de los puertos energéticos

Los puertos energéticos no son simples nodos logísticos donde convergen múltiples sistemas —transporte marítimo, almacenamiento, procesamiento, distribución y control digital—. Su función no se limita al embarque y desembarque de productos energéticos, sino que incluye:

- Almacenamiento temporal en tanques de gran capacidad.
- Interconexión con refinerías y plantas regasificadoras.
- Distribución terrestre mediante oleoductos, gasoductos y camiones cisterna.
- Control digital mediante sistemas SCADA⁴ y redes OT⁵.

La eficiencia operativa de estos puertos determina la continuidad del suministro energético en regiones enteras. Su paralización, por cualquier causa, puede suponer un desastre sin precedentes que a buen seguro generará efecto dominó que afectará no solo al aseguramiento energético, sino a todos los hogares, servicios e industrias esenciales, y minará la confianza de la población en el sistema político, que, a su vez, generaría gran inestabilidad, con la seguridad de que será aprovechada siempre por los movimientos radicales de un extremo u otro con la única finalidad de generar caos.

⁴ SCADA (*supervisory control and data acquisition*) es un sistema que permite: monitorear procesos industriales en tiempo real; controlar dispositivos como válvulas, motores, sensores y PLC (controladores lógicos programables); recopilar datos desde múltiples ubicaciones y enviarlos a una estación central, y visualizar y analizar el rendimiento de procesos para tomar decisiones informadas.

⁵ Redes OT (tecnología operativa) se refiere al conjunto de *hardware* y *software* que gestiona procesos físicos en industrias como energía, manufactura, transporte, etc.

7 Principales puertos energéticos del mundo

Con idea de no extenderse en exceso, se centrará el estudio en los que se consideran algunos de los principales puertos energéticos del mundo por sus capacidades, localización y relevancia estratégica:



7.1 Ras Tanura (Arabia Saudí)

Ras Tanura, ubicado en la costa oriental de Arabia Saudí, no es solo una ciudad portuaria; es una pieza clave en el engranaje energético global. Desde su fundación, en la década de 1940, como enclave estratégico para la exportación de petróleo, ha evolucionado hasta convertirse en uno de los puertos petroleros más grandes y sofisticados del mundo. Operado principalmente por Saudi Aramco, representa el núcleo logístico de una nación cuya economía gira en torno al crudo.

El puerto de Ras Tanura nació como parte del ambicioso proyecto de infraestructura petrolera liderado por la compañía Aramco. En sus inicios, fue diseñado para alojar a trabajadores extranjeros, especialmente estadounidenses, en una comunidad cerrada con servicios al estilo occidental. Con el paso del tiempo, se transformó en un centro de operaciones de exportación de petróleo crudo, con instalaciones que rivalizan con las de cualquier puerto industrial del planeta.

Ras Tanura maneja una porción significativa del petróleo que Arabia Saudí exporta al mundo, más de 250 millones de toneladas de crudo al año. Gracias a sus aguas profundas y a la construcción de islas artificiales, puede recibir superpetroleros de gran calado VLCC⁶. Además de petróleo crudo, también gestiona productos refinados provenientes de su refinería adyacente, una de las más grandes del país.

La infraestructura del puerto incluye:

- Plataformas *offshore* operadas por Aramco y socios internacionales como Schlumberger y Halliburton.
- Un aeropuerto privado para operaciones logísticas.
- Conectividad terrestre con centros industriales como Jubail y Dhahran.
- Sistemas de automatización industrial basados en SCADA y redes OT.

El petróleo que sale de Ras Tanura abastece a economías clave como China, Japón, Corea del Sur, varios países europeos y Estados Unidos. Empresas multinacionales como Shell, ExxonMobil y Total han mantenido acuerdos comerciales con Saudi Aramco, consolidando la posición del puerto como un nodo esencial en la red energética global.

La seguridad en Ras Tanura es una prioridad absoluta. En el plano físico, el puerto cuenta con vallas perimetrales, vigilancia armada, control biométrico de accesos y patrullas regulares. Pero es en el ámbito digital donde se despliega una arquitectura de protección avanzada.

Los sistemas SCADA supervisan en tiempo real los procesos industriales, mientras que las redes OT conectan sensores, PLC y actuadores con centros de control. Esta infraestructura está segmentada para evitar que un ataque en la red IT afecte a la

⁶ Las terminales para buques VLCC (*very large crude carrier*) —capaces de transportar hasta 320 000 toneladas de peso muerto— requieren infraestructura especializada por su tamaño y calado.

Generalmente más de 20 metros de profundidad para permitir el calado de estos buques.

Sistemas de amarre: SBM (*single buoy mooring*) o CALM (*catenary anchor leg mooring*) para operaciones seguras en alta mar.

Capacidad de bombeo: alta velocidad de carga/descarga para manejar grandes volúmenes de crudo.

Infraestructura terrestre: oleoductos conectados a campos petroleros o refinerías.

red OT⁷. Además, se emplean *firewalls* industriales, sistemas de detección de intrusos, inteligencia artificial para análisis de tráfico y redundancia de servidores para garantizar la continuidad operativa.

A pesar de sus medidas de seguridad, Ras Tanura no es inmune a los riesgos. En marzo de 2021, se informó de un intento de ataque con drones contra instalaciones de Aramco en la zona, que fue interceptado, pero dejó en evidencia la vulnerabilidad aérea. Además, el *malware* Shamoon⁸, que afectó a Aramco en 2012, demostró que los sistemas industriales pueden ser blanco de ciberataques sofisticados.

Las principales debilidades incluyen:

- La interconexión creciente entre redes IT y OT⁹.
- La exposición y concentración de infraestructuras críticas como plataformas *offshore*.
- La dependencia económica del petróleo, que convierte cualquier interrupción en una amenaza nacional.

Mantener la continuidad operativa es vital. La protección de datos industriales, la gestión ambiental y la resiliencia ante crisis geopolíticas o sanitarias son pilares fundamentales. Ras Tanura debe estar preparado para responder ante cualquier eventualidad, desde sabotajes hasta pandemias.

Ras Tanura no es solo un puerto, es un símbolo de la infraestructura energética global. Su relevancia estratégica exige una vigilancia constante, inversión en seguridad y adaptación tecnológica, en un mundo cada vez más interconectado y vulnerable. Representa el equilibrio entre tradición industrial y modernización digital, entre potencia logística y fortaleza cibernética. Sin olvidar en ningún momento la clásica seguridad física ante ataques de todo tipo, desde burdos intentos a cohetes o misiles de largo alcance.

7

⁸ Shamoon es uno de los *malwares* más destructivos jamás detectados, conocido por su capacidad de borrar completamente los discos duros de los sistemas infectados. También se lo conoce como DistTrack y fue descubierto por primera vez en 2012, con nuevas variantes apareciendo en 2016 y 2018

⁹ Las redes IT (tecnologías de la información) gestionan datos y sistemas digitales para el negocio, mientras que las redes OT (tecnologías operativas) controlan máquinas, procesos físicos y producción industrial.

En los últimos diez años, Arabia Saudí ha sufrido varios ataques significativos contra sus instalaciones petroleras, principalmente atribuidos a los rebeldes hutíes de Yemen respaldados por Irán. Estos ataques han demostrado la vulnerabilidad de la infraestructura energética saudí y han tenido repercusiones globales en el mercado del petróleo.

Estos son los principales ataques a instalaciones petroleras saudíes:

- Mayo de 2019: rebeldes hutíes atacaron con drones un oleoducto de Saudi Aramco, obligando a suspender temporalmente el bombeo de crudo.
- Septiembre de 2019, Abqaiq y Khurais, el ataque más grave de la historia reciente: drones y misiles golpearon la refinería de Abqaiq y el campo de Khurais, reduciendo la producción de Arabia Saudí en 5,7 millones de barriles diarios, casi la mitad de su capacidad.
- Enero de 2020, campo de Al Shayba: una operación con diez drones hutíes atacó el campo petrolífero de Al Shayba, en la Provincia Oriental, afectando una de las reservas estratégicas más importantes.
- Marzo de 2021: los rebeldes hutíes atacaron las instalaciones de la petrolera estatal Saudi Aramco en Ras Tanura.
- Marzo de 2022, Jeddah (cerca del circuito de Fórmula 1): drones y misiles provocaron un incendio en una planta de almacenamiento de Aramco en Jeddah, justo antes del Gran Premio de Arabia Saudí.

7.2 Sabine Pass (EE. UU.)

Es el puerto que impulsa la revolución del gas natural en Estados Unidos. En la costa del golfo de México, justo en la frontera entre Texas y Luisiana, se encuentra Sabine Pass, una terminal portuaria que ha redefinido el papel de Estados Unidos en el mercado energético global. A diferencia de los puertos tradicionales centrados en el petróleo crudo, Sabine Pass se especializa en la exportación de gas natural licuado (GNL), posicionándose como un eje estratégico en la transición energética mundial. Operado por Cheniere Energy, es hoy en día el primer terminal de exportación de GNL en EE. UU., con una capacidad superior a treinta millones de toneladas anuales, lo que lo convierte en un puerto

clave para abastecer, entre otros, a Europa tras la crisis del gas ruso.

La historia moderna de Sabine Pass comienza en 2016, cuando Cheniere Energy inaugura la primera terminal de exportación de GNL de EE. UU. Este hito marca el inicio de una transformación radical: de ser una zona costera poco desarrollada, Sabine Pass se convierte en el mayor productor de GNL del país y uno de los más importantes a nivel global.

La terminal ha sido diseñada para escalar rápidamente, con múltiples fases de expansión que han permitido aumentar su capacidad de producción y adaptarse a la creciente demanda internacional.

Sabine Pass cuenta con una infraestructura altamente especializada:

- Seis trenes de licuefacción operativos, capaces de producir más de treinta millones de toneladas métricas de GNL al año.
- Muelles marítimos diseñados para buques metaneros de gran calado.
- Miles de válvulas industriales, incluyendo sistemas criogénicos y de aislamiento rápido (HIPPS).
- Conectividad terrestre con redes de distribución de gas en EE. UU., lo que facilita el transporte desde los yacimientos hasta la terminal.

Esta infraestructura no solo permite la exportación eficiente de GNL, sino que también garantiza altos estándares de seguridad y sostenibilidad operativa.

Sabine Pass exporta GNL a más de treinta países, consolidando a Estados Unidos como un proveedor «teóricamente» confiable en tiempos de incertidumbre energética. Se trata de un papel que ha podido alcanzar, entre otras razones, gracias a la crisis del gas ruso como consecuencia de la invasión de Ucrania y las posteriores sanciones a Rusia en materia energética, así como la voladura de los gaseoductos North Stream 1 y 2.

Sus principales destinos incluyen:

- Europa, especialmente tras la crisis energética de 2022, donde el GNL estadounidense ha sido clave para reducir la dependencia del gas ruso, independientemente de que se pague mucho más caro.

- Asia, con países como Japón, Corea del Sur y China liderando la demanda.
 - Sudamérica y Oriente Medio, como mercados emergentes en transición hacia fuentes más limpias.

La seguridad en Sabine Pass se articula en dos niveles complementarios: seguridad física y seguridad digital.

- Control de accesos biométricos para personal.
- Vigilancia perimetral con sensores, cámaras térmicas y patrullas armadas.
- Protocolos de emergencia, ante fugas, incendios o sabotajes.
- Sistemas SCADA para supervisión en tiempo real de procesos industriales.
- Redes OT segmentadas, que evitan la propagación de ciberataques desde redes IT.
- *Firewalls* industriales, sistemas de detección de intrusos (IDS) y algoritmos de inteligencia artificial para análisis de tráfico.
- Colaboración con empresas tecnológicas como Bechtel y AMPO para garantizar la integridad operativa.

A pesar de su sofisticación, Sabine Pass no está exento de amenazas, por lo que ha de afrontar riesgos y vulnerabilidades:

- Ciberataques dirigidos a sistemas SCADA, especialmente en contextos geopolíticos tensos.
- Dependencia de infraestructura criogénica, que requiere mantenimiento constante y especializado.
- Exposición a fenómenos climáticos extremos, como huracanes que afectan la costa del golfo.

Hasta la fecha, no se ha informado de ataques graves, pero la terminal ha sido objeto de auditorías intensivas por parte de la Comisión Federal Reguladora de Energía (FERC), lo que ha derivado en mejoras continuas en sus protocolos de seguridad.

Sabine Pass opera bajo una lógica de resiliencia y eficiencia. Entre sus prioridades destacan:

- Continuidad operativa, incluso en escenarios de crisis.
- Protección de datos industriales, clave para evitar sabotajes digitales.

- Gestión ambiental, con estrictos controles para evitar emisiones y derrames.
- Adaptabilidad tecnológica, para integrar nuevas soluciones sin comprometer la seguridad.

Sabine Pass es mucho más que una terminal portuaria, es el símbolo de la nueva era energética estadounidense. Su capacidad para exportar GNL a escala global, su infraestructura de vanguardia y su enfoque en seguridad lo convierten en un modelo de referencia para puertos energéticos del siglo XXI. En un mundo que busca alternativas al petróleo, Sabine Pass se erige como el puerto del futuro donde la innovación, la sostenibilidad y la estrategia convergen.

7.3 Róterdam (Países Bajos)

El puerto de Róterdam, situado en Países Bajos, no solo ostenta el título de mayor puerto de Europa en volumen total de carga, sino que también se posiciona como uno de los nodos logísticos más avanzados del mundo en el manejo de petróleo crudo, gas natural y productos derivados de hidrocarburos. De hecho, es el mayor puerto energético de Europa: maneja más de 300 millones de toneladas de carga energética, terminales de crudo, GNL, derivados y petroquímicos. Su infraestructura especializada, su



conectividad intermodal y su papel estratégico en la seguridad energética europea lo convierten en un pilar fundamental de la economía continental.

El puerto de Róterdam ha sido testigo de una transformación radical gracias a las expansiones Maasvlakte I y II. Estas ampliaciones no solo han aumentado la capacidad operativa del puerto, sino que han marcado un antes y un después en la automatización portuaria, posicionando a Róterdam como un referente global en logística inteligente y sostenible.

Inaugurada en 1973, Maasvlakte I fue la primera gran expansión del puerto hacia el mar del Norte. Esta obra de ingeniería permitió recibir buques de mayor calado y mejorar la infraestructura portuaria. Aunque no incorporaba automatización avanzada, sentó las bases para el desarrollo tecnológico que vendría décadas después.

Operativa desde 2015, Maasvlakte II representa la cúspide de la innovación portuaria. Esta expansión fue diseñada desde cero para integrar tecnologías de automatización, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental.

Róterdam gestiona cerca de 100 millones de toneladas de crudo al año, aunque en 2024 se registró una leve caída del 4,5 % debido al mantenimiento programado en varias refinerías. El puerto cuenta con terminales de descarga y almacenamiento conectadas directamente con refinerías como Shell Pernis, una de las más grandes de Europa. Además, dispone de oleoductos transfronterizos que enlazan con Alemania y Bélgica, facilitando la distribución terrestre del crudo importado. El puerto se extiende a lo largo de 42 kilómetros, donde se pueden encontrar cinco refinerías; más de treinta tanques de almacenamiento de crudo; decenas de terminales para gasolina, diésel, fueloil, queroseno, etc., y terminales de GNL con capacidad de doce millones de metros cúbicos, y ha comenzado la expansión con proyectos de terminales de hidrógeno verde y azul, lo que convertiría a Ámsterdam en un *hub* de hidrógeno.

El puerto de Róterdam está conectado a una vasta red de transporte energético que lo convierte en un *hub* estratégico para Europa mediante:

- Oleoducto Rotterdam-Rhineland. Transporta crudo desde el puerto hacia refinerías en Alemania, especialmente en la región del Ruhr.

- Oleoducto Transalpine (TAL). Aunque no parte directamente de Róterdam, está conectado a la red europea que distribuye productos refinados hacia Austria e Italia.
- Terminales de productos refinados. Desde Botlek y Europoort, se distribuyen gasolina, diésel y queroseno por carretera, ferrocarril y barco.
- Red de gasoductos. Conectada a la red holandesa de Gasunie, que distribuye gas por toda Europa occidental.
- Proyecto H2Import. Recibirá hidrógeno verde desde países como España, Marruecos y Chile.
- Proyecto HyTransPort. Ducto de hidrógeno que conectará el puerto con zonas industriales del país.
- LOHC y amoníaco. Se están desarrollando terminales para importar hidrógeno en forma líquida orgánica o amoníaco, facilitando su transporte seguro.
- Ferrocarril. El puerto tiene enlaces directos con Alemania, Suiza y Europa del Este, permitiendo el transporte de productos energéticos por tren.
- Flota fluvial. Más de 91 000 embarcaciones fluviales al año transportan productos energéticos por el Rin y otros ríos.

En resumen, el puerto de Róterdam no solo almacena y procesa energía, sino que la distribuye a todo el continente mediante una red integrada de oleoductos, gasoductos, ferrocarriles y rutas fluviales.

Gracias a sus muelles de aguas profundas, el puerto puede recibir superpetroleros VLCC, lo que lo convierte en un punto de entrada clave para el petróleo proveniente de Oriente Medio, África y América.

El puerto de Róterdam también destaca por su capacidad para gestionar una amplia gama de productos derivados, como fueloil, queroseno, gasolina, diésel, lubricantes y petroquímicos. En 2024, el volumen de estos productos aumentó un 0,8 %, impulsado por el comercio de fueloil y la creciente demanda de queroseno en el sector aeronáutico.

El puerto alberga clústeres petroquímicos que transforman materias primas en productos industriales como plásticos, fertilizantes y solventes. Las terminales están equipadas con sistemas especializados de bombeo, refrigeración y seguridad química, adaptados a las características de cada tipo de carga.

Aunque el volumen de gas natural licuado (GNL) disminuyó un 5,3 % en 2024, habrá que esperar a las cifras oficiales de 2025 para ver un repunte en el volumen, proporcional al incremento de compra de GNL a EE. UU., tras la llegada del presidente Trump y su política arancelaria.

Róterdam sigue siendo un actor clave en la recepción y distribución de GNL. Sus terminales están conectadas con redes de distribución europeas, permitiendo el abastecimiento a países del norte y centro del continente.

Tras la crisis energética de 2022 y la reducción de importaciones de gas ruso, el puerto ha desempeñado un papel esencial en la diversificación energética de Europa. Sus instalaciones incluyen tanques criogénicos, sistemas de regasificación y plataformas de carga para buques metaneros.

La gestión de hidrocarburos en Róterdam está respaldada por una arquitectura de seguridad avanzada. El puerto emplea sistemas SCADA y redes OT para supervisar en tiempo real los procesos industriales y ha implementado protocolos de ciberseguridad específicos para terminales de productos peligrosos.

En el plano ambiental, Róterdam impulsa la reducción de emisiones mediante el uso de biocombustibles, la electrificación de muelles y proyectos de captura de carbono. Estas iniciativas forman parte de su estrategia para convertirse en un puerto climáticamente neutro en las próximas décadas.

A pesar de su sofisticación, el puerto de Róterdam se enfrenta a importantes desafíos:

- La volatilidad geopolítica puede afectar la estabilidad del suministro energético.
- Las infraestructuras críticas están expuestas a riesgos cibernéticos y físicos.
- La transición energética acabará exigiendo adaptar los terminales tradicionales a nuevos combustibles como el hidrógeno verde.
- Una alarmante concentración de capacidades.

El puerto de Róterdam no es solo un punto de tránsito marítimo, es un centro estratégico para la energía fósil en Europa, con capacidades avanzadas para manejar petróleo, gas y derivados de hidrocarburos. Su papel en la seguridad energética, su infraestructura especializada y su compromiso con la sos-

tenibilidad lo convierten en un referente global en logística energética.

Pero existe otra realidad: se podría denominar al puerto de Róterdam como la bomba de relojería más grande de Europa, con una alarmante exposición a sufrir cualquier intento de atentado físico mediante drones, bombas sucias... El puerto es famoso por su alto grado de permeabilidad a todo tipo de tráfico ilícito. De hecho, es considerado como la principal puerta de entrada de drogas ilícitas a Europa, especialmente cocaína, lo que debería encender todas las alarmas al respecto. Tanto Europol como la policía neerlandesa han advertido que las redes criminales usan los mismos canales para introducir otros bienes ilícitos en Europa. Quizá es necesario recordar cómo, a lo largo de 2025, la aparición de drones sin identificar, en diferentes aeropuertos europeos, ha demostrado las graves deficiencias de seguridad aeroportuarias en las instalaciones, de las que el puerto de Róterdam no se puede excluir, sino más bien poner en la primera posición del pódium.

A finales de 2025, de acuerdo con lo establecido por el Centro Nacional de Coordinación Antiterrorista (NCTV), el nivel oficial en Países Bajos de amenaza terrorista es de 4 sobre 5, lo que significa que las autoridades consideran realista la posibilidad de un atentado en cualquier parte del país.

7.4 Singapur

En el corazón del sudeste asiático, donde convergen las rutas marítimas más transitadas del planeta, se encuentra el puerto de Singapur, una infraestructura portuaria que no solo lidera en eficiencia y volumen de carga, sino que también desempeña un papel estratégico en el comercio global de petróleo, gas natural y productos derivados de hidrocarburos como *hub* global de transbordo y *bunkering*¹⁰. Singapur es el mayor puerto de abastecimiento de combustible marino del mundo. Su ubicación privilegiada, tecnología de vanguardia y enfoque sostenible lo convierten en un referente mundial en logística energética, con terminal flotante de GNL y futura infraestructura para hidrógeno.

¹⁰ El *bunkering* es el proceso de suministrar combustible a los barcos. Es una operación esencial para que el transporte marítimo funcione, ya que los buques necesitan repostar durante sus rutas.

Singapur es uno de los principales centros de *bunkering* del mundo, suministrando combustible a miles de buques cada mes. El puerto gestiona más de 4 millones de toneladas mensuales de combustibles convencionales y sus terminales están diseñadas para recibir, almacenar y distribuir petróleo crudo con eficiencia y seguridad. Sus capacidades permiten funcionar como un *hub* de redistribución regional, abasteciendo a países vecinos y facilitando el comercio intercontinental.

Gestiona una amplia gama de productos refinados, como fueloil, diésel, queroseno, lubricantes y petroquímicos, esenciales para la industria marítima y manufacturera del sudeste asiático.

Alberga instalaciones de refinación y procesamiento que permiten transformar materias primas en productos industriales de alto valor añadido.

Aunque Singapur no es un gran productor de gas natural, su puerto actúa como centro de distribución regional de GNL. Las terminales están diseñadas para:

- Recibir buques metaneros con cargas criogénicas.
- Almacenar el gas en tanques refrigerados.
- Regasificar y redistribuir el producto hacia mercados del sudeste asiático.
- Participar activamente en comercio de futuros de GNL, consolidando su rol como centro financiero y logístico del gas en Asia.

La gestión de hidrocarburos en Singapur está respaldada por una arquitectura tecnológica de primer nivel:

- Sistemas SCADA y redes OT para supervisión en tiempo real de procesos industriales.
- Grúas automatizadas y vehículos autónomos para minimizar el riesgo humano.
- Protocolos de ciberseguridad que incluyen *blockchain*, inteligencia artificial y segmentación de redes.

Singapur es mucho más que un punto de carga y descarga, es un centro energético global, donde convergen tecnología, estrategia y sostenibilidad. Su capacidad para manejar petróleo, gas y derivados de hidrocarburos con precisión y seguridad lo convierte, según muchos expertos, en un modelo de eficiencia portuaria en el siglo XXI.

El puerto enfrenta principalmente tres grandes amenazas: la congestión logística, la piratería en el estrecho de Singapur y las tensiones geopolíticas en la región.

Congestión logística con la acumulación de barcos debido a su ubicación estratégica. Factores externos como la crisis en el mar Rojo y el aumento de la demanda mundial de mercancías intensifican el problema.

Piratería y delitos marítimos. En el estrecho de Singapur los ataques pasaron de siete a veintisiete en un año, un aumento del 285 %. Aunque muchos son de menor escala, en catorce incidentes se usaron armas de fuego. Todos ellos ponen en riesgo tripulaciones y mercancías.

Tensiones geopolíticas. Los estrechos de Malaca y Singapur son cuellos de botella críticos para el comercio mundial y el transporte de energía. Los conflictos regionales y la rivalidad entre potencias en Asia y Oriente Medio pueden afectar la libre circulación de mercancías.

Crimen organizado y ciberataques. Los puertos modernos, incluido Singapur, son blancos de contrabando, crimen organizado y ciberataques que buscan explotar su papel crítico en el comercio global. La interconexión tecnológica convierte el puerto en un objetivo para ataques que podrían paralizar operaciones o manipular datos logísticos.

7.5 Ningbo-Zhoushan (China)

En la costa oriental de China, en la provincia de Zhejiang, se alza el puerto de Ningbo-Zhoushan, una colosal infraestructura marítima que ha escalado posiciones hasta convertirse en uno de los puertos más activos del planeta. Más allá de su liderazgo en volumen total de carga en el mundo, este puerto desempeña un papel estratégico en el manejo de petróleo crudo, gas natural y productos derivados de hidrocarburos, consolidando su importancia en la seguridad energética nacional y en el comercio global.

El puerto de Ningbo-Zhoushan gestiona decenas de millones de toneladas de petróleo crudo cada año, gracias a sus terminales especializadas en graneles líquidos. Estas instalaciones están diseñadas para recibir superpetroleros y facilitar el almacenamiento y distribución del crudo hacia refinerías e industrias del interior de China.

Entre sus activos destacan:

- Muelles de aguas profundas con capacidad para buques VLCC.
- Tanques automatizados con sistemas de control de presión, temperatura y seguridad.
- Oleoductos interconectados con refinerías regionales y zonas industriales clave.

Su ubicación estratégica en el delta del Yangtsé permite una conectividad fluida con los principales corredores logísticos del país.

Además del crudo, Ningbo-Zhoushan gestiona una amplia gama de productos refinados como fueloil, gasolina, diésel, lubricantes y petroquímicos. Las terminales están equipadas con tecnología de bombeo y mezcla automatizada, así como sistemas de seguridad química para cargas peligrosas.

El puerto también alberga clústeres industriales dedicados a la transformación de hidrocarburos en productos de alto valor añadido, como plásticos, fertilizantes y solventes. Su infraestructura intermodal —que incluye ferrocarriles, autopistas y vías fluviales— permite una distribución eficiente tanto a nivel nacional como internacional.

Aunque China cuenta con otros *hubs* más especializados en GNL, Ningbo-Zhoushan también participa en el manejo de GNL, reforzando su papel como centro logístico energético. Las terminales de GNL incluyen:

- Tanques criogénicos para almacenamiento seguro.
- Plantas de regasificación para redistribución hacia el interior del país.
- Conexiones con redes de distribución energética, que fortalecen la seguridad energética nacional.

La gestión de hidrocarburos en Ningbo-Zhoushan está respaldada por una arquitectura tecnológica avanzada:

- Sistemas SCADA y redes OT para supervisión en tiempo real de procesos industriales.
- Protocolos de ciberseguridad para proteger infraestructuras críticas frente a amenazas digitales.
- Medidas ambientales para reducir emisiones, prevenir derrames y proteger ecosistemas costeros.

El puerto también participa en iniciativas vinculadas a la Nueva Ruta de la Seda, lo que refuerza su papel como nodo estratégico en la expansión comercial y enA pesar de su escala y sofisticación, el puerto de Ningbo-Zhoushan enfrenta desafíos relevantes:

- Riesgos cibernéticos, derivados de su alto grado de automatización.
- Congestión logística, especialmente en temporadas de alta demanda.
- Exposición a tensiones geopolíticas, que pueden afectar el comercio energético y las rutas marítimas.

El puerto de Ningbo-Zhoushan no es solo un punto de tránsito marítimo: es un centro energético global, donde convergen eficiencia operativa, tecnología avanzada y estrategia geopolítica. Su capacidad para manejar petróleo, gas y derivados de hidrocarburos lo convierte en un pilar de la seguridad energética de China.

No obstante, los riesgos de seguridad en Ningbo-Zhoushan son elevados debido a la magnitud del puerto y la presencia de materiales peligrosos en su operación diaria. Los incidentes recientes muestran que incluso un solo accidente puede tener repercusiones globales en logística, economía y medioambiente. En agosto de 2024, una potente explosión en el buque YM Mobility, un portacontenedores atracado en el puerto, generó una enorme bola de fuego y obligó a evacuar a la tripulación y al cierre temporal de varias terminales que afectó las cadenas de suministro internacionales. El buque transportaba materiales peligrosos, lo que amplificó el riesgo de incendio y contaminación.

8 El caso de España como eje energético marítimo

España es, en ocasiones, uno de los principales nodos logísticos energéticos de Europa gracias a su red portuaria especializada en la carga, descarga y almacenamiento de petróleo crudo, productos refinados y GNL. Con más de 200 millones de toneladas de mercancías energéticas movidas al año y una capacidad de almacenamiento superior a los 8 millones de metros cúbicos, intenta mantener un papel estratégico en el abastecimiento energético del continente.



8.1 Puerto de Algeciras (Cádiz)

El puerto de Algeciras es un enclave logístico relevante del Mediterráneo y Europa. Con un volumen anual superior a las 100 millones de toneladas, especializado en petróleo crudo, productos refinados y operaciones de *bunkering*, se ha consolidado como un nodo energético y comercial de primer orden. Su infraestructura incluye modernas terminales de hidrocarburos y conexiones con oleoductos y red ferroviaria, además de sistemas de seguridad avanzados como detección de fugas e incendios, vigilancia perimetral y protocolos SEVESO III para sustancias peligrosas.

8.2 Puerto de Cartagena (Murcia)

El puerto de Cartagena se ha consolidado como un enclave energético de España. Con un volumen anual cercano a las 30 millones de toneladas, su actividad se centra en el tráfico de crudo, productos refinados y GNL. La capacidad de almacenamiento de GNL alcanza los 600 000 m³, lo que lo convierte en un nodo clave para la seguridad energética nacional y europea.

Su infraestructura está directamente conectada con la refinería de Repsol y cuenta con una planta regasificadora activa, lo

que refuerza su papel estratégico en la cadena de suministro de hidrocarburos y gas. En materia de seguridad, el puerto dispone de barreras anticontaminación, sistemas automáticos de extinción y auditorías periódicas de ciberseguridad industrial.

No obstante, esta relevancia lo convierte en un objetivo atractivo para amenazas de terrorismo y ciberataques, que representan los principales riesgos en el contexto actual. La concentración de operaciones energéticas en Cartagena lo convierte en un blanco potencial para grupos terroristas. Las terminales de hidrocarburos y la planta regasificadora son instalaciones cuya interrupción tendría un impacto inmediato en el suministro energético.

8.3 Puerto de Bilbao (País Vasco)

El puerto de Bilbao, situado en el País Vasco, cuenta con un volumen anual superior a las 25 millones de toneladas. Su actividad se centra en el tráfico de crudo, derivados y GNL. La capacidad de almacenamiento de GNL alcanza los 300 000 m³, lo que refuerza su papel como nodo estratégico en la seguridad energética nacional.

La infraestructura del puerto está directamente conectada con la refinería de Petronor y cuenta con una planta regasificadora, consolidando su importancia en la cadena de suministro de hidrocarburos y gas. En materia de seguridad, dispone de sistemas de control ambiental continuo, una red de sensores térmicos y simulacros periódicos de emergencia, lo que demuestra un compromiso con la prevención y la resiliencia.

8.4 Puerto de Huelva (Andalucía)

El puerto de Huelva es un enclave energético del sur de España. Con un volumen anual superior a las 30 millones de toneladas, su actividad se centra en el tráfico de crudo, productos refinados y GNL. La capacidad de almacenamiento de GNL alcanza los 600 000 m³, lo que refuerza su papel como nodo estratégico en la seguridad energética nacional y europea.

La infraestructura del puerto es amplia y compleja: cuenta con nueve pantalanes, trece atraques y más de 110 kilómetros de tuberías conectadas a oleoductos, lo que garantiza un flujo constante de hidrocarburos y gas hacia el interior peninsular.

8.5 Puerto de Barcelona (Cataluña)

El puerto de Barcelona es un nodo energético y logístico de España. Su actividad se centra en el tráfico de GNL y productos refinados, con una capacidad de almacenamiento de GNL de 760 000 m³, la mayor del país. Esta infraestructura lo convierte en un punto clave para la seguridad energética nacional y europea.

La planta regasificadora de alta capacidad y las terminales multipropósito refuerzan su papel estratégico en la cadena de suministro. En materia de seguridad, el puerto cuenta con sistemas redundantes de control, monitoreo ambiental continuo y planes de contingencia integrados, lo que demuestra un compromiso con la prevención y la resiliencia.

8.6 Puerto de Sagunto (Valencia)

El puerto de Sagunto es un importante nodo energético del Mediterráneo español. Su actividad se centra en el tráfico de gas natural licuado (GNL), con una capacidad de almacenamiento de 600 000 m³, lo que lo convierte en un punto crítico para la seguridad energética nacional.

La infraestructura del puerto incluye una planta regasificadora moderna y conexión directa con la red nacional de gasoductos, garantizando el suministro continuo de gas hacia el interior peninsular.

8.7 Puerto de Ferrol (Galicia)

El puerto de Ferrol es un enclave energético especializado en el tráfico de gas natural licuado (GNL). Con una capacidad de almacenamiento de 150.000 m³, su planta regasificadora de menor escala y sus terminales especializadas lo convierten en un punto relevante dentro de la red energética nacional, aunque con menor volumen que otros puertos de referencia, quizá por haberse instalado en una auténtica ratonera, como es la ría de Ferrol, independientemente de que la infraestructura está diseñada para operaciones seguras y eficientes.

8.8 Puerto de Gijón (Asturias)

Después de más de diez años en hibernación, la planta de Gijón entro en operación en julio de 2023 reforzando su papel en el

sector energético con la reactivación de su planta regasificadora. Su actividad se centró en el tráfico de GNL, con una capacidad de almacenamiento de 300.000 m³, lo que lo convierte en un nodo relevante para la distribución de gas.

En la actualidad a marzo de 2026, solo presta servicio logístico de almacenamiento, recarga y transshipment. La compañía Enagás, ha solicitado conectar la planta a la red nacional.

9 Amenazas, fortalezas y debilidades

Esta relevancia estratégica de los puertos españoles en materia de hidrocarburos y sus derivados los convierte en general en objetivos altamente atractivos para amenazas de terrorismo y ciberataques, que representan los riesgos más críticos en el contexto actual. La concentración de tráfico energético y la presencia de instalaciones críticas hacen de todos estos puertos un blanco potencial para grupos terroristas.

Un ataque a sus infraestructuras críticas —explosiones provocadas, sabotajes en operaciones de carga/descarga, ataques coordinados contra buques en operaciones de *bunkering* o a terminales de hidrocarburos, oleoductos, gaseoductos, etc., con la consiguiente interrupción de sus funciones— tendría un impacto inmediato en el suministro energético.

En mucho de ellos, la ubicación estratégica del puerto, cercano al estrecho de Gibraltar o muy cerca de grandes poblaciones, lo convierte en un punto sensible en conflictos internacionales y tensiones regionales. El impacto de un ataque sería terrible, desde la interrupción del flujo energético y pérdidas económicas millonarias hasta el debilitamiento de la confianza internacional en el puerto como nodo seguro, pasando por un riesgo, quizá no suficientemente tenido en cuenta, para la población.

Sus fortalezas son disponer en ocasiones de protocolos SEVESO III¹¹ o los sistemas SCADA, sistemas de detección avan-

¹¹ El protocolo Seveso III, oficialmente la Directiva 2012/18/UE, es la normativa europea que regula la prevención y el control de accidentes graves relacionados con sustancias peligrosas, surgida tras el accidente químico de Seveso (Italia) en 1976. Su objetivo es reducir la probabilidad de explosiones, incendios o fugas tóxicas y minimizar sus consecuencias sobre la salud humana, el medioambiente y los bienes. La directiva clasifica los establecimientos en dos niveles según la cantidad de sustancias peligrosas presentes, imponiendo obligaciones como la notificación a las autoridades, la elaboración de informes de seguridad, planes de emergencia internos

zada y vigilancia perimetral, y disponer de sistemas de seguridad física y auditorías de ciberseguridad industrial.

Sus debilidades: la dependencia crítica de sistemas digitales para la gestión operativa. La digitalización de las operaciones portuarias, gestión logística informatizada y control remoto de gran parte de sus operaciones abre la puerta a riesgos cibernéticos. Los ataques a sistemas de control que gestionan las plantas y las terminales pueden ser manipulados para alterar procesos críticos. También se pueden alterar los sensores de fugas o paralizar grúas automatizadas. Existe, además, riesgo de *ransomware*, con bloqueo de sistemas de gestión portuaria con exigencia de rescates económicos, afectando la continuidad operativa. Pueden darse amenazas híbridas, con una combinación de ataques físicos y digitales para maximizar el impacto. Sin olvidar, una alta concentración de tráfico energético en un solo nodo. En ocasiones, disponer de conexión directa con las refinerías y plantas regasificadoras. O simplemente ataques físicos con cualquiera de los procedimientos que los terroristas emplean en la actualidad.

10 Conclusiones

Como ya se ha mencionado, la dependencia energética en el mundo, de los hidrocarburos, representa un porcentaje nada desdeñable; asegurar su producción, transporte y distribución es de vital importancia si no se quiere sufrir una grave crisis energética y, por ende, económica. Este capítulo ha tratado de destacar el que puede considerarse el patito feo de la película, los puertos de carga y descarga, pero solo es un eslabón más en una frágil cadena que hay que asegurar en su totalidad.

La red portuaria energética mundial es un pilar estratégico para el comercio y la energía global. No solo debe garantizar el abastecimiento nacional, sino que refuerza la seguridad energética en todo el globo. Su seguridad es vital.

Su importancia la convierte en un objetivo prioritario para amenazas de terrorismo físico y ciberataques. La resiliencia de los puertos dependerá de su capacidad para reforzar la seguridad física y digital, diversificar infraestructuras críticas y establecer

y externos y la información a la población sobre riesgos y medidas preventivas. En España se aplica mediante el Real Decreto 840/2015, que adapta esta normativa al marco legal nacional y obliga a las industrias químicas a mantener altos estándares de seguridad y transparencia.

alianzas internacionales que garanticen una respuesta rápida y coordinada ante incidentes.

Su proximidad a importantes núcleos de población, en algunos casos, los convierte en objetivos doblemente interesantes para el terrorismo. Las consecuencias de ataques físicos pueden ser devastadores no únicamente a nivel energético, sino en bajas humanas.

Es necesario conseguir una mayor concienciación de las autoridades con respecto a esta vulnerabilidad. Las ventajas logísticas que representan grandes concentraciones de instalaciones energéticas en puertos es un arma de doble filo, muy a tener en cuenta a la hora de seguir incrementando dicha concentración.

El mantener, principalmente por razones económicas, la actual estructura de megapuertos es asumir un riesgo muy alto que puede pasar una factura incalculable en vidas humanas y capital.

En general, los puntos focales de las rutas marítimas a los que se les da tanta importancia suelen tener alternativas, que encarecen el producto al alargar los tránsitos, es cierto, pero existe la alternativa. No se puede decir lo mismo de muchos de los puertos de carga y descarga.

La guerra de Ucrania ha enseñado cómo los drones se han convertido en una amenaza letal de muy bajo coste y a la que todavía cuesta mucho enfrentarse. No se habla solo de Ucrania, sino de los problemas que su sola presencia ha causado en el tráfico aéreo europeo. El empleo de esos mismos drones armados contra instalaciones energéticas portuarias es una amenaza real ante la que se debe estar preparado.

Capítulo sexto

Geopolítica de la energía: una perspectiva desde Canadá

Joe Calnan

Resumen

Canadá es uno de los principales productores y exportadores de energía, aunque a menudo se subestima su papel en el sistema energético mundial. Este artículo analiza la posición de Canadá en la geopolítica energética mundial. De este modo, se examinan los factores geográficos y geológicos determinantes del comercio energético internacional y de las dependencias energéticas de Canadá, así como la estructura constitucional del país, los derechos de los pueblos indígenas, la política climática y las alianzas en materia de seguridad. El artículo concluye que la opacidad del papel de Canadá en el sistema energético global se deriva de su estrecha interdependencia energética con Estados Unidos. Por tanto, la geopolítica energética canadiense se caracteriza por las tensiones entre la atracción económica y la autonomía política, entre las limitaciones en materia de infraestructura y la diversificación de las exportaciones y entre la seguridad económica y la licencia social. Estas conclusiones ponen de manifiesto las enormes barreras a las que actualmente se enfrenta Canadá en su esfuerzo por diversificar su comercio energético.

Palabras clave

Estados Unidos, Dependencia, Diversificación, Soberanía, Medioambiente.

Geopolitics of Energy – A View from Canada

Abstract

Canada is a major energy producer and exporter, yet its role in the global energy system is often understated. This paper examines Canada's position in the global geopolitics of energy. In doing so, it considers the geographical and geological determinants of Canada's international energy trade and energy dependencies, alongside the country's constitutional structure, Indigenous rights, climate policy, and security partnerships. The paper finds that the obscurity of Canada's role in global energy systems stems from its close energy interdependence with the United States. Canadian energy geopolitics is therefore defined by tensions between economic gravity and political autonomy, infrastructure constraints and export diversification, and economic security and social license. These findings illuminate the formidable barriers facing Canada's current efforts to diversify its energy trade.

Keywords

United States, Dependence, Diversification, Sovereignty, Environment.

EL CONTEXTO INTERNACIONAL DE CANADÁ COMO 'SUPERPOTENCIA ENERGÉTICA'

MEMBRESÍAS IMPORTANTES DE CANADÁ

OTAN



CINCO OJOS



OCDE



CONSEJO ÁRTICO



ARCTIC COUNCIL

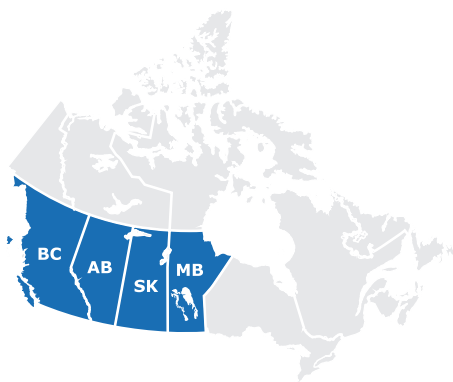
G7



MANCOMUNIDAD
DE NACIONES



LAS DOS CARAS DE CANADÁ



RED DEL OESTE DE CANADÁ EXPORTADOR DE ENERGÍA:

BC - COLUMBIA BRITÁNICA
SK - SASKATCHEWAN

AB - ALBERTA
MB - MANITOBA

PRODUCCIÓN DE
ENERGÍA PRIMARIA
EN 2024 (PJ)

22,608.6

CONSUMO DE
ENERGÍA SECUNDARIA
EN 2024 (PJ)

3,996.0

RED DEL ESTE DE CANADÁ IMPORTADOR DE ENERGÍA:

ON - ONTARIO
QC - QUEBEC
NL - TERRANOVA
Y LABRADOR

NB - NUEVA BRUNSWICK
NS - NUEVA ESCOCIA
PEI - ISLA DEL PRÍNCIPE
EDUARDO

PRODUCCIÓN DE
ENERGÍA PRIMARIA
EN 2024 (PJ)

1,987.7

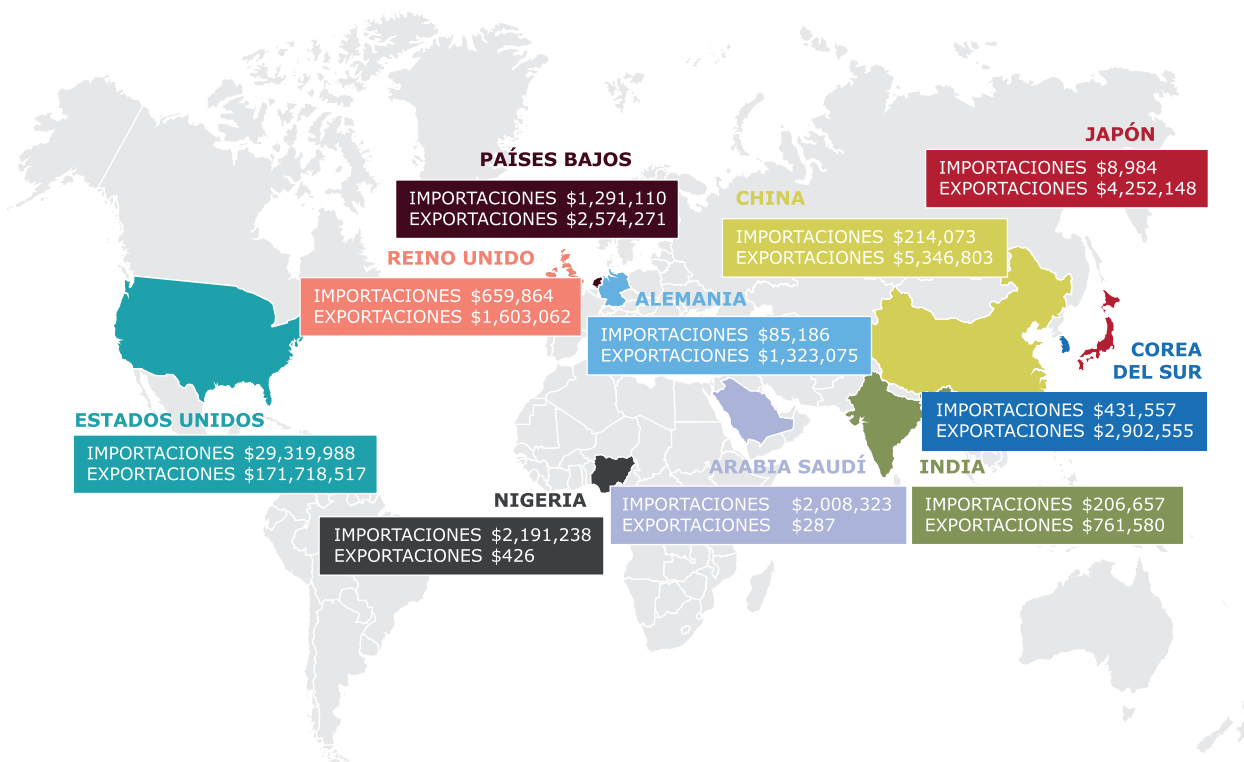
CONSUMO DE
ENERGÍA SECUNDARIA
EN 2024 (PJ)

4,345.3



PRINCIPALES SOCIOS COMERCIALES BILATERALES DE CANADÁ EN MATERIA DE ENERGÍA

IMPORTACIONES DE ENERGÍA DE CANADÁ EN 2024 (\$000 CAD) /EXPORTACIONES (\$ MILES DE MILLONES CAD)



CANADÁ COMO ACTOR CLAVE EN EL ÁRTICO



INFRAESTRUCTURA ESTRATÉGICA

FONDO DE INFRAESTRUCTURA DEL ÁRTICO - «DOBLE USO» FINANCIACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS



SEGURIDAD ENERGÉTICA

POTENCIAL DE LOS GRANDES PROYECTOS DEL ÁRTICO PARA AYUDAR A RESPALDAR LA PRESENCIA MILITAR PERMANENTE MEDIANTE EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURAS ENERGÉTICAS



FLOTA POLAR

ENFOQUE ÁRTICO DEL DISEÑO NAVAL: ROMPEHIELOS POLARES, PACTO DEL HIELO, SUBMARINOS Y MAYOR PRESENCIA EN LAS RUTAS MARÍTIMAS DEL ÁRTICO PARA EL COMERCIO CANADIENSE Y MUNDIAL



ALERTA TEMPRANA

EL ÁRTICO MÁS ALLÁ DEL HORIZONTE COMPONENTE DE RADAR DE LA MODERNIZACIÓN DEL NORAD (MANDO DE DEFENSA AEROSPAZIAL DE NORTEAMÉRICA)

1 Introducción

El desarrollo energético de Canadá ha estado condicionado por la geografía, por la geología y por una relación asimétrica con Estados Unidos. La proximidad al segundo mayor mercado energético del mundo ha orientado los flujos de petróleo y gas canadienses hacia el sur, a pesar de las inquietudes persistentes sobre una dependencia excesiva de un vecino más grande y poderoso. Esta dependencia energética genera una doble vulnerabilidad, tanto en el suministro como en la demanda de energía, con un único socio comercial. Por tanto, la geopolítica energética canadiense se caracteriza por las tensiones entre la atracción económica y la autonomía política, entre las limitaciones en materia de infraestructura y la diversificación de las exportaciones y entre la seguridad económica y la licencia social.

Este artículo intenta responder a una pregunta fundamental: *¿cuál es la posición de Canadá en la geopolítica energética mundial?*

La geopolítica puede definirse como el estudio de las relaciones exteriores y de la política internacional a través del prisma de la geografía, la economía y la demografía. En consecuencia, la geopolítica energética puede entenderse como el conjunto de determinantes geográficos y geológicos del comercio energético internacional y de las dependencias energéticas de un país. Estos factores son esenciales para comprender la posición de Canadá en el mundo. No obstante, el análisis de la geopolítica energética canadiense también exige considerar la estructura constitucional del país, los derechos de los pueblos indígenas, la política climática y las alianzas en materia de seguridad. En el centro de esta cuestión se encuentra la integración económica y de seguridad excepcionalmente estrecha entre Canadá y Estados Unidos, así como la forma en que la geografía, la economía y la demografía han sobredeterminado la integración de sus sistemas energéticos.

Para abordar esta cuestión, en primer lugar, este artículo sitúa Canadá dentro del sistema energético global. Revisa la producción y el consumo de energía en Canadá, poniendo en relieve la paradoja de un país que es a la vez uno de los principales exportadores de energía y dependiente de las importaciones. Después, examina las principales relaciones comerciales energéticas de Canadá, subrayando el papel desproporcionado de Estados Unidos tanto en las exportaciones como en la seguridad del suministro. En esta parte también se analiza cómo la geo-

grafía y la geología han determinado la concentración regional de los recursos energéticos canadienses y cómo han limitado el desarrollo de infraestructuras energéticas en el eje este-oeste.

A continuación, el artículo se centra en la dotación energética interna y la infraestructura de Canadá. Traza el desarrollo histórico de oleoductos, puertos y redes eléctricas, mostrando cómo estos activos han afianzado la integración económica de Canadá con Estados Unidos. Asimismo, examina los crecientes obstáculos políticos, jurídicos y sociales para la construcción de nuevas infraestructuras energéticas, incluidas la protección de los derechos indígenas, los conflictos jurisdiccionales entre el Gobierno federal y las provincias, y la evolución de las actitudes públicas frente al cambio climático.

Por último, el artículo analiza la posición internacional de Canadá y sus perspectivas de diversificación. Canadá es un país occidental transatlántico, integrado en las instituciones económicas y de seguridad surgidas en la posguerra, pero con una influencia limitada dentro de dichos ámbitos. El artículo explora también posibles vías de diversificación energética: al este, en dirección a Europa; al oeste, hacia el Indopacífico, y al norte, hacia el Ártico. Si bien cada una de estas opciones enfrenta obstáculos significativos, la región del Indopacífico se perfila como la alternativa más viable a medio plazo para la diversificación.

El artículo concluye evaluando la renovada ambición del Gobierno de Carney de posicionar a Canadá como una «superpotencia energética». Analiza si la aceleración de los procesos de concesión de permisos para infraestructuras energéticas puede reforzar de manera realista la autonomía geopolítica de Canadá o si la dependencia estructural de Estados Unidos seguirá definiendo el futuro energético del país.

2 Contexto de la geopolítica energética de Canadá

La posición de Canadá en la geopolítica energética global puede entenderse como un equilibrio entre cuatro fuerzas:

1. La atracción económica de Estados Unidos, que atrae la energía canadiense hacia su órbita.
2. La persistente preocupación por los impactos económicos, sociales y medioambientales de las nuevas infraestructuras energéticas.

3. Las presiones políticas recurrentes para diversificar los mercados de exportación y reducir la vulnerabilidad.
4. Las preocupaciones ocasionales sobre la seguridad del suministro energético derivadas de una dependencia excesiva de un único socio energético.

A lo largo de la historia ha predominado el poder de atracción del mercado estadounidense. Los intentos de diversificar el comercio y construir infraestructuras alternativas han fracasado en repetidas ocasiones debido a la geografía, los costes, la oposición política y la complejidad regulatoria. A medida que se han intensificado las preocupaciones sobre el cambio climático y los impactos sociales, la dificultad y el coste de construir grandes infraestructuras energéticas han aumentado aún más, reforzando la dependencia de Canadá de los sistemas existentes en el eje norte-sur.

Sigue siendo una incógnita si el periodo actual de tensiones políticas con Estados Unidos será suficiente para superar esta inercia.

3 Geografía, recursos y estructura de la dependencia energética de Canadá

Los dirigentes canadienses en ocasiones describen Canadá como una superpotencia energética. Según la mayoría de los indicadores de producción, esta caracterización es acertada: Canadá produce más del doble de la energía que consume, lo que lo sitúa entre los mayores exportadores de energía del mundo. Sin embargo, este excedente nacional oculta importantes desequilibrios regionales. El sistema energético canadiense está profundamente integrado en el mercado estadounidense, de mayor tamaño, y en varias regiones, en particular en el este de Canadá, la seguridad del suministro depende en gran medida de las importaciones.

La geografía de Canadá es, al mismo tiempo, su mayor activo estratégico y su limitación más persistente. Con una superficie terrestre de 8,8 millones de kilómetros cuadrados (el doble que la Unión Europea), Canadá posee una riqueza natural extraordinaria, estimada por Statistics Canada en 1,36 billones de dólares canadienses, de los cuales los recursos energéticos representan aproximadamente 833 000 millones de dólares (Statistics Canada [StatsCan], 2025a). El petróleo, el gas natural, la energía hidroeléctrica y el uranio sustentan la fortaleza económica de Canadá y su relevancia internacional. Sin embargo, la dis-

tribución geográfica de estos recursos, combinada con enormes barreras físicas, ha configurado de manera profunda la forma en la que Canadá produce, consume y comercia energía, reforzando la dependencia con Estados Unidos y, al mismo tiempo, complicando la integración interna y la diversificación de las exportaciones.

Los recursos de petróleo y gas de Canadá se concentran en tres regiones: la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá (WCSB, por sus siglas en inglés), las zonas submarinas frente a Terranova y Labrador, y el Ártico. De ellas, la WCSB, que se extiende desde el noreste de la Columbia Británica a través de Alberta y Saskatchewan hacia el suroeste de Manitoba, domina la producción. Tras el descubrimiento del pozo Leduc n.º 1 en 1947, durante la década de 1950, se tendieron rápidamente oleoductos hacia el este, el sur y el oeste para conectar el suministro del oeste con los mercados canadienses y estadounidenses. Las arenas bituminosas, conocidas desde hacía décadas pero desarrolladas comercialmente a partir de 1967, experimentaron un crecimiento exponencial entre los años 2000 y 2020. Aunque es impresionante desde un punto de vista tecnológico, la producción submarina del Atlántico sigue siendo modesta en comparación y abastece principalmente a la costa este de Estados Unidos y a los mercados europeos. Los recursos de petróleo y gas del Ártico permanecen en gran medida sin desarrollar, limitados por los elevados costes y la falta de licencia social a nivel local.

El sistema eléctrico canadiense refleja una concentración geográfica similar. La energía hidroeléctrica aporta más del 60 % de la generación eléctrica nacional, lo que convierte a Canadá en el tercer mayor productor hidroeléctrico del mundo (Natural Resources Canada [NRCan], 2024; Energy Institute, 2025). El 90 % de esta capacidad se localiza en Quebec, Columbia Británica, Manitoba y Terranova y Labrador, concentrada a lo largo de un reducido número de los principales sistemas fluviales. Las provincias que carecen de recursos hidroeléctricos comparables, como Ontario, Alberta, Saskatchewan y el resto de las provincias atlánticas, dependen de la generación de energía nuclear y con combustibles fósiles. La energía eólica y la solar desempeñan un papel creciente, aunque todavía secundario, con una adopción dependiente en gran medida de las condiciones meteorológicas locales. En conjunto, estos patrones refuerzan la fragmentación regional más que la integración energética nacional.

La geografía física restringe la infraestructura energética lineal de Canadá. El Escudo Canadiense (Canadian Shield), una inmensa extensión de roca madre expuesta, divide el este del oeste del país a lo largo de la frontera entre Manitoba y Ontario, lo que hace que la construcción de oleoductos y redes a través de esta región resulte excesivamente costosa. Como consecuencia, Canadá carece de un oleoducto directo que conecte la producción del oeste con la demanda del este. En su lugar, el petróleo destinado a Ontario y Quebec fluye a través de Estados Unidos mediante los oleoductos de Enbridge, orientados originalmente hacia el sur en la década de 1950 (Taylor, 2019, p. 165). El comercio de electricidad sigue una lógica similar: Manitoba exporta mucha más electricidad de origen hidroeléctrico a Estados Unidos que a la vecina Ontario, a pesar de la gran demanda interna (Manitoba Public Utilities Board, 2013). Estas realidades estructurales ayudan a explicar por qué Canadá es a la vez el mayor exportador de energía hacia Estados Unidos y uno de los mayores importadores de energía estadounidense, lo que provoca que la seguridad energética del este de Canadá dependa de la cooperación estadounidense.

Las rutas de exportación del oeste enfrentan sus propias barreras geográficas. La cordillera Norteamericana, que incluye las Montañas Rocosas, las cordilleras costeras y las sierras interiores, constituye un obstáculo abrupto para la exportación hacia el oeste desde la WCSB. Superarla requirió hazañas excepcionales de ingeniería, como el oleoducto Trans Mountain y el gasoducto Westcoast, construidos en la década de 1950 (Saywell, 1975, pp. 227-244). Estos proyectos, apoyados por capital y materiales estadounidenses, conectaron la energía del oeste de Canadá con los mercados del Pacífico en Vancouver y con el noroeste de Estados Unidos. En la época actual, estos mismos imperativos geográficos siguen dando forma a los esfuerzos de diversificación: la ampliación del oleoducto Trans Mountain en 2024 y la inauguración de LNG Canada en 2025 representan casos excepcionales en los que la voluntad política y el capital lograron imponerse al terreno, a la complejidad regulatoria y a la oposición social para acceder a la demanda asiática.

En conjunto, la infraestructura energética existente de Canadá refleja décadas de adaptación a restricciones geográficas, políticas y sociales, más que un diseño nacional deliberado. Los oleoductos fluyen de manera abrumadora hacia el sur, en dirección a los mercados estadounidenses, donde la demanda es elevada, cercana y accesible. La integración este-oeste sigue siendo limitada. Las redes eléctricas son independientes; existen mayores

redes eléctricas entre provincias canadienses y estados estadounidenses que entre provincias del propio país. Estos patrones sustentan el argumento central de este artículo: la geopolítica energética canadiense no es el resultado de una única decisión estratégica, sino de un ejercicio persistente de equilibrio entre la atracción económica de Estados Unidos, una diversificación limitada y gradual hacia otros destinos, la necesidad de mantener la seguridad energética interna en regiones fragmentadas y una preocupación permanente en cuanto al coste, la viabilidad y las consecuencias sociales y medioambientales de construir una infraestructura energética nacional.

3.1 Producción de energía

En 2024, Canadá produjo aproximadamente 5,1 millones de barriles diarios de petróleo crudo y líquidos de gas natural, junto con unos 18 800 millones de pies cúbicos diarios de gas natural comercializable (NRCan 2025a). Expresada en términos energéticos, la producción canadiense de petróleo y gas ascendió a aproximadamente 21,71 exajulios (EJ) de energía primaria. La producción de carbón añadió 1,15 EJ, procedente sobre todo de minas en la Columbia Británica destinadas a los mercados de exportación en Asia. La electricidad primaria no fósil, incluidas la hidroeléctrica, la nuclear, la eólica, la mareomotriz y la solar,

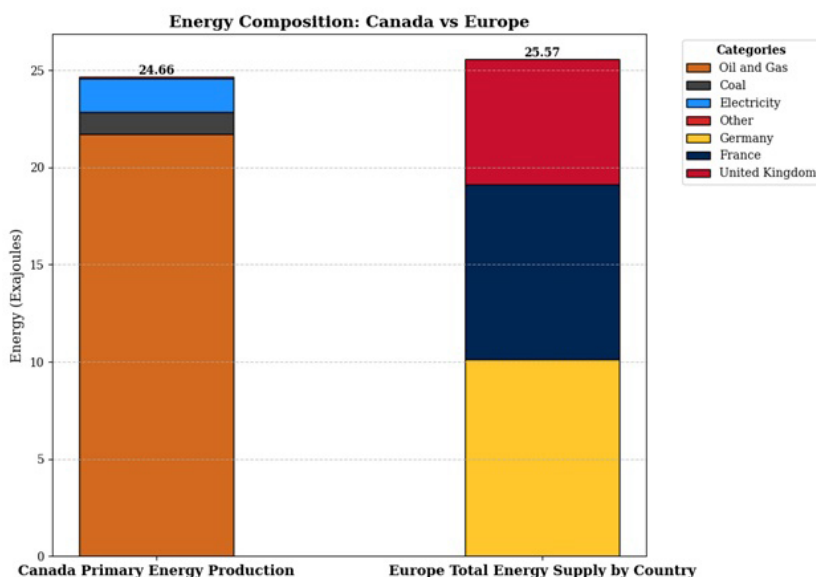


Figura 1: Datos de StatsCan, 2025b; Energy Institute, 2025

generó 1,72 EJ. En total, la producción de energía primaria de Canadá alcanza alrededor de 24,66 EJ (StatsCan, 2025b).

Para contextualizar la magnitud de la industria energética canadiense, la producción total de energía de Canadá es comparable al consumo energético combinado de Alemania, Francia y Reino Unido. Canadá es estructuralmente importante para los mercados energéticos mundiales, aunque esa importancia no siempre se traduzca de manera uniforme en influencia global.

3.2 Desequilibrios regionales

Las cifras nacionales de producción ocultan profundas divisiones regionales. La producción de energía primaria de Canadá se concentra en las provincias situadas al oeste del Escudo Canadiense, mientras que la población y el consumo están distribuidos de forma más equilibrada. Alberta, por sí sola, representa la mayor parte de la producción canadiense de petróleo y gas, mientras que las dos provincias más pobladas, Ontario y Quebec, no logran producir suficiente energía para cubrir sus necesidades. Como resultado, Canadá es uno de los pocos exportadores netos cuyas regiones más pobladas dependen de importaciones energéticas extranjeras. Esta paradoja es clave para comprender la geopolítica energética canadiense.

Tabla 1. Producción y consumo energético en Canadá por región, PJ		
Región	Producción de energía primaria	Consumo de energía secundaria
Canadá	24 664,4	8505,4
Este del Escudo Canadiense	1987,7	4345,3
Provincias atlánticas (excluida Nuevo Brunswick)	663,0	275,3
Quebec	670,7	1644,7
Ontario	654,0	2425,3
Oeste del Escudo Canadiense	22 608,6	3996,0
Manitoba	199,7	285,4
Saskatchewan	1318,3	568,1
Alberta	16 409,8	2224,6
Columbia Británica	4680,8	917,8
Yukón, Territorios del Noroeste y Nunavut	14,8	33,3

Tabla 1. Datos de StatsCan, 2025b; NRCan, 2025b

3.3 Consumo energético interno

Canadá presenta una de las tasas de consumo energético per cápita más elevadas del mundo. Con aproximadamente 299 gigajulios por habitante, esta cifra es casi tres veces superior a la media europea (Energy Institute, 2025). El clima y la geografía de Canadá explican parte de esta diferencia. Los inviernos largos y fríos incrementan la demanda de calefacción, mientras que las enormes distancias elevan el consumo energético asociado al transporte. A pesar de estas vulnerabilidades, los precios de la energía de Canadá son considerablemente más bajos que los de Europa. Esta situación incentiva el consumo doméstico y sustenta una amplia base de industrias de elevado consumo energético, en particular la producción de petróleo y gas, la minería y la industria pesada.

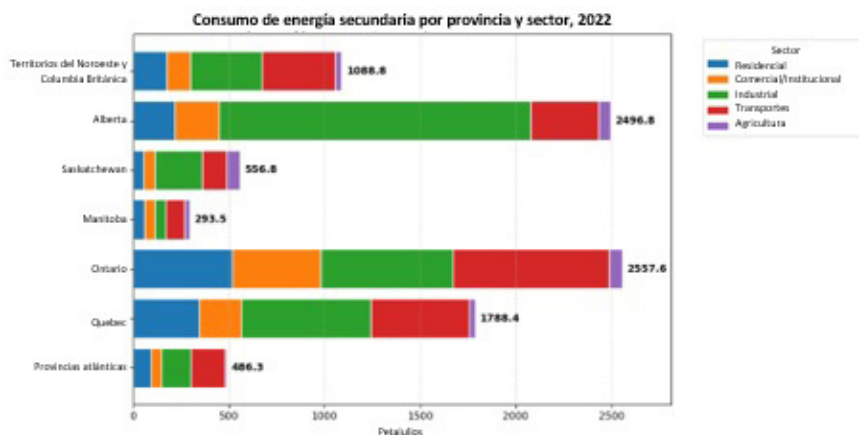


Figura 2. Fuente: Datos de NRCan, 2025b

En 2024, el suministro energético total de Canadá (una medida del consumo de energía primaria) fue de aproximadamente 11,75 EJ (Energy Institute, 2025). Esta cifra está dominada por el consumo de gas natural y petróleo. El consumo de energía secundaria (es decir, la energía utilizada en su forma final útil) es inferior, lo que refleja las pérdidas de eficiencia en la generación eléctrica y la conversión de combustibles. La actividad industrial representó la mayor proporción del uso final de energía, seguida por el transporte, el sector residencial y los servicios comerciales.

ARENAS BITUMINOSAS, CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIONES

Las arenas bituminosas dominan el perfil energético de Alberta y representan una proporción desproporcionada del consumo canadiense de gas natural y de las emisiones de gases de efecto invernadero. Aproximadamente la mitad de la producción de las arenas bituminosas procede de instalaciones *in situ*, que dependen de la inyección de vapor para extraer el bitumen de yacimientos subterráneos. Para generar dicho vapor se queman grandes volúmenes de gas natural.

En 2024, las operaciones en las arenas bituminosas consumieron alrededor de 21 000 millones de metros cúbicos de gas natural, una cantidad comparable al consumo nacional total de un país europeo de tamaño medio (AER, 2025; Energy Institute, 2025). Esta elevada intensidad energética se traduce en altas emisiones por barril de petróleo procedente de las arenas bituminosas. El sector del petróleo y el gas es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de Canadá y las operaciones en las arenas bituminosas representan una parte sustancial de dicho total.

Existen iniciativas impulsadas por la industria, como la Pathways Alliance, cuyo objetivo es reducir las emisiones mediante proyectos de captura y almacenamiento de carbono a gran escala. La cuestión de quién debe asumir los enormes costes asociados a este tipo de proyectos constituye un asunto central de la política pública.

El consumo energético sigue la distribución de la población con una excepción destacada: Alberta. A pesar de contar con menos de un tercio de la población de Ontario, Alberta consume casi la misma cantidad de energía. El principal factor que explica el consumo inusualmente elevado de la provincia es el sector del petróleo y el gas, y en particular la elevada intensidad energética de la producción en las arenas bituminosas (Alberta Energy Regulator [AER], 2025).

4 Comercio energético canadiense y vulnerabilidades estratégicas

El papel de Canadá en los sistemas energéticos globales está definido por la concentración de sus relaciones comerciales con un número reducido de socios clave. Canadá se encuentra entre los mayores exportadores mundiales de petróleo y gas natural,

aunque su perfil exportador está orientado principalmente hacia Estados Unidos. Al mismo tiempo, Canadá importa volúmenes significativos de energía tanto de Estados Unidos como de otros orígenes, lo que genera un conjunto de vulnerabilidades económicas relacionadas tanto con la seguridad del suministro energético como con la seguridad de la demanda energética.

4.1 Exportaciones energéticas

	Importaciones energéticas de Canadá en 2024	Exportaciones energéticas de Canadá en 2024
Estados Unidos	29 319 988 \$	171 718 517 \$
China	214 073 \$	5 346 803 \$
Japón	8984 \$	4 252 148 \$
Países Bajos	1 291 110 \$	2 574 271 \$
Corea del Sur	431 557 \$	2 902 555 \$
Reino Unido	659 864 \$	1 603 062 \$
Nigeria	2 191 238 \$	426 \$
Arabia Saudí	2 008 323 \$	287 \$
Alemania	85 186 \$	1 323 075 \$
India	206 657 \$	761 580 \$

Tabla 2 - Datos de StatsCan, 2025c. Fuente: Datos de StatsCan, 2025c

En 2024, Canadá exportó productos energéticos por un valor superior a 200 000 millones de dólares canadienses (NRCan, 2025a). La energía constituye la mayor categoría individual de exportaciones de bienes de Canadá y estas exportaciones sostienen una parte sustancial de la renta nacional, del empleo y de los ingresos públicos, especialmente en el oeste del país.

Estados Unidos domina claramente este panorama. En 2024, el 88 % del valor de las exportaciones energéticas canadienses tuvo como destino clientes estadounidenses (StatsCan, 2025c). Todas las formas de energía canadiense se exportan en su mayoría hacia el sur. El petróleo crudo representó la mayor proporción, seguido del gas natural, los productos petrolíferos refinados, la electricidad y el carbón. Esta elevada concentración refleja décadas de desarrollo de infraestructuras optimizadas para el comercio en el eje norte-sur, así como la magnitud y la fiabilidad de la demanda estadounidense.

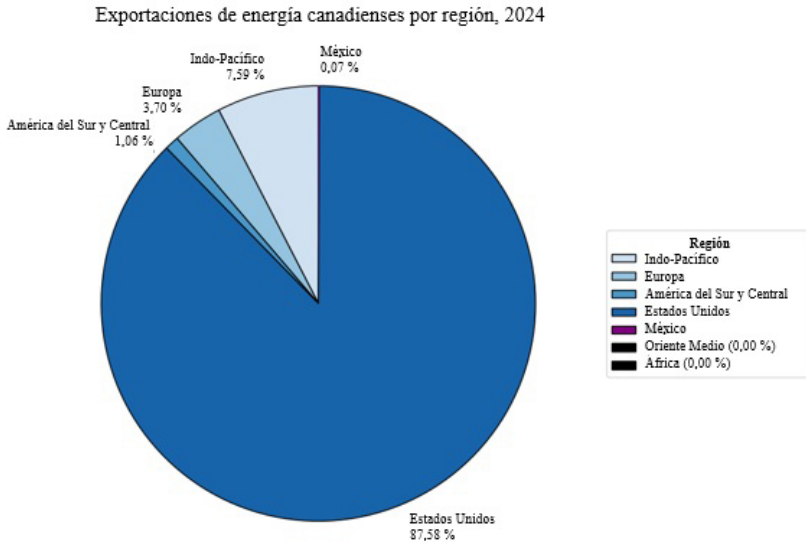


Figura 3: Datos procedentes de StatsCan, 2025c

En comparación, las exportaciones canadienses fuera de Estados Unidos son modestas. La región del Indopacífico concentró aproximadamente el 7,6 % del total de las exportaciones energéticas, siendo China, Japón y Corea del Sur los principales destinos. Se espera que los países del Indopacífico reciban una mayor proporción de la energía canadiense en el futuro gracias a la finalización de la ampliación del oleoducto Trans Mountain y al proyecto LNG Canada, que han permitido que una mayor cantidad de recursos de la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá llegue a la costa del Pacífico. Europa recibió únicamente una cuota modesta de las exportaciones energéticas canadienses. Al no tener acceso directo a los recursos energéticos del oeste del país, las exportaciones hacia Europa proceden fundamentalmente de la industria petrolera marina del Atlántico canadiense.

4.2 Importaciones energéticas

A pesar de su condición de exportador neto de energía, Canadá también importa grandes cantidades de recursos energéticos. En 2024, Canadá importó energía por un valor de 56 100 millones de dólares canadienses de socios comerciales internacionales, principalmente petróleo crudo, productos petrolíferos refinados y gas natural (NRCan, 2025a). Como era de esperar, Estados Unidos vuelve a ser el socio dominante. Más de cuatro

quintas partes de las importaciones energéticas de Canadá proceden del sur de la frontera. Estas importaciones son fundamentales para la economía del este de Canadá, ya que abastecen de combustibles y electricidad a Ontario, Quebec y las provincias atlánticas (Statistics Canada, 2025d). El petróleo crudo y los productos petrolíferos refinados procedentes de Europa, Oriente Medio y África occidental complementan el suministro estadounidense para determinadas refinerías y terminales de importación de productos en Quebec y Nuevo Brunswick (Statistics Canada, 2025d)

La dependencia canadiense de las importaciones energéticas está estrechamente ligada a la geografía y a la infraestructura. El este de Canadá carece de una ruta directa de oleoductos que permita acceder al petróleo del oeste del país y, por tanto, depende de importaciones extranjeras y de infraestructuras que atraviesan territorio estadounidense. Otro factor clave es el económico. Aunque el este de Canadá dispone de un gasoducto para recibir gas natural procedente del oeste del país, la expansión de la fracturación hidráulica en la formación Marcellus en Estados Unidos, justo al sur de Ontario, ha provocado un aumento masivo de la producción regional de gas natural y una caída de los precios. Como resultado, una parte significativa de los suministros tradicionales del este de Canadá, anteriormente procedentes del oeste del país, ha sido desplazada por importaciones desde Estados Unidos (Canadian Association of Petroleum Producers [CAPP], 2025).

5 Vulnerabilidades estratégicas

El perfil del comercio energético canadiense genera una doble vulnerabilidad. Por el lado del suministro, el este de Canadá depende en gran medida de la energía importada. Aunque el petróleo y el gas del oeste de Canadá aportan una parte considerable del suministro energético del este del país, una proporción significativa de estos flujos (en particular en el caso del petróleo) se transporta a través de sistemas de oleoductos regulados por Estados Unidos en el Medio Oeste estadounidense. Por el lado de la demanda, el oeste de Canadá depende del acceso continuado al mercado estadounidense para absorber la mayor parte de sus exportaciones energéticas. Estas vulnerabilidades diferenciadas pueden dar lugar a una política canadiense fragmentada en sus relaciones energéticas con Estados Unidos, cuestión que se analizará más adelante en este artículo.

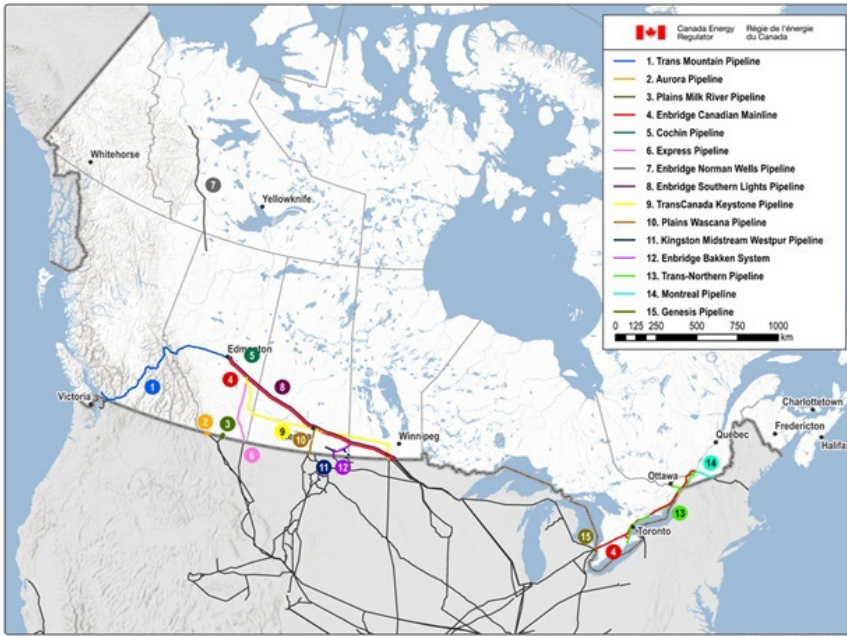


Figura 4. Fuente: Mapa cortesía del Canada Energy Regulator [CER], 2025

Una interrupción grave de las relaciones entre Canadá y Estados Unidos no solo podría poner en riesgo los ingresos por exportaciones, sino también socavar la seguridad del suministro energético en las regiones más pobladas de Canadá. Aunque este escenario sigue siendo poco probable, sus consecuencias serían severas. Estas vulnerabilidades no se resuelven con facilidad. La geografía, los costes hundidos de las infraestructuras, las barreras regulatorias y la oposición política limitan la capacidad de Canadá para reorientar rápidamente sus flujos comerciales. En consecuencia, los esfuerzos de diversificación tienden a ser incrementales más que transformadores.

EL DEBATE DEL GASODUCTO, 1956

Varios Gobiernos canadienses han invertido un capital político y financiero considerable en intentos de cerrar la brecha de la infraestructura energética entre el este y el oeste del país. El ejemplo más destacado es el «debate del gasoducto» de 1956, en torno a la construcción del gasoducto TransCanada, promovido por C. D. Howe. Charles Decateur Howe fue un influyente ministro de los Gobiernos del Partido Liberal de Canadá encabezados por William Lyon Mackenzie King y Louis St. Laurent, de cuyos gabinetes formó parte

entre 1935 y 1957. Conocido durante la Segunda Guerra Mundial como el «ministro de todo», suele ser descrito como el padre de la industrialización canadiense.

El proyecto estaba concebido para transportar hacia el este el abundante gas natural de Alberta a través de una ruta íntegramente canadiense al norte de los Grandes Lagos. En teoría, mantener la infraestructura dentro del territorio canadiense limitaría el alcance de una posible interferencia estadounidense en la futura explotación del gasoducto, reforzando así la soberanía energética de Canadá. La principal complicación radicaba en que las empresas que integraban el consorcio TransCanada eran mayoritariamente de propiedad estadounidense, debido a las limitaciones financieras y tecnológicas de las empresas canadienses (Saywell, 1975, p. 254).

Restringir el trazado del gasoducto a una ruta exclusivamente canadiense resultó comercialmente inviable, lo que obligó tanto al Gobierno federal como al Gobierno de Ontario a intervenir financieramente. El Gobierno federal asumió la responsabilidad del tramo más complejo del proyecto a través de una empresa estatal creada específicamente para ese fin (Saywell, 1975, p. 251). Como consecuencia, los enormes costes de atravesar los terrenos pantanosos del este de Manitoba y de perforar el Escudo Canadiense en el oeste de Ontario recayeron directamente sobre el tesoro federal.

El apoyo federal incluyó, asimismo, un préstamo de 72 millones de dólares a TransCanada, que el Gobierno aprobó en la Cámara de los Comunes el 7 de junio de 1956, antes de la fecha límite para el inicio de las obras. El uso agresivo de los procedimientos parlamentarios, combinado con la indignación pública ante lo que fue percibido en gran medida como la «cesión» de una infraestructura nacional crítica a la propiedad estadounidense, provocó una grave crisis política. El resurgimiento del nacionalismo económico desencadenado por el debate del gasoducto contribuyó finalmente a la derrota del Gobierno liberal y a la caída política de C. D. Howe en 1957 (Ibbitson, 2023, p. 162).

A pesar de haber hecho campaña contra el proyecto, el nuevo Gobierno progresista-conservador de John Diefenbaker optó por no detener la construcción del gasoducto. Diefenbaker reconoció la importancia del proyecto para el

desarrollo económico de las praderas canadienses (Ibbitson, 2023, pp. 164-166). No obstante, el cambio de Gobierno marcó el inicio de un nuevo periodo de inquietud en Canadá respecto de la influencia estadounidense sobre el sector energético y la economía en general. Esta preocupación quedó recogida formalmente más tarde, en 1957, por una *Royal Commission* que examinó las perspectivas de crecimiento económico de Canadá, la cual concluyó que «detrás de esta [ansiedad] se encuentra el temor de que una integración continuada pueda conducir a la dominación económica por parte de Estados Unidos y, en última instancia, a la pérdida de nuestra independencia política» (Gobierno de Canadá, 1957, p. 390).

6 Restricciones políticas, jurídicas y sociales de la infraestructura energética

Si bien la geografía y la geología establecen los límites físicos del sistema energético canadiense, el derecho y las políticas públicas definen los límites de lo que resulta social y políticamente aceptable en Canadá. Durante las dos últimas décadas, la construcción de grandes infraestructuras energéticas en el país se ha vuelto cada vez más difícil, costosa e incierta. Esto no obedece a una única limitación, sino a la interacción de tres puntos de veto distintos: los derechos de los pueblos indígenas, la política climática y la gobernanza federal-provincial. La construcción de nueva infraestructura energética exige que los promotores de los proyectos sepan navegar estos puntos de veto. La gestión de este entorno complejo suele describirse como la obtención de una «licencia social» para avanzar con un proyecto. La creciente dificultad para obtener dicha licencia social ha dificultado de manera decisiva la construcción de nuevas infraestructuras energéticas.

6.1 Derechos de los pueblos indígenas

La consagración constitucional y la expansión jurisprudencial de los derechos de los pueblos indígenas han transformado la economía política del desarrollo de infraestructuras. Las decisiones judiciales de las últimas décadas han establecido una sólida obligación de consultar y, en algunos casos, de adaptarse a las comunidades indígenas cuyos derechos puedan verse afectados por proyectos propuestos (Bankes, 2020). En la práctica, esto ha

convertido a las comunidades indígenas en actores decisivos de la geopolítica energética. Los proyectos de infraestructura que logran un apoyo duradero de estas comunidades pueden avanzar, aunque a un ritmo lento. El resultado no es una oposición uniforme al desarrollo energético, sino un aumento significativo de la incertidumbre y de los costes de negociación.

Esta nueva realidad puede interpretarse como una corrección de errores pasados. A lo largo de la historia, la expansión de la infraestructura energética canadiense se solía llevar a cabo a expensas de las tierras tradicionales y los medios de subsistencia de los pueblos indígenas. Por ejemplo, la construcción de la presa W. A. C. Bennet en la década de 1960 inundó una vasta extensión de tierras utilizadas por el pueblo Tse'kehne en el noreste de la Columbia Británica (Sims, 2017). El equilibrio entre la preservación del uso tradicional de las tierras y la construcción de nuevas infraestructuras para el desarrollo económico y la seguridad seguirá siendo un desafío que Canadá deberá gestionar durante muchos años.

6.2 Clima y oposición pública

La limitación de las emisiones responsables del cambio climático se ha convertido en un principio central de la política energética canadiense desde el regreso al poder del Partido Liberal de Canadá en 2015. Los compromisos climáticos federales y provinciales, incluidos los límites de emisiones, la fijación de precios al carbono y las normas reguladoras, influyen directamente en la viabilidad de nuevas infraestructuras. Estas políticas interactúan con actitudes públicas que, en algunas regiones, son abiertamente hostiles a la expansión de los combustibles fósiles. Incluso cuando los proyectos cumplen con los requisitos regulatorios formales, pueden fracasar políticamente si se perciben como incompatibles con los objetivos climáticos de Canadá (Calnan, 2024). Esta dinámica incrementa el riesgo de los proyectos y alarga los plazos, intensificando la cautela de los inversores.

En los últimos años, las actitudes públicas respecto al equilibrio entre medioambiente y economía han comenzado a cambiar. En 2015, el 67 % de los canadienses encuestados priorizaba el medioambiente frente a un 24 % que priorizaba el crecimiento económico. En 2025, esta relación se ha invertido: el 57 % prioriza la economía frente a un 35 % que prioriza el medioambiente (Nanos Research, 2025).

6.3 Federalismo y complejidad regulatoria

La estructura federal de Canadá añade otra capa de complejidad. El desarrollo energético se sitúa en la intersección de las competencias federales y provinciales, lo que genera procesos regulatorios superpuestos y frecuentes disputas políticas. Las provincias controlan el desarrollo de los recursos, la fiscalidad asociada y la infraestructura interprovincial, mientras que el Gobierno federal regula la energía en tierras federales, la energía nuclear y la infraestructura interprovincial e internacional (Biblioteca del Parlamento, 2019). La regulación ambiental es una competencia compartida y a menudo controvertida.

Esta división de competencias suele generar parálisis y politización. Los grandes proyectos se convierten en símbolos de identidad nacional, agravios regionales y conflictos partidistas. Como resultado, los debates sobre infraestructura trascienden cada vez más lo económico para adentrarse en cuestiones de legitimidad, división constitucional de poderes y propósito nacional.

7 La posición internacional de Canadá

Canadá está firmemente integrado en el grupo de naciones occidentales. Cuenta con una larga tradición de gobernanza democrática, una economía orientada al mercado y una profunda participación en las instituciones multilaterales surgidas tras la Segunda Guerra Mundial. Canadá es miembro fundador de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), del Grupo de los Siete (G7), de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y de la alianza de inteligencia Cinco Ojos (Five Eyes). Como nación ártica, también es miembro del Consejo Ártico, establecido en Ottawa en 1996. Asimismo, Canadá pertenece a la Mancomunidad de Naciones (Commonwealth of Nations), lo que refuerza sus vínculos institucionales y culturales con el Reino Unido y otras antiguas colonias británicas. Canadá también se presenta como una nación indopacífica: es miembro fundador del foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) y un socio comercial creciente de las economías de la región.

Las relaciones de seguridad fundamentales de Canadá son norteamericanas y transatlánticas. La pertenencia a la OTAN compromete a Canadá con la defensa colectiva en virtud del artículo 5, anclando su política de seguridad en la alianza occidental. Canadá mantiene una presencia militar avanzada en Europa

central y oriental a través de la operación REASSURANCE, con aproximadamente dos mil efectivos desplegados como parte de la Brigada Multinacional de la OTAN en Letonia (Fuerzas Armadas Canadienses, 2025). Asimismo, Canadá alberga en Montreal el Centro de Excelencia de la OTAN sobre Cambio Climático y Seguridad. La pertenencia de Canadá a la comunidad de inteligencia Cinco Ojos integra estrechamente a sus agencias, como el Communications Security Establishment, el Intelligence Assessment Secretarial del Privy Council Office y el Chief of Defence Intelligence, con sus homólogas de Estados Unidos, Reino Unido, Australia y Nueva Zelanda. Canadá y Estados Unidos también están vinculados a través del Comando de Defensa Aeroespacial de América del Norte (NORAD, por sus siglas en inglés), un sistema integrado de alerta y control aeroespacial responsable de la defensa del continente.

El compromiso económico y diplomático refuerza aún más la alineación occidental de Canadá. Canadá suele definir su papel internacional a través de su identidad como «país del G7». Es importante señalar que la inclusión de Canadá en el G7 se vio reforzada por sus vastas reservas energéticas. La creación del G7 fue consecuencia directa de la crisis energética de la década de 1970 y la incorporación de uno de los pocos grandes exportadores energéticos del bloque occidental resultó coherente con los objetivos del grupo (Gordon, 2023). La ayuda internacional canadiense también respalda las instituciones multilaterales occidentales. La asistencia al desarrollo se canaliza a través del sistema de las Naciones Unidas, el Fondo Monetario Internacional, el Grupo Banco Mundial y la Organización Mundial del Comercio (Asuntos Globales de Canadá, 2025).

Desde el giro del Partido Conservador hacia el libre comercio bajo el primer ministro Brian Mulroney en la década de 1980, la política económica canadiense ha abrazado de manera sistemática los acuerdos de libre comercio. Hoy en día, Canadá participa en una amplia red de acuerdos comerciales, entre ellos el Acuerdo Económico y Comercial Global con la Unión Europea, el Tratado Integral y Progresista de Asociación Transpacífico con las economías de la región del Indopacífico y, de manera más significativa, el Tratado de Libre Comercio de América del Norte y su sucesor, el Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá. El comercio y la inversión en energía de Canadá han crecido de forma sostenida al amparo de estos marcos jurídicos, sujetos a la evolución de los precios de las materias primas.

La herencia cultural influye en la política exterior canadiense y, de manera indirecta, en su diplomacia energética. Los vínculos institucionales, jurídicos y lingüísticos con Europa constituyen la base de la alineación con las normas occidentales. Las comunidades de la diáspora y los lazos históricos han influido en los asuntos de seguridad que afectan a las cadenas de suministro energético. La participación de Canadá en la Primera y la Segunda Guerra Mundial, por ejemplo, estuvo vinculada a su identificación con Gran Bretaña como la «madre patria». Más recientemente, se considera que la amplia diáspora ucraniana en Canadá influyó en la firme respuesta de Ottawa a la anexión de Crimea por parte de Rusia en 2014 (Ibbitson, 2014). Al mismo tiempo, la cultura popular canadiense está fuertemente influida por Estados Unidos. El ecosistema de entretenimiento de Canadá, incluidas la televisión, el cine, la música y las redes sociales, está dominado por empresas y plataformas estadounidenses, lo que refuerza la superposición cultural junto con la integración económica. Los vínculos de Canadá con los países occidentales influyen indirectamente en su geopolítica y diplomacia energéticas. En la medida en que los canadienses aspiran a aumentar las exportaciones de energía, sus socios preferidos son los países europeos (Nanos Research, 2025). Esta preferencia se ha vuelto más urgente tras la invasión rusa de Ucrania y la posterior crisis energética en Europa.

Décadas de una política exterior relativamente benigna han contribuido a la reputación de Canadá como un actor internacional constructivo y positivo (Bricker, 2024). Sobre esta base, los Gobiernos canadienses recientes han impulsado una política exterior orientada a valores. Durante el Gobierno del primer ministro Justin Trudeau, este enfoque alcanzó su punto álgido con la denominada «política exterior feminista» de Canadá, que enfatizaba el empoderamiento de las mujeres y la igualdad de género. La política climática constituyó otro pilar central de la diplomacia canadiense durante este periodo, lo que generó una tensión inherente entre los valores proclamados por Canadá y la realidad económica de ser uno de los principales exportadores de petróleo y gas.

Este enfoque basado en valores se apoyaba en un entorno estratégico en el que la seguridad, el comercio y la posición diplomática de Canadá estaban sustentados por relaciones positivas con una potencia hegemónica estadounidense. Por ejemplo, la pertenencia de Canadá al G7 es resultado directo de la

intervención de Estados Unidos. En 1976, el presidente estadounidense Gerald R. Ford insistió en que Canadá fuera incluido en la segunda cumbre celebrada en Puerto Rico, anulando las objeciones francesas (Gordon, 2023). Asimismo, la integración de Canadá en el aparato de seguridad estadounidense a través de la alianza de intercambio de inteligencia Cinco Ojos y del NORAD resulta inconcebible sin una relación excepcionalmente estrecha entre ambos países.

Sin embargo, en los últimos años Canadá ha tenido dificultades para cumplir compromisos militares y de seguridad clave. En 2023, fue el único miembro de la OTAN que no alcanzó tanto el objetivo de destinar el 2 % del PIB al gasto en defensa como el umbral de asignar el 20 % de dicho gasto a equipamiento e investigación y desarrollo (Maddison, Fraser y Cowan, 2024). Canadá tampoco cumplió sus compromisos en materia de mantenimiento de la paz: pese a que en 2016 se comprometió a desplegar hasta seiscientos efectivos en misiones de las Naciones Unidas, en octubre de 2025 solo veintisiete efectivos y agentes de policía canadienses participaban en operaciones de mantenimiento de la paz de la ONU (Fuerza de las Naciones Unidas para el Mantenimiento de la Paz, 2025). En 2023, un reportaje del *Washington Post* basado en un documento filtrado del Pentágono reveló la frustración existente dentro de la Administración Biden respecto al nivel de preparación militar de Canadá, incluida la acusación de que el primer ministro Trudeau había indicado en privado que Canadá nunca alcanzaría el objetivo de gasto de la OTAN (Coletta, 2023). La exclusión de Canadá del acuerdo AUKUS sobre submarinos y tecnologías avanzadas entre Estados Unidos, Australia y Reino Unido reforzó aún más estas preocupaciones. Aunque Canadá no tiene una necesidad inmediata de submarinos de propulsión nuclear, la restricción del intercambio tecnológico a un subconjunto más reducido de socios de Cinco Ojos ha suscitado interrogantes sobre el riesgo de marginación dentro de las instituciones de seguridad occidentales predilectas de Canadá (Carvin y Juneau, 2023).

Canadá sigue siendo miembro y firme defensor de las principales instituciones occidentales surgidas tras la Segunda Guerra Mundial. No obstante, pese a esta identificación con Occidente, la infraestructura energética existente en Canadá lo limita a la hora de influir en los resultados económicos de los países europeos. En cambio, la geopolítica energética canadiense probablemente lo acerque aún más a Estados Unidos y a la región del Indopacífico.

8 La atracción inexorable de la integración energética entre Canadá y Estados Unidos

El sector energético canadiense, al igual que gran parte de su economía, está profundamente entrelazado con el de Estados Unidos. Como se ha señalado anteriormente, Estados Unidos es el principal socio de Canadá tanto en exportaciones como en importaciones de energía. A lo largo del tiempo, esta relación ha atravesado periodos de estrecha cooperación, desconfianza y episodios periódicos de proteccionismo a ambos lados de la frontera. Estas oscilaciones han influido de manera decisiva en el desarrollo de la industria y la infraestructura energéticas de Canadá. Durante décadas, Canadá ha sopesado repetidas veces sus temores persistentes a una dominación política estadounidense frente a la prosperidad que permite el acceso a un mercado mucho mayor. La retórica del presidente estadounidense Donald Trump intensificó estas tensiones y reavivó el interés político por diversificar las exportaciones energéticas canadienses más allá de Estados Unidos.

El oeste de Canadá ha sido exportador de energía hacia Estados Unidos desde la finalización del oleoducto Interprovincial Pipeline. En 1955, las exportaciones canadienses de «petróleo, crudo y parcialmente refinado» alcanzaban un valor nominal de 36,3 millones de dólares (Dominion Bureau of Statistics, 1956). En la actualidad, las exportaciones energéticas del oeste de Canadá a Estados Unidos generan bastante más de cien mil millones de dólares anuales (NRCan, 2025a). El este de Canadá, por el contrario, sigue dependiendo de suministros de petróleo y gas natural producidos o controlados por Estados Unidos. El crudo y los productos refinados del oeste de Canadá se suministran a Ontario y Quebec a través de oleoductos que atraviesan el estado de Michigan. Estos suministros se complementan con importaciones de crudo y productos refinados estadounidenses. Tras la revolución del gas de esquisto, el este de Canadá también ha pasado a importar la mayor parte de su gas natural desde Estados Unidos. Como resultado, los sectores energéticos de Canadá y Estados Unidos son hoy codependientes en términos generales (Johnston y Calnan, 2024).

En los inicios de la industria del petróleo y el gas, ambos sistemas energéticos se mantenían separados. Tras la Confederación en 1867, la producción de petróleo y gas en el suroeste de Ontario se protegió de la competencia estadounidense mediante arance-

les y barreras no arancelarias, y posteriormente a través de los aranceles de la «Política Nacional» introducidos por el segundo Gobierno de Macdonald en 1878 (Taylor, 2019, p. 46). A medida que la producción mundial de petróleo se expandía y la competencia se intensificaba, los productores y refinadores canadienses dependieron cada vez más de estas restricciones comerciales para proteger sus mercados internos.

Esa protección resultó ser ilusoria. Bajo el Gobierno liberal de Wilfrid Laurier, se dismantelaron los aranceles y la mayor empresa petrolera de Canadá, Imperial Oil, fue adquirida por el gigante estadounidense Standard Oil. Este desenlace era inevitable. El petróleo del suroeste de Ontario tenía un alto contenido de azufre y Standard Oil controlaba las patentes del proceso de desulfuración Frasch (Taylor, 2019, p. 45). Al mismo tiempo, los recursos petroleros de Ontario eran limitados y la producción comenzó a descender de forma pronunciada tras 1900. Canadá seguiría dependiendo de los suministros estadounidenses de petróleo y gas hasta el descubrimiento de petróleo en Leduc (Alberta) en 1947 y el auge de los oleoductos en la década de 1950, desarrollos que, a su vez, estuvieron impulsados por capital y conocimientos técnicos estadounidenses (Kureth, 1985). En 1959, el presidente estadounidense Dwight Eisenhower concedió al petróleo canadiense un trato favorable dentro de las cuotas de importación estadounidenses, lo que incentivó aún más las exportaciones canadienses hacia Estados Unidos (Eisenhower, 1959).

Estados Unidos tenía motivaciones estratégicas muy fuertes para asegurar el suministro de petróleo canadiense en la segunda mitad del siglo xx. En 1956, el geólogo de Shell M. King Hubbert (1956) predijo que la producción de crudo estadounidense alcanzaría pronto su máximo y comenzaría a descender. A comienzos de la década de 1970, esta previsión se había materializado, con la entrada de la producción estadounidense en un prolongado declive. En paralelo, las grandes compañías petroleras internacionales, incluidas las estadounidenses, estaban perdiendo el control de las reservas de Oriente Medio, mientras los productores de la OPEP, recién empoderados, actuaban para elevar los precios del crudo. En este contexto, las primeras inversiones en las arenas bituminosas canadienses comenzaron a parecer cada vez más atractivas, al prometer décadas de suministro procedente de un vecino políticamente estable y fiable.

A partir de 1988, las exportaciones de crudo canadiense a Estados Unidos se expandieron rápidamente, impulsadas por el

crecimiento de las arenas bituminosas y por una relación bilateral estable. Entre 1990 y 2010, las refinerías del Medio Oeste estadounidense invirtieron miles de millones de dólares para procesar mayores volúmenes de crudo pesado y con alto contenido de azufre procedente de las arenas bituminosas (Oil Sands Magazine, 2020). El creciente volumen de petróleo de Canadá también transformó la infraestructura energética estadounidense, incluida la inversión del oleoducto Capline Pipeline para trasladar el crudo de Canadá desde el Medio Oeste hasta la costa del golfo de Estados Unidos.

Se demostró que el consenso en la era posterior a la Guerra Fría para el libre comercio era más frágil de lo esperado. Antes de la elección de Donald Trump en 2016, la oposición política a la globalización fue cobrando fuerza en Estados Unidos. La oposición estadounidense al acuerdo de asociación transpacífico se volvió tan intensa que incluso Hillary Clinton rechazó el acuerdo durante su campaña presidencial. El regreso de Trump al despacho oval en 2025 ha expandido esta oposición a la cooperación extranjera al cuestionar abiertamente los acuerdos económicos y de seguridad a largo plazo con Canadá. El objetivo de los aranceles de Estados Unidos son los productos manufacturados de Canadá, incluidos los automóviles, el acero y el aluminio, mientras que Trump declaró a principios de 2025 que Estados Unidos emplearía la «fuerza económica» para absorber a Canadá como su «estado número 51».

Hasta la fecha, los aranceles estadounidenses han tenido un impacto directo limitado sobre el sector energético de Canadá, aunque la política de Estados Unidos podría tener un mayor efecto en los años venideros. Las exportaciones de petróleo y gas canadienses se escudan en las exenciones del T-MEC (*USMCA exemptions*), dejando más expuestos a los centros de producción de Ontario y Quebec (Tombe, 2025). No obstante, el sector energético juega un papel fundamental en la respuesta estratégica de Canadá. Al inicio de esta última disputa comercial se propuso utilizar las exportaciones de energía como arma, pero Canadá se abstuvo de tomar tales medidas. La intervención de Estados Unidos en Venezuela a principios de 2026 ha planteado otro riesgo para Canadá. Si Estados Unidos logra desviar el crudo pesado de Venezuela a las refinerías estadounidenses de la costa del golfo, podría apartar el crudo de Canadá del mercado de las exportaciones.

A largo plazo, las presiones generadas por la Administración Trump han reforzado el argumento político a favor de la inver-

sión en infraestructura con el fin de diversificar los socios comerciales de Canadá en el sector energético. Sin embargo, las importantes barreras políticas y de infraestructura frenan los esfuerzos de Canadá por diversificar sus exportaciones energéticas.

EL PROGRAMA NACIONAL DE ENERGÍA

Canadá ha experimentado varias oleadas de nacionalismo económico en respuesta a la influencia estadounidense sobre su sector energético. El debate sobre los oleoductos de comienzos de la década de 1950 mencionado con anterioridad fue uno de esos episodios. Otro fue el Programa Nacional de Energía, introducido por el Gobierno liberal de Pierre Trudeau y aplicado entre 1980 y 1985 en respuesta a las crisis petroleras de la década de 1970. Entre otros objetivos, buscaba redirigir petróleo canadiense occidental, vendido con descuento, hacia las refinerías del este del país y reducir la proporción de la producción petrolera canadiense controlada por empresas estadounidenses (Noakes, 2006). En 1973, el 80 % de los ingresos petroleros de Canadá eran recaudados por empresas de propiedad extranjera, principalmente las grandes compañías estadounidenses (Globerman y Shapiro, 1998).

A diferencia de los aranceles de la política nacional anterior, el Programa Nacional de Energía provocó una oposición feroz por parte de la industria energética del oeste de Canadá. En la región, sigue siendo ampliamente percibido como un intento de redistribuir los recursos occidentales en beneficio del Gobierno federal y de reducir los precios de la energía para los consumidores de petróleo del este de Canadá (Nemeth, 1997). Para entonces, el oeste de Canadá ya estaba firmemente consolidado como un exportador competitivo hacia Estados Unidos y veía poco valor en quedar limitado al mercado interno. Tras la salida de Pierre Trudeau del poder en 1984, los Gobiernos canadiense y estadounidense se alinearon ideológicamente en favor del libre comercio. Este periodo de acercamiento dio lugar al Acuerdo de Libre Comercio entre Canadá y Estados Unidos en 1988, seguido por el Tratado de Libre Comercio de América del Norte en 1994, que restringieron de forma significativa la interferencia política en el comercio y la inversión transfronterizos.

9 Diversificación energética de Canadá y Europa: acuerdo de principio

Las relaciones energéticas entre Canadá y Europa se caracterizan por un acuerdo de principio, pero con medidas escasas en la práctica. En 2024, Canadá exportó 6,6 millones de toneladas de crudo y productos petrolíferos refinados a Europa, principalmente a Países Bajos, Reino Unido y Alemania. Estas exportaciones proceden exclusivamente de la industria del petróleo en alta mar de Canadá, con envíos regulares de crudo desde Terranova y Labrador a Europa (StatsCan, 2025d). Aunque el sector *offshore* de Canadá supone un importante logro técnico, su alcance sigue siendo limitado. Terranova y Labrador representan aproximadamente un 2,3 % de la producción total de petróleo y gas de Canadá en términos energéticos (Statistics Canada, 2025b).

Los canadienses muestran interés por Europa como destino para diversificar el comercio energético. Cuando se les preguntó sobre los destinos de exportación que Canadá debería priorizar, la mayoría de los encuestados se inclinaron por Europa (Nanos Research, 2025) y respaldando su opinión, algunos de los principales legisladores europeos han expresado su interés en importar energía canadiense. No obstante, la construcción de esta infraestructura plantea enormes desafíos económicos, políticos y medioambientales, y sigue siendo un objetivo lejano.

Un aumento considerable de la contribución de Canadá al sector energético europeo supondría la necesidad de una infraestructura capaz de transportar los enormes recursos de petróleo y gas del oeste de Canadá a la costa atlántica. Tradicionalmente, los Gobiernos y empresas europeas han mostrado un menor interés en la energía canadiense que sus homólogos estadounidenses. Royal Dutch Shell, por ejemplo, no abrió una filial en Canadá hasta 1911, décadas después de que Standard Oil entrara en el mercado canadiense. Como antigua colonia británica, los recursos energéticos de Canadá atraían de vez en cuando la atención de los políticos británicos: en 1929, el parlamentario de la oposición Winston Churchill visitó los yacimientos de gas natural de Turner Valley (Finch, 2017). Aun así, durante gran parte de la historia de Canadá, el interés británico y europeo en la energía canadiense se centró más en desarrollar la autosuficiencia económica del país que en establecer vínculos duraderos de seguridad energética transatlántica.

El desarrollo de la producción de petróleo en alta mar en la cuenca Jeanne d'Arc, frente a las costas de Terranova y Labrador, supuso una mejora cualitativa en la relación energética entre Canadá y Europa, pero estas exportaciones se desarrollaron lentamente. Aunque la producción en la plataforma Hibernia comenzó en 1997, la exportación regular de crudo de Canadá a Reino Unido no empezó hasta noviembre de 2012. Los cargamentos a otros países europeos comenzaron en diciembre de 2013 (StatsCan, 2025d). Incluso entonces, las refinerías de la costa este de Estados Unidos seguían siendo clientes muy competitivos. Es posible que sea consecuencia de los planes de negocio de las empresas que invirtieron en los proyectos. Las principales plataformas petrolíferas marinas de Canadá, como Hibernia, han estado bajo el mando de empresas estadounidenses, entre ellas Exxon, Chevron, y Murphy Oil, mientras que las empresas europeas, como Equinor, han desempeñado un papel secundario.

En principio, una mayor cooperación energética entre Canadá y Europa beneficia a ambas partes. La crisis energética en Europa tras la invasión de Ucrania por parte de Rusia ha socavado gravemente la seguridad económica de todo el continente. Diversos responsables políticos europeos de diferentes corrientes ideológicas —entre ellos la presidenta del Parlamento Europeo, Roberta Metsola; el excanciller de Alemania, Olaf Scholz, y el presidente de Polonia, Andrzej Duda— han apoyado públicamente el aumento de las importaciones de energía canadiense. Canadá y sus socios europeos han puesto en marcha múltiples iniciativas, como el diálogo de alto nivel en materia de energía entre la UE y Canadá, la asociación energética entre Canadá y Alemania, el diálogo bilateral en materia de energía entre Canadá e Italia y diversos otros marcos bilaterales y multilaterales.

Hasta la fecha, estas iniciativas han dado resultados tangibles limitados para la seguridad energética europea y la diversificación de las exportaciones canadienses. La red de oleoductos existente en Canadá está optimizada para las exportaciones a Estados Unidos y para el suministro nacional en el este de Canadá. El desvío de la energía del oeste de Canadá a los puertos del Atlántico requeriría importantes inversiones en nuevas infraestructuras. Para estos proyectos también sería necesaria la cooperación de Quebec, que en anteriores ocasiones bloqueó iniciativas de exportación energética como el proyecto Énergie Saguenay de GNL (Calnan, 2024). Sin el apoyo regional, la idea de una infraestructura de exportación a gran escala sigue siendo poco probable. La posi-

bilidad de que disminuya la demanda europea de gas natural debilita aún más la visibilidad comercial de nuevos gasoductos y plantas de regasificación. Propuestas como la exportación de GNL desde la bahía de Hudson han llamado la atención, pero se enfrentan a grandes barreras técnicas y políticas.

El hidrógeno es una posible excepción, aunque incierta. En 2022, Canadá y Alemania firmaron un «Acuerdo de mejora de la seguridad energética de Alemania con hidrógeno limpio canadiense». Aunque al principio el canciller Scholz buscaba el GNL de Canadá, la declaración resultante hizo hincapié en las esperanzas de Canadá de participar en la incipiente economía del hidrógeno en Europa. Sigue habiendo una gran incertidumbre sobre la viabilidad y el calendario de exportaciones de hidrógeno canadiense a Europa. En Europa, el insuficiente apoyo político ha ralentizado el desarrollo de un mercado de hidrógeno con bajas emisiones de carbono, mientras que los analistas se preguntan si el transporte de hidrógeno será alguna vez económicamente viable, dadas las pérdidas de energía que conlleva (Liebreich, 2022).

10 Diversificación energética en la región del Indopacífico: resultados tangibles y escollos políticos

El creciente papel de Canadá en la seguridad energética de la región del Indopacífico refleja las mismas tensiones fundamentales que definen su geopolítica energética en general: la atracción económica de los grandes mercados externos, los esfuerzos políticos por diversificar las exportaciones fuera de Estados Unidos, las restricciones impuestas por la infraestructura y la normativa nacionales y las persistentes inquietudes sobre la soberanía, la seguridad y la influencia extranjera. La región del Indopacífico ofrece a Canadá su mayor oportunidad de crecimiento a largo plazo fuera de América del Norte, pero también es una región con un grave riesgo geopolítico.

10.1 China y los límites de la diversificación estratégica

China tiene una influencia inevitable en los cálculos energéticos de Canadá en el Indopacífico. Como superpotencia económica disruptiva, China presenta a la vez una enorme oportunidad comercial y un importante riesgo político. La rápida industrialización y urbanización generaron un gran interés por los recursos naturales de Canadá, entre ellos la energía, incluso al tiempo que

la creciente presencia económica de China suscitaba inquietudes en Canadá sobre la influencia política y la dificultad de equilibrar las relaciones con Pekín y Washington.

En 2005, el primer ministro Paul Martin firmó un acuerdo de cooperación con la República Popular China, que promovía la colaboración bilateral en materia de petróleo y gas, energía nuclear, eficiencia energética y energía limpia. En ese momento, China estaba viviendo una década de crecimiento económico de dos dígitos, así como el aumento de la demanda de energía más rápido de la historia mundial. Entre los años 2000 y 2010, el consumo energético de China pasó de 40 exajulios a 100 exajulios, superando a Europa y Norteamérica como consumidor de energía.

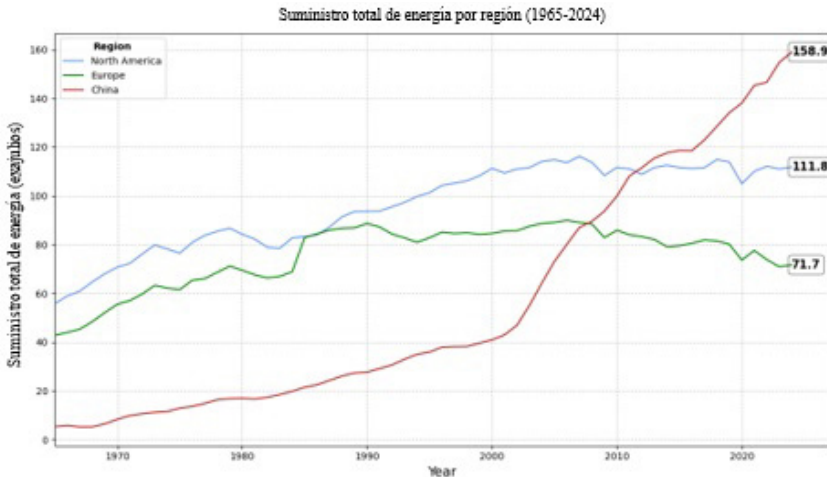


Figura 5. Fuente: Datos de Energy Institute, 2025

Para mantener este crecimiento se requerían importaciones de energía a gran escala. En 2001, China anunció su estrategia de «salida al exterior» (*going out*), alentando a las empresas estatales a invertir en el extranjero. Esto incluía explícitamente la explotación de los recursos extranjeros en colaboración con empresas locales (Rongji, 2001). El acuerdo de cooperación de 2005 vino rápidamente acompañado de importantes inversiones de China en el sector energético de Canadá, en particular en las arenas bituminosas, cuya magnitud y sofisticación tecnológica resultaban muy atractivas para las empresas energéticas chinas. Ese mismo año, la CNOOC adquirió una participación del 16,7 % en MEG Energy. En 2010, Sinopec compró una participación del 9 %

en el proyecto Syncrude y, en 2012, CNOOC adquirió la totalidad de Nexen por la cuantía de 15 000 millones de dólares. PetroChina también tiene participaciones en diversos proyectos de arenas bituminosas, como MacKay River y Dover. Además de los hidrocarburos, China importa grandes cantidades de carbón metalúrgico canadiense del sureste de la Columbia Británica y es responsable del funcionamiento de dos reactores nucleares CANDU cerca de Hangzhou.

Estos acontecimientos provocaron cierta inquietud en China. La adquisición de Nexen por parte de la CNOOC fue especialmente controvertida, en parte debido a la estrecha alianza entre Canadá y Estados Unidos. Mientras las autoridades canadienses revisaban la compra, la agencia de espionaje canadiense CSIS advirtió que las adquisiciones por parte de empresas chinas podrían suponer una amenaza para la seguridad nacional (Steger y Alini, 2012). En ese momento, Estados Unidos estaba revisando los posibles riesgos de seguridad que planteaba el gigante chino de las telecomunicaciones Huawei y advirtió a Canadá de los riesgos de la integración económica con la superpotencia asiática. Tras la adquisición de Nexen, el Gobierno de Harper introdujo nuevas normas en virtud de la ley de inversiones de Canadá para limitar la capacidad de las empresas estatales de adquirir participaciones mayoritarias en empresas de arenas bituminosas (Burton, 2012). El aumento de las tensiones entre Estados Unidos y China, especialmente en torno a Huawei, puso a Ottawa en una posición cada vez más incómoda. Esto culminó en 2018, con la detención de la ejecutiva de Huawei Meng Wanzhou a petición de las autoridades estadounidenses y la detención en represalia por parte de China de dos ciudadanos canadienses.

Desde entonces, ha sido complicado reparar esta relación. En 2024, una investigación pública reveló que China había interferido en dos elecciones canadienses recientes. Más tarde ese mismo año, Canadá se unió a Estados Unidos al imponer aranceles del 100 % en los vehículos eléctricos fabricados en China, lo que desencadenó una disputa comercial que se mantiene a día de hoy. Aunque las relaciones diplomáticas se han estabilizado en parte, estos acontecimientos han limitado drásticamente el espacio político para una mayor cooperación energética con China.

10.2 Infraestructura del Pacífico y mercados asiáticos

A pesar de las grandes inversiones chinas en la producción canadiense, hasta hace poco la infraestructura energética de Canadá

no permitía la exportación al Indopacífico. Al principio, China intentó coordinar la construcción de esta infraestructura. En 2005, PetroChina firmó un acuerdo de cooperación con Enbridge para explorar la posibilidad de un oleoducto hasta la costa noroeste de la Columbia Británica, un proyecto que más tarde se conocería como Northern Gateway. La propuesta se enfrentó a una intensa oposición regulatoria, medioambiental y política, y fue cancelada por el Gobierno de Trudeau en 2016. La prolongada suspensión de Canadá del tráfico de petroleros a lo largo de la costa norte de la Columbia Británica, que finalmente se formalizó mediante la ley de suspensión de buques petroleros en 2019, cerró de forma definitiva los puertos de gran calado como Kitimat o Prince Rupert a la exportación de crudo (Chong y Sweeney, 2017).

Después de la cancelación del Northern Gateway, la ampliación del oleoducto Trans Mountain se convirtió en la única ruta viable para exportar el crudo canadiense al Indopacífico. Tras años de retrasos y sobrecostes, las exportaciones desde la terminal marítima de Westridge comenzaron finalmente en mayo de 2024. Uno de sus primeros cargamentos se dirigió a China (StatsCan, 2025d) y, desde entonces, China se ha mantenido como el segundo mayor importador de crudo canadiense. Sin embargo, las perspectivas de una mayor expansión son inciertas. Tras décadas de rápido crecimiento, la demanda china de petróleo parece estar estancándose a medida que los vehículos eléctricos sustituyen el consumo de gasolina y diésel.

China también desempeña un papel importante en el sector del gas natural de Canadá. CNOOC, PetroChina y Sinopec poseen activos en el sector *upstream* del gas natural en la Columbia Británica y Alberta. Además, PetroChina es un socio clave para LNG Canada, que empezó a exportar gas natural licuado a Asia en junio de 2025. Entre mayo y octubre de 2025, China recibió cuatro cargamentos de GNL provenientes del proyecto (CER, 2026).

10.3 Más allá de China: socios del Indopacífico y diversificación progresiva

Aun excluyendo a China, la región del Indopacífico representa la mayor parte del comercio energético de Canadá fuera de Estados Unidos. Canadá es miembro del Tratado Integral y Progresista de Asociación Transpacífico y ha buscado estrechar lazos económicos con las economías en crecimiento de la región. Japón y Corea del

Sur, ambos aliados democráticos reconocidos en la Estrategia de Canadá para el Indopacífico como socios en materia de seguridad, mantienen relaciones energéticas duraderas con el país. Los países de la ASEAN, en particular Malasia, también juegan un papel cada vez más importante, aunque el volumen sigue siendo modesto.

La integración de Japón en el sector energético de Canadá se remonta a hace décadas. La filial canadiense de Mitsui & Co.'s se constituyó en 1956, con intereses entre los que se encontraban el petróleo, el gas y el carbón. En 1977, el carbón era el principal producto que Canadá exportaba a Japón, con un valor anual de 520 millones de dólares (Gobierno de Canadá, 1977). En 2024, la energía que Canadá exportó a Japón ascendió a un total de 4200 millones de dólares. Se espera que LNG Canada estreche aún más esta relación: Mitsubishi Corporation posee una participación del 15 % en el proyecto y Japón importó cinco cargamentos de GNL entre mayo y octubre de 2025 (CER, 2026).

Corea del Sur también ha expandido su presencia. La empresa estatal Korea National Oil Corporation se incorporó al sector energético canadiense en 2009 con la adquisición de Harvest Energy, lo que le permitió acceder a los activos de arenas bituminosas y gas natural. KOGAS tiene una participación en LNG Canada e importó nueve cargueros en los primeros seis meses del proyecto (CER, 2026). Corea del Sur es también el mayor operador extranjero de reactores nucleares CANDU, tras haber puesto en marcha cuatro unidades en la central de Wolseong en 1983, y sigue siendo uno de los principales importadores de carbón metalúrgico de Canadá.

Actualmente, los países de la ASEAN (con la notable excepción de Singapur) importan poca energía canadiense. La limitada capacidad de refinado de crudo pesado y los abundantes recursos energéticos regionales han reducido la demanda, aunque el aumento del consumo y la disminución de la producción podría alterar este equilibrio (Calnan, 2025). La empresa estatal malasia PETRONAS se ha posicionado en consecuencia, convirtiéndose en uno de los principales inversores en el sector *upstream* del gas natural canadiense y en el segundo mayor accionista de LNG Canada después de Shell. El sudeste asiático también puede convertirse en un mercado importante para las exportaciones de tecnología nuclear canadiense.

India representa la oportunidad de crecimiento a largo plazo más importante, aunque las relaciones de Canadá con el gigante del

sudeste asiático son casi tan tensas como las que mantiene con China. Con el enorme crecimiento económico e industrial previsto en las próximas décadas, se espera que la demanda energética de la India aumente considerablemente hasta mediados del siglo XXI (Agencia Internacional de la Energía [IEA], 2021). Sin embargo, la cooperación energética entre Canadá y la India, especialmente en materia de tecnología nuclear, sigue limitada por las tensiones históricas y políticas. Entre ellas se incluye el uso por parte de la India de un reactor suministrado por Canadá para ayudar al país a desarrollar armas nucleares en la década de 1960. Más recientemente, el deterioro de las relaciones bilaterales está relacionado con el movimiento separatista de Jalistán y el asesinato del líder separatista y ciudadano canadiense Hardeep Singh Nijjar, presuntamente a manos de agentes indios.

11 La energía canadiense en el Ártico

El desarrollo energético en el Ártico canadiense se ve condicionado por los elevados costes de infraestructura, los mercados locales limitados y el objetivo tradicional del Gobierno federal de desarrollar económicamente y asegurar su vasto territorio septentrional. Los tres territorios septentrionales de Canadá, los Territorios del Noroeste y Nunavut cubren en conjunto una superficie equiparable a la Unión Europea, pero tienen menos de 140 000 residentes en total (StatsCan, 2025e). Esta escasa densidad de población limita de forma considerable la viabilidad comercial de las infraestructuras energéticas a gran escala. La mayoría de las regiones del extremo norte carecen de refinerías, oleoductos, centrales eléctricas o líneas de transmisión, lo que provoca que el sistema esté fragmentado y sea inseguro desde el punto de vista energético.

Al mismo tiempo, la presencia constante en el Ártico es esencial para reforzar la soberanía de Canadá. La política canadiense de defensa de 2024, *Our North, Strong and Free* («Nuestro Norte, Fuerte y Libre»), hace especial hincapié en «defender el Ártico y el norte y sus alrededores frente a amenazas nuevas y emergentes mediante una disuasión creíble» (Gobierno de Canadá, 2024, p. 11). En una región tan remota y escasamente poblada, controlar la actividad y hacer cumplir la legislación canadiense resulta difícil y costoso. La señal más evidente de este desafío es la reivindicación de Canadá de que el paso del Noroeste forme parte de sus aguas interio-

res, una posición disputada por Estados Unidos, Reino Unido y la mayoría de las demás potencias marítimas. Cabe destacar que Rusia apoya de forma pasiva la reivindicación de Canadá en foros como el Consejo Ártico, ya que coincide con su reivindicación del control de su propia Ruta del Mar del Norte (Lalonde, 2022).

Por lo tanto, el principal reto para Canadá es mantener una soberanía real en el Ártico sin imponer cargas fiscales insostenibles al Gobierno federal. La mayoría considera que la presencia de las Fuerzas Armadas Canadienses en el Ártico es insuficiente en cuanto a personal, mientras que la infraestructura sigue deteriorándose tras años de falta de inversión (Departamento de Defensa Nacional, 2024). Una estrategia para reducir los costes de revitalización consiste en desarrollar una infraestructura de doble uso: proyectos que sirvan tanto para fines civiles como estratégicos. No obstante, sigue siendo difícil identificar qué usos no militares son viables. El desarrollo energético se ha propuesto en repetidas ocasiones como una de esas vías, ya que ofrece la posibilidad de respaldar los objetivos de soberanía al tiempo que mejora las condiciones económicas locales.

Las consideraciones relativas a seguridad energética proporcionan una justificación interna convincente para invertir en infraestructura en el Ártico. Muchas comunidades septentrionales dependen casi en su totalidad del diésel para el suministro eléctrico y la calefacción. Esta dependencia genera vulnerabilidades persistentes: las entregas de diésel están limitadas por las ventanas de envío estacionales, son habituales las interrupciones de suministro en los meses de invierno y los costes operativos son extremadamente elevados. Los Gobiernos locales carecen de la base impositiva necesaria para mantener esta infraestructura, lo que hace que las comunidades dependan de los subsidios federales y las ayudas de emergencia. Reducir la dependencia del diésel mejoraría la fiabilidad, reduciría las emisiones y aumentaría la resiliencia de la comunidad, pero los sistemas alternativos se enfrentan a grandes obstáculos logísticos y financieros.

Se han presentado diversas propuestas para abordar estos retos. El Kivalliq Hydro–Fibre Link («enlace hidroeléctrico y de fibra óptica de Kivalliq») conectaría las comunidades de Nunavut con la red hidroeléctrica de Manitoba a través de una línea de transmisión de 1200 km, suministrando electricidad y conexión

de banda ancha. Otra opción sería el despliegue de reactores modulares pequeños (SMR, por sus siglas en inglés). El plan de acción de SMR de Canadá considera de manera explícita las comunidades septentrionales y remotas como posibles pioneras, donde los SMR podrían sustituir a la generación diésel (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018). Si bien ambos enfoques prometen una mejora de la seguridad energética y una reducción de las emisiones, requerirían una inversión inicial masiva y una financiación federal continua, lo que plantea dudas sobre su viabilidad política y su rentabilidad a largo plazo.

Desde un punto de vista geopolítico, el desarrollo energético del Ártico ocupa un lugar destacado en la estrategia energética general de Canadá. A diferencia de Europa o del Indopacífico, el Ártico no ofrece oportunidades para la diversificación de las exportaciones ni para el acceso a mercados extranjeros. En cambio, refleja la cara interna de la geopolítica energética canadiense: reforzar la seguridad energética nacional, afianzar la soberanía territorial y gestionar las consecuencias sociales y medioambientales de las infraestructuras en regiones sensibles. Por lo tanto, cualquier estrategia energética para el Ártico debe conciliar los objetivos estratégicos nacionales con los derechos de los pueblos indígenas, la protección del medioambiente y las restricciones fiscales.

Una excepción a esta norma es el posible desarrollo de una terminal de exportación de energía a través de la bahía de Hudson. Este hipotético proyecto podría satisfacer las necesidades energéticas locales y servir como punto de partida para la diversificación de las exportaciones. Además, podría funcionar como infraestructura de doble uso para la presencia militar canadiense. La propuesta más avanzada es la terminal de exportación de GNL de NeeStaNaN, propuesta por Fox Lake Cree Nation, que permitiría exportar el gas natural del oeste de Canadá desde Port Nelson, al norte de Manitoba. Al igual que otros grandes proyectos energéticos en el Ártico, este proyecto se encuentra en una fase inicial. Sigue habiendo dudas sobre su viabilidad económica. La bahía de Hudson solo está libre de hielo durante una parte del año y mantener las entregas de GNL durante todo el año podría requerir buques cisterna especializados y costosas escoltas de rompehielos pesados. Esto añade un importante obstáculo económico a un proyecto que ya de por sí es caro.

EL GASODUCTO DEL VALLE DEL MACKENZIE

El gasoducto del valle del río Mackenzie sigue siendo el ejemplo histórico más claro tanto de la ambición como de las limitaciones del uso de infraestructura energética para «abrir» el Ártico canadiense. Los importantes descubrimientos de petróleo y gas en tierra y mar en la región de Beaufort-Mackenzie, en los Territorios del Noroeste, durante la década de 1960, despertó el interés federal por conectar los recursos del norte con los mercados del sur. Dado que las grandes infraestructuras de los territorios del norte competen a la jurisdicción federal, el Gobierno liberal del primer ministro Pierre Trudeau apoyó activamente las propuestas para construir un gasoducto que transcurriera a lo largo del valle del río Mackenzie.

Desde el principio, el gasoducto se concibió como algo más que un proyecto energético. En 1972, el Gobierno federal publicó unas directrices de planificación que planteaban una visión expansiva en la que el gasoducto serviría de anclaje a un «pasillo» de desarrollo más amplio a lo largo del valle del Mackenzie. La infraestructura complementaria propuesta incluía «una autopista, ferrocarril, redes eléctricas, instalaciones de telecomunicaciones, etc.» (Departamento de Asuntos Indígenas y Desarrollo del Norte, 1972). Al igual que las posteriores estrategias para el Ártico, esta visión contemplaba que la infraestructura energética fuese de doble uso: un medio para estimular el desarrollo económico, así como mejorar la seguridad energética y reforzar la soberanía canadiense en una región remota y escasamente poblada.

Trudeau describió de forma directa el gasoducto del valle del río Mackenzie como un proyecto de construcción nacional comparable al ferrocarril Canadian Pacific. En 1973, argumentó que «es caro, pero también lo fue hace un siglo el ferrocarril Canadian Pacific. ¿Es un proyecto demasiado grande para Canadá? Solo a ojos de aquellos que han perdido la fe en lo que Canadá representa» (Munzur, 2021). Al igual que en los debates actuales sobre las infraestructuras del Ártico, los proyectos destinados al desarrollo del norte se evalúan en función de sus objetivos estratégicos y políticos, más que de su rentabilidad comercial.

Sin embargo, en la práctica, el proyecto ha resultado ser política y jurídicamente insostenible. Las elecciones federales

de 1972 redujeron a los liberales a un gobierno minoritario que dependía del apoyo del Nuevo Partido Democrático (NDP, por sus siglas en inglés), lo que redujo la capacidad de Ottawa para seguir adelante con el proyecto. Al mismo tiempo, las organizaciones indígenas y los grupos ecologistas movilizaron una importante oposición al gasoducto. Como reflejo de la creciente preocupación por las consecuencias sociales y medioambientales del desarrollo energético del Ártico, el Gobierno federal designó en 1974 al expolítico del NDP y juez del Tribunal Supremo de la Columbia Británica, Thomas Berger, para dirigir una investigación sobre los impactos del gasoducto.

El informe final de la investigación de Berger, publicado en 1977, recomendaba una moratoria de diez años para la construcción del gasoducto en el valle del río Mackenzie, con el fin de permitir la resolución de las reclamaciones territoriales de los pueblos indígenas (Berger, 1977). A pesar de que esta recomendación no se cumplió en su totalidad (Enbridge construyó un oleoducto a lo largo del río Mackenzie a principios de la década de 1980), la investigación reformuló en lo fundamental los enfoques canadienses sobre el desarrollo del Ártico. Se establecieron nuevas normas de evaluación ambiental y se elevó el consentimiento indígena como una consideración fundamental en los proyectos de infraestructuras del norte.

12 Canadá como una «superpotencia energética»

La reelección de Donald Trump y la elección del primer ministro Mark Carney pueden marcar un punto de inflexión en la geopolítica energética de Canadá. Poco después de las elecciones estadounidenses, el presidente electo Trump se comprometió a imponer aranceles del 25 % a todos los productos importados de Canadá y México. No solo eso, sino que argumentó también que la dependencia de Canadá de la seguridad y el comercio estadounidenses justificaba su absorción como el «estado 51». La retórica incendiaria de Trump puso de relieve una realidad persistente: la posición de Canadá en materia de seguridad, comercio y diplomacia a nivel mundial sigue estando profundamente marcada por su relación con la superpotencia dominante de la posguerra.

Las declaraciones de Trump provocaron una fuerte reacción en Canadá y contribuyeron a la victoria de los liberales de Carney.

Sin embargo, la vulnerabilidad subyacente sigue presente. Como se ha mostrado en apartados anteriores, los sistemas energéticos de Canadá son un ejemplo del alcance de la integración económica norteamericana. La electricidad, el petróleo y el gas natural fluyen a través de una densa red de infraestructuras transfronterizas, determinada más por la geografía que por las fronteras políticas. Ningún otro par de países ha desarrollado una codependencia energética tan extensa. Como el socio más pequeño, Canadá asume un mayor riesgo: Estados Unidos puede diversificar sus relaciones comerciales y de seguridad con mucha más facilidad que Canadá. Para agravar este desequilibrio, Canadá se enfrenta a un bajo crecimiento de la productividad, con una inversión insuficiente en maquinaria y equipos que contribuye al estancamiento del crecimiento del PIB per cápita y al descenso del nivel de vida relativo.

En respuesta a estos retos estructurales, el Gobierno de Carney ha reavivado la ambición de la era Harper de «alcanzar todo nuestro potencial como superpotencia energética» (Primer Ministro de Canadá, 2025). En este contexto, la frase no denota tanto un deseo de ejercer influencia coercitiva como un esfuerzo por reducir la vulnerabilidad mediante la escalabilidad, la fiabilidad y la diversificación. Un elemento central de esta estrategia es la rápida aprobación y construcción de infraestructuras energéticas para ampliar las opciones de exportación más allá de Estados Unidos, al tiempo que se mantiene el papel de Canadá como proveedor fiable de su mercado principal.

En junio de 2025, el Parlamento aprobó la *Building Canada Act* (ley de construcción de Canadá), una ley nueva y decisiva que permite al Gobierno federal designar determinados proyectos como «proyectos de interés nacional» (PoNI, por sus siglas en inglés). Los proyectos previstos en el anexo 1 de la ley cuentan oficialmente con una autorización previa y están exentos de las disposiciones clave de la *Impact Assessment Act* (ley de evaluación de impacto) (Canadá, 2025). El Gobierno también podría eximir los PoNI de las leyes y normativas enumeradas en el anexo 2, de los que ya se han añadido muchos. Este marco representa una importante recalibración de la autoridad federal sobre la aprobación de infraestructuras. Para llevar a cabo este enfoque, el Gobierno de Carney creó la Oficina de Grandes Proyectos (MPO, del inglés *Major Projects Office*), encargada de acelerar los plazos de aprobación y de asesorar sobre la designación de PoNI. De los trece proyectos que actualmente están siendo evaluados por la

MPO, siete están relacionados con infraestructuras energéticas, entre las que se incluyen importantes redes, la fase 2 de LNG Canada, el proyecto Ksi Lisims LNG y un proyecto de reactor modular pequeño en Ontario (Major Project Office, 2026).

La coordinación entre el Gobierno federal y los Gobiernos provinciales también es fundamental para esta visión de «superpotencia energética». Un memorándum de entendimiento (o MoU, por sus siglas en inglés) entre Ottawa y Alberta compromete a ambos Gobiernos a ampliar la producción y las exportaciones de petróleo y gas. En su redacción, el MoU también compromete a ambos Gobiernos a reducir las emisiones procedentes de la producción de petróleo pesado hasta alcanzar los mejores niveles de su categoría para 2050 mediante un impuesto al carbono industrial cada vez más elevado (Gobierno de Canadá y Gobierno de Alberta, 2025). El MoU prevé la construcción del proyecto Pathways de captura y almacenamiento de carbono a gran escala, junto con un nuevo oleoducto capaz de transportar al menos un millón de barriles diarios de crudo de las arenas bituminosas de Alberta a los mercados asiáticos.

Si bien la viabilidad del proyecto Pathways y del nuevo oleoducto de exportación es objeto de disputa, otros aspectos del MoU tienen implicaciones normativas más inmediatas. El memorándum de entendimiento elimina el límite de emisiones de petróleo y gas propuesto e interrumpe la aplicación de la normativa sobre electricidad limpia en Alberta, revirtiendo así dos políticas emblemáticas de la era Trudeau que habían generado una importante resistencia en el sector energético. El acuerdo también prevé una mayor expansión del oleoducto Trans Mountain, lo que podría aumentar la capacidad total a 1,25 millones de barriles diarios.

12.1 Retos para la visión de superpotencia energética

A pesar de lo atractiva que pueda resultar la idea, las implicaciones reales de ser una «superpotencia energética» siguen siendo ambiguas. Tradicionalmente, el término se refiere a los Estados que utilizan las exportaciones de energía como influencia geopolítica, como la protección de Arabia Saudí bajo el «paraguas de seguridad» de Estados Unidos, la diplomacia coercitiva de Rusia en cuanto al gas o la desmesurada influencia global de Catar. Como economía de libre mercado que apoya las relaciones reguladas con otras naciones, Canadá no es el país más adecuado para asumir ese papel. Si Canadá intenta emular a esos países,

socavaría su credibilidad como proveedor estable. Una estrategia más realista es que Canadá siga actuando como socio de confianza en materia de seguridad energética para Estados Unidos, al tiempo que amplía gradualmente sus relaciones con Europa y el Indopacífico.

También persisten las tensiones entre el aumento de las exportaciones de petróleo y gas y los compromisos climáticos de Canadá. Muchas de las primeras medidas del primer ministro Carney retrotraen elementos de la política climática de Trudeau, apoyándose en la fijación de precios del carbono industrial como principal herramienta de mitigación del Gobierno federal. No obstante, es cada vez más probable que con esta sola herramienta se logren múltiples objetivos políticos. La *Climate Competitiveness Strategy* (Estrategia de Competitividad Climática) de Canadá, publicada junto con el Presupuesto 2025, planteó la fijación de precios del carbono como un mecanismo de reducción de emisiones y un medio para mejorar la competitividad de las exportaciones (Departamento de Finanzas de Canadá, 2025, p. 104). La estrategia sostiene que el petróleo y el gas con menores emisiones conservarán su valor en un mundo en proceso de descarbonización, por lo que es el momento de establecer incentivos para acelerar este proceso. Sin embargo, esto deja sin resolver una cuestión fundamental: si la descarbonización mundial fracasa, ¿entraría dentro de sus intereses nacionales gravar su principal industria exportadora, reduciendo así su competitividad frente a otras naciones?

El reto de la competitividad también es relevante para la resistencia del recientemente revitalizado nacionalismo económico canadiense. Si bien la ampliación de las rutas de exportación a Asia y Europa podría fortalecer la posición negociadora de Canadá con Estados Unidos, las empresas privadas deben ser prudentes con sus gastos de capital. Quizá no estén convencidas de que a sus accionistas les valga la pena asumir el riesgo de llevar a cabo costosos proyectos de diversificación energética. Por ejemplo, TransCanada Pipelines es ahora una empresa energética continental llamada TC Energy, que a menudo prefiere invertir en Estados Unidos antes que en Canadá (TC Energy, 2025). Para muchos inversores, las infraestructuras que satisfacen la demanda estadounidense siguen siendo más rentables que los proyectos políticamente inciertos en los mercados lejanos. Además, el nacionalismo económico de la Administración Trump podría arrebatar aún más capital a Canadá, ya que las empresas

buscan alinearse con las prioridades políticas de Estados Unidos. También existen serias dudas sobre si la administración estadounidense actual o futura tolerará que Canadá se diversifique en la dirección equivocada, al convertirse en uno de los principales socios de China en materia de seguridad energética.

La geografía energética de Canadá impone una lógica difícil de eludir en su geopolítica energética. Canadá cuenta con ingentes recursos y Estados Unidos ofrece una demanda de una magnitud inigualable. Esta asociación natural ha sustentado la prosperidad de Canadá durante décadas. Sin embargo, la reorientación de la política exterior estadounidense bajo el mandato de Trump, plasmada en un enfoque basado en esferas de influencia por todo el hemisferio occidental, podría obligar a Canadá a tomar decisiones incómodas. El país podría verse obligado a sopesar los beneficios materiales de una mayor integración dentro de una esfera de influencia estadounidense explícita frente a los riesgos económicos y de seguridad que conllevaría la búsqueda activa de una mayor autonomía. En este sentido, el debate de Canadá como «superpotencia energética» no resuelve su geopolítica energética, sino que reafirma su dilema central.

13 Conclusión

El auge del nacionalismo económico en todo el mundo y las consiguientes amenazas para las instituciones multilaterales suponen importantes desafíos para Canadá. Este problema se ve agravado sobre todo a medida que Estados Unidos se aleja de su papel tradicional como garante de un orden internacional reglamentado, aunque imperfecto. La retórica de la Administración Trump sobre el «estado 51» resulta especialmente contraproducente para mantener una relación bilateral positiva y basada en la confianza. Si bien una ruptura grave de las relaciones entre Canadá y Estados Unidos sigue siendo poco probable, las consecuencias para Canadá podrían ser especialmente severas en lo que respecta a su vulnerabilidad energética.

Como cualquier sistema energético, el sistema canadiense es el resultado de circunstancias geográficas y geológicas. Lo que diferencia a su industria energética es la proximidad a la enorme demanda de Estados Unidos. Canadá es vulnerable en dos aspectos distintos: depende de Estados Unidos como mercado para el suministro energético del oeste canadiense y, al mismo tiempo, depende también para la seguridad de su abastecimiento energé-

tico. Asimismo, Canadá está fuertemente integrado en el aparato de seguridad liderado por Estados Unidos a través de la OTAN, el NORAD y la alianza de inteligencia Cinco Ojos. Por tanto, la geopolítica energética canadiense se caracteriza por las tensiones entre la atracción económica y la autonomía política, entre las limitaciones en materia de infraestructura y la diversificación de las exportaciones y entre la seguridad económica y la licencia social.

Bibliografía

- Agencia Internacional de la Energía. (2021). *India Energy Outlook 2021* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1de6d91e-e23f-4e02-b1fb-51fdd6283b22/India_Energy_Outlook_2021.pdf
- Alberta Energy Regulator. (2025). *Natural gas demand* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.aer.ca/data-and-performance-reports/statistical-reports/alberta-energy-outlook-st98/natural-gas/natural-gas-demand>
- Asuntos Globales de Canadá. (2025). *Statistical report on international assistance, fiscal year 2023-2024* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.international.gc.ca/transparency-transparence/international-assistance-report-stat-rapport-aide-internationale/2023-2024.aspx?lang=eng>
- Bankes, N. (2020). The Duty to Consult in Canada Post-Haida Nation. *Arctic Review on Law and Politics*. 11, pp. 256-279. Doi: <https://doi.org/10.23865/arctic.v11.2568>
- Berger, T. (1977). *Northern Frontier, Northern Homeland: The Report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry: Volume One* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2015/bcp-pco/CP32-25-1977-1-eng.pdf
- Biblioteca del Parlamento. (2019). *Federal and provincial jurisdiction to regulate environmental issues* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://lop.parl.ca/sites/PublicWebsite/default/en_CA/ResearchPublications/201386E
- Bricker, D. (2024). *Canada viewed as most positive leader on world stage* [en línea]. IPSOS. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.ipsos.com/en-ca/halifax-report-2024-influence>

- Burton, C. (2012). Stephen Harper's new trade rules safeguard Canada's interests [en línea]. *The Globe and Mail*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.theglobeandmail.com/opinion/stephen-harpers-new-trade-rules-safeguard-canadas-interests/article6136355/>
- Calnan, J. (2024). Political Barriers to Canada's Contribution to Trans-Atlantic Energy Security [en línea]. *Transatlantic Policy Quarterly*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://transatlanticpolicy.com/political-barriers-to-canadas-contribution-to-trans-atlantic-energy-security/>
- . (2025). *Canada's Energy Future in the Indo-Pacific* [en línea]. Canadian Global Affairs Institute. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://www.cgai.ca/pp_canadas_energy_future_in_the_indo_pacific
- Canadá. (2025). Building Canada Act [en línea]. *Justice Laws*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/B-9.89/page-1.html#h-1533364>
- Canada Energy Regulator. (2025). *Crude Oil Pipeline Transportation System* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/facilities-we-regulate/canadas-pipeline-system/2021/crude-oil-pipeline-transportation-system.html>
- . (2026). *Exports of Liquefied Natural Gas (LNG)* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://apps.cer-rec.gc.ca/CommodityStatistics/Statistics.aspx?language=english>
- Canadian Association of Petroleum Producers. (2025). *Canadian Imports of US Crude Oil, Natural Gas, and Refined Products* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.capp.ca/wp-content/uploads/2025/01/Canadian-Imports-of-US-Crude-Natural-Gas-and-Refined-Products.pdf>
- Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee. (2018). *A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMR-roadmap_EN_nov6_Web-1.pdf
- Carvin, S y Juneau, T. (2023). Why AUKUS and not CAUKUS? It's a Potluck, not a Party. *International Journal*. 78(3). Doi: <https://doi.org/10.1177/00207020231195109>
- Chong, J. y Sweeney, N. (2017). *Legislative Summary of Bill C-48: An Act respecting the regulation of vessels that transport crude oil or persistent oil to or from ports or marine*

- installations located along British Columbia's north coast* [en línea]. Biblioteca del Parlamento. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://lop.parl.ca/sites/PublicWebsite/default/en_CA/ResearchPublications/LegislativeSummaries/421C48E
- Coletta, A. (2023). Trudeau told NATO that Canada will never meet spending goal, Discord leak shows. [en línea]. *The Washington Post*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.washingtonpost.com/national-security/2023/04/19/canada-military-trudeau-leaked-documents/>
- Departamento de Asuntos Indígenas y Desarrollo del Norte. (1972). *Expanded guidelines for northern pipelines* [en línea]. Gobierno de Yukón. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://archives-ftp.gov.yk.ca/library/normal/Pipeline_Guidelines_1972.pdf
- Departamento de Defensa Nacional. (2024). *Evaluation of Arctic operations* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/department-national-defence/corporate/reports-publications/audit-evaluation/evaluation-arctic-operations.html>
- Departamento de Finanzas de Canadá. (2025). *Canada strong: budget 2025* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://budget.canada.ca/2025/report-rapport/pdf/budget-2025.pdf>
- Dominion Bureau of Statistics. (1956). *Review of foreign trade, calendar year 1955* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/statcan/65-205/CS65-205-1955-eng.pdf
- Eisenhower, D. (1959). *Proclamation 3279—Adjusting Imports of Petroleum and Petroleum Products Into the United States* [en línea]. UC Santa Barbara. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/proclamation-3279-adjusting-imports-petroleum-and-petroleum-products-into-the-united>
- Energy Institute. (2025). *Statistical Review of World Energy 2025* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>
- Finch, D. (2017). 'Immense developments' pleased Winston Churchill during Alberta visit in 1929 [en línea]. *Calgary Herald*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://calgaryherald.com>

- com/news/local-news/immense-developments-pleased-winston-churchill-on-canadian-tour-in-1929
- Fuerzas Armadas Canadienses. (2025). *Operation REASSURANCE* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/department-national-defence/services/operations/military-operations/current-operations/operation-reassurance.htm>
- Fuerza de las Naciones Unidas para el Mantenimiento de la Paz. (2025). *Contribution of uniformed personnel to UN by country and personnel type* [en línea]. Organización de las Naciones Unidas. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://peacekeeping.un.org/sites/default/files/01_contributions_to_un_peacekeeping_operations_by_country_and_post_91_october_2025.pdf
- Globerman, S. y Shapiro, D. (1998). *Canadian government policies toward inward foreign direct investment* [en línea]. Industria, Ciencia y Desarrollo Económico de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://ised-isde.canada.ca/site/economic-analysis-statistics/sites/default/files/attachments/2022/wp24e.pdf>
- Gordon, N. (2023). *Canada joins the G7* [en línea]. EBSCO. [Consulta: 2026]. Disponible en: Recuperado de la página web de: <https://www.ebsco.com/research-starters/history/canada-joins-g7>
- Gobierno de Canadá. (1957). *Royal commission on Canadian economic prospects final report* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/bcp-pco/Z1-1955-2-3-eng.pdf
- . (1977). *Export opportunities Japan* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/isde-ised/c42/C42-19-1977-eng.pdf
- . (2024). *Our north, strong and free: A renewed vision for Canada's defence* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/department-national-defence/corporate/reports-publications/north-strong-free-2024.html>
- Gobierno de Canadá y Gobierno de Alberta. (2025). *Memorandum of understanding between the Government of Canada and the Government of Alberta* [en línea]. Open Alberta. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://open.alberta.ca/dataset/ceb83f4b-25ba-4781-b09d-5b6ac7725972/resource/1c9a9826-fd06-4150-ad54-5c2a94ea8383/download/exc-mou-goc-and-go-a-energy-collaboration.pdf>

- Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear energy and the fossil fuels* [en línea]. ASPO France [Consulta: 2026]. Disponible en: https://aspofrance.org/wp-content/uploads/2024/04/king_hubbert_1956_ocr.pdf
- Ibbitson, J. (2014). Harper's handling of Ukraine the latest outrage for old-school observers [en línea]. *The Globe and Mail*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.theglobeandmail.com/news/politics/harpers-handling-of-ukraine-the-latest-outrage-for-old-school-observers/article17586559/>
- . (2023). *The Duel: Diefenbaker, Pearson, and the Making of Modern Canada*. Penguin Random House Canada Ltd. ISBN: 9780771003288.
- Johnston, R. y Calnan, J. (2024). *The co-evolution of the Canada-U.S. oil industry and possible implications of Donald Trump's re-election* [en línea]. Canadian Global Affairs Institute. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://www.cgai.ca/the_co_evolution_of_the_canada_us_oil_industry_and_possible_implications_of_donald_trumps_reelection
- Kureth, E. J. C. (1985). An historical perspective of the growth and development of Canada's petroleum industry: 1946-1970 [en línea]. *The Geographical Bulletin*. 27(1). [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://digitalcommons.kennesaw.edu/thegeographicalbulletin/vol27/iss1/4>
- Lalonde, S. (2022). *The debate over the legal status of the Northwest Passage* [en línea]. Senado de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://sencanada.ca/Content/Sen/Committee/441/SECD/briefs/2022-03-28_SECD_Brief_SLalonde_e.pdf
- Liebreich, M. (2022). *Hydrogen shipping* [en línea]. Thoughts of Chairman Michael Substack. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://mliebreich.substack.com/p/hydrogen-shipping>
- Maddison, P., Fraser, D. y Cowan, J. S. (2024). *What spending two per cent of GDP on national defence means for Canada* [en línea]. Canadian Global Affairs Institute. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://www.cgai.ca/what_spending_two_per_cent_of_gdp_on_national_defence_means_for_canada
- Major Project Office. (2026). *Projects and transformative strategies map* [en línea]. Oficina del Consejo Privado. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/privy-council/major-projects-office/projects/map.html>

- Manitoba Public Utilities Board. (2013). *Needs for and alternatives to chapter 5 –The Manitoba hydro system, interconnections and export markets* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://www.pubmanitoba.ca/nfat/pdf/hydro_application/nfat_business_case_chapter_05_the_manitoba_hydro_system_interconnection_and_export_markets.pdf
- Munzur, A. (2021). *Mackenzie valley gas pipeline in retrospect*. School of Public Policy Publications, SPP Briefing Paper. ISSN 2560-8320.
- Nanos Research. (2025). *Canadians most likely to rank energy as sector with greatest potential to expand exports to non-US destinations; want to see Canada prioritize energy exports to Europe and Asia* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://nanos.co/wp-content/uploads/2025/11/2025-2933-Positive-Energy-Oct-Omni-Populated-report-FINAL.pdf>
- Natural Resources Canada. (2024). *Hydroelectric energy* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://natural-resources.canada.ca/energy-sources/renewable-energy/hydroelectric-energy>
- . (2025a). *Energy fact book 2025-26* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://energy-information.canada.ca/sites/default/files/2025-11/energy-fact-book-2025-2026.pdf>
- . (2025b). *National energy use database* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/data_e/databases.cfm
- Nemeth, T. (1997). *Pat Carney and the dismantling of the National Energy Program* [en línea]. Departamento de Historia y Cultura Clásica de la Universidad de Alberta. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://ualberta.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/5e9d270f-f2d0-496d-ab8b-820a4f213cdf/content>
- Noakes, T. (2006). *National energy program* [en línea]. The Canadian Encyclopedia. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://thecanadianencyclopedia.ca/en/article/national-energy-program>
- Oil Sands Magazine. (2020). *Assessing America's appetite for Canada's crude: A look at Canadian crude usage by U.S. refineries*. [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.oilsandsmagazine.com/market-insights/american-appetite-canadian-crude-usage-us-refineries>

- Primer Ministro de Canadá. (2025). *Prime Minister Carney announces second tranche of nation-building projects referred to the Major Projects Office* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.pm.gc.ca/en/news/news-releases/2025/11/13/prime-minister-carney-announces-second-tranche-nation-building-projects>
- Rongji, Z. (2001). *Report on the outline of the tenth Five-Year Plan for national economic and social development (2001)* [en línea]. Asamblea Popular Nacional de la República Popular China. [Consulta: 2026]. Disponible en: http://www.npc.gov.cn/zgrdw/englishnpc/Special_11_5/2010-03/03/content_1690620.htm
- Saywell, J. T. (1975). *Across mountain and muskeg: Building the Canadian transportation system* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/ecc/EC22-3-1975-22-eng.pdf
- Sims, D. (2017). *Dam Bennett: The impacts of the W.A.C. Bennett Dam and Williston Lake Reservoir on the Tsek'ehne of Northern British Columbia* [en línea]. Departamento de Historia y Cultura Clásica de la Universidad de Alberta. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://ualberta.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/4712cbef-dd89-4b39-811c-322f83d4e772/content>
- Statistics Canada. (2025a). *The daily: Canada's natural resource wealth, 2024* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/251120/dq251120d-eng.htm>
- . (2025b). *Table 25-10-0029-01, Supply and demand of primary and secondary energy in terajoules, annual* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/cv.action?pid=2510002901>
- . (2025c). *Table 12-10-0171-01, Canadian international merchandise trade by country and by product section, customs-based, annual* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=1210017101>
- . (2025d). *Canadian international merchandise trade web application* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/2021004/imp-eng.htm>

- . (2025e). *Table 17-10-0009-01, Population estimates, quarterly* [en línea]. Gobierno de Canadá. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=1710000901>
- Steger, D. y Alini, E. (2012). *CNOOC-Nexen review explained: 'net benefit' might not even be the point* [en línea]. Centro para la Innovación para la Gobernanza Internacional. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.cigionline.org/articles/cnooc-nexen-review-explained-net-benefit-might-not-even-be-point/>
- Taylor, G. D. (2019). *Imperial standard: Imperial Oil, Exxon, and the Canadian oil industry from 1880*. University of Calgary Press. ISSN: 2562-3494.
- TC Energy. (2025). *Energy for a growing America* [en línea]. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://www.tcenergy.com/operations/natural-gas/energy-for-a-growing-america/>
- Tombe, T. (2025). Get ready for a troubling new era for the Canadian economy [en línea]. *The Hub*. [Consulta: 2026]. Disponible en: <https://thehub.ca/2025/12/11/get-ready-for-a-troubling-new-era-for-the-canadian-economy/>

Composición del grupo de trabajo

Presidente	Claudio Aranzadi <i>Ingeniero industrial y economista</i> <i>Exministro de Industria y Energía</i>
Secretario	Francisco Javier Canalejo Ariza <i>Subdirector de Relaciones Internacionales, Repsol</i>
Vocal y coordinador	Ignacio Fuente Cobo <i>Coronel del Ejército de Tierra (DEM)</i> <i>Analista principal del IEEE</i>
Vocales:	Ignacio Urbasos <i>Investigador asociado en Center for Global Affairs</i> <i>and Strategic Studies (GASS)</i>
	Maria del Mar Hidalgo García <i>Analista principal del Instituto Español de Estudios</i> <i>Estratégicos</i>
	Sehila M. González de Vicente <i>Directora global de Energía de Fusión</i> <i>Clean Air Task Force, CATF</i>
	Inmaculada Martínez Rubio <i>Asesora en Inteligencia Artificial en G7, OECD AI,</i> <i>UNESCO y la Organización Mundial para el Trabajo</i> <i>(WTO). Miembro del Consejo Asesor de la SEDIA,</i> <i>Ministerio para la Transformación Digital y de la</i> <i>Función Pública, Gobierno de España</i>
	Joe Calnan <i>Vicepresidente de Energía y Operaciones en Cal-</i> <i>gary, Canadian Global Affairs Institute</i>
	Miguel Golmayo <i>Capitán de navío de la Armada en reserva</i>

Colaboradores en la edición de esta obra

Ana Belén Padilla Moreno

Coordinadora de Proyectos, Club Español de la Energía; secretaria general, Comité Español del Consejo Mundial de la Energía

Alfonso Méndiz Guerra

Capitán del Ejército de Tierra del IEEE



Patrocinador

