



MÁSTER UNIVERSITARIO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SOBERANÍA TECNOLÓGICA EUROPEA:
EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE LA ESTRATEGIA
ENERGÉTICA A SEGUIR ANTE EL AUGUE DE LOS
CENTROS DE DATOS

Autor: José María de la Puerta Belzunegui

Director: Alejandro González San Román

Madrid

30 de agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Soberanía Tecnológica Europea: Evaluación y propuestas de la estrategia energética a
seguir ante el auge de los centros de datos.

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: José María de la Puerta Belzunegui

Fecha: 30/08/2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Alejandro González San Román

Fecha: 30/08/2025





MÁSTER UNIVERSITARIO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SOBERANÍA TECNOLÓGICA EUROPEA:
EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE LA ESTRATEGIA
ENERGÉTICA A SEGUIR ANTE EL AUGUE DE LOS
CENTROS DE DATOS

Autor: José María de la Puerta Belzunegui

Director: Alejandro González San Román

Madrid

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento, en primer lugar, a mi familia por brindarme la oportunidad de acceder a esta universidad, además de a mi tutor, por la rápida atención y buena disposición cada vez que he precisado de su ayuda.

SOBERANÍA TECNOLÓGICA EUROPEA:

EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE LA ESTRATEGIA ENERGÉTICA A SEGUIR ANTE EL AUGE DE LOS CENTROS DE DATOS

Autor: de la Puerta Belzunegui, José María.

Director: González San Román, Alejandro.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster analiza la estrategia energética que España debe adoptar ante la rápida expansión de los centros de datos, considerados infraestructuras críticas para la soberanía tecnológica europea. A través de un modelo de escenarios energéticos, se evalúan su impacto en la red eléctrica, la viabilidad técnica y ambiental, y se formulan propuestas estratégicas que conectan digitalización y transición energética. Los resultados confirman que España posee una oportunidad histórica para consolidarse como hub digital sostenible, siempre que logre alinear normativa, inversión y capacidad renovable.

Palabras clave: Soberanía tecnológica, centros de datos, energía, sostenibilidad, estrategia.

1. Introducción

La expansión acelerada de los centros de datos en Europa ha convertido a estas infraestructuras en un elemento crítico de la soberanía tecnológica y de la transición energética. Su creciente consumo eléctrico, la necesidad de refrigeración avanzada y la presión sobre la red los sitúan en el centro del debate energético y regulatorio. En España, las inversiones anunciadas por gigantes tecnológicos superan los 30.000 millones de euros, consolidando al país como nodo digital emergente en el sur de Europa. Este trabajo analiza cómo garantizar un desarrollo sostenible y competitivo de los centros de datos en el marco de la estrategia nacional y europea de descarbonización.

2. Definición del proyecto

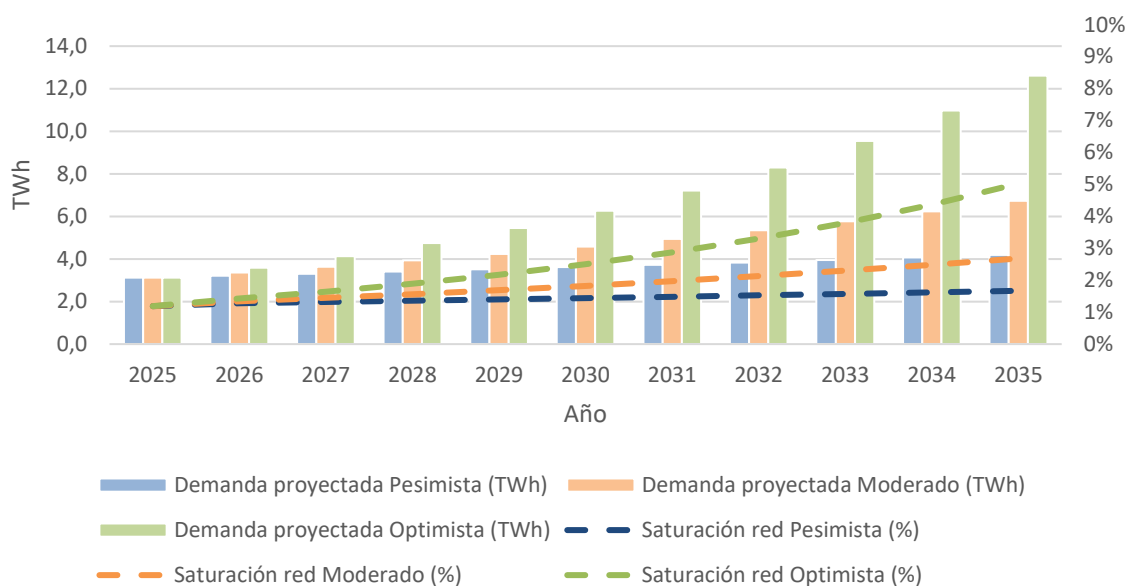
El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es evaluar y proponer una estrategia energética para España que permita atraer y consolidar centros de datos sostenibles, garantizando su viabilidad técnica, económica y ambiental. La investigación se centra en responder a la pregunta: *¿qué estrategia energética debe adoptar España para compatibilizar la digitalización con la sostenibilidad de su sistema eléctrico?* Para ello, se estudia el contexto europeo, se diagnostica la situación española y se formulan propuestas adaptadas a distintos escenarios de crecimiento.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La metodología combina análisis comparativo europeo, diagnóstico nacional y modelización de escenarios energéticos para el horizonte 2025–2035. Se desarrollan tres escenarios —pesimista, moderado y optimista— a partir de datos de REE, PNIEC, Spain DC y operadores del sector. Se incluye un cálculo de saturación de red y un análisis de sensibilidad ante variaciones de demanda y penetración renovable. El modelo se fundamenta en indicadores técnicos clave: consumo eléctrico (TWh), potencia instalada (MW), factor de emisiones y eficiencia energética (PUE).

4. Resultados

- En el escenario moderado, la capacidad instalada en España podría superar los 1.000 MW en 2035, con una demanda anual cercana a 7 TWh ($\approx 2\%$ del consumo nacional).
- En el escenario optimista, la potencia podría alcanzar 1.400 MW, representando hasta el 5 % de la electricidad nacional.
- La red actual presenta riesgo de saturación en áreas críticas (Madrid y Aragón), con tiempos de conexión a red superiores a 3–5 años.
- Tecnologías como free cooling, refrigeración líquida e integración con energías renovables mediante PPAs resultan imprescindibles para garantizar sostenibilidad.
- La comparación con Irlanda, Países Bajos y Noruega demuestra que la anticipación regulatoria y la integración energética son factores diferenciales de éxito.



5. Conclusiones

El estudio confirma que España cuenta con una ventana de oportunidad estratégica para convertirse en hub digital sostenible en Europa. Sin embargo, para materializarlo es necesario:

1. Integrar los centros de datos en la planificación energética nacional (PNIEC), con objetivos de eficiencia y uso renovable obligatorio.
2. Simplificar los procedimientos regulatorios mediante una ventanilla única y tiempos de tramitación reducidos.
3. Incentivar la innovación tecnológica en refrigeración avanzada, reutilización de calor y almacenamiento.
4. Asegurar la resiliencia de la red eléctrica, invirtiendo en capacidad de transporte y gestión de energía reactiva.

En conclusión, los centros de datos deben pasar de ser una amenaza de sobrecarga energética a convertirse en palancas de digitalización y sostenibilidad, reforzando la soberanía tecnológica europea desde España.

6. Referencias

- [1] Comisión Europea. *Reglamento (UE) 2020/852 de taxonomía verde*. Bruselas, 2020.
- [2] European Data Centre Association (EUDCA). *Informe sobre eficiencia energética en data centres*. Bruselas, 2023.
- [3] Spain DC. *El impacto económico y energético de los centros de datos en España*. Madrid, 2023.
- [4] Red Eléctrica de España (REE). *Avance del sistema eléctrico 2024*. Madrid, 2025.
- [5] Climate Neutral Data Centre Pact (CNDCP). *Objetivos de neutralidad climática 2030*. Bruselas, 2021.
- [6] McKinsey & Company. *The future of European data centres: balancing growth and sustainability*. Informe sectorial, 2023.

EUROPEAN TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY: EVALUATION AND PROPOSALS FOR THE ENERGY STRATEGY TO ADDRESS THE RISE OF DATA CENTRES

Author: de la Puerta Belzunegui, José María.

Supervisor: González San Román, Alejandro.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Master's Thesis analyses the energy strategy that Spain should adopt in response to the rapid expansion of data centres, considered critical infrastructures for European technological sovereignty. Through a scenario-based energy model, their impact on the power grid, as well as their technical and environmental viability, are assessed, and strategic proposals are formulated that connect digitalisation and energy transition. The results confirm that Spain has a historic opportunity to consolidate itself as a sustainable digital hub, provided it succeeds in aligning regulation, investment, and renewable capacity.

Keywords: Technological sovereignty, Data centres, Energy, Sustainability, Strategy

1. Introduction

The accelerated expansion of data centres in Europe has turned these infrastructures into a critical element of technological sovereignty and energy transition. Their growing electricity demand, advanced cooling needs and pressure on power grids place them at the heart of regulatory and sustainability debates. In Spain, announced investments by global tech companies already exceed 30.000 million euros, positioning the country as an emerging digital hub in Southern Europe. This study examines how to ensure a sustainable and competitive development of data centres within the framework of European decarbonisation and national energy planning.

2. Project definition

The main objective of this Master's Thesis is to evaluate and propose an energy strategy for Spain that enables the attraction and consolidation of sustainable data centres, while ensuring their technical, economic, and environmental viability. The research focuses on answering the central question: *What energy strategy should Spain adopt to reconcile digitalisation with the sustainability of its electricity system?* To this end, the European

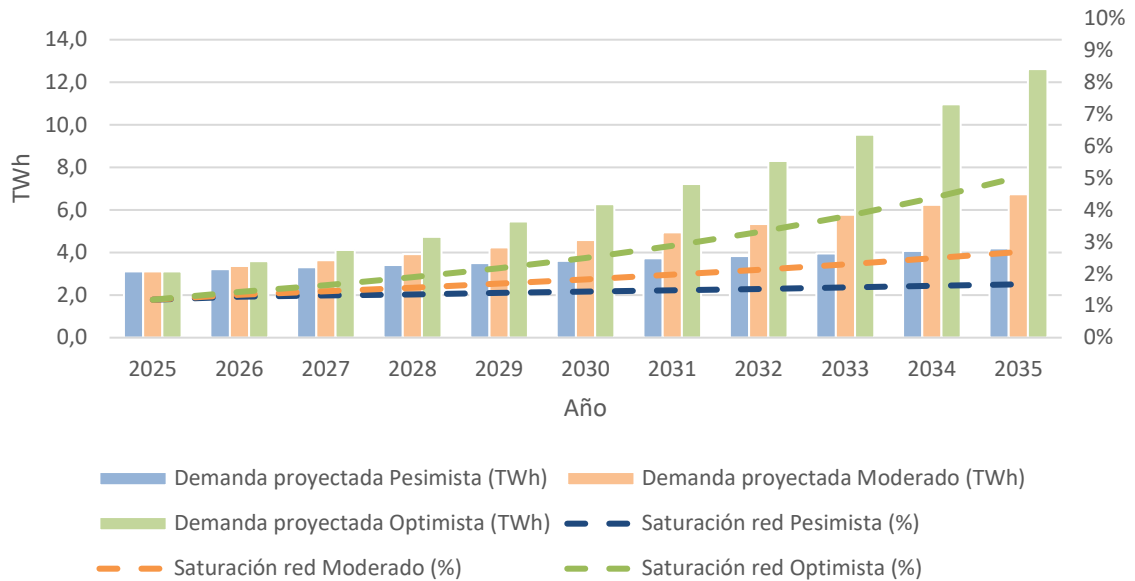
context is analysed, the Spanish case is diagnosed, and proposals are formulated for different growth scenarios.

3. Model/Tool description

The methodology combines European benchmarking, national diagnosis, and scenario modelling for the 2025–2035 horizon. Three scenarios —pessimistic, moderate, and optimistic— were developed using data from REE, PNIEC, Spain DC and industry reports. The model includes grid saturation calculations and sensitivity analyses for demand growth and renewable penetration. Key performance indicators considered are electricity consumption (TWh), installed capacity (MW), emissions factor, and energy efficiency (PUE).

4. Results

- In the moderate scenario, Spain's installed capacity could exceed 1,000 MW by 2035, with annual demand reaching ~7 TWh (~2% of national electricity).
- In the optimistic scenario, capacity could reach 1,400 MW, representing up to 5% of national electricity demand.
- The current grid shows risks of saturation in critical areas (Madrid and Aragón), with connection lead times of 3–5 years.
- Technologies such as free cooling, liquid immersion cooling and renewable PPAs are essential to guarantee sustainability.
- Comparison with Ireland, the Netherlands, and Norway demonstrates that regulatory anticipation and energy integration are decisive success factors.



5. Conclusions

The study confirms that Spain has a strategic window of opportunity to become a sustainable digital hub in Europe. However, to achieve this, it is necessary to:

1. Integrate data centres into the national energy planning (PNIEC), with mandatory renewable and efficiency targets.
2. Streamline permitting procedures through a one-stop shop and reduced administrative delays.
3. Foster technological innovation in advanced cooling, heat recovery and storage solutions.
4. Ensure grid resilience with new transmission capacity and reactive power management.

In conclusion, data centres must evolve from being perceived as an energy burden to becoming catalysts of digitalisation and sustainability, reinforcing European technological sovereignty from Spain.

6. References

- [1] Comisión Europea. *Reglamento (UE) 2020/852 de taxonomía verde*. Bruselas, 2020.
- [2] European Data Centre Association (EUDCA). *Informe sobre eficiencia energética en data centres*. Bruselas, 2023.

- [3] Spain DC. *El impacto económico y energético de los centros de datos en España*. Madrid, 2023.
- [4] Red Eléctrica de España (REE). *Avance del sistema eléctrico 2024*. Madrid, 2025.
- [5] Climate Neutral Data Centre Pact (CNDCP). *Objetivos de neutralidad climática 2030*. Bruselas, 2021.
- [6] McKinsey & Company. *The future of European data centres: balancing growth and sustainability*. Informe sectorial, 2023.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	3
1.1 Contexto global: digitalización, soberanía tecnológica y centros de datos	3
1.2 Relevancia industrial, energética y medioambiental en Europa y España	4
1.2.1 Relevancia industrial.....	4
1.2.2 Relevancia energética	5
1.2.3 Relevancia ambiental	6
1.3 Motivación personal y profesional	6
1.4 Pregunta de investigación y problema a resolver	7
1.5 Definición del proyecto	9
Capítulo 2. Contexto global	10
2.1 El rol estratégico de los centros de datos en la era digital.....	10
2.2 Demanda energética y sostenibilidad de los centros de datos en Europa y España	12
2.2.1 Consumo energético a escala europea.....	12
2.2.2 El caso español.....	14
2.2.3 Reparto interno del consumo.....	16
2.3 Normativa vigente aplicada a los centros de datos.....	16
2.3.1 Normativa española.....	18
2.4 Soluciones tecnológicas actuales.....	20
2.4.1 Free cooling.....	20
2.4.2 Refrigeración por inmersión	21
2.4.3 Reutilización del calor residual.....	21
2.4.4 Edge computing.....	22
2.4.5 Energías renovables	22
2.5 Casos prácticos ¿Qué hacen en Europa?	23
2.5.1 Irlanda.....	24
2.5.2 Países Bajos.....	25
2.5.3 Noruega.....	26
2.6 Tendencias actuales y señales de alerta.....	26
2.6.1 Apagón 28 de abril de 2025: desequilibrios reactivos y estrés de red.....	27
2.6.2 Vuelta a la energía nuclear: el interés de las grandes tecnológicas.....	27

2.7 Conclusiones derivadas del contexto global.....	28
Capítulo 3. Diagnóstico del caso español.....	30
3.1 Situación actual mercado español	30
3.1.1 Perfil de los inversores.....	30
3.1.2 Factores que facilitan el crecimiento.....	31
3.1.3 Casos representativos.....	32
3.2 Potencial nacional de energías renovables	35
3.2.1 Solar fotovoltaica	35
3.2.2 Eólica.....	37
3.2.3 Hidráulica	38
3.3 Energía nuclear.....	39
3.3.1 Capacidad y aportación al mix	40
3.3.2 Plan de cierre	40
3.4 Cuellos de botella	41
3.4.1 Regulación dispersa	41
3.4.2 Volatilidad precios energéticos.....	42
3.4.3 Limitaciones del sistema.....	43
3.4.4 Clima extremo	43
Capítulo 4. Marco Teórico	44
4.1 Fundamentos técnicos y energéticos de los centros de datos	44
4.2 Variables críticas: consumo energético, refrigeración, emisiones, resiliencia	46
4.2.1 Consumo energético	46
4.2.2 Refrigeración.....	46
4.2.3 Emisiones de carbono y sostenibilidad	47
4.2.4 Resiliencia operativa	47
4.3 Iniciativas europeas: EUDCA, Climate Neutral Data Centre Pact, etc.	48
4.3.1 European Data Centre Association (EUDCA).....	48
4.3.2 Climate Neutral Data Centre Pact (CNDCP).....	49
4.3.3 Regulación y taxonomía verde europea	50
4.3.4 Programas nacionales para la digitalización sostenible	51
4.4 Revisión académica.....	52
4.4.1 Modelado del consumo energético y fiabilidad operativa	52

4.4.2	<i>Eficiencia térmica y refrigeración inteligente</i>	52
4.4.3	<i>Renovables, flexibilidad de red y recuperación de calor</i>	53
4.4.4	<i>Impacto ambiental y sostenibilidad</i>	53
4.4.5	<i>Edge computing y transición digital</i>	55
4.5	Identificación de brechas a cubrir.....	57
Capítulo 5. Metodología y fuentes		61
5.1	Enfoque metodológico	61
5.2	Herramientas utilizadas	62
5.3	Fuentes	63
5.4	Escenarios desarrollados	64
5.4.1	<i>Escenario Pesimista</i>	65
5.4.2	<i>Escenario Moderado</i>	67
5.4.3	<i>Escenario Optimista</i>	68
5.5	Cálculo de saturación de la red.....	70
5.6	Justificación del enfoque metodológico	71
Capítulo 6. Discusión y análisis crítico		73
6.1	Análisis comparativo de escenarios.....	73
6.1.1	<i>Escenario Pesimista</i>	74
6.1.2	<i>Escenario Moderado</i>	75
6.1.3	<i>Escenario Optimista</i>	76
6.2	Riesgos identificados y puntos críticos	78
6.3	Análisis de sensibilidad.....	80
6.3.1	<i>Sensibilidad 1: +10% demanda en escenario moderado</i>	80
6.3.2	<i>Sensibilidad 2: Reducción del % de renovables en red en escenario moderado</i>	81
6.4	Discusión crítica y conclusiones	82
Capítulo 7. Propuestas de aplicación y viabilidad		83
7.1	Recomendaciones escenario pesimista.....	84
7.2	Recomendaciones escenario moderado.....	86
7.3	Recomendaciones escenario optimista	88
7.4	Conclusión estratégica.....	90
Capítulo 8. Conclusiones		91
8.1	Respuesta a la pregunta de investigación	91

8.2 Síntesis y hallazgos clave	92
8.3 Aportación del trabajo y originalidad.....	93
8.4 Implicaciones prácticas para España.....	94
Capítulo 9. Limitaciones y trabajos futuros	95
9.1 Limitaciones del estudio.....	95
9.2 Trabajos futuros.....	96
Capítulo 10. Bibliografía.....	99
ANEXO I: Tablas evolución de escenarios	103
ANEXO II: Alineación con los ODS	106
ANEXO III: Explicación detallada del modelo.....	107

Índice de figuras

Figura 1. Consumo eléctrico anual por país	13
Figura 2. Porcentaje del consumo dedicado a DC.....	13
Figura 3. Capacidad contratada bajo PPAs en Europa por país en 2022.....	15
Figura 4. Energía contratada anualmente bajo PPAs en Europa	24
Figura 5. Estructura de generación de energía eléctrica (%) en 2024 en España (12)	32
Figura 6. Participación anual de la generación fotovoltaica en la generación total (12).....	36
Figura 7. Participación anual de la generación eólica en la generación total (12)	38
Figura 8. Participación anual de la generación hidráulica en la generación total	39
Figura 9. Tiempo de conexión esperado.....	42
Figura 10. Indicadores de eficiencia energética para centros de datos.....	54
Figura 11. Evolución de la capacidad de la red desde el año 2020	66
Figura 12. Evolución escenario pesimista	75
Figura 13. Evolución escenario moderado	76
Figura 14. Evolución escenario optimista	77
Figura 15. Evolución demanda 3 escenarios con saturación de red (%).....	78

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución del consumo energético en un DC.....	16
Tabla 2. Estudios académicos relevantes	57
Tabla 3. Jerarquización de las brechas identificadas.....	60
Tabla 4. Fuentes de datos para la construcción de los escenarios	64
Tabla 5. Valores escenario pesimista	67
Tabla 6. Valores escenario moderado.....	68
Tabla 7. Valores escenario optimista.....	69
Tabla 8. Resumen resultados 3 escenarios	74
Tabla 9. Riesgos identificados.....	79
Tabla 10. Sensibilidad 1: +10% de demanda	81
Tabla 11. Sensibilidad 2: reducción del porcentaje de renovables en red.....	81
Tabla 12. Recomendaciones escenario pesimista.....	85
Tabla 13. Recomendaciones escenario moderado.....	87
Tabla 14. Recomendaciones escenario optimista.....	89

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO GLOBAL: DIGITALIZACIÓN, SOBERANÍA TECNOLÓGICA Y CENTROS DE DATOS

La economía global está inmersa en una profunda transformación digital, marcada por la expansión masiva de los servicios en la nube, la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), el big data y la automatización inteligente. Esta revolución tecnológica está redefiniendo el modo en que las empresas operan, cómo se prestan los servicios públicos y la manera en que los ciudadanos interactúan con su entorno digital. En este contexto, los centros de datos se han convertido en infraestructuras críticas, funcionando como el corazón físico que da soporte al universo digital contemporáneo.

En paralelo a su importancia funcional, los centros de datos están emergiendo como activos estratégicos para la soberanía tecnológica de las regiones. El concepto de soberanía tecnológica no se limita a la propiedad de los datos, sino que abarca la capacidad de un país o región para controlar, desarrollar y regular sus infraestructuras digitales y energéticas, garantizando su disponibilidad, resiliencia y cumplimiento con los valores democráticos y sostenibles (3)(8).

El despliegue de estas infraestructuras exige enormes cantidades de energía eléctrica y recursos técnicos, lo que ha disparado la preocupación por su sostenibilidad. En 2022, el consumo energético global de los centros de datos superó los 340 TWh, equivalente al 1,5 % de la demanda mundial de electricidad, una cifra que podría duplicarse para 2030 si se mantiene la tendencia actual de expansión de la IA generativa y el procesamiento intensivo de datos (26). Este aumento sostenido de la demanda energética y de capacidad computacional está atrayendo la atención de gobiernos, operadores energéticos, inversores

e instituciones académicas, que ven en los centros de datos no solo un pilar de crecimiento económico, sino también una fuente potencial de tensiones estructurales en materia de planificación territorial, emisiones de carbono y estabilidad de red.

La Unión Europea ha comenzado a tratar estos centros como activos de infraestructura estratégica, proponiendo estándares de eficiencia energética, mecanismos de información obligatoria y criterios de financiación sostenible, especialmente en el marco del Reglamento (UE) 2020/852 (13). A su vez, iniciativas como el “Climate Neutral Data Centre Pact” buscan comprometer al sector privado a alcanzar la neutralidad climática en 2030, mediante la adopción de tecnologías limpias, el uso eficiente del agua y la recuperación térmica (3)(8).

En definitiva, el avance de la digitalización conlleva riesgos y oportunidades desde una perspectiva de soberanía tecnológica. La capacidad de los países para albergar centros de datos sostenibles, eficientes y alineados con los objetivos climáticos determinará en buena medida su relevancia económica y autonomía digital en la próxima década.

1.2 RELEVANCIA INDUSTRIAL, ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL EN EUROPA Y ESPAÑA

El despliegue de centros de datos en Europa ha adquirido una relevancia estratégica en el cruce de tres ejes: el desarrollo industrial digital, la transición energética y la sostenibilidad medioambiental. Esta triple dimensión convierte a los data centers en elementos clave no solo de la infraestructura tecnológica, sino también del sistema energético y de la planificación económica a medio plazo.

1.2.1 RELEVANCIA INDUSTRIAL

Desde el punto de vista industrial, los centros de datos constituyen un motor de inversión, empleo cualificado e innovación. El sector de servicios digitales en Europa representa ya más del 4 % del PIB, con expectativas de alcanzar cifras aún mayores en el marco del

crecimiento exponencial de la inteligencia artificial y la digitalización de procesos productivos (3). En países como Irlanda o los Países Bajos, este sector ha sido impulsado por políticas de incentivos fiscales, conectividad internacional y disponibilidad energética.

España ha comenzado recientemente a posicionarse como un hub digital emergente. Entre los anuncios más destacados de inversión se encuentran:

- Microsoft, con más de 2.200 millones de euros destinados a construir una nueva región cloud en Madrid (19).
- Amazon Web Services, que prevé invertir hasta 15.700 millones de euros en Aragón hasta 2033 (20).
- En total, se estima que las inversiones en centros de datos en España podrían superar los 30.000 millones de euros en la próxima década, consolidando su peso en el PIB y el empleo digital (21)(22).

Estas cifras reflejan una apuesta de actores globales por el mercado español como localización estratégica en el sur de Europa, en parte por su geografía, estabilidad regulatoria y potencial energético renovable.

1.2.2 RELEVANCIA ENERGÉTICA

El impacto de los centros de datos en los sistemas eléctricos es doble. Por un lado, representan una nueva fuente de demanda estable y predecible, lo que puede facilitar la integración de renovables y mejorar la gestión de carga base. Por otro, su concentración geográfica y temporal puede crear estrés sobre redes locales y nodos específicos.

En Irlanda, los centros de datos consumieron el 18 % de toda la electricidad nacional en 2023, lo que ha llevado al regulador a limitar nuevas conexiones en el área metropolitana de Dublín (10). Aunque en España el impacto actual es aún reducido, el crecimiento proyectado podría alcanzar consumos de entre 5 y 10 TWh anuales en 2030, dependiendo de la intensidad de electrificación y de la adopción de tecnologías como IA generativa (18)(26).

Además, los centros de datos pueden actuar como catalizadores de innovación energética, incorporando:

- Contratos PPA (Power Purchase Agreement) con parques solares o eólicos,
- Autoproducción en ubicaciones remotas (edge computing),
- Reutilización de calor residual en redes urbanas,
- Almacenamiento térmico o eléctrico como respuesta a picos de demanda.

1.2.3 RELEVANCIA AMBIENTAL

Desde la perspectiva medioambiental, la presencia de estos centros genera impactos a evaluar:

- Emisiones indirectas (por el origen de la electricidad que consumen),
- Uso de recursos hídricos en sistemas de refrigeración (particularmente relevantes en climas como el español),
- Ocupación de suelo en zonas logísticas, rurales o metropolitanas.

La Estrategia Europea de Digitalización Verde establece que para 2030 todos los nuevos centros de datos deberán ser climáticamente neutros, lo que implica el uso exclusivo de energías renovables, eficiencia térmica avanzada y certificaciones ambientales (3)(8). En este marco, España dispone de una oportunidad estratégica si consigue alinear su regulación, red eléctrica y mercado digital para atraer inversiones que cumplan esos estándares.

1.3 MOTIVACIÓN PERSONAL Y PROFESIONAL

Este trabajo nace de una motivación personal y profesional por integrar mis conocimientos técnicos en ingeniería industrial con un compromiso con el desarrollo sostenible del sistema energético nacional.

Desde el punto de vista técnico, los centros de datos suponen un reto interdisciplinar: requieren soluciones en eficiencia energética, refrigeración avanzada, electrificación fiable y automatización. Durante el máster, he trabajado estos temas en asignaturas como ESEE (Explotación de los Sistemas de Energía Eléctrica), Instalaciones Industriales o Automatización Industrial. Esta confluencia de disciplinas hace que el objeto de estudio resulte particularmente enriquecedor.

A nivel profesional, creo firmemente que España cuenta con oportunidad histórica para posicionarse como un actor de peso en el ecosistema digital europeo. Con un contexto favorable (renovables, conectividad, clima), pero también desafíos (normativa, red eléctrica, planificación), se requiere una estrategia técnica y de país que impulse el desarrollo ordenado del sector.

Esta motivación se vincula directamente con los subproblemas planteados en este trabajo:

- Mi formación técnica me permite analizar comparativamente las ventajas e infraestructuras del caso español.
- Mi interés por la sostenibilidad me lleva a explorar barreras regulatorias y medioambientales.
- La dimensión sistémica del máster permite abordar modelos de diseño energético innovadores.
- Finalmente, mi vocación estratégica se refleja en el desarrollo de una hoja de ruta nacional para el sector.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y PROBLEMA A RESOLVER

El análisis previo ha mostrado que los centros de datos son infraestructuras críticas en la economía digital, con implicaciones directas sobre la planificación energética, la sostenibilidad y la soberanía tecnológica. España se encuentra en una fase incipiente pero

estratégica en este despliegue, con importantes inversiones anunciadas, una posición geográfica favorable y un notable potencial en energías renovables. Sin embargo, también enfrenta desafíos estructurales que pueden comprometer su capacidad para consolidarse como un hub digital competitivo a escala europea.

Este trabajo parte de una pregunta de investigación principal que guía todo el análisis:

- ¿Qué estrategia energética debería adoptar España para atraer y consolidar centros de datos sostenibles y competitivos, garantizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en el medio y largo plazo?

Para abordar esta cuestión de forma operativa y técnica, se plantean cuatro subproblemas interrelacionados:

- ¿Qué ventajas comparativas ofrece España frente a otros países europeos?
- ¿Qué barreras reguladoras, energéticas y climáticas limitan actualmente la expansión del sector?
- ¿Qué tecnologías y modelos de diseño energético están siendo implementados con éxito en Europa y cómo podrían adaptarse al caso español?
- ¿Qué hoja de ruta puede trazarse para asegurar el desarrollo ordenado, eficiente y alineado con los objetivos climáticos de la UE?

Este enfoque busca no sólo responder a una cuestión técnica, sino también ofrecer una visión estratégica fundamentada que aporte valor al debate actual sobre el desarrollo del ecosistema digital en España. Al tratarse de un Trabajo de Fin de Máster en Ingeniería Industrial, se abordará el problema desde una perspectiva cuantitativa, integrando conocimientos energéticos, normativos, económicos y tecnológicos. Todo ello, con el fin de generar recomendaciones aplicables para la planificación futura del país.

1.5 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo principal diseñar una propuesta estratégica energética para el despliegue de centros de datos sostenibles en España, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental. A través del análisis comparado de casos europeos, la identificación de mejores prácticas y la aplicación de modelos energéticos, se busca contribuir al desarrollo de un sector clave para la autonomía digital, la eficiencia energética y la competitividad del país.

Capítulo 2. CONTEXTO GLOBAL

En este capítulo se analiza en profundidad el papel estratégico de los centros de datos en el actual contexto europeo y español, con especial atención a su impacto energético, sus retos de sostenibilidad y las principales soluciones tecnológicas emergentes. Este análisis servirá como base conceptual para evaluar posteriormente la viabilidad y potencial de implantación de nuevas instalaciones en España.

2.1 EL ROL ESTRATÉGICO DE LOS CENTROS DE DATOS EN LA ERA DIGITAL

En la actualidad, el volumen de datos generados por usuarios, empresas y dispositivos ha alcanzado cifras sin precedentes. Según estimaciones de Cisco y otros informes industriales, entre 2016 y 2021 la capacidad de computación de los centros de datos se duplicó, mientras que la capacidad de almacenamiento se multiplicó por casi cuatro, alcanzando los 2,6 zettabytes (4). Este crecimiento se ha visto impulsado por fenómenos tecnológicos como el uso generalizado de servicios en la nube, el despliegue masivo del 5G, la popularización de la inteligencia artificial, y la digitalización acelerada de procesos industriales y gubernamentales.

En este contexto, los centros de datos se han convertido en elementos clave para la infraestructura crítica de cualquier país. Más allá de su función técnica, representan un factor de soberanía digital, ya que permiten alojar y procesar información sensible dentro de las fronteras nacionales y/o comunitarias. La capacidad de una nación para controlar el flujo, almacenamiento y protección de sus propios datos es hoy considerada un pilar de su autonomía estratégica, tal como ha reconocido la Comisión Europea en múltiples iniciativas vinculadas al mercado único digital (2).

Desde un punto de vista económico, los centros de datos también son motores de inversión. Un solo campus de gran escala puede movilizar cientos de millones de euros en obra civil, redes eléctricas, centros de transformación, seguridad y contratación de personal cualificado. Además, el despliegue de estos centros suele atraer un ecosistema complementario: proveedores de conectividad, operadores de nube, empresas de refrigeración industrial, técnicos de mantenimiento, etc.

La ubicación geográfica de los centros no es arbitraria. Se priorizan zonas con buen acceso a redes eléctricas potentes, clima favorable para la refrigeración natural (*free cooling*), políticas públicas atractivas y cercanía a grandes nodos de telecomunicaciones. Esto ha dado lugar a la emergencia de verdaderos hubs digitales en ciudades como Ámsterdam, Dublín, Frankfurt o Madrid. En este último caso, España ha comenzado a consolidarse como nodo estratégico en el sur de Europa gracias a sus infraestructuras, disponibilidad energética renovable y potencial de crecimiento (3).

Finalmente, desde una óptica medioambiental y energética, los centros de datos también representan una gran oportunidad. Aunque tradicionalmente se los ha visto como instalaciones de elevado consumo, la incorporación de energías renovables, tecnologías de refrigeración eficientes y sistemas inteligentes de gestión energética puede convertirlos en modelos de eficiencia dentro del sector industrial. Algunos operadores incluso han comenzado a reutilizar el calor residual para calefacción urbana, cerrando así el ciclo energético de forma innovadora (4)(6).

En suma, los centros de datos no solo sostienen la economía digital, sino que también son catalizadores de inversión, competitividad, autonomía tecnológica y transición energética. Su adecuada planificación y regulación resulta crítica para cualquier estrategia nacional de digitalización sostenible.

2.2 DEMANDA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD DE LOS CENTROS DE DATOS EN EUROPA Y ESPAÑA

Los centros de datos son infraestructuras energéticas que, en un contexto de transformación digital acelerada, ejercen una presión creciente sobre los sistemas eléctricos nacionales. Su demanda energética está vinculada no solo a la operación de servidores, sino también a subsistemas esenciales como la refrigeración, la alimentación eléctrica redundante y el mantenimiento de condiciones ambientales estables.

2.2.1 CONSUMO ENERGÉTICO A ESCALA EUROPEA

A nivel global, el consumo energético total de los centros de datos se estimaba en torno a 205 TWh en 2018, lo que representaba aproximadamente el 1 % del consumo eléctrico mundial (4). Si bien esa proporción ha permanecido relativamente constante, esto se debe en gran parte a avances tecnológicos en eficiencia, que han logrado contener el incremento energético pese al crecimiento masivo del tráfico de datos.

En el ámbito europeo, la demanda conjunta de los centros de datos ronda actualmente los 76 TWh anuales, equivalente al consumo de países como Bélgica o Austria. La Comisión Europea prevé un crecimiento del 28 % hasta 2030, como consecuencia directa del auge de la inteligencia artificial y el *cloud computing* (8). Algunos países ya experimentan cifras preocupantes: en Irlanda, por ejemplo, los centros de datos representaron en 2022 casi el 18 % del total del consumo eléctrico nacional, con previsiones que podrían alcanzar el 30 % para 2030, según el regulador CRU (10).

La presión sobre los sistemas eléctricos está obligando a los gobiernos a replantear sus planes de expansión y a exigir un mayor compromiso ambiental a los operadores. Países como Países Bajos y Alemania han llegado incluso a suspender temporalmente la aprobación de nuevos proyectos para reevaluar su sostenibilidad y alineamiento con los objetivos de descarbonización (11).

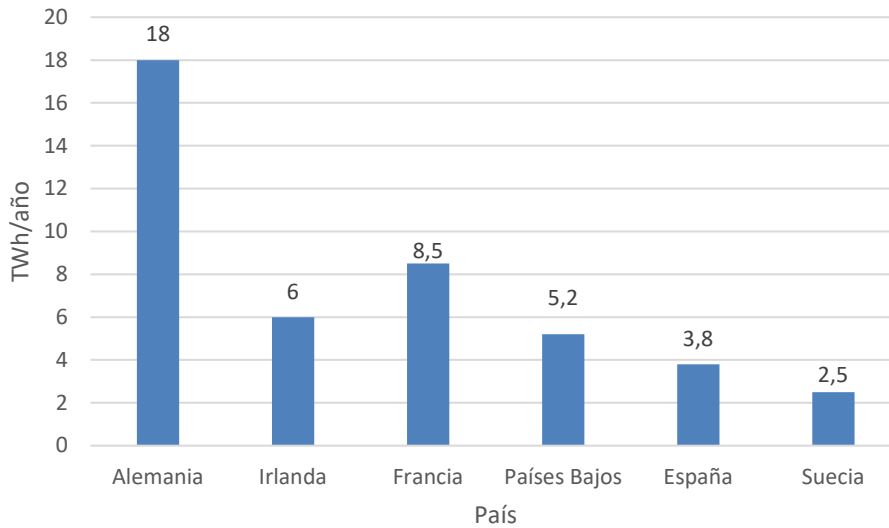


Figura 1. Consumo eléctrico anual por país

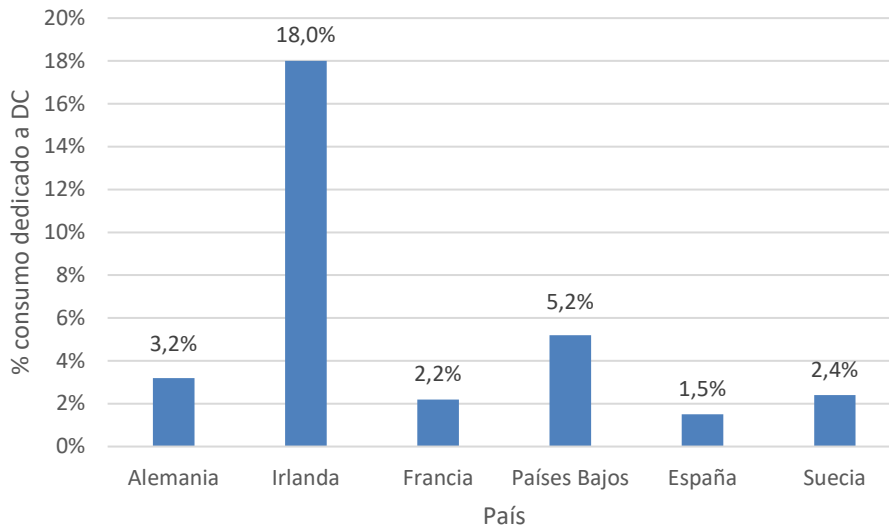


Figura 2. Porcentaje del consumo dedicado a DC

De los gráficos anteriores (Figura 2) y (Figura 3) se deduce que, aunque países como Alemania y Francia albergan un elevado número de centros de datos, su consumo energético relativo es moderado gracias a sus amplias redes eléctricas. Por el contrario, Irlanda destaca como un caso crítico, donde los centros de datos ya consumen el 18 % de la electricidad nacional, lo que genera preocupación regulatoria. España, con un consumo estimado del 1,5 %, se posiciona como un mercado emergente con amplio margen de crecimiento sostenible, especialmente si aprovecha su alto potencial en energías renovables y eficiencia climática. Suecia, por su parte, mantiene un equilibrio óptimo entre expansión digital y sostenibilidad, gracias a su clima frío y acceso a energía limpia.

2.2.2 EL CASO ESPAÑOL

España, aunque tradicionalmente ha tenido un menor número de centros de datos en comparación con los hubs FLAP (Frankfurt, Londres, Ámsterdam, París), está experimentando un despegue notable. Según Spain DC, en 2023 existían más de 160 centros operativos, con una previsión de alcanzar los 600 MW de capacidad IT instalada para 2026 (9). Esta expansión podría traducirse en un consumo de más de 5 TWh anuales, equivalente al de una ciudad de más de 500.000 habitantes como Málaga.

Este crecimiento plantea tanto un reto como una oportunidad: si bien puede tensionar la red eléctrica, también permite planificar infraestructuras más eficientes desde su origen. España cuenta con ventajas estratégicas como:

- Un mix energético cada vez más renovable.
- Condiciones climáticas favorables para el free cooling durante buena parte del año.
- Su posición como punto de interconexión internacional, gracias a cableado submarino en desarrollo y hubs como Madrid o Barcelona.

Además, una de las claves que refuerzan la viabilidad del crecimiento sostenible de los centros de datos en España es su posición de liderazgo en la contratación de energía renovable mediante PPAs. Esto no solo garantiza precios estables y previsibles, sino que también posiciona al país como referente europeo en sostenibilidad digital.

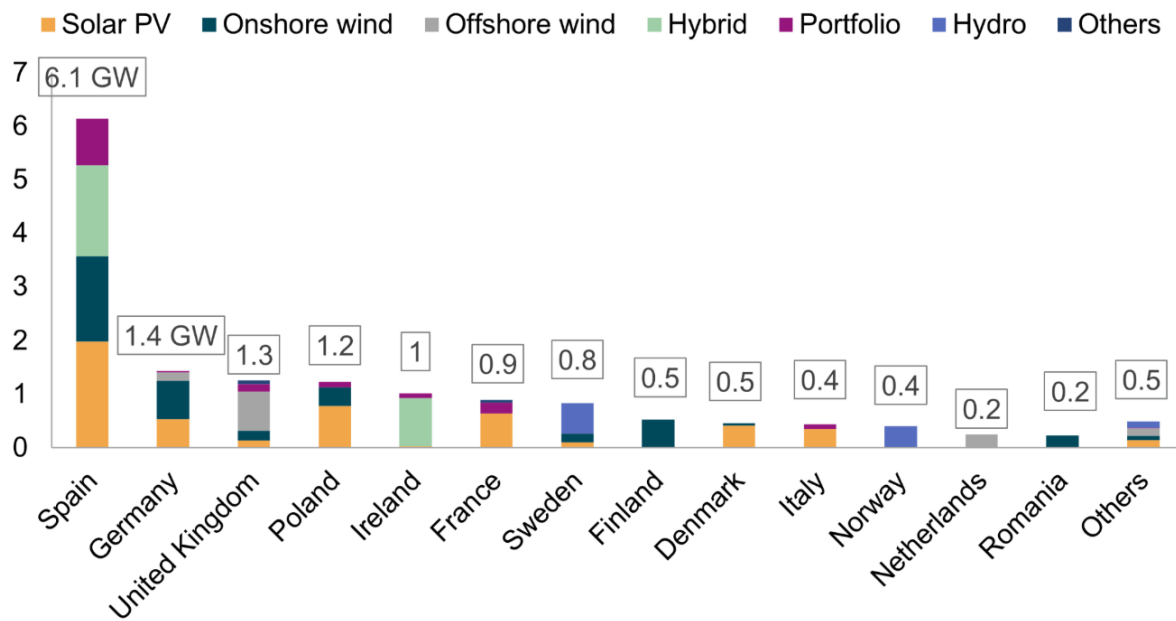


Figura 3. Capacidad contratada bajo PPAs en Europa por país en 2022

España lideró el mercado europeo en 2022 con 6,1 GW contratados en PPAs, muy por delante de Alemania (1,4 GW) o Reino Unido (1,3 GW). Este liderazgo se debe en gran parte al desarrollo del mercado solar fotovoltaico, así como al marco regulatorio favorable para este tipo de acuerdos. En el contexto de expansión de centros de datos, este dato refuerza la capacidad del país para garantizar una operación baja en carbono y alineada con los objetivos climáticos europeos. (38)

2.2.3 REPARTO INTERNO DEL CONSUMO

El consumo energético de un centro de datos se distribuye en varias secciones, de la siguiente manera:

Componente	Porcentaje estimado de consumo
Equipos Informáticos (IT)	45%
Sistemas de refrigeración	38%
Alimentación eléctrica (SAI, UDE)	8%
Otros	9%

Tabla 1. Distribución del consumo energético en un DC

Esta distribución pone de manifiesto que los esfuerzos de eficiencia deben centrarse no solo en el hardware, sino también en los sistemas de refrigeración y distribución eléctrica. Indicadores como el PUE (*Power Usage Effectiveness*) permiten cuantificar esta eficiencia: mientras que un PUE ideal es 1,0, la mayoría de los centros modernos oscila entre 1,3 y 1,5, aunque algunos logran valores inferiores en climas fríos o mediante tecnologías innovadoras (4)(5).

2.3 ***NORMATIVA VIGENTE APLICADA A LOS CENTROS DE DATOS***

La Unión Europea ha comenzado a integrar explícitamente a los centros de datos en su marco normativo, como parte de su estrategia de transición energética, digitalización y sostenibilidad. Estas instalaciones, consideradas ya infraestructuras críticas, están cada vez más sujetas a obligaciones regulatorias que buscan reducir su huella ambiental, fomentar la eficiencia energética y asegurar la transparencia operativa.

Uno de los marcos normativos más relevantes es la Directiva (UE) 2018/2002, que modifica la anterior Directiva 2012/27/UE sobre eficiencia energética. En ella se incluye, por primera vez, una mención específica a los centros de datos. En su artículo 10 (6), establece que los Estados miembros deben velar por que los operadores de centros con una potencia informática superior a 500 kW reporten públicamente, a partir de 2024, una serie de indicadores clave de sostenibilidad, incluyendo:

- El PUE (*Power Usage Effectiveness*).
- El porcentaje de energía renovable utilizada.
- La temperatura de operación y métodos de refrigeración.
- El calor residual reaprovechado, si aplica (2).

Este informe será de obligatorio cumplimiento y deberá enviarse a través de una plataforma digital común europea, que permitirá a los reguladores comparar la eficiencia de los centros entre países y regiones. La intención es establecer un sistema similar al de los certificados energéticos para edificios, pero adaptado a instalaciones digitales.

Además, en línea con el Pacto Verde Europeo, la Comisión ha fijado el objetivo de que los centros de datos sean climáticamente neutros en 2030. Este compromiso fue refrendado en la iniciativa conocida como el *Climate Neutral Data Centre Pact*, firmada por más de 60 empresas y respaldada por la Comisión (8). Aunque de momento es de carácter voluntario, se prevé que en futuras revisiones legislativas su cumplimiento sea vinculante.

Este pacto establece objetivos adicionales como:

- 100 % de uso de energías renovables.
- Reutilización del calor generado.

- Gestión responsable del agua y e-waste.
- Uso de refrigeración con gases de bajo impacto ambiental.

Añadido los requisitos de transparencia mencionados, la Unión Europea ha comenzado a establecer umbrales mínimos de eficiencia energética para centros de datos a través de normativas secundarias y estándares técnicos. Aunque el PUE no está aún regulado como umbral legal obligatorio, entidades como la Agencia Ejecutiva Europea de Clima, Infraestructuras y Medio Ambiente (CINEA) utilizan este indicador para evaluar proyectos financiados, y en muchos casos exigen valores inferiores a 1,3 en centros nuevos que aspiran a recibir fondos europeos o certificaciones energéticas avanzadas (37). Paralelamente, la Directiva 2012/27/UE —modificada por la Directiva (UE) 2018/2002— establece que los centros de datos con potencia superior a 500 kW deben reportar públicamente su PUE, junto con otros indicadores clave, como la temperatura de operación, el uso de energías renovables y el aprovechamiento del calor residual (2). Además, los centros de más de 1 MW están obligados a someterse a auditorías energéticas cada cuatro años, con el fin de detectar oportunidades de mejora en eficiencia y alinearse con los planes nacionales de descarbonización (2). Esta regulación anticipa una tendencia hacia la armonización de estándares de eficiencia en toda la UE.

2.3.1 NORMATIVA ESPAÑOLA

España está desarrollando un marco normativo cada vez más favorable, pero aún fragmentado. Los centros de datos se regulan de forma transversal a través de distintas leyes nacionales, estrategias sectoriales y normas regionales.

La norma que actúa como cabecera, y por la que se regirán el resto es el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Este documento estratégico establece la hoja de ruta para la descarbonización y digitalización del sistema energético español. Aunque no

menciona expresamente los centros de datos, estos deben alinearse con sus objetivos si quieren obtener licencias o financiación pública (15).

Otro de los proyectos a tener en cuenta es el de la Ley de Industria del año 2023. El anteproyecto de esta ley clasifica a los centros de datos como infraestructuras digitales de interés estratégico. Este reconocimiento permitirá que estos proyectos sean considerados prioritarios en el acceso a permisos, financiación y suelos industriales, especialmente si cumplen criterios de eficiencia energética, uso de renovables y resiliencia climática. (16)

Además, se trabaja en incluir estas instalaciones dentro del Catálogo Nacional de Infraestructuras Críticas, lo que implicaría mayores requisitos de seguridad física y cibernética, así como coordinación con el CNPIC (Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas).

2.3.1.1 Procedimientos regionales

Uno de los aspectos más destacados en la legislación en preparación es la creación de una “ventanilla única” para la tramitación de centros de datos, que permita reducir significativamente los plazos de obtención de licencias ambientales, energéticas y urbanísticas. Esta propuesta ha sido identificada como una de las medidas clave para atraer inversión extranjera.

Aquí, las comunidades autónomas juegan un papel central. Por ejemplo, la Comunidad de Madrid ya ha adaptado su normativa industrial para facilitar la implantación de centros de datos en parques tecnológicos. En este caso, el procedimiento a seguir se llama PEI (Proyecto de Especial Interés).

Los proyectos elegibles como Proyecto de Especial Interés (PEI) en Madrid son aquellos que crean al menos 50 empleos permanentes a tiempo completo o implican una inversión mínima de 10 millones de euros en activos fijos (excluyendo bienes inmuebles). Para instalaciones relacionadas con la energía, la inversión mínima requerida es de 24 millones

de euros. Los proyectos que no cumplan con estos umbrales también pueden calificar si incluyen una fuerte inversión en I+D, la creación de empleos de alto valor o actúan como impulsores estratégicos dentro de la cadena de valor.

Los promotores deben presentar un informe del proyecto, una autorización de representación legal (si corresponde) y documentos que detallen la descripción del proyecto, el promotor, la ubicación, el monto de la inversión, el número de empleos a crear y una declaración responsable. Esta vía lo que permite es una tramitación administrativa preferente. (14)

2.4 SOLUCIONES TECNOLÓGICAS ACTUALES

A medida que los centros de datos ganan protagonismo en la economía digital, también lo hacen como responsables de un consumo eléctrico significativo. Para responder a los retos regulatorios, medioambientales y económicos, este sector está adoptando múltiples soluciones tecnológicas enfocadas en la eficiencia energética, el uso responsable de recursos y la integración con el entorno urbano e industrial.

2.4.1 FREE COOLING

El free cooling se basa en aprovechar el aire exterior frío o agua a baja temperatura para enfriar los equipos sin recurrir a sistemas mecánicos activos. Existen dos variantes principales: el free cooling directo, donde el aire exterior se introduce filtrado al interior del centro, y el indirecto, donde el aire o agua enfría un circuito secundario sin contacto con el ambiente.

En climas templados como el español, especialmente en altitudes medias (Madrid, Zaragoza, Burgos), este sistema puede utilizarse entre 5.000 y 6.500 horas al año, lo que permite reducir significativamente el uso de *chillers* eléctricos y, por tanto, el consumo energético. Al disminuir la necesidad de compresión y bombeo continuo, los centros pueden alcanzar un

PUE de entre 1,2 y 1,3, lo cual representa una mejora sustancial respecto a instalaciones tradicionales con $PUE > 1,6$ (4).

2.4.2 REFRIGERACIÓN POR INMERSIÓN

En la refrigeración por inmersión, los componentes electrónicos se sumergen en fluidos dieléctricos (normalmente hidrocarburos sintéticos o líquidos fluorados) que absorben directamente el calor y lo transportan a un sistema de intercambio. Esto elimina la necesidad de ventiladores, disipadores y canalizaciones de aire.

Esta tecnología mejora la densidad computacional por rack, ya que permite instalar más equipos en menos espacio sin comprometer la temperatura de operación. Además, reduce el ruido, el mantenimiento y el desgaste por polvo o vibración. Aunque todavía es más cara que la refrigeración tradicional, su eficiencia y sostenibilidad la hacen especialmente atractiva para centros que operan con cargas intensivas y continuas, como los destinados a inteligencia artificial, big data o renderizado 3D (7).

2.4.3 REUTILIZACIÓN DEL CALOR RESIDUAL

Los servidores generan grandes cantidades de calor, tradicionalmente disipado mediante ventilación o torres de enfriamiento. Sin embargo, este calor puede recuperarse y usarse en aplicaciones útiles, como:

- Calefacción de edificios cercanos mediante redes de calor urbano.
- Climatización de piscinas o invernaderos.
- Procesos industriales de baja temperatura (lavanderías, alimentación).

Esta práctica, común en países del norte de Europa, comienza a introducirse en España en centros situados dentro de polígonos industriales o cerca de zonas residenciales. La

reutilización térmica puede aumentar la eficiencia energética global (EER) del sistema y transformar el centro de datos en una fuente neta de calor útil (13).

2.4.4 EDGE COMPUTING

El *edge computing* traslada parte del procesamiento desde los grandes centros de datos centralizados hacia ubicaciones más cercanas al usuario final o al dispositivo. Esto reduce la latencia, mejora la disponibilidad de datos en tiempo real y permite ahorrar energía de transmisión.

Los microcentros de borde, al estar más cerca de zonas urbanas o industriales, suelen operar a menor escala (10–200 kW), con una arquitectura optimizada que prioriza la eficiencia, la modularidad y la sostenibilidad. Además, pueden alimentarse con energía solar local o funcionar con refrigeración pasiva. En conjunto, el edge contribuye a una red digital más resiliente, eficiente y distribuida (17).

2.4.5 ENERGÍAS RENOVABLES

Integrar energías renovables en la alimentación eléctrica es una de las estrategias más directas para reducir la huella de carbono. Esto se logra, principalmente, a través de dos mecanismos:

- Contratos bilaterales de compraventa de energía (PPAs) con productores renovables, que aseguran precios estables y energía limpia durante 10 o más años.
- Autoproducción on-site, instalando paneles solares o minieólicas en la propia parcela del centro.

En España, donde el coste de la energía solar es de los más bajos de Europa, varios proyectos ya integran generación fotovoltaica local o híbrida. También se está estudiando el uso de almacenamiento con baterías o sistemas térmicos para mejorar la gestión de la intermitencia.

Esto permite a los centros no solo consumir energía verde, sino también actuar como activos de flexibilidad en la red (18).

2.5 CASOS PRÁCTICOS ¿QUÉ HACEN EN EUROPA?

Europa presenta una serie de ejemplos significativos de cómo distintos países han gestionado, potenciado o limitado el desarrollo de centros de datos. Algunos han liderado la captación de inversión tecnológica a través de infraestructura robusta y políticas energéticas innovadoras; otros han impuesto restricciones por motivos de sostenibilidad y planificación urbana. Este apartado repasa algunos de los casos más representativos.

Antes de analizar cómo distintos países han gestionado el desarrollo de centros de datos, es relevante observar una tendencia común en toda Europa: el crecimiento sostenido del uso de contratos de compraventa de energía (PPAs) para garantizar el suministro renovable de estas infraestructuras. El siguiente gráfico muestra la evolución de la energía contratada bajo PPAs en Europa entre 2018 y abril de 2023.

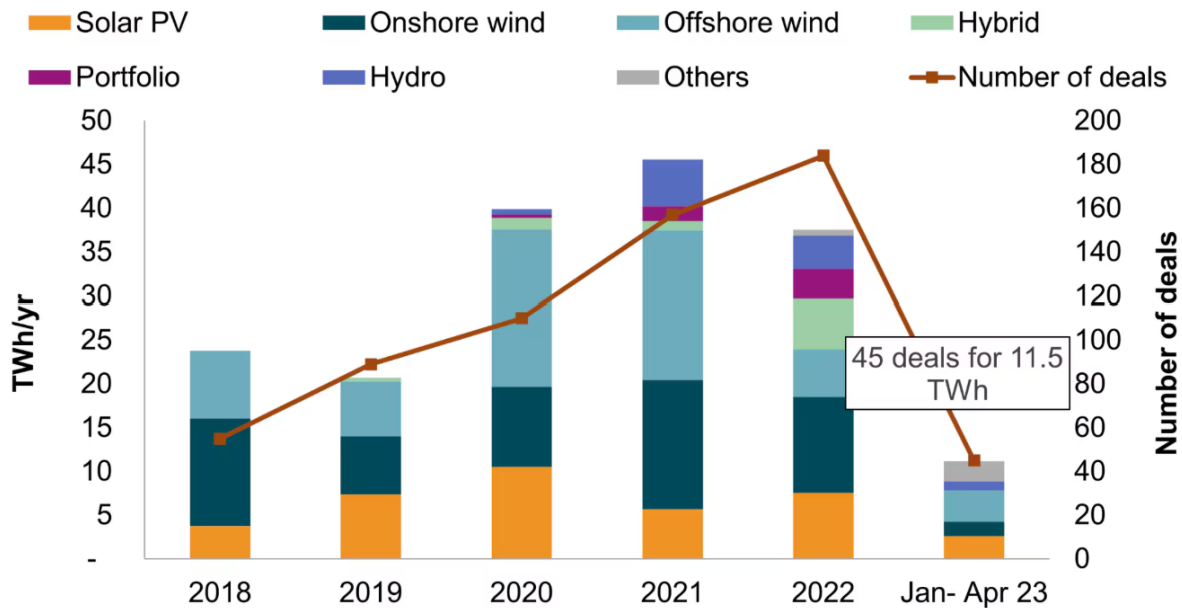


Figura 4. Energía contratada anualmente bajo PPAs en Europa

El gráfico revela un crecimiento significativo en la contratación de energía renovable, alcanzando un pico de más de 40 TWh firmados en 2022. La diversidad tecnológica: solar, eólica onshore y offshore, hidroeléctrica y combinaciones híbridas, evidencia una maduración del mercado energético verde. Aunque el número de acuerdos cayó en el primer trimestre de 2023, el volumen por operación continúa siendo elevado, lo que indica un enfoque más selectivo y estratégico por parte de los compradores energéticos, incluyendo operadores de centros de datos. (38)

2.5.1 IRLANDA

Irlanda es uno de los países con mayor concentración de centros de datos per cápita del mundo. Solo en 2023, estos centros consumieron cerca del 18 % de toda la electricidad del país, una cifra que ha generado preocupación pública y medidas regulatorias (10).

- Factores de éxito:
 - Impuestos corporativos bajos (12,5 %).

- Interconexión con EE. UU. mediante cables submarinos.
- Estabilidad política y clima favorable al free cooling.
- Problemas emergentes:
 - Congestión de la red en el área de Dublín.
 - Moratoria parcial a nuevos centros desde 2022.
 - Revisión regulatoria por impacto medioambiental (10).

El ejemplo irlandés demuestra cómo el rápido crecimiento sin planificación energética puede colapsar la red, complicando el funcionamiento de la infraestructura eléctrica nacional.

2.5.2 PAÍSES BAJOS

Los Países Bajos, especialmente Ámsterdam y Eemshaven, son un hub clave de conectividad en Europa. Sin embargo, el Gobierno ha aplicado restricciones temporales al desarrollo de nuevos centros de datos desde 2022, debido a preocupaciones sobre uso de suelo y energía (30).

- Aspectos destacados:
 - Alta eficiencia energética (PUE medio inferior a 1,3).
 - Liderazgo en integración con energías renovables y economía circular.
 - Implementación de centros de datos hiperescalares de Microsoft y Google.
- Restricciones:
 - Congelación de nuevos permisos hasta asegurar sostenibilidad del modelo.
 - Planes regionales obligatorios para nuevas instalaciones.

Este caso ilustra la tensión entre liderazgo digital y gobernanza ambiental a nivel urbano.

2.5.3 NORUEGA

Noruega ha optado por posicionarse como un destino hiper sostenible para centros de datos gracias a su abundancia de hidroelectricidad de bajo coste y emisiones nulas.

- Ventajas competitivas:
 - Más del 90 % de su electricidad procede de hidroeléctrica.
 - Clima frío ideal para refrigeración pasiva.
 - Incentivos fiscales para tecnologías verdes.
 - Proyectos de reutilización del calor residual (district heating).
- Proyectos clave:
 - Green Mountain DC (alimentado 100 % por renovables).
 - Campus de Lefdal Mine, ubicado en una mina subterránea reconvertida.

Noruega representa el estándar en sostenibilidad y eficiencia térmica aplicable a centros de datos.

2.6 TENDENCIAS ACTUALES Y SEÑALES DE ALERTA

Los recientes acontecimientos en el panorama energético español y europeo muestran que la planificación y resiliencia del sistema eléctrico es tan urgente como compleja. Estos eventos no sólo revelan las debilidades estructurales de la red eléctrica y del marco regulador, sino que también ponen de manifiesto nuevas dinámicas industriales: desde apagones críticos hasta decisiones estratégicas por parte de los gigantes tecnológicos. Ambos fenómenos

encierran lecciones clave para evaluar la viabilidad de convertir a España en un destino atractivo para nuevos centros de datos.

2.6.1 APAGÓN 28 DE ABRIL DE 2025: DESEQUILIBRIOS REACTIVOS Y ESTRÉS DE RED

El pasado 28 de abril, España sufrió un apagón que afectó a diversos nodos de su red de alta tensión, con especial impacto durante las horas centrales del día. El informe técnico del IIT (Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas) atribuye el origen del colapso a un fallo en el control de la energía reactiva en condiciones de baja demanda y alta producción renovable. En concreto, el exceso de tensión generado por la sobreinyección solar en líneas de 400 kV con baja carga generó oscilaciones que no pudieron ser compensadas a tiempo por el sistema (35).

Aunque Red Eléctrica programó ciclos combinados y nucleares en niveles mínimos para estabilizar el sistema, la insuficiencia de reactancias, compensadores síncronos y reservas distribuidas provocó un colapso en cascada. La falta de flexibilidad para gestionar la energía reactiva local, junto con la baja capacidad de interconexión con otros países, evidenció una vulnerabilidad estructural del sistema ibérico. El incidente expone la necesidad urgente de inversiones en activos de control avanzado y en el rediseño de las reglas de mercado para integrar con seguridad la creciente generación renovable distribuida.

Este evento, aunque haya ocurrido de manera puntual, anticipa los riesgos crecientes de congestión y desequilibrios en una red sometida a una rápida electrificación, alto grado de descentralización y aumento de demanda por cargas críticas como los centros de datos.

2.6.2 VUELTA A LA ENERGÍA NUCLEAR: EL INTERÉS DE LAS GRANDES TECNOLÓGICAS

De forma paralela, se ha observado una tendencia cada vez más clara entre las grandes tecnológicas hacia la inversión o asociación directa con centrales nucleares para asegurar un

suministro eléctrico estable y libre de carbono. Según un reportaje del *New York Times*, empresas como Microsoft, Amazon y Google están buscando acuerdos con operadores nucleares en EE. UU. y Europa para alimentar sus futuros centros de datos con electricidad de origen atómico (36).

Esta estrategia responde a tres factores convergentes:

- La necesidad de mitigar las emisiones de carbono ante los compromisos ESG y la presión regulatoria europea.
- La elevada carga base y continuidad operativa que exigen las infraestructuras digitales.
- El colapso progresivo de las ventanas regulatorias para invertir en combustibles fósiles, combinado con la intermitencia inherente a las energías renovables.

En países como EE. UU., estas compañías están incluso participando en el desarrollo de pequeños reactores modulares (SMRs), que permitirían un suministro más localizado, escalable y adaptable a sus propias instalaciones. Esta revalorización estratégica de la energía nuclear como vector de resiliencia y descarbonización puede modificar el mapa de inversiones digitales en Europa. España, actualmente inmersa en un calendario de cierre progresivo de sus reactores, podría verse en desventaja si no adapta su política energética a estos nuevos requisitos industriales.

2.7 CONCLUSIONES DERIVADAS DEL CONTEXTO GLOBAL

El análisis del contexto europeo revela un ecosistema de centros de datos en rápida expansión, condicionado por factores como la soberanía digital, la eficiencia energética, la disponibilidad de renovables y las crecientes exigencias normativas. Tecnologías como el free cooling, la refrigeración por inmersión, el uso de PPAs o la reutilización del calor están

permitiendo mejorar la sostenibilidad de estas infraestructuras críticas, al tiempo que se consolidan como nodos estratégicos de inversión y digitalización.

En este escenario, España se posiciona como un país con margen de crecimiento, respaldado por un marco normativo emergente, abundancia de recursos renovables y buenas condiciones climáticas. No obstante, para materializar este potencial es necesario un diagnóstico riguroso que identifique las fortalezas y debilidades del caso español.

En el siguiente capítulo se abordará ese diagnóstico local, aplicando una metodología basada en criterios técnicos, energéticos y normativos, que permita evaluar con precisión la viabilidad de nuevos centros de datos en el territorio nacional.

Capítulo 3. DIAGNÓSTICO DEL CASO ESPAÑOL

España se ha convertido en uno de los mercados más dinámicos del sur de Europa en cuanto a centros de datos, gracias a su disponibilidad de energías renovables, buena conectividad internacional y creciente interés de inversores globales. Este capítulo examina la situación actual del sector en el país, destacando su evolución reciente, principales actores, ventajas competitivas y los factores que podrían limitar su desarrollo, con el objetivo de entender su preparación para liderar el crecimiento digital sostenible en la región.

3.1 SITUACIÓN ACTUAL MERCADO ESPAÑOL

Como se ha venido comentando en secciones anteriores, para el año que viene se espera alcanzar los 600 MW de capacidad, situando a España entre los países con mayor ritmo de expansión digital de Europa, especialmente dentro del sur del continente.

Madrid concentra actualmente más del 80 % de la capacidad instalada, consolidándose como un nuevo hub digital del sur de Europa, gracias a su red eléctrica robusta, interconexión por cable submarino (como el 2Africa o el Marea) y la presencia creciente de proveedores cloud globales como AWS, Microsoft o NTT. Barcelona, Zaragoza y Málaga también están emergiendo como polos tecnológicos, asociados a hubs de innovación, logística y universidades.

3.1.1 PERFIL DE LOS INVERSORES

El ecosistema español está compuesto tanto por proveedores locales (como Interxion, Nabiax o Data4) como por grandes actores internacionales que han iniciado grandes inversiones en los últimos años. Algunos de los casos más destacados incluyen:

- Amazon Web Services (AWS) ha anunciado en mayo de 2024 una inversión de 15.700 millones de euros hasta 2033 para ampliar su región cloud en Aragón, con centros en Huesca, El Burgo de Ebro y Villanueva de Gállego, lo que representa la mayor inversión tecnológica realizada en España hasta la fecha (20). Esta expansión, además de reforzar el peso digital del país, se estima que generará más de 17.500 empleos anuales y tendrá un impacto económico de 21.600 millones de euros a lo largo de la década.
- Microsoft también ha confirmado en 2024 una inversión de 2.200 millones de euros en un nuevo campus de centros de datos en Aragón, centrado en inteligencia artificial y servicios en la nube, ampliando así su estrategia de despliegue en España y reforzando la colaboración con la administración pública (19).
- En conjunto, ambas compañías superarán los 22.300 millones de euros invertidos solo en Aragón, situando a esta comunidad como un eje estratégico del sur de Europa en servicios digitales avanzados (21).

Además, otras entidades como Blackstone, a través de QTS, y operadores como NTT Global Data Centers y Digital Realty están ampliando su infraestructura en Cataluña y Madrid, con inversiones crecientes en entornos energéticamente sostenibles y de alta disponibilidad (2).

3.1.2 FACTORES QUE FACILITAN EL CRECIMIENTO

Varios factores clave sitúan a España como un país altamente atractivo para la implantación de centros de datos:

- Penetración de energías renovables: como puede apreciarse en la Figura 5, en 2024, más del 50 % del mix eléctrico procedía de fuentes limpias, con previsión de alcanzar el 74 % en 2030, según el PNIEC (9).

- Condiciones climáticas favorables para la implementación de free cooling en muchas regiones del interior y norte peninsular.
- Precio competitivo del suelo industrial en comparación con países como Alemania, Países Bajos o Francia, lo que facilita proyectos de gran escala.
- Apoyo institucional a través de fondos europeos (NextGenEU) y programas como el Plan España Digital 2026, que prioriza la inversión en infraestructura digital (10).

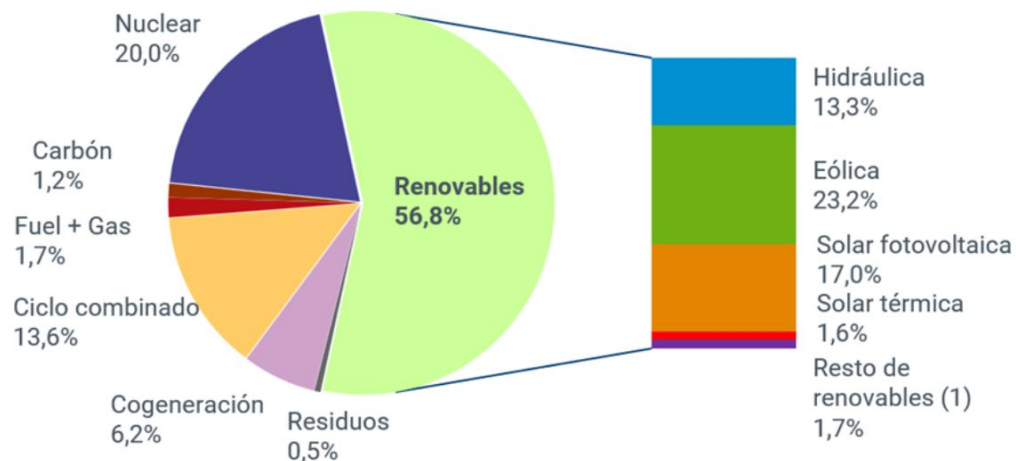


Figura 5. Estructura de generación de energía eléctrica (%) en 2024 en España (12)

3.1.3 CASOS REPRESENTATIVOS

El posicionamiento de España como hub digital del sur de Europa no es solo una aspiración estratégica, sino una realidad que empieza a tomar forma a través de inversiones concretas y despliegues operativos de gran escala. A continuación, se presentan cuatro casos representativos, dos con información pública ampliamente difundida y dos adicionales basados en proyectos reales evaluados por Arup, cuya confidencialidad se mantiene al preservar el anonimato del cliente, que ilustran tanto las fortalezas como las barreras estructurales del entorno español para centros de datos.

Caso 1: Interxion MAD3 (Madrid): Ubicado en San Sebastián de los Reyes, MAD3 es parte del campus digital más grande del sur de Europa operado por Interxion (Digital Realty). Iniciado en 2021 y con una capacidad prevista de hasta 35 MW, este centro se abastece al 100 % de energía renovable, dispone de múltiples conexiones de fibra óptica y forma parte de un ecosistema de cuatro centros interconectados en Madrid (MAD1–MAD4).

- Capacidad estimada: ~35 MW
- Inicio operaciones: 2021
- Ubicación: Madrid norte
- Energía: PPA renovables, alta eficiencia energética
- Conectividad: conexión directa con IXPs, carriers y anillos de fibra

Caso 2: AWS (Aragón): Amazon Web Services ha desplegado tres centros de datos en Huesca, Villanueva de Gállego y El Burgo de Ebro, iniciando operaciones en 2022. Con una inversión prevista de 15.700 millones de euros hasta 2033, representa el mayor proyecto digital del país.

- Capacidad estimada: >210 MW (en fases)
- Inicio operaciones: desde 2022 (eu-south-2)
- Ubicación: Aragón
- Inversión: 15.700 millones €
- Impacto económico: más de 17.500 empleos/año y 21.600 M€ al PIB nacional
- Energía: 100 % renovable, con PPAs de más de 596 MW solares/eólicos

Caso 3 (confidencial – asesorado por Arup): Centro de datos Tier IV en zona urbana periférica: En 2022, un operador global de hiperescala evaluó la construcción de un campus Tier IV en las afueras de una ciudad del sur de España. Aunque la localización presentaba atractivos evidentes —bajo coste de suelo, buen acceso logístico y disponibilidad de energías renovables cercanas—, el proyecto se enfrentó a diversos bloqueos estructurales:

- La conexión a la red eléctrica, según REE, exigía un refuerzo de subestación que alargaría los plazos entre 4 y 5 años.
- El coste estimado de conexión superaba los 900.000 €/MW, debido a ampliaciones de línea y transformadores.
- Desde el punto de vista urbanístico, la tramitación se vio ralentizada por la exigencia de doble informe ambiental (local y autonómico), con duplicidad documental y secuencias de aprobación no paralelas.

El resultado fue que el operador redirigió su inversión hacia un país del Benelux, donde encontró una regulación más integrada y tiempos de conexión por debajo de los 12 meses.

Caso 4 (confidencial – proyecto privado evaluado por Arup): Integración directa con renovables mediante PPA solar: Otro caso analizado por Arup involucró a una tecnológica europea interesada en construir un centro de datos de 18 MW en una comunidad del noreste peninsular. La propuesta incluía un contrato de compraventa de energía a largo plazo (PPA) con una planta solar situada a 40 km del emplazamiento.

- La línea dedicada de conexión tardó en ser ejecutada 28 meses, aunque el diseño fue aprobado en una fase previa al proyecto técnico completo.
- El centro consiguió operar con un mix energético 85 % solar y 15 % red general, con apoyo de sistemas de baterías como respaldo.

- Durante los meses de julio y agosto, el consumo energético aumentó un 22 % por el incremento en el uso de sistemas de refrigeración, afectando al PUE (Power Usage Effectiveness) medio anual.
- Para mantener la estabilidad operativa, se diseñó un sistema de free cooling mixto y se firmaron acuerdos de respaldo flexible con el operador energético local.

Este caso ilustra una tendencia creciente en la integración energética directa, pero también subraya las limitaciones térmicas y logísticas de muchas ubicaciones en España, especialmente ante eventos climáticos extremos.

3.2 POTENCIAL NACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES

Uno de los factores clave que refuerzan la competitividad de España como destino para centros de datos es su enorme potencial en energías renovables, tanto en capacidad instalada como en desarrollo futuro. Esta ventaja comparativa es especialmente relevante si se tiene en cuenta la presión europea para que estos centros operen con electricidad 100 % libre de emisiones de aquí a 2030 (2)(8).

A continuación, se analiza el estado actual y futuro del potencial energético renovable español, segmentado por tecnología.

3.2.1 SOLAR FOTOVOLTAICA

España cuenta con una de las mejores irradiaciones solares de Europa, con valores medios anuales entre 1.500 y 2.100 kWh/m², lo que permite alcanzar altos factores de capacidad en plantas solares (15).

- El año 2024 ha vuelto a ser un año de récord para la generación solar fotovoltaica en España con un máximo histórico anual de 44.520 GWh y una cobertura máxima del 17,0 % (12).

- El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) prevé alcanzar los 76.000 MW fotovoltaicos en 2030, lo que triplicará la capacidad actual y permitirá una oferta estable para alimentar grandes consumidores eléctricos como los centros de datos (15).
- Muchas comunidades con irradiación óptima (Aragón, Castilla-La Mancha, Andalucía) ya albergan proyectos combinados de centros de datos y plantas fotovoltaicas, tanto en modalidad on-site como mediante contratos PPA (18).

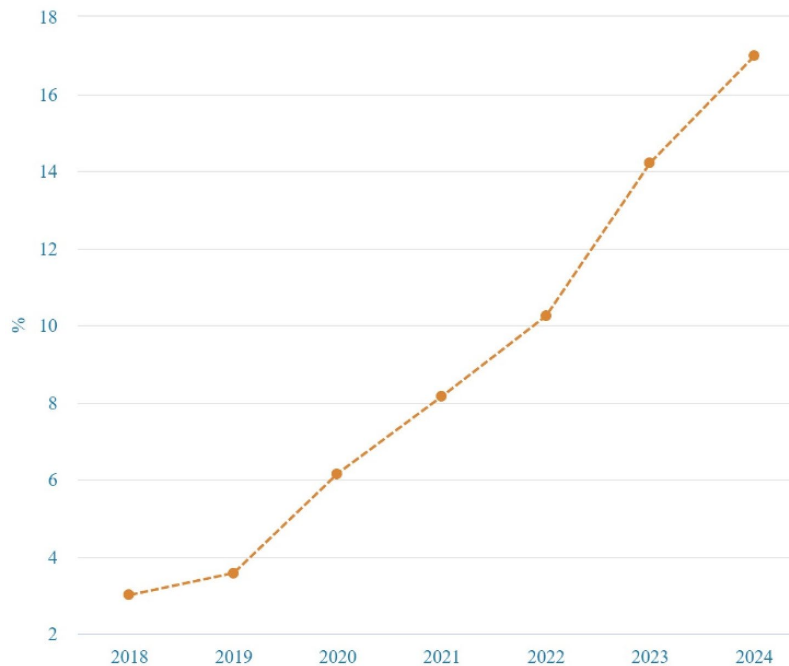


Figura 6. Participación anual de la generación fotovoltaica en la generación total (12)

Estos valores avalan que se está apostando fuertemente por esta tecnología, que está ganando cada vez más peso en el mix energético nacional. Hasta la cifra que hay marcada como

objetivo de los 76.000 MW instalados para 2030, hay mucho margen de crecimiento desde los 32.350 MW actuales.

3.2.2 EÓLICA

La energía eólica volvió a ser en 2024, por segundo año consecutivo y por cuarta vez en la historia, la primera fuente de generación nacional, con una participación del 23,2 % en el mix de generación. Además, su comportamiento complementa bien a la solar, ya que genera de forma más estable durante la noche y en estaciones frías.

- En 2024, España superó los 60.000 GWh eólicos generados, una producción superior al 23% de la electricidad total (15).
- Las regiones con mayor penetración eólica (Castilla y León, Galicia, Aragón) coinciden con las zonas donde están emergiendo nuevos hubs de centros de datos, lo que permite una integración energética eficiente.
- El PNIEC fija como objetivo alcanzar los 62.000 MW eólicos para 2030, incluyendo la eólica marina flotante en el Mediterráneo y Canarias.

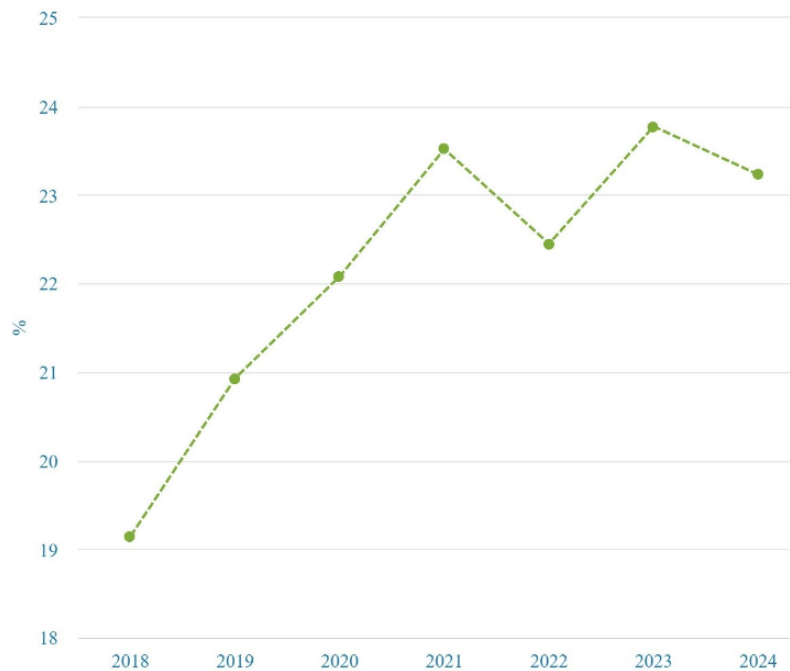


Figura 7. Participación anual de la generación eólica en la generación total (12)

Tras analizar la Figura 6, se deduce que, aunque el porcentaje de participación de esta tecnología no presenta la misma tendencia exponencial que la fotovoltaica, sigue siendo la que más aporta al mix nacional. De todos modos, sigue siendo una fuente energética con potencial ya que hasta los 62.000 MW propuestos para 2030, hay margen desde los poco más de 32.000 MW actuales.

3.2.3 HIDRÁULICA

La generación hidráulica en España es muy variable, llegando en años húmedos a superar los 40.000 GWh, mientras que en años secos ese volumen se reduce a menos de la mitad. Debido a una mayor pluviosidad mayor a la de 2023, en 2024 se han alcanzado los 34.912 GWh. Esta producción ha aportado el 13,3 % del total de la producción nacional.

A pesar de esta variabilidad, la energía hidráulica cuenta con ventajas competitivas como, fuente de respaldo, esencial en escenarios con alta penetración de renovables intermitentes

y la reversibilidad (bombaje), clave para estabilizar el suministro eléctrico de los centros de datos más exigentes, especialmente en regiones montañosas.

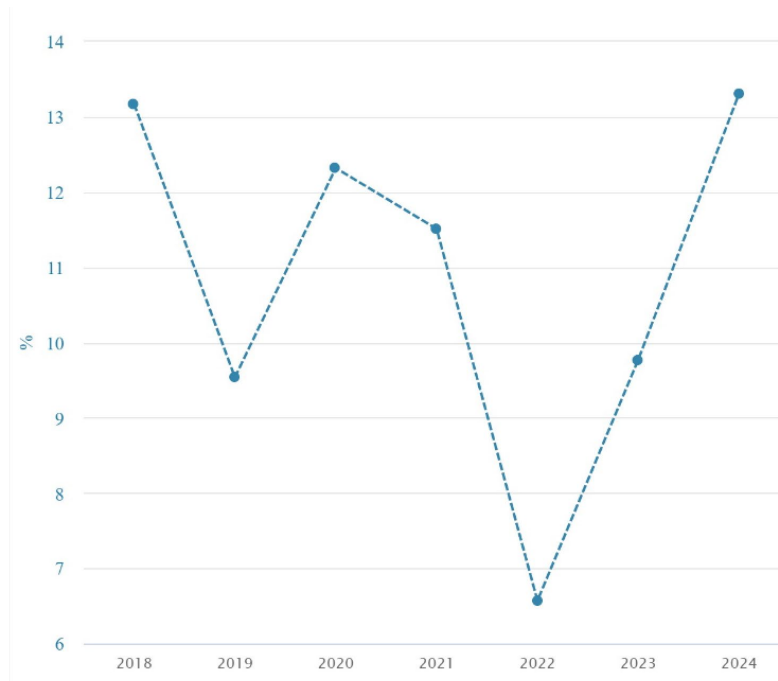


Figura 8. Participación anual de la generación hidráulica en la generación total

3.3 ENERGÍA NUCLEAR

Debido a la controversia existente respecto a esta tecnología, he considerado conveniente estudiarla aparte. La energía nuclear ha sido históricamente uno de los pilares del sistema eléctrico español en términos de estabilidad, disponibilidad continua y bajo coste variable. Aunque no es considerada mayoritariamente una fuente renovable, sí es considerada una fuente libre de emisiones directas de CO₂, lo que la hace atractiva para industrias que requieren un suministro constante y bajo en carbono, como los centros de datos.

3.3.1 CAPACIDAD Y APORTACIÓN AL MIX

España cuenta actualmente con 7 reactores nucleares en operación, que suman una potencia bruta instalada de aproximadamente 7.400 MW. En 2024, la energía nuclear representó un 19,57% de la generación eléctrica total del país, siendo la segunda fuente tras la eólica (23).

Esta alta estabilidad la convierte en una tecnología estratégica para complementar la variabilidad de las renovables y mantener frecuencias estables en la red, algo crítico para el funcionamiento de los centros de datos más sensibles.

3.3.2 PLAN DE CIERRE

Según los acuerdos entre el Gobierno y las eléctricas, España tiene previsto el cierre progresivo de todas sus centrales nucleares entre 2027 y 2035, comenzando por Almaraz I y finalizando con Trillo.

Este calendario plantea desafíos importantes para la seguridad de suministro y estabilidad de red, y en caso de que finalmente se llevase a cabo, debería de compensarse con:

- Renovables despachables (eólica + almacenamiento).
- Fuentes térmicas con bajas emisiones.
- Redes inteligentes y flexibilidad del consumo.

Este plan afecta de lleno al sector objeto de este estudio. Los centros de datos requieren una calidad de suministro muy alta, con tolerancia mínima a interrupciones o fluctuaciones. En este sentido, la nuclear ha sido un pilar técnico de fiabilidad para el sistema eléctrico español. El cierre, aumentaría la presión sobre renovables y gas, y obligará a los centros a invertir en soluciones de backup, como baterías, microredes o PPA's firmes. Además, sin la nuclear, el factor de emisiones medio del sistema aumentará en los días de baja producción renovable, lo que puede dificultar a los operadores alcanzar certificaciones "cero emisiones netas".

Por tanto, aunque la energía nuclear no sea considerada renovable, su papel como fuente firme, libre de carbono y continua resulta clave hasta que el sistema renovable español alcance un grado de almacenamiento, control y capacidad suficiente para garantizar el mismo nivel de seguridad operativa.

3.4 CUELLOS DE BOTELLA

A pesar de las ventajas competitivas de España para albergar centros de datos, su desarrollo se ve frenado por varios desafíos estructurales que afectan a la seguridad regulatoria, los costes energéticos, la sostenibilidad climática y la capacidad de red eléctrica.

3.4.1 REGULACIÓN DISPERSA

Pese a los intentos por acelerar estos procedimientos con los permisos especiales regionales, España carece de un marco administrativo unificado para centros de datos, lo que obliga a cumplir con regulaciones urbanísticas, ambientales y eléctricas simultáneamente, generando plazos de tramitación que pueden superar los 18 – 24 meses. En comparación, países líderes como Países Bajos y Reino Unido logran tiempos medios de 6 a 9 meses, según un estudio de WFW sobre tiempos de aprobación en infraestructuras digitales (27).

El procedimiento administrativo para la obtención de permisos en proyectos de centros de datos en España presenta una notable complejidad y dispersión normativa. Dependiendo del tipo de tramitación (estándar o simplificada), los tiempos pueden extenderse significativamente, afectando la viabilidad de los proyectos y su planificación financiera. A continuación, se presenta un esquema representativo que detalla los diferentes pasos y plazos esperados en la tramitación de infraestructuras de conexión eléctrica bajo ambas modalidades.

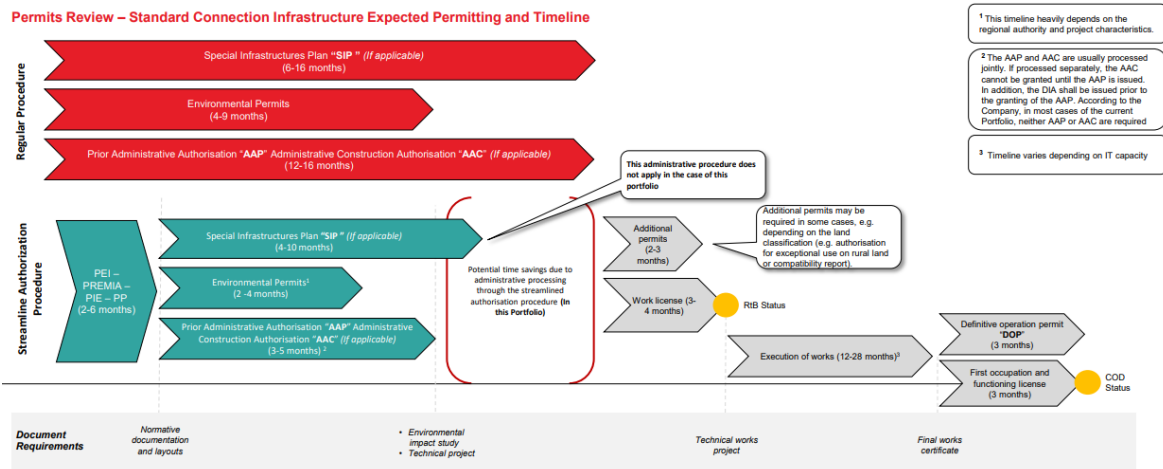


Figura 9. Tiempo de conexión esperado

Como puede observarse en el diagrama, los plazos acumulados para una conexión estándar pueden alcanzar los 24 a 36 meses o incluso más, en función de si se requieren planes especiales, autorizaciones ambientales y licencias complementarias. En contraste, la tramitación simplificada permite acortar algunos pasos, aunque sigue implicando fases críticas como la autorización administrativa previa (AAP) o de construcción (AAC), y la ejecución de obras, que puede extenderse hasta 28 meses adicionales. (18)

Esta diversidad de procedimientos y dependencia de autoridades locales refuerzan la necesidad de una ventanilla única regulatoria y de un marco nacional armonizado, como ya ocurre en otros países europeos que lideran el sector digital.

3.4.2 VOLATILIDAD PRECIOS ENERGÉTICOS

La volatilidad de precios resulta especialmente crítica para cargas constantes como los centros de datos. Los precios medios del MWh en España, han oscilado entre 20 € en horas de alta producción renovable y picos superiores a 150 € en situaciones de escasez, generando oscilaciones de más de 130 €/MWh en un solo mes (12).

En 2024, el precio medio del mercado diario eléctrico en España fue de 63,04 €/MWh, un 28 % menos que en 2023 (87,10 €/MWh), pero aún elevado históricamente. Esta volatilidad aumenta el riesgo económico para este tipo de proyectos.

3.4.3 LIMITACIONES DEL SISTEMA

Numerosos estudios señalan que, los modelos con baja resolución tienden a subestimar los costes de refuerzo de red en un 16 %, mientras que actualizaciones de alta resolución revelan congestiones significativas en regiones clave como Aragón y Castilla-La Mancha (28). Un reciente informe de Ember sobre Europa estima que hasta la mitad de la capacidad de nuevos centros de datos podrían migrar fuera de los hubs tradicionales debido a tiempos de conexión, que hoy varían entre 7 y 10 años (29).

En España, los tiempos estimados para proyectos de conexión a red pueden alcanzar los 3-5 años sin acometidas previas, lo que genera incertidumbre en la planificación de inversiones (28).

3.4.4 CLIMA EXTREMO

Aunque el free cooling es viable gran parte del año, los picos veraniegos, especialmente en julio-agosto en el sur peninsular, reducen esa eficiencia. Algunos operadores reportan un aumento del consumo de refrigeración activa de hasta 25 % durante esos meses, en comparación con la media anual.

Asimismo, en zonas con estrés hídrico, el uso de sistemas adiabáticos queda limitado hasta en un 30 % del tiempo de operación potencial, obligando nuevamente a sistemas más intensivos en consumo y coste operativo (18).

Capítulo 4. MARCO TEÓRICO

4.1 FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y ENERGÉTICOS DE LOS CENTROS DE DATOS

Los centros de datos son infraestructuras físicas diseñadas para alojar, gestionar y procesar grandes volúmenes de información digital. Su operación se basa en un conjunto complejo de sistemas interconectados que incluyen servidores, almacenamiento, redes, sistemas eléctricos de respaldo y, muy especialmente, mecanismos de refrigeración. A nivel técnico, estas instalaciones están construidas con criterios de redundancia, escalabilidad y disponibilidad continua (24 horas al día, 365 días al año), lo que exige un consumo eléctrico constante y altamente fiable (1).

Desde el punto de vista energético, los centros de datos son altamente intensivos en demanda eléctrica, especialmente por la energía requerida para alimentar servidores (IT load) y para mantener condiciones térmicas óptimas. La relación entre ambas cargas se refleja en el indicador Power Usage Effectiveness (PUE), que mide la eficiencia energética global. Según el *Uptime Institute* (2023), el valor medio global de PUE se mantiene estable en torno a 1,55, aunque los mejores centros (hiperescalables) alcanzan cifras por debajo de 1,20 gracias al uso de refrigeración avanzada y gestión térmica inteligente (31).

Otra característica técnica clave es la arquitectura de alimentación eléctrica. Los centros de datos suelen integrar:

- Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) y generadores diésel de emergencia,
- Celdas de media tensión para conexión directa con subestaciones,

- Distribución eléctrica en anillo, con redundancia N+1 o 2N para asegurar la continuidad del servicio ante fallos.

Además, desde una perspectiva de diseño, existen distintas tipologías que afectan al perfil energético:

- Centros de datos “on-premise”, integrados en las instalaciones de empresas;
- Centros de datos “colocation”, que alquilan espacio y servicios;
- Centros hiperescalables, operados por empresas como Google, AWS o Microsoft, que requieren gran consumo y suelen negociar acuerdos de compra de energía (PPAs).

En términos de localización, factores como el clima (que afecta directamente a la refrigeración), la cercanía a infraestructuras eléctricas y de fibra óptica, y la disponibilidad de terreno, son determinantes. Estas variables condicionan el diseño técnico, la eficiencia energética y la viabilidad de conexión a redes eléctricas existentes (18)(24).

Por último, cabe destacar que los centros de datos están evolucionando hacia modelos distribuidos o edge, donde se prioriza la latencia y la proximidad al usuario final, sacrificando en parte la eficiencia energética global en favor de tiempos de respuesta más cortos. Esta evolución tendrá implicaciones importantes sobre el diseño y operación energética futura.

En conjunto, estos fundamentos técnicos y energéticos permiten comprender la infraestructura y funcionamiento de los centros de datos. A partir de esta base, es necesario profundizar en las variables críticas que definen su comportamiento energético, su sostenibilidad ambiental y su resiliencia operativa.

4.2 VARIABLES CRÍTICAS: CONSUMO ENERGÉTICO, REFRIGERACIÓN, EMISIONES, RESILIENCIA

Los centros de datos, por su naturaleza intensiva en recursos, se enfrentan a múltiples variables críticas que determinan su viabilidad técnica, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes.

4.2.1 CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo eléctrico es la variable principal que condiciona tanto la planificación como la operación de un centro de datos. Este consumo no es lineal: depende del número de servidores activos, del uso real de los procesadores y de las tecnologías de virtualización y escalado que se apliquen. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el consumo energético mundial de los centros de datos fue de aproximadamente 415 TWh en 2024, con proyecciones que podrían duplicarse en la próxima década por el auge de la inteligencia artificial y los modelos generativos (26).

En Europa, se estima que el sector consume entre el 1,8 % y 2,6 % de la electricidad total, con una demanda creciente especialmente en países como Irlanda, los Países Bajos y Alemania (32). El crecimiento de la demanda no solo implica más energía, sino también mayor potencia instalada y reservas eléctricas disponibles, lo cual puede generar tensiones sobre las redes locales.

4.2.2 REFRIGERACIÓN

La refrigeración representa entre el 30 % y 40 % del consumo eléctrico total de un centro de datos (5). Su eficiencia depende del sistema utilizado y del clima local. Las soluciones tradicionales basadas en sistemas HVAC están dando paso a alternativas más avanzadas como:

- Free cooling, que aprovecha el aire exterior en climas favorables,

- Refrigeración líquida directa (direct-to-chip), con eficiencias superiores,
- Inmersión líquida total, en fase piloto, con potencial para grandes ahorros térmicos.

Estas tecnologías permiten reducir el PUE por debajo de 1,3 en instalaciones optimizadas (31). En climas cálidos como el español, el reto térmico es mayor, por lo que la elección de la localización geográfica es clave para la viabilidad técnica y energética del proyecto.

4.2.3 EMISIONES DE CARBONO Y SOSTENIBILIDAD

Aunque los centros de datos no emiten CO₂ directamente, su huella de carbono depende del mix energético del sistema al que se conectan. Si el suministro proviene de fuentes fósiles, las emisiones indirectas pueden ser significativas. Según Cao et al. (2021), sin medidas correctivas, el sector podría alcanzar el 8 % de las emisiones globales de CO₂ en 2030 (33).

Para mitigar este impacto, se están extendiendo:

- Contratos PPA con generación renovable,
- Compensación de emisiones mediante certificados verdes,
- Certificaciones ambientales tipo LEED, ISO 50001 o CEEDA.

4.2.4 RESILIENCIA OPERATIVA

La resiliencia es esencial dado que cualquier fallo en el suministro eléctrico, en la refrigeración o en el sistema de red puede afectar millones de usuarios o procesos críticos.

Para garantizar continuidad, los centros de datos suelen incorporar:

- Redundancia eléctrica N+1, 2N o 2N+1, con sistemas UPS, grupos electrógenos y almacenamiento,
- Topologías de red en doble acometida, con rutas físicas separadas,

- Sistemas de monitorización en tiempo real, que detectan anomalías térmicas, de carga o ciberataques.

La creciente electrificación del sector digital, unida al estrés que ya sufren las redes eléctricas en algunas zonas, convierte la resiliencia energética en una condición estructural, no negociable, para el desarrollo del sector.

La identificación de estas variables operativas es clave no solo desde un punto de vista técnico, sino también normativo. En este contexto, adquieren especial relevancia las iniciativas regulatorias y estratégicas impulsadas por la Unión Europea para guiar el crecimiento sostenible del sector.

4.3 INICIATIVAS EUROPEAS: EUDCA, CLIMATE NEUTRAL DATA CENTRE PACT, ETC.

Ante el crecimiento exponencial de la demanda digital y el impacto ambiental que eso supone, la Unión Europea ha comenzado a implementar un marco estratégico para guiar la transformación sostenible del sector de los centros de datos. Estas iniciativas buscan garantizar que el despliegue digital sea compatible con los objetivos climáticos europeos y con los principios de eficiencia energética y economía circular. A continuación, se presentan las iniciativas más destacadas:

4.3.1 EUROPEAN DATA CENTRE ASSOCIATION (EUDCA)

La European Data Centre Association (EUDCA) es la principal organización que agrupa a operadores de centros de datos, fabricantes de equipos y proveedores de servicios relacionados en Europa. Fundada en 2011, actúa como interlocutor ante las instituciones europeas, promoviendo políticas que favorezcan un desarrollo digital sostenible y competitivo.

Entre sus líneas estratégicas se encuentran:

- Fomentar estándares comunes de eficiencia energética y transparencia.
- Promover el uso de energías renovables y la neutralidad climática.
- Facilitar la colaboración entre operadores y autoridades nacionales para la planificación de infraestructuras energéticas y digitales (3)(8).

La EUDCA ha sido un actor clave en la elaboración de marcos voluntarios como el *Climate Neutral Data Centre Pact* y en las negociaciones sobre la *Directiva de Eficiencia Energética* y la *Taxonomía Verde Europea* (13).

4.3.2 CLIMATE NEUTRAL DATA CENTRE PACT (CNDCP)

En 2021, los principales operadores de centros de datos y asociaciones del sector firmaron el *Climate Neutral Data Centre Pact (CNDCP)*, un compromiso voluntario para lograr que todos los centros de datos europeos sean climáticamente neutros para 2030.

Este pacto establece una serie de criterios cuantificables, entre los que destacan:

- PUE medio inferior a 1,3 en instalaciones nuevas para 2025.
- 100 % de electricidad de origen renovable antes de 2030.
- Reutilización de al menos el 30 % del calor residual en climas templados.
- Auditorías energéticas regulares y transparencia en la publicación de datos.

El pacto se alinea con los objetivos del Green Deal europeo y funciona como una alternativa autorreguladora frente a una posible imposición regulatoria directa. Está respaldado por la Comisión Europea, y supervisado por la EUDCA y otras entidades firmantes (8).

4.3.3 REGULACIÓN Y TAXONOMÍA VERDE EUROPEA

El Reglamento (UE) 2020/852, conocido como *Taxonomía Verde*, establece los criterios para que una actividad económica pueda considerarse sostenible. En este contexto, los centros de datos solo serán clasificados como sostenibles si:

- Alcanzan un PUE por debajo de 1,3,
- Demuestran consumo exclusivo de energía renovable,
- Gestionan adecuadamente residuos electrónicos y agua,
- Garantizan ciberseguridad y resiliencia operativa (13).

Asimismo, la nueva versión de la Directiva de Eficiencia Energética (2018/2002 revisada en 2023) establece que los operadores deberán comunicar su consumo energético anual si superan ciertos umbrales, fomentando así la transparencia y la mejora continua.

Todas estas iniciativas están enmarcadas en la Estrategia Digital Europea, que prevé que para 2030 el 75 % de las empresas utilicen servicios cloud o big data, y que al menos 10.000 centros de datos verdes funcionen en la UE (8). Estas metas no solo impulsan la expansión del sector, sino que condicionan su diseño, operación y localización. Para España, alinearse con estas iniciativas representa una oportunidad estratégica para atraer inversión, demostrar compromiso climático y posicionarse como país líder en infraestructura digital sostenible.

Así, los marcos europeos están trazando una hoja de ruta ambiciosa hacia la sostenibilidad digital. Sin embargo, para evaluar su viabilidad y aplicación real, es fundamental examinar qué nos dice la literatura académica reciente sobre las soluciones técnicas, económicas y ambientales más relevantes

Junto a estos marcos europeos, también se han puesto en marcha políticas nacionales en España que buscan promover la digitalización sostenible y reforzar la soberanía tecnológica. Algunas de las más relevantes se presentan a continuación.

4.3.4 PROGRAMAS NACIONALES PARA LA DIGITALIZACIÓN SOSTENIBLE

En paralelo a las iniciativas europeas, España ha comenzado a desplegar políticas públicas alineadas con los objetivos del Pacto Verde Europeo, que tienen implicaciones directas para el desarrollo de centros de datos sostenibles. Destacan especialmente los siguientes instrumentos:

- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023–2030: Este plan establece metas ambiciosas en eficiencia energética y electrificación del sistema, promoviendo el uso de energías renovables y la digitalización del sistema eléctrico. Los centros de datos se consideran infraestructuras críticas en este proceso, por su capacidad de ofrecer flexibilidad y gestión avanzada de la demanda.
- PERTE Chip y PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua: Ambos forman parte de los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE), financiados por fondos Next Generation EU. El PERTE Chip, en particular, contempla el desarrollo de infraestructura de datos avanzada, incluyendo centros de procesamiento con criterios de eficiencia energética y neutralidad climática.
- Estrategia Nacional de Infraestructuras del Dato: Presentada en 2023, esta estrategia busca fomentar la soberanía digital y la resiliencia tecnológica mediante el impulso a infraestructuras de almacenamiento y procesamiento de datos, integrando principios de sostenibilidad ambiental y eficiencia energética.

Estas iniciativas refuerzan el marco europeo, adaptándolo a las particularidades del sistema energético, climático y normativo español. Asimismo, representan una oportunidad

estratégica para atraer inversiones internacionales en infraestructura digital sostenible y posicionar a España como hub tecnológico del sur de Europa.

4.4 REVISIÓN ACADÉMICA

En los últimos años, la literatura científica sobre eficiencia energética, sostenibilidad y diseño operativo de centros de datos ha aumentado de forma significativa. Esta sección sintetiza los principales enfoques, resultados y vacíos detectados, con especial atención al contexto europeo y a la aplicabilidad de los estudios al caso español.

4.4.1 MODELADO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y FIABILIDAD OPERATIVA

Ahmed et al. (2020) presentan una revisión sistemática sobre modelos energéticos y de fiabilidad, identificando que los enfoques actuales aún no capturan adecuadamente la variabilidad dinámica de carga y la heterogeneidad de infraestructura (1). Sus hallazgos destacan la necesidad de combinar técnicas de simulación estocástica con sensores en tiempo real para ajustar la planificación energética.

Complementariamente, Shehabi et al. (2018) estiman que el consumo global de los centros de datos se encuentra entre el 1 % y el 1,5 % de la electricidad mundial, con previsiones de fuerte crecimiento por la inteligencia artificial y el edge computing (6). Estos estudios subrayan el papel de las predicciones de demanda como factor clave para la planificación de red eléctrica y generación.

4.4.2 EFICIENCIA TÉRMICA Y REFRIGERACIÓN INTELIGENTE

Rong & Zhang (2015) analizan algoritmos de control HVAC para mejorar la eficiencia térmica, logrando reducciones del consumo eléctrico de hasta un 15 % en modelos experimentales (5). Zhang & Liu (2022) aportan modelos predictivos basados en variables climáticas locales, lo que permite adaptar las estrategias de refrigeración al entorno geográfico con mejoras del 10 % en precisión energética (7).

Más recientemente, Arroba et al. (2023) proponen una estrategia basada en heurísticas avanzadas para la gestión conjunta del enfriamiento y el cómputo, logrando un ahorro energético de hasta el 22 % frente a enfoques tradicionales (34). Estos trabajos confirman el impacto que tiene la ubicación climática y el diseño térmico sobre la eficiencia global del centro.

4.4.3 RENOVABLES, FLEXIBILIDAD DE RED Y RECUPERACIÓN DE CALOR

Los estudios más relevantes sobre integración renovable destacan el papel de los centros de datos como nodos activos en los sistemas eléctricos del futuro. Frysztacki et al. (2021) demuestran que si se gestiona correctamente su demanda, los centros podrían aportar hasta 10 GW de flexibilidad para apoyar la integración de eólica y solar en Europa (28).

El informe del JRC de la Comisión Europea (Kamiya & Bertoldi, 2024) estima que en 2022 los centros consumieron entre 45 y 65 TWh en la UE, lo que representa hasta un 2,6 % de la electricidad total europea (32). Estas cifras refuerzan la necesidad de diseñar sistemas que aprovechen el calor residual, la flexibilidad de carga y los recursos distribuidos.

4.4.4 IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD

Diversos autores han advertido sobre el riesgo de que el sector se convierta en un contribuyente significativo a las emisiones globales de carbono. Cao et al. (2021) proyectan que las emisiones asociadas a los centros de datos podrían representar hasta el 8 % del total global para 2030 si no se adoptan medidas estructurales (33).

En esta línea, Buyya et al. (2023) proponen marcos integrados de sostenibilidad basados en planificación holística de workloads, uso de energías limpias, reutilización térmica y certificaciones ambientales estrictas (34). Estos enfoques van más allá del simple PUE e introducen métricas multicriterio como el CUE (Carbon Usage Effectiveness) y el WUE (Water Usage Effectiveness).

En la figura siguiente se representan los valores objetivo de las principales métricas utilizadas para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los centros de datos:

- PUE (Power Usage Effectiveness): refleja la proporción entre el consumo total del centro y la energía dedicada exclusivamente a los equipos TI. Valores cercanos a 1 indican mayor eficiencia.
- CUE (Carbon Usage Effectiveness): estima la cantidad de CO₂ emitido por cada kilovatio hora consumido, considerando el mix energético del suministro.
- WUE (Water Usage Effectiveness): cuantifica el volumen de agua utilizado por unidad de energía consumida, especialmente relevante en sistemas de refrigeración por evaporación.

Estas métricas son clave para la clasificación de centros sostenibles en el marco de la Taxonomía Verde Europea, y constituyen un punto de partida esencial para evaluar el desempeño ambiental de nuevos proyectos en el contexto español.

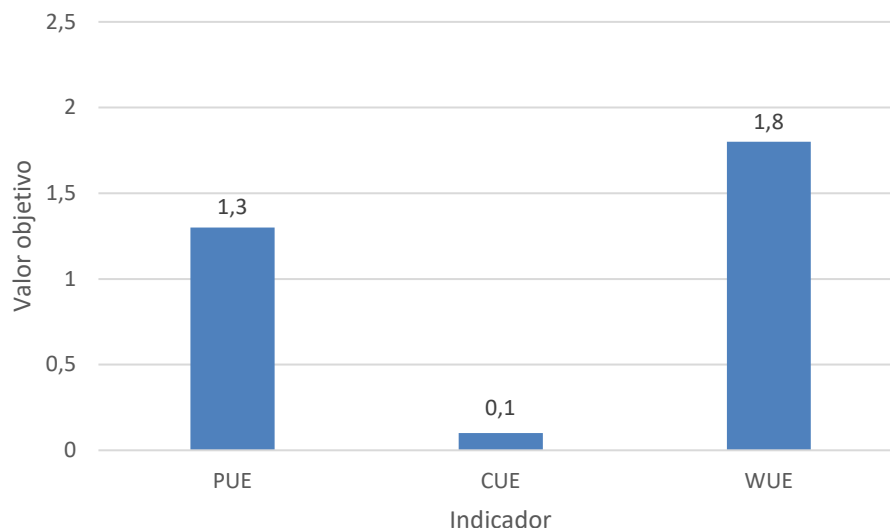


Figura 10. Indicadores de eficiencia energética para centros de datos

Como puede observarse, alcanzar estos valores de referencia no solo depende del diseño técnico del centro, sino también de factores externos como el clima local, la disponibilidad de energías renovables y la infraestructura regulatoria. En climas cálidos como el español, cumplir simultáneamente con métricas exigentes como el PUE o el WUE supone un desafío técnico y económico considerable. Por ello, resulta imprescindible analizar con mayor detalle las brechas existentes entre las recomendaciones internacionales y las condiciones reales de implementación en el contexto nacional, lo cual se aborda en la siguiente sección.

4.4.5 EDGE COMPUTING Y TRANSICIÓN DIGITAL

Chen et al. (2021) exploran el impacto del edge computing como nuevo paradigma, donde la proximidad a la fuente de datos reduce la latencia, pero también multiplica los puntos de consumo energético. Esta descentralización introduce desafíos para la planificación de red, refrigeración local y gestión de picos de carga (17).

La literatura reciente también coincide en que la automatización de los centros (con IA para control energético, predicción de fallos, y asignación de cargas) será una herramienta clave para alcanzar la sostenibilidad operativa.

En conjunto, estos estudios ofrecen una visión diversa sobre los desafíos y oportunidades para los centros de datos, pero también dejan al descubierto ciertas lagunas y áreas insuficientemente abordadas, especialmente en relación con el contexto español. En la siguiente sección se sistematizan estas brechas clave.

Para sintetizar los enfoques analizados y facilitar su comparación crítica, la siguiente tabla resume los principales estudios académicos revisados, destacando su metodología, resultados clave y aplicabilidad al contexto español.

Autor/es	Año	Enfoque principal	Método utilizado	Métricas analizadas	Resultados clave	Aplicabilidad al caso español
Ahmed	2020	Modelado energético y fiabilidad	Revisión sistemática + simulación	Carga dinámica, fiabilidad operativa	Limitaciones en modelos estáticos; necesidad de sensores en tiempo real	Limitada (modelo genérico sin variables climáticas)
Shehabi	2018	Consumo global y tendencias	Análisis empírico de datos	Consumo energético global	Estimación: 1-1,5 % del consumo mundial	Moderada (datos globales, no adaptados a clima cálido)
Rong & Zhang	2015	Eficiencia térmica HVAC	Simulación + control predictivo	Reducción energética	Ahorros de hasta 15 % en eficiencia térmica	Limitada (enfoque genérico HVAC, no adaptado a edge ni clima español)
Zhang	2022	Refrigeración adaptativa	Modelado predictivo con variables climáticas	Precisión energética	Mejora del 10 % en eficiencia ajustada al entorno	Alta (modelo adaptable a regiones cálidas)
Arroba	2023	Gestión térmica-cómputo integrada	Heurísticas avanzadas + simulación	PUE, eficiencia combinada	Ahorros del 22 % frente a enfoques separados	Alta (enfoque aplicable a centros con alta carga y climatología variable)

Frysztacki	2021	Flexibilidad de red	Modelado de demanda	Potencial de integración renovable	Centros pueden aportar hasta 10 GW de flexibilidad	Moderada (modelo europeo, sin detalle por país)
Buyya	2023	Sostenibilidad multicriterio	Marco conceptual + simulaciones	CUE, WUE, PUE	Propuesta de enfoque holístico de sostenibilidad	Alta (marco replicable, incluye métricas ambientales)
Chen	2021	Edge computing	Análisis de impacto energético	Latencia, picos de consumo	Multiplicación de puntos críticos, desafío en refrigeración	Alta (relevante por crecimiento edge en España)

Tabla 2. Estudios académicos relevantes

Como se observa, aunque existe una base sólida de investigación internacional, la mayoría de los estudios aún presentan limitaciones para su implementación directa en climas cálidos o en entornos regulatorios como el español. Esto refuerza la necesidad de marcos metodológicos contextualizados, como se plantea en el presente trabajo.

4.5 IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS A CUBRIR

La revisión bibliográfica realizada y el análisis de estrategias institucionales europeas y nacionales ponen de relieve que, si bien existe una base sólida de conocimiento técnico sobre la eficiencia energética y sostenibilidad de centros de datos, persisten notables vacíos tanto en la literatura científica como en los informes técnicos aplicados al caso español.

En primer lugar, gran parte de los estudios existentes se centran en países del norte de Europa (Países Bajos, Noruega, Irlanda, Suecia), donde el clima frío, el desarrollo tecnológico y la infraestructura energética avanzada, han favorecido la implantación de centros de datos

desde hace más de una década (8)(10). En contraste, el contexto mediterráneo y español en particular está escasamente abordado en la literatura internacional, especialmente en lo que respecta al impacto del clima cálido, la variabilidad del mix renovable y las limitaciones de red (28)(29).

Además, los modelos energéticos más utilizados en estudios académicos tienden a simplificar en exceso las condiciones reales de operación de los centros de datos, sin incorporar adecuadamente variables como:

- La estacionalidad del enfriamiento
- La congestión de redes eléctricas
- Los costes reales de conexión
- Los tiempos de tramitación regulatoria.

Esto se refleja en la falta de herramientas de simulación integradas que combinen el perfil técnico del centro con el entorno regulatorio y económico local, una carencia particularmente notoria en el caso español (18)(27).

Tampoco se ha avanzado suficientemente en el análisis multidisciplinar que combine ingeniería energética, economía regulatoria y planificación territorial. La mayoría de estudios son monodisciplinarios, sin abordar la complejidad de decisiones que deben tomar los promotores en función de restricciones urbanísticas, fiscales o de conectividad. Esta desconexión entre enfoques académicos y realidades de mercado reduce la aplicabilidad práctica de muchas investigaciones (34).

En resumen, con base en la revisión bibliográfica y documental realizada, es posible sintetizar las principales brechas aún no resueltas en el ámbito de los centros de datos sostenibles en España. La siguiente tabla jerarquiza estas carencias en función de su impacto

sobre el modelo propuesto y del grado de atención que han recibido en la literatura científica y técnica.

Brecha identificada	Impacto sobre el modelo	Grado de cobertura en literatura	Prioridad de abordaje
Falta de estudios aplicados al sur de Europa y España	Muy alto	Muy baja	Alta
Ausencia de modelos energéticos adaptados a climas cálidos	Muy alto	Baja	Muy alta
Poca integración de variables regulatorias y de red	Alta	Baja	Muy alta
Escasa incorporación de costes reales y tiempos de tramitación	Alta	Muy baja	Alta
Enfoques monodisciplinarios (sin visión integrada técnico-económica-ambiental)	Media	Media	Media

**Falta de herramientas de
simulación locales y
contextualizadas**

Alta

Baja

Alta

Tabla 3. Jerarquización de las brechas identificadas

Esta priorización pone de manifiesto que las limitaciones más críticas no son exclusivamente técnicas, sino también contextuales, regulatorias y territoriales. Por tanto, cualquier aproximación rigurosa al desarrollo de centros de datos sostenibles en España debe integrar una visión sistémica que combine variables energéticas, normativas, climáticas y económicas. Este enfoque es precisamente el que se adopta en el presente Trabajo de Fin de Máster.

Capítulo 5. METODOLOGÍA Y FUENTES

Este capítulo describe el enfoque metodológico adoptado para proyectar el impacto energético del crecimiento de los centros de datos en España entre 2025 y 2035. Se detallan las herramientas utilizadas, las fuentes de datos que sustentan el modelo, los supuestos de partida, y los escenarios desarrollados (optimista, moderado y pesimista). El objetivo es proporcionar una base técnica sólida y transparente que justifique los resultados presentados en los capítulos posteriores y facilite su interpretación en clave estratégica y regulatoria. En el Anexo III del presente documento, se da una explicación más detallada del modelo.

5.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

El presente estudio emplea una metodología de modelado estratégico combinada con un enfoque analítico-comparativo para estimar el impacto del crecimiento de los centros de datos sobre el sistema eléctrico español entre 2025 y 2035. Se han definido tres escenarios de crecimiento —pesimista, moderado y optimista— que proyectan la evolución de la potencia instalada, la demanda energética y el grado de ocupación de la red eléctrica.

El modelo es anual, no horario, y se centra en observar tendencias agregadas, detectar cuellos de botella y anticipar necesidades regulatorias o técnicas. Las estimaciones para el periodo 2025–2030 tienen mayor solidez por basarse en datos ya anunciados (proyectos, políticas activas). Las de 2030–2035 incorporan mayor incertidumbre, propia de entornos tecnológicos y energéticos en transformación.

La metodología incluye:

- Proyecciones con tasas de crecimiento diferenciadas por escenario.

- Comparación de la demanda de los centros de datos con la capacidad de generación nacional.
- Identificación de puntos críticos de saturación de red.

Este enfoque no busca simular operaciones en tiempo real, sino facilitar el diseño de estrategias energéticas sostenibles, replicables y alineadas con la planificación nacional.

5.2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para el desarrollo del modelo y la proyección de escenarios se ha empleado principalmente Microsoft Excel, aprovechando su versatilidad para construir modelos paramétricos basados en crecimiento compuesto, y para estructurar la comparación entre escenarios en hojas separadas. Esta herramienta permite:

- Gestionar y visualizar de forma estructurada los valores base y supuestos.
- Aplicar fórmulas de crecimiento anual por escenario.
- Calcular porcentajes de saturación respecto a capacidad de red y generación nacional.
- Desarrollar gráficos comparativos de evolución (MW, GWh, PUE).

Además, se han utilizado fuentes estadísticas y técnicas disponibles públicamente, principalmente:

- REE – Red Eléctrica de España: datos de generación nacional y capacidad instalada.
- CNMC y SpainDC: cifras sobre implantación actual de centros de datos.
- PNIEC 2021–2030: objetivos energéticos nacionales.

No se han utilizado herramientas de simulación horaria como RETScreen, EnergyPLAN, ni software de análisis nodal como DIgSILENT o PSS/E, dado que el objetivo del estudio es estratégico y proyectivo, no operativo.

Como línea de trabajo futuro, se propone la integración de Python o R para automatizar iteraciones de sensibilidad y mejorar la visualización dinámica de escenarios, especialmente si se avanza hacia una modelización horaria en estudios posteriores.

5.3 FUENTES

La construcción de los escenarios energéticos para centros de datos en España se fundamenta en una combinación de fuentes primarias y secundarias, tanto nacionales como internacionales, con criterios de actualidad, rigor técnico y relevancia sectorial.

A continuación, se presenta una tabla resumen que clasifica las fuentes según su tipología:

Tipo de fuente	Fuente / Referencia
Normativa	PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima), CNMC, regulaciones europeas de eficiencia TIC
Técnica	Red Eléctrica de España (2024).
Energética	DNV (2025).
Económica	PwC (2024), McKinsey & Company (2024).
Estadística	Eurostat (2023). <i>Digital economy and society statistics – enterprises: ICT usage and cloud adoption</i>

Mediática (relevancia sectorial)	RTVE (2025).
Otras fuentes del modelo	Informes internos sectoriales, Spain DC, energías-renovables.com, inforges.es

Tabla 4. Fuentes de datos para la construcción de los escenarios

Los escenarios se han construido en base a dos tipos de datos:

- **Datos primarios:** No se han generado mediante medición directa, pero el modelo parte de datos clave (potencia instalada, consumo energético, número de centros) tomados directamente de fuentes técnicas oficiales como REE y estudios sectoriales recientes (DNV, McKinsey, PwC).
- **Datos secundarios:** Utilizados para enriquecer la contextualización del sector y validar supuestos de crecimiento (noticias sectoriales, entrevistas, proyecciones europeas).

Además, todas las fuentes consideradas corresponden a informes publicados entre 2023 y 2025, lo que garantiza la vigencia de los supuestos y valores base empleados en las proyecciones. Las referencias están debidamente documentadas en el apartado de bibliografía.

5.4 ESCENARIOS DESARROLLADOS

Con base en los datos de referencia para 2025, se han definido tres escenarios de crecimiento para el sector de los centros de datos en España. Cada uno responde a hipótesis distintas respecto al ritmo de expansión de la infraestructura digital, considerando variables como inversión extranjera, políticas de atracción, evolución del cloud y demanda derivada de la inteligencia artificial.

5.4.1 ESCENARIO PESIMISTA

Este escenario contempla un crecimiento anual del 3 % en potencia y demanda energética, en línea con las tasas históricas observadas en España entre 2018 y 2023. Representa un contexto de baja inversión extranjera, escasa implementación de políticas proactivas y una digitalización empresarial progresiva, pero sin impulso estratégico.

Se asume un desarrollo sin megaproyectos (como gigafactorías), con dificultades para ejecutar nuevas conexiones o permisos, y un entorno regulatorio pasivo.

Justificación del crecimiento:

- Proyecciones conservadoras de DNV y REE (2–3 % anual sin incentivos).
- Baja presión sobre la red eléctrica: crecimiento inferior al 4,5 % anual de capacidad.
- Tendencias similares en países con bajo desarrollo digital intensivo (Eurostat).

En este entorno, el sector no representa una amenaza estructural para la red, pero tampoco genera ventajas competitivas para España como hub digital europeo.

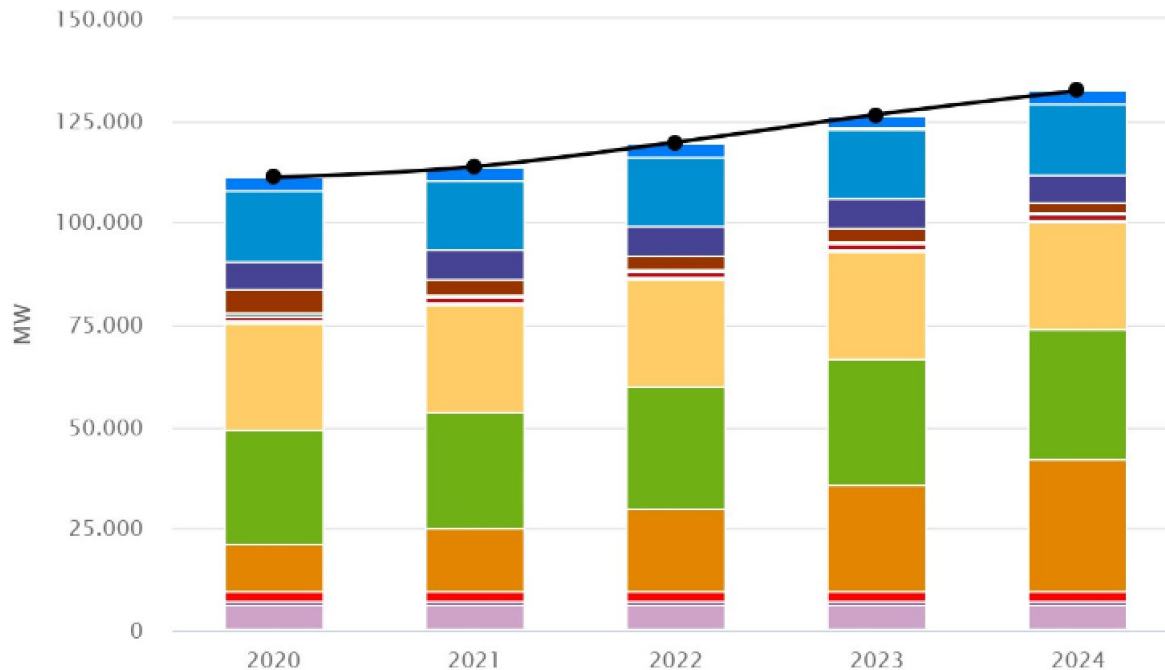


Figura 11. Evolución de la capacidad de la red desde el año 2020

En este entorno, el sector no representa una amenaza estructural para la red, pero tampoco genera ventajas competitivas para España como hub digital europeo.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores del escenario:

Variable	Valor inicial (2025)	Valor final (2035)	Comentario
Potencia IT instalada	356 MW	478 MW	Incremento moderado, asumible por la red
Demanda energética total	3,12 TWh	4,19 TWh	<2 % del total nacional

Participación renovable estimada	55 %	>95 %	Por inercia del sistema, no por exigencia sectorial
% demanda nacional absorbida	1,3 %	1,67 %	Impacto bajo sobre red y planificación
PUE medio estimado	1,7	1,6	Mejora leve por renovación tecnológica marginal

Tabla 5. Valores escenario pesimista

5.4.2 ESCENARIO MODERADO

Este escenario asume un crecimiento anual medio del 8 %, impulsado por inversiones ya anunciadas (AWS, Microsoft, NTT), la mejora regulatoria progresiva y la ejecución de planes públicos como el PNIEC y el Plan España Digital 2026.

Refleja un entorno en el que los centros de datos se consideran infraestructura estratégica, con presencia creciente de PPAs renovables, modelos híbridos y eficiencia operativa optimizada.

Justificación del crecimiento:

- Datos reales de pipeline 2023–2026 en Madrid y Aragón.
- Tasa proyectada según escenarios intermedios de Spain DC y McKinsey.
- Refleja casos como los de Países Bajos y Francia, donde la digitalización se alinea con la transición energética.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores del escenario:

Variable	Valor inicial (2025)	Valor final (2035)	Comentario
Potencia IT instalada	356 MW	843 MW	Crecimiento sostenido, especialmente en hubs clave
Demanda energética total	3,12 TWh	7,39 TWh	Entre el 2 % y 3 % de la demanda nacional proyectada
Participación renovable estimada	55 %	>98 %	Alta, gracias a PPAs y autoconsumo
% demanda nacional absorbida	1,3 %	2,95 %	Aumento progresivo pero asumible por la red
PUE medio estimado	1,7	1,35	Mejora significativa por modernización

Tabla 6. Valores escenario moderado

5.4.3 ESCENARIO OPTIMISTA

Este escenario proyecta un crecimiento anual del **15 %**, derivado de una estrategia nacional de vanguardia, apoyada en:

- Atracción de proyectos como gigafactorías de IA, laboratorios de datos o redes edge distribuidas.
- Reformas regulatorias efectivas: ventanilla única, permisos exprés, marco fiscal atractivo.

- Integración energética avanzada: autoconsumo, PPA firmes, almacenamiento, cogeneración, recuperación térmica.
- Participación de operadores en la innovación energética (por ejemplo, mediante proyectos piloto con SMRs o distritos térmicos).

Es un escenario exigente pero viable, alineado con el potencial renovable y tecnológico de España, y comparable con líderes como Noruega o Dinamarca.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores del escenario:

Variable	Valor inicial (2025)	Valor final (2035)	Comentario
Potencia IT instalada	356 MW	1.437 MW	Multiplicación por 4x en 10 años, presencia de gigafactorías
Demanda energética total	3,12 TWh	12,49 TWh	>4 % del total nacional; alta carga base continua
Participación renovable estimada	55%	99+ %	Operación casi totalmente renovable gracias a PPA + BESS
% demanda nacional absorbida	1,3 %	4,98 %	Implica rediseño de red y nodos críticos
PUE medio estimado	1,7	1,20	Uso de refrigeración líquida, inmersión, edge y optimización

Tabla 7. Valores escenario optimista

5.5 CÁLCULO DE SATURACIÓN DE LA RED

El crecimiento proyectado del sector de centros de datos plantea un reto creciente sobre la infraestructura eléctrica nacional. Para evaluar su impacto, se han definido dos métricas de saturación del sistema eléctrico:

- **Ocupación por capacidad instalada (MW):** porcentaje que representa la potencia IT de los centros de datos respecto a la potencia eléctrica nacional.
- **Ocupación por consumo energético (TWh):** proporción de la demanda energética de los centros respecto a la demanda nacional total.

Estas métricas permiten anticipar la presión sobre nodos, subestaciones y capacidad de evacuación, especialmente en regiones donde ya existen limitaciones estructurales.

Según el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte 2021–2026 (REE), en 2023 la capacidad instalada nacional fue de 125.620 MW, con un crecimiento anual cercano al 5,2 %. A pesar de inversiones previstas (más de 1.200 millones entre 2024 y 2026), el propio plan reconoce que la red no está preparada para absorber cargas intensivas como las que implican los escenarios moderado y optimista.

El análisis de saturación realizado muestra:

- **Escenario pesimista:** saturación máxima < 0,4 % (sin tensiones relevantes).
- **Escenario moderado:** saturación \approx 0,6 %, empieza a requerir refuerzos localizados.
- **Escenario optimista:** saturación > 1,1 % en potencia y 5 % en energía → necesidad de rediseño normativo y técnico.

La ocupación agregada puede parecer baja, pero el problema radica en la distribución geográfica, ya que los centros se concentran en zonas como Madrid, Aragón o Cataluña, donde algunos nodos ya presentan congestión o tiempos de conexión de hasta 5 años. Por

ello, la planificación territorial y energética coordinada se convierte en un elemento clave de viabilidad.

5.6 JUSTIFICACIÓN DEL ENFOQUE METODOLÓGICO

El enfoque adoptado en este trabajo se basa en el modelado estratégico de escenarios y el análisis de saturación energética, una elección justificada por tres factores clave:

- 1. Complejidad del objeto de estudio:** Los centros de datos son infraestructuras altamente heterogéneas, tanto en su arquitectura técnica como en su distribución territorial. Esto dificulta el uso de modelos físicos u horarios sin una base robusta de datos operativos, especialmente en el caso español.
- 2. Limitaciones de datos primarios nacionales:** Actualmente, en España no existe una base pública con información detallada sobre consumo, ubicación o potencia contratada real de centros de datos. Ante esta falta, el enfoque adoptado permite construir estimaciones realistas a partir de fuentes sectoriales consolidadas (REE, CNMC, DNV, McKinsey, Spain DC...).
- 3. Objetivo estratégico del estudio:** Este trabajo no busca simular el funcionamiento horario de un centro de datos individual, sino evaluar su **impacto agregado** sobre el sistema eléctrico nacional en distintos escenarios. Un modelo operativo no aportaría valor proporcional al esfuerzo requerido. En cambio, el modelado anual permite:
 - Detectar puntos de saturación potencial.
 - Estimar impacto energético por escenario.
 - Apoyar decisiones regulatorias y de planificación.

Por estas razones, se optó por:

- Usar Excel como entorno principal de modelado (por su accesibilidad y trazabilidad).
- Definir tres escenarios divergentes (pesimista, moderado, optimista) con tasas diferenciadas de crecimiento.
- Aplicar cálculos simples pero representativos sobre demanda, capacidad instalada, y grado de saturación.

Esta metodología es coherente con otros estudios estratégicos en sectores emergentes de alta intensidad energética, y es compatible con futuras ampliaciones (simulación horaria, modelado con agentes, análisis multicriterio). El enfoque elegido permite tomar decisiones informadas y reproducibles en un contexto de alta incertidumbre y limitada transparencia de datos.

Este estudio emplea una metodología de modelado estratégico comparativo, basada en proyecciones anuales para el periodo 2025–2035. Se han definido tres escenarios (pesimista, moderado y optimista), diferenciados por tasas de crecimiento, penetración renovable y eficiencia energética. Las herramientas utilizadas incluyen Microsoft Excel como soporte principal del modelo, complementado con datos de REE, PNIEC, Spain DC, McKinsey y CNMC. Se han aplicado métricas de saturación por potencia y energía para estimar el impacto sobre la red eléctrica nacional. Esta aproximación permite obtener resultados claros, reproducibles y coherentes con la disponibilidad actual de datos y con el objetivo estratégico del trabajo.

Capítulo 6. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO

Este capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los resultados obtenidos en el modelado energético de los centros de datos en España para el periodo 2025–2035. A partir de los tres escenarios proyectados —pesimista, moderado y optimista— se evalúa la evolución de la potencia instalada, la demanda energética, la saturación de la red eléctrica y el grado de aprovechamiento de energías renovables.

El análisis no solo permite observar las implicaciones técnicas del crecimiento del sector, sino también identificar riesgos potenciales, oportunidades de eficiencia, y cuellos de botella en el sistema eléctrico, especialmente en lo referente al acceso a red, la distribución territorial de la carga y la planificación energética nacional.

6.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESCENARIOS

La evolución del sector de centros de datos en España entre 2025 y 2035 ha sido modelada mediante tres escenarios: pesimista, moderado y optimista. Cada uno responde a diferentes grados de inversión, regulación, integración renovable y ambición estratégica. A continuación, se presentan los resultados clave en formato comparativo.

Variable	Escenario Pesimista	Escenario Moderado	Escenario Optimista
Potencia IT instalada (MW)	478	843	1.437
Demanda energética total (TWh)	4,19	7,39	12,49

% sobre demanda nacional estimada	1,67 %	2,95 %	4,98 %
PUE medio	1,6	1,35	1,20
% de energía renovable utilizada	90 %	95 %	99 %
Emisiones asociadas (ktCO₂)	44	41	13

Tabla 8. Resumen resultados 3 escenarios

Cabe destacar que los cálculos relativos a las emisiones no hacen referencia emisiones directas de los centros (que no queman combustible), sino emisiones indirectas asociadas al mix eléctrico nacional. Los valores son conservadores y consistentes con el enfoque estratégico del trabajo (sin simulación horaria). Se ha escogido como ratio para los tres escenarios, el de 0,1 kgCO₂/kWh.

6.1.1 ESCENARIO PESIMISTA

En el escenario pesimista, el crecimiento de la demanda es lento y determinado por la inercia del sistema. La reducción de emisiones no se debe a decisiones del sector, sino a la evolución del mix eléctrico nacional, que aumenta progresivamente su cuota renovable. Esto permite una caída sostenida de las emisiones indirectas, pese al aumento moderado del consumo.

En el siguiente gráfico puede apreciarse su evolución:

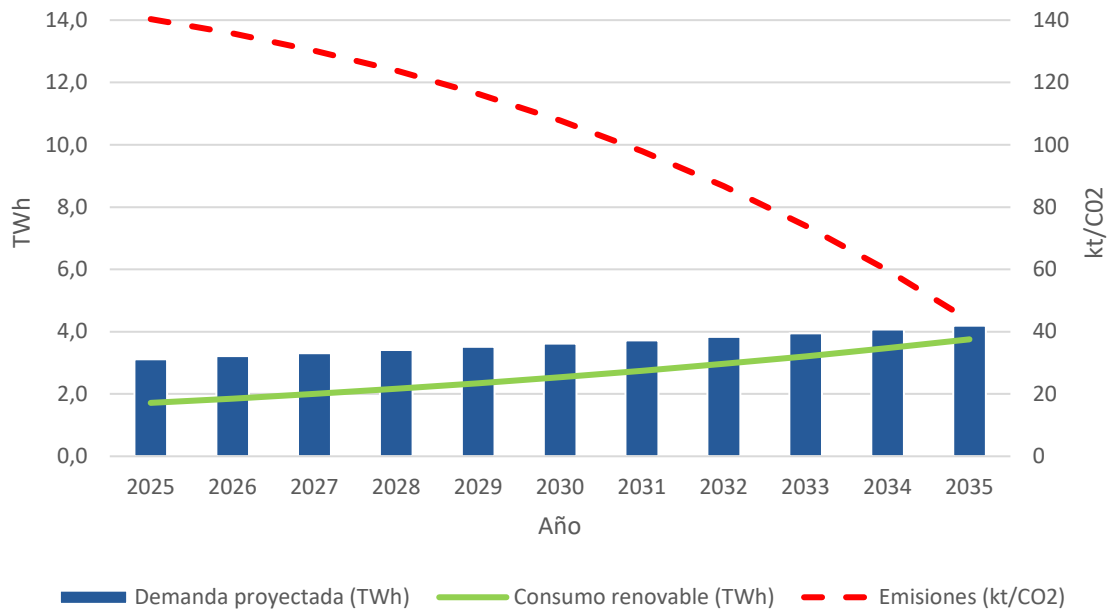


Figura 12. Evolución escenario pesimista

6.1.2 ESCENARIO MODERADO

En el escenario moderado, la incorporación de contratos PPA y autoconsumo renovable permite que el crecimiento de la demanda no se traduzca en un aumento de emisiones. Al contrario, estas se reducen con claridad, mostrando que el sector puede expandirse sin aumentar su huella de carbono si se acompaña de planificación energética y políticas activas.

En el siguiente gráfico puede apreciarse su evolución:

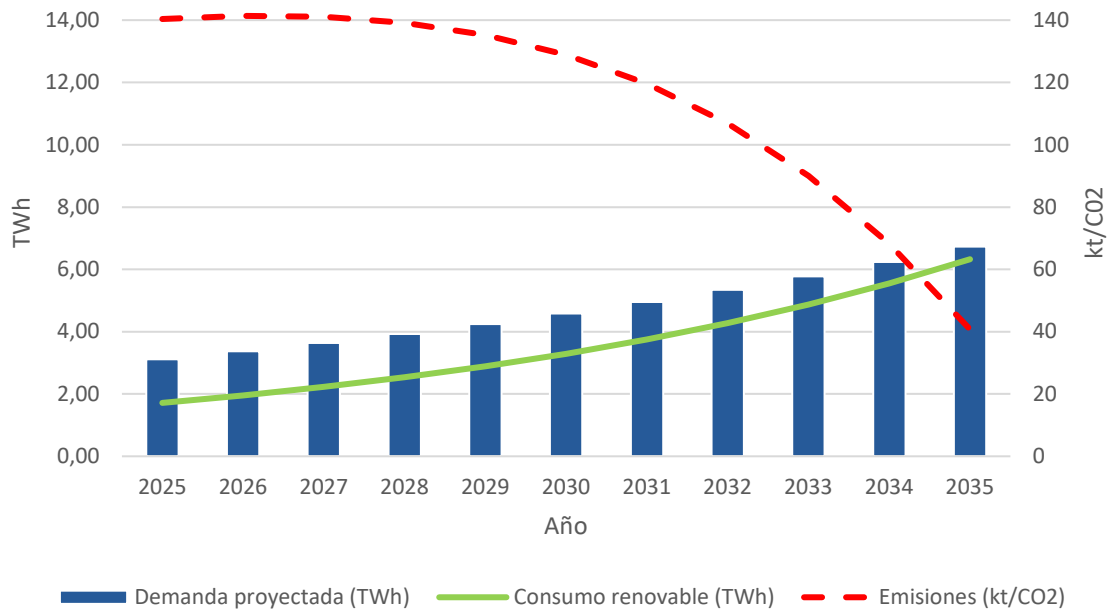


Figura 13. Evolución escenario moderado

6.1.3 ESCENARIO OPTIMISTA

Este escenario representa un salto cualitativo en capacidad e impacto. Gigafactorías, edge computing y nuevas tecnologías disparan la demanda. Sin embargo, el uso casi total de energía renovable (99 %) permite una caída pronunciada de emisiones, demostrando que el crecimiento intensivo puede ser compatible con la neutralidad climática si se gestiona adecuadamente.

En el siguiente gráfico puede apreciarse su evolución:

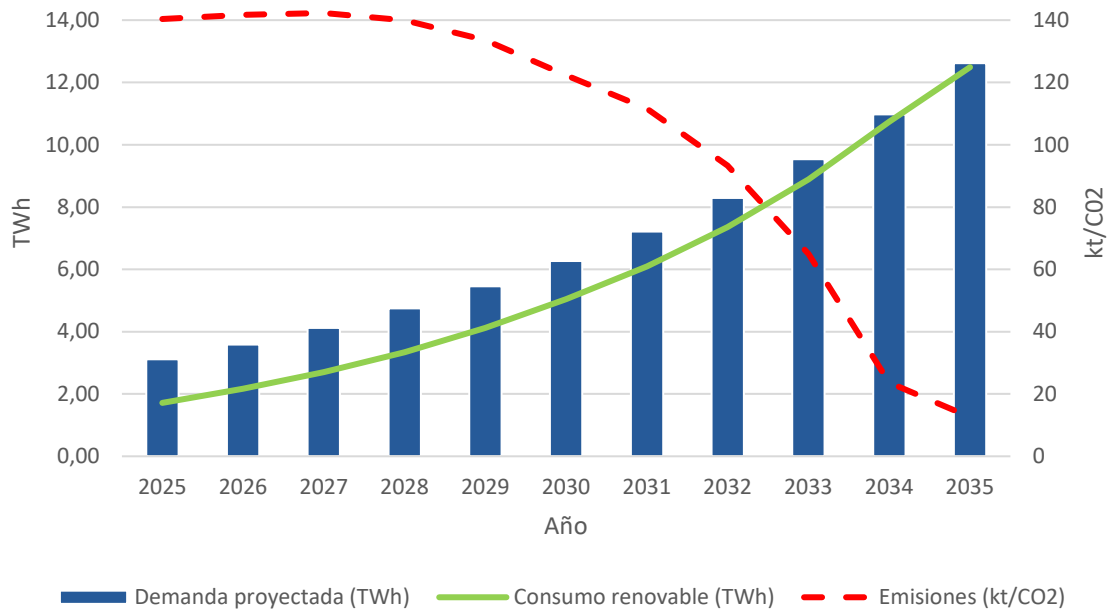


Figura 14. Evolución escenario optimista

Finalmente, se incluye un gráfico comparativo de los tres escenarios, dónde además se tiene en cuenta el porcentaje de saturación de la red. La comparación de los tres escenarios revela que la presión sobre la red eléctrica varía notablemente. En el escenario pesimista, el sistema puede absorber la carga sin tensiones. El escenario moderado ya exige actuaciones específicas sobre nodos clave. En el escenario optimista, se alcanza una ocupación del sistema superior al 5 %, lo que requeriría un rediseño estructural del sistema eléctrico y una coordinación estrecha entre el regulador y los operadores.

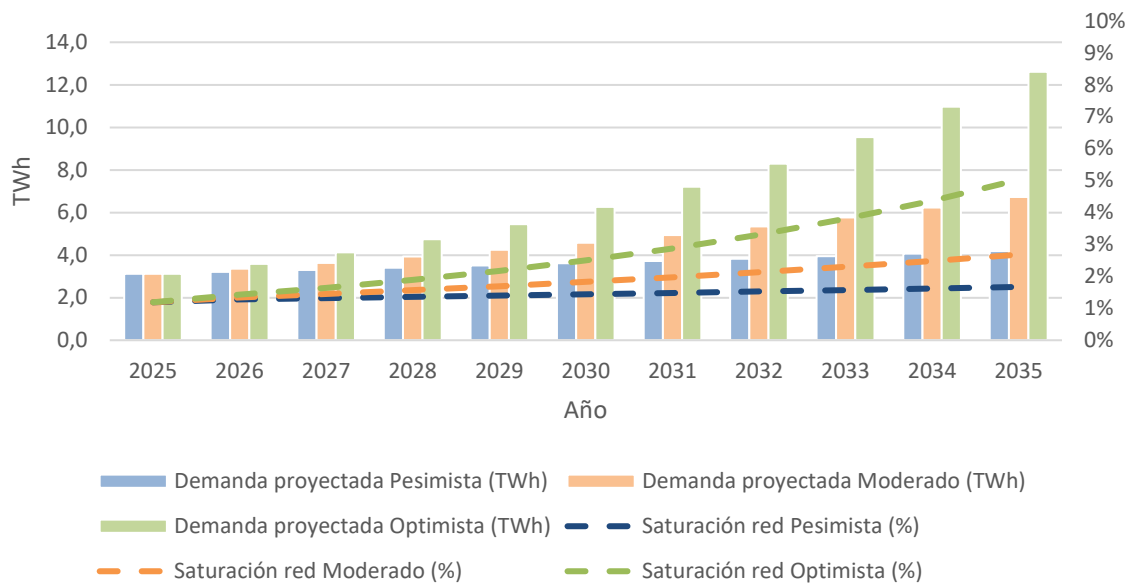


Figura 15. Evolución demanda 3 escenarios con saturación de red (%)

6.2 RIESGOS IDENTIFICADOS Y PUNTOS CRÍTICOS

A partir de la comparación de los tres escenarios y de la revisión de estudios técnicos, se identifican cinco riesgos principales que pueden comprometer la viabilidad técnica, regulatoria o reputacional del crecimiento de los centros de datos en España. Estos riesgos no solo afectan al sector digital, sino que también inciden directamente en el sistema eléctrico y en los objetivos de sostenibilidad a 2030 y 2035.

Para clarificar su análisis, se representan a continuación en una matriz de impacto vs probabilidad, diferenciando aquellos que requieren intervención urgente de los que pueden ser monitorizados a medio plazo.

Riesgo	Tipo	Probabilidad	Impacto	Comentario
Cuellos de botella eléctricos	Técnico	Alta	Alto	Limitaciones de acceso real a red en zonas críticas como Madrid o Aragón.
Falta de flexibilidad institucional	Institucional	Alta	Medio	Tramitación lenta y falta de respuesta ante aumentos rápidos de demanda.
Riesgo regulatorio por EED	Normativo	Media	Alto	Incumplimiento de estándares europeos (PUE, calor residual) por parte de actores pequeños.
Riesgo reputacional por impacto territorial	Reputacional	Media	Medio	Conflictos por uso de suelo, agua y oposición social en zonas urbanas.
Desalineación con calendario de descarbonización	Ambiental	Baja	Alto	Riesgo si el mix eléctrico no se descarboniza al ritmo previsto.

Tabla 9. Riesgos identificados

Como muestra la matriz, los riesgos de mayor prioridad corresponden a los cuellos de botella técnicos y a la rigidez institucional, que amenazan el despliegue de nuevos centros incluso en escenarios moderados. Aunque los riesgos ambientales o normativos puedan parecer más difusos, su impacto potencial es elevado y pueden tener consecuencias reputacionales o regulatorias serias si no se anticipan con políticas claras y exigencias homogéneas.

6.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para evaluar la robustez del modelo y entender cómo reaccionan los resultados ante pequeñas variaciones en los supuestos, se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre dos variables clave:

- Variación en la demanda energética proyectada.
- Variación en el factor de penetración renovable.

6.3.1 SENSIBILIDAD 1: +10% DEMANDA EN ESCENARIO MODERADO

A continuación, se presenta un ejemplo cuantitativo con el escenario moderado como caso base, y un incremento del 10 % en la demanda energética para 2035.

Variable	Valor base	Valor ajustado (+10 %)	Diferencia
Demanda energética (TWh)	7,39	8,13	+0,74 TWh
% sobre demanda nacional	2,95 %	3,25 %	+0,30 puntos
Emisiones asociadas (kt CO₂)	41	45	+4 kt CO ₂
Saturación red (capacidad)	0,61 %	0,67 %	+0,06 puntos

Tabla 10. Sensibilidad 1: +10% de demanda

Un incremento del 10 % en la demanda anual del sector en el escenario moderado genera:

- Un impacto leve pero significativo sobre la red (+0,3 puntos en saturación relativa).
- Un aumento proporcional de las emisiones indirectas, si no se refuerzan los contratos PPA o el autoconsumo.
- Una carga más cercana a los niveles del escenario optimista, lo que sugiere que incluso trayectorias “moderadas” pueden acercarse a umbrales críticos si el crecimiento del sector se acelera más de lo previsto (por ejemplo, por la IA generativa o la aparición de gigafactorías de datos).

6.3.2 SENSIBILIDAD 2: REDUCCIÓN DEL % DE RENOVABLES EN RED EN ESCENARIO MODERADO

Vamos a mantener el escenario moderado como caso base (2035) y analizar qué ocurre si el porcentaje de electricidad renovable consumida por los centros baja del 95 % al 90 % (por retrasos en PPAs, falta de autoconsumo, etc.).

Variable	Valor base (95 %)	Valor ajustado (90 %)	Diferencia
Emisiones asociadas (kt CO₂)	41	67	+26 kt CO ₂
Porcentaje de energía no renovable	5 %	10 %	+5 puntos
Factor de emisión aplicado	0,1 kgCO ₂ /kWh	0,1 kgCO ₂ /kWh	-

Tabla 11. Sensibilidad 2: reducción del porcentaje de renovables en red

Este ejercicio muestra que el porcentaje de energía renovable utilizada es el factor más sensible en términos de emisiones. Una caída del 95 % al 90 % en la cobertura renovable incrementaría las emisiones totales en un 63,4 %.

Este resultado subraya la necesidad de que los centros de datos aseguren contratos PPA a largo plazo o soluciones de autoconsumo para mantener sus compromisos de sostenibilidad. La dependencia del mix general del sistema introduce una vulnerabilidad ambiental significativa.

6.4 DISCUSIÓN CRÍTICA Y CONCLUSIONES

El análisis comparativo de escenarios deja una conclusión clara: el ritmo de crecimiento del sector de los centros de datos ya desborda la capacidad de respuesta estructural del sistema eléctrico español tal como está diseñado actualmente.

No se trata solo de capacidad física, sino de capacidad institucional, territorial y normativa para integrar una nueva clase de demanda intensiva, crítica y estratégica. Incluso en escenarios moderados, el modelo muestra que la planificación actual no será suficiente para absorber la expansión digital sin conflictos o cuellos de botella.

El verdadero desafío, por tanto, no es si el crecimiento es deseable o viable, sino cómo prepararse para gestionarlo de forma ordenada, sostenible y con visión de país.

España tiene por delante, una oportunidad para liderar el desarrollo digital europeo. Pero esa oportunidad solo podrá materializarse si se asume que los centros de datos no son un fenómeno marginal, sino una pieza central de la transición energética y tecnológica.

El siguiente capítulo plantea una hoja de ruta para que esa oportunidad no se convierta en un riesgo, o en una ocasión perdida.

Capítulo 7. PROPUESTAS DE APLICACIÓN Y

VIABILIDAD

El presente capítulo propone un conjunto de recomendaciones técnicas y estratégicas que permitirían a España absorber el crecimiento proyectado del sector de centros de datos en los distintos escenarios modelados (pesimista, moderado y optimista), sin comprometer la estabilidad del sistema eléctrico ni los objetivos climáticos y digitales establecidos a nivel nacional y europeo.

A partir del análisis realizado en capítulos anteriores, se considera que el escenario pesimista podría ser asumido por el sistema eléctrico mediante su evolución orgánica, mientras que el escenario moderado exigiría modificaciones relevantes en planificación, eficiencia y acceso a red, y el escenario optimista requeriría transformaciones estructurales de mayor calado.

Las propuestas que se presentan a continuación no son generalidades políticas ni aspiraciones teóricas, sino medidas técnicas que se traducen en:

- Recomendaciones sobre tipologías de generación eléctrica compatibles (como fotovoltaica distribuida combinada con almacenamiento BESS, o SMR nucleares de soporte en ubicaciones industriales).
- Criterios para la localización estratégica de nuevos centros según variables climáticas y de red.
- Propuestas para agilizar la tramitación y simplificar los puntos de acceso a red de alta capacidad.

- Selección de tecnologías específicas para mejorar la eficiencia operativa y energética del sector.

Cada uno de los subapartados siguientes detalla estas medidas según el nivel de ambición de crecimiento sectorial, con horizonte temporal 2025–2035, y una clara orientación a reforzar la soberanía tecnológica europea desde el sistema energético español.

7.1 RECOMENDACIONES ESCENARIO PESIMISTA

En este escenario, el crecimiento del sector es orgánico, moderado y sin disrupciones, pero puede quedar bloqueado por ineficiencias estructurales si no se adoptan medidas mínimas de soporte. Las propuestas que siguen no buscan transformar el modelo energético, sino garantizar su viabilidad básica y evitar cuellos de botella innecesarios.

La siguiente tabla resume las principales medidas priorizadas, vinculándolas con los riesgos identificados en el capítulo 6 y clasificándolas según impacto, dificultad y plazo de aplicación:

Medida	Riesgo que aborda	Impacto	Dificultad	Plazo	Prioridad
Refuerzo selectivo de nodos eléctricos críticos	Cuellos de botella eléctricos	Alto	Media	Medio	Crítica
Adopción obligatoria de tecnologías de eficiencia (PUE < 1,5)	Desalineación con descarbonización	Medio	Baja	Corto	Crítica

Despliegue solar con almacenamiento en campus aislados	Riesgo de saturación local	Medio	Media	Medio	Secundaria
Protocolo de respuesta ante picos de demanda (demand response)	Inestabilidad de red	Medio	Alta	Largo	Secundaria
Programa de incentivos condicionado al PUE y % renovable	Riesgo regulatorio (EED)	Medio	Media	Medio	Crítica

Tabla 12. Recomendaciones escenario pesimista

En un contexto de bajo crecimiento, el riesgo no es la sobrecarga, sino la ineficiencia estructural: instalaciones mal conectadas, con baja eficiencia o fuera de normativa. Las medidas prioritarias buscan:

- Evitar bloqueos físicos o administrativos en las ubicaciones más demandadas (Madrid, Aragón).
- Alinear el mínimo despliegue con la normativa europea, especialmente en lo relativo a eficiencia (PUE) y uso renovable.
- Garantizar que el crecimiento limitado no sea un crecimiento frágil, sino compatible con los compromisos de descarbonización y digitalización sostenible.

Este enfoque evita inversiones sobredimensionadas, pero asegura que España no pierda competitividad frente a otros mercados europeos incluso en un escenario de expansión contenida.

7.2 RECOMENDACIONES ESCENARIO MODERADO

Este escenario refleja un crecimiento sostenido y planificado del sector, impulsado por inversiones ya anunciadas y una digitalización alineada con la transición energética. Para que este desarrollo no genere tensiones críticas, es necesario implementar una estrategia coordinada que combine incentivos, planificación territorial y eficiencia operativa.

La siguiente tabla resume las propuestas organizadas por su impacto, dificultad, horizonte temporal y vínculo directo con los riesgos detectados en el capítulo 6:

Medida	Riesgo que aborda	Impacto	Dificultad	Plazo	Prioridad
Identificación y habilitación de ubicaciones estratégicas (clima + red)	Cuellos de botella eléctricos	Alto	Media	Corto	Crítica
Despliegue sistemático de autoconsumo con almacenamiento (PV + BESS)	Desalineación con descarbonización	Alto	Media	Medio	Crítica

Creación de una ventanilla única digital para tramitaciones	Falta de flexibilidad institucional	Alto	Alta	Medio	Crítica
Incentivos a la eficiencia en nuevos desarrollos	Riesgo regulatorio / reputacional	Medio	Media	Corto	Secundaria
Promoción de centros energéticamente híbridos	Inestabilidad operativa en red local	Medio	Alta	Largo	Secundaria

Tabla 13. Recomendaciones escenario moderado

A diferencia del escenario pesimista, aquí el desafío no es la viabilidad básica, sino la optimización del despliegue: garantizar que el crecimiento se produzca en zonas viables, con tecnologías sostenibles y bajo una gobernanza eficiente.

Las medidas prioritarias actúan sobre tres frentes:

- **Territorial:** evitar sobrecargas concentradas mediante planificación geográfica.
- **Institucional:** reducir la fricción burocrática con herramientas digitales y normas homogéneas.
- **Energético:** maximizar el autoconsumo y la flexibilidad operativa para reducir emisiones y dependencia del mix.

Este enfoque permitiría a España consolidarse como hub digital sin comprometer su transición energética ni generar tensiones territoriales o regulatorias.

7.3 RECOMENDACIONES ESCENARIO OPTIMISTA

En este escenario, España experimenta un crecimiento acelerado y estratégico del sector de centros de datos, impulsado por gigafactorías de IA, innovación digital distribuida, y una integración profunda con el sistema energético. Esta trayectoria maximiza el potencial del país, pero también requiere un salto estructural en la planificación de red, la gestión de permisos y la innovación tecnológica.

La tabla siguiente presenta las propuestas ordenadas por su prioridad y dificultad, vinculadas directamente con los riesgos y umbrales críticos del capítulo 6:

Medida	Riesgo que aborda	Impacto	Dificultad	Plazo	Prioridad
Rediseño de la planificación eléctrica nacional (generación distribuida)	Cuellos de botella eléctricos / saturación red	Muy alto	Muy alta	Largo	Crítica
Introducción de tecnologías nucleares modulares (SMR)	Desalineación con descarbonización / demanda base	Alto	Muy alta	Largo	Secundaria
Reforma del modelo de acceso a red y permisos	Falta de flexibilidad institucional	Alto	Alta	Medio	Crítica

Estímulo a la innovación en refrigeración y recuperación energética	Riesgo regulatorio / emisiones indirectas	Medio	Media	Medio	Secundaria
Creación de hubs integrados de innovación digital y energética	Riesgo reputacional / falta de valor añadido	Alto	Alta	Largo	Crítica

Tabla 14. Recomendaciones escenario optimista

Este escenario requiere no solo medidas técnicas, sino un reposicionamiento estructural del país en el mapa digital europeo. Ya no basta con facilitar inversión: es necesario construir una propuesta nacional de alto valor añadido, resiliente, limpia y conectada con el territorio.

Las medidas críticas en este caso son transformadoras:

- El rediseño de la planificación eléctrica permitiría absorber cargas distribuidas sin generar cuellos de botella.
- La reforma del modelo de acceso y permisos es esencial para acortar plazos en megaproyectos.
- Los hubs integrados de innovación combinan digitalización, energía limpia y desarrollo local, reduciendo riesgos reputacionales y atrayendo inversión de mayor calidad.

Este conjunto de propuestas constituye la base para una estrategia de liderazgo digital y energético, anclada en la sostenibilidad y la soberanía tecnológica.

7.4 CONCLUSIÓN ESTRATÉGICA

Los tres escenarios analizados en este capítulo evidencian que el futuro del sector de centros de datos en España no dependerá únicamente de su demanda, sino de la capacidad del país para anticiparse y adaptar su infraestructura energética y regulatoria.

- En el escenario pesimista, bastará con mantener el rumbo, reforzando ciertos nodos críticos y consolidando estándares de eficiencia y autoconsumo.
- En el escenario moderado, será necesario rediseñar la planificación territorial, acelerar permisos, condicionar incentivos y fomentar modelos híbridos de suministro.
- En el escenario optimista, España deberá abordar reformas estructurales: nuevas formas de generación distribuida, adopción de tecnologías nucleares modulares, gobernanza especializada y hubs digitales energéticamente inteligentes.

Estas propuestas, lejos de ser especulativas, se basan en experiencias internacionales, benchmarks técnicos y la lógica propia del modelo energético español. Implementarlas con visión estratégica no solo permitiría absorber la demanda futura del sector, sino convertir esa demanda en una palanca de reindustrialización digital y de soberanía tecnológica europea.

Si España logra integrar digitalización, planificación energética y eficiencia climática en una única hoja de ruta, estará en condiciones de liderar una nueva generación de infraestructuras críticas al servicio del desarrollo económico y la autonomía estratégica del continente.

En el siguiente capítulo se presentará una síntesis de las aportaciones del trabajo y se dará respuesta directa a la pregunta de investigación planteada al inicio del proyecto.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

El presente capítulo recoge las conclusiones principales del trabajo, sintetizando los hallazgos más relevantes obtenidos a lo largo del análisis técnico, energético y estratégico desarrollado. Su objetivo es ofrecer una respuesta clara y directa a la pregunta de investigación planteada al inicio del proyecto, así como poner en valor la aportación original del estudio al debate sobre la planificación energética y digital en España.

8.1 RESPUESTA A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

La pregunta formulada en el capítulo introductorio fue:

¿Qué estrategia energética debería adoptar España para atraer y consolidar centros de datos sostenibles y competitivos, garantizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en el medio y largo plazo?

El objetivo principal del TFM era proponer una estrategia energética para atraer y consolidar centros de datos sostenibles y competitivos. La siguiente formulación resume dicha estrategia, articulada en torno a cinco ejes.

España necesita una estrategia energética anticipativa, territorialmente inteligente y tecnológicamente exigente, que:

- Integre la carga digital en la planificación eléctrica nacional (PNIEC, REE).
- Exija eficiencia energética y uso renovable en todos los nuevos desarrollos.
- Priorice ubicaciones estratégicas y nodos con viabilidad real.
- Acelere los permisos mediante gobernanza digital y simplificada.

- Establezca una hoja de ruta clara que conecte digitalización y descarbonización.

Esta propuesta no solo busca garantizar viabilidad técnica, sino también alinear el desarrollo digital con los objetivos climáticos y económicos del país.

8.2 *SÍNTESIS Y HALLAZGOS CLAVE*

Las siguientes cinco ideas condensan los hallazgos más relevantes del análisis realizado en los capítulos anteriores, y constituyen la base sobre la que se apoya la estrategia propuesta.

- **Los centros de datos son ya una carga estructural emergente:** en el escenario optimista podrían representar hasta el 5 % de la demanda nacional en 2035, con más de 1.400 MW de potencia instalada. Su impacto ya no es marginal, sino estratégico.
- **El sistema eléctrico español no está preparado para un crecimiento medio o alto:** sin reformas, la red no absorberá el desarrollo digital proyectado. Se requieren cambios en planificación, acceso a red, autoconsumo y flexibilidad operativa.
- **La eficiencia energética debe dejar de ser voluntaria:** tecnologías como refrigeración líquida, servidores ARM o recuperación de calor pueden reducir significativamente la carga, pero solo si se convierten en requisitos mínimos.
- **La ubicación lo es todo:** elegir zonas con clima favorable, red robusta y baja presión urbanística reduce costes y emisiones. La lógica de disponibilidad de suelo no puede seguir guiando la expansión.
- **España tiene una oportunidad estratégica única:** si articula su potencial renovable, marco regulatorio y planificación anticipativa, puede convertirse en un nodo digital sostenible y competitivo en Europa.

Estas conclusiones muestran que el despliegue de centros de datos debe entenderse como una cuestión estructural que afecta a la red, la sostenibilidad y la competitividad de España.

8.3 APORTACIÓN DEL TRABAJO Y ORIGINALIDAD

Este trabajo ofrece una contribución original al análisis energético del sector de centros de datos en España al integrar, en un estudio académico, los siguientes elementos:

- 1. Cálculo energético estratégico vinculado a escenarios sectoriales:** A diferencia de enfoques centrados en la eficiencia técnica de instalaciones individuales o en previsiones globales abstractas, este trabajo construye tres escenarios concretos de crecimiento nacional (pesimista, moderado, optimista), y proyecta su impacto sobre la red eléctrica en términos de potencia instalada, demanda anual y saturación relativa. El modelo permite anticipar con datos la magnitud del reto energético, territorial y normativo.
- 2. Visión integral: energía, tecnología, normativa y territorio:** El enfoque del trabajo no se limita a la dimensión técnica del suministro eléctrico. Se incorporan variables climáticas, regulatorias, territoriales y tecnológicas, estableciendo una hoja de ruta multisectorial que traduce el problema energético en una estrategia nacional para consolidar infraestructura crítica digital con criterio de sostenibilidad y competitividad.
- 3. Propuestas específicas, realistas y escalonadas por escenario:** La aportación no se detiene en el diagnóstico: el Capítulo 7 plantea una batería de propuestas detalladas, clasificadas por nivel de crecimiento del sector, que incluyen:
 - Configuraciones concretas de autoconsumo (PV + BESS).
 - Tipologías de tecnológicas recomendadas.
 - Reformas institucionales y regulatorias viables.

- Ubicaciones estratégicas fundamentadas en datos climáticos y eléctricos.

4. Enlace entre planificación energética y soberanía digital: El trabajo demuestra que la planificación del sistema eléctrico ya no puede desvincularse de la estrategia digital del país, especialmente si se aspira a competir por inversiones tecnológicas, inteligencia artificial y cloud computing. Esta relación estructural entre energía y soberanía digital es aún incipiente en la literatura, y este estudio contribuye a hacerla operativa y medible.

8.4 IMPLICACIONES PRÁCTICAS PARA ESPAÑA

A partir del análisis realizado, pueden identificarse acciones concretas para los principales actores implicados en la planificación y despliegue de centros de datos en España.

- **Para el regulador energético (REE, CNMC):** Incluir explícitamente la carga de centros de datos en los planes de desarrollo y en los criterios de planificación de red.
- **Para el legislador:** Aprobar mecanismos de tramitación preferente, incentivos ligados a eficiencia y acceso a red condicionado a criterios técnicos y ambientales.
- **Para los gobiernos autonómicos:** Desarrollar mapas de aptitud territorial digital-energética y ofrecer suelo competitivo con garantías eléctricas.
- **Para el sector privado:** Asumir que sostenibilidad, eficiencia y viabilidad eléctrica no son extras, sino condiciones habilitantes del negocio.

La acción coordinada entre administraciones, operadores y reguladores será clave para transformar el potencial actual en una ventaja competitiva real a escala europea.

Capítulo 9. LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente capítulo reconoce las limitaciones inherentes al estudio y propone una serie de líneas de trabajo futuras para consolidar, ampliar o replicar el análisis realizado. Lejos de reducir el valor del proyecto, este ejercicio busca reforzar su utilidad práctica y abrir nuevas oportunidades de investigación y aplicación.

9.1 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

A pesar del rigor metodológico aplicado y de la amplitud de fuentes consultadas, el estudio presenta varias limitaciones que es necesario explicitar:

- **Acceso limitado a datos primarios del sector:** Debido al carácter estratégico y privado de muchos desarrollos, no ha sido posible acceder a bases de datos actualizadas con información granular sobre:
 - Localización exacta de centros de datos en operación o en desarrollo.
 - Potencia contratada real.
 - Cargas horarias o curvas de demanda específicas. Esto ha obligado a trabajar con estimaciones agregadas, extrapolaciones y escenarios contruidos a partir de informes sectoriales, lo que introduce incertidumbre.
- **Supuestos simplificados en el modelado energético:** El modelo se basa en hipótesis razonables sobre:
 - Crecimiento de potencia IT.

- Ratios de eficiencia (PUE).
- Evolución de la generación eléctrica nacional.

Sin embargo, no incorpora simulación horaria, modelado de red a nivel nodal, ni análisis de estabilidad técnica, aspectos que podrían modificar los resultados en estudios más especializados.

- **Falta de participación directa de agentes del sector:** Aunque se ha trabajado con documentación actualizada (Spain DC, REE, CNMC, consultoras), el proyecto no ha contado con entrevistas directas ni workshops con operadores, promotores o reguladores. Esto limita la validación directa de las recomendaciones propuestas, aunque no invalida su fundamento técnico.
- **Exclusión de costes económicos detallados:** El trabajo no incluye un análisis económico completo (CAPEX/OPEX) de las soluciones planteadas, ni una modelización del retorno financiero de los escenarios. Se ha priorizado el análisis técnico y energético, dejando para futuras investigaciones una evaluación coste-beneficio detallada.

Estas limitaciones no comprometen las conclusiones generales del trabajo, pero sí apuntan a la necesidad de profundizar y ampliar algunas dimensiones en futuras investigaciones o en estudios complementarios orientados a la implementación.

9.2 TRABAJOS FUTUROS

Las limitaciones anteriormente señaladas abren distintas vías de investigación futura que permitirían completar, refinar o aplicar los resultados obtenidos en este trabajo. A continuación, se destacan las más relevantes:

La primera de ellas vendría a ser el desarrollo de herramientas de simulación energética horaria. El modelo estratégico utilizado podría ampliarse con herramientas que permitan:

- Simular la demanda horaria real de diferentes tipologías de centros de datos.
- Evaluar el impacto de la variabilidad renovable en la cobertura energética de estos centros.
- Analizar la interacción con mercados de flexibilidad y servicios de ajuste.

Esto permitiría pasar de un modelo proyectivo a uno operativo, útil para operadores de red y reguladores.

Después, pasaríamos a los estudios multicriterio de ubicaciones óptimas. Sería muy valioso desarrollar estudios que combinen variables técnicas, económicas, climáticas y sociales para definir:

- Zonas óptimas de implantación para nuevos centros de datos en el territorio español.
- Equilibrios entre acceso eléctrico, disponibilidad de suelo, temperatura media, presión urbanística y empleo local.

Este tipo de análisis podría guiar políticas regionales y facilitar la planificación ordenada del sector.

También sería de gran interés, contar con evaluaciones económicas detalladas. Futuros trabajos pueden:

- Estimar los costes reales de implementación de las soluciones propuestas (PV, BESS, refrigeración avanzada, SMR).
- Comparar el retorno esperado de cada escenario para operadores, sistemas energéticos y la economía nacional.

- Analizar el impacto fiscal, normativo y jurídico de medidas como los sellos de eficiencia energética o las subastas inversas de acceso a red.

Y, por último, la aplicación de modelos a casos reales. Una evolución natural del trabajo sería aplicarlo a:

- Proyectos piloto en zonas específicas (por ejemplo, un nuevo campus en Aragón o Castilla y León).
- Infraestructuras públicas digitales (centros de supercomputación, IA, administración electrónica).
- Comparativa con otros países de la UE, adaptando el modelo al contexto normativo y eléctrico de cada uno.

Este trabajo ha construido un marco sólido para entender el impacto energético de los centros de datos en España. Las líneas futuras permitirán llevar este conocimiento a la acción, aportando herramientas para la toma de decisiones públicas y privadas en un sector con crecimiento acelerado y consecuencias que afectan a nada menos que el sistema eléctrico nacional.

Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahmed, K. M. U., Bollen, M. H. J., & Alvarez, M. (2020). A review of data centers energy consumption and reliability modeling. *IEEE Access*, 8, 132994-133020.
- [2] European Commission. (2018). *Directive on Energy Efficiency (2018/2002)*.
- [3] European Data Centre Association. (2021). *Sustainability in Data Centres: A Strategic Guide*.
- [4] Hintemann, R. (2018). Energy consumption of data centers worldwide: How will the Internet become green? *Energy Efficiency Journal*, 12.
- [5] Rong, H., & Zhang, H. (2015). Optimizing energy consumption for data centers. *Journal of Network and Computer Applications*, 58.
- [6] Shehabi, A., Smith, S. J., & Masanet, E. (2018). Energy and carbon emissions of computing and data centers. *Nature Climate Change*, 8.
- [7] Zhang, Y., & Liu, J. (2022). Prediction of Overall Energy Consumption of Data Centers in Different Locations. *Sensors*, 22(10), 3704.
- [8] European Data Centre Association. (2023). *EU Policy Brief: Sustainable Data Centre Strategy*.
- [9] Spain DC. (2024). *Informe de situación del sector de centros de datos en España*.
- [10] Commission for Regulation of Utilities (CRU). (2023). *Electricity Demand and Data Centre Growth in Ireland*.
- [11] Dgtl Infra. (2023). *Netherlands Freezes Data Center Construction in Amsterdam*.
- [12] Redeia. (2025). *La producción renovable crece en España un 10,3% en 2024 y alcanza sus mayores registros*. Red Eléctrica.

- [13] European Parliament. (2020). *Regulation (EU) 2020/852 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment.*
- [14] Comunidad de Madrid. (2025). *Aceleradora de inversiones.*
- [15] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC).*
- [16] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (2023). *Anteproyecto de Ley de Industria.*
- [17] Chen, X., Xu, H., et al. (2021). *Edge Computing for Sustainable ICT Infrastructure: A Review.* IEEE Communications Magazine.
- [18] Arup. (2025). *Project Zeus: Informe técnico para la implantación de centros de datos en España.* Borrador final TDD.
- [19] AFP. (2024). *Microsoft to invest €2.2 billion in data centre expansion in Spain.* TechXplore.
- [20] Reuters. (2024). *Amazon's AWS to invest €15.7 billion in Aragon cloud region.* Cadena SER / Reuters.
- [21] FDI Intelligence. (2024). *Total investment of €22.3bn in Aragon by Microsoft and AWS.*
- [22] La Vanguardia. (2024). *Inversión acumulada en Aragón superará los €33.000 millones con nuevos centros de datos de AWS y Blackstone.*
- [23] Foro Nuclear. (2024). *El parque nuclear español: datos actualizados y calendario de cierre.*
- [24] McKinsey & Company. (2024). *The role of power in unlocking the European AI revolution.*
- [25] Frysztacki, M.M., Hörsch, J. & Brown, T. (2021). *The strong effect of network resolution on electricity system models with high shares of wind and solar.* arXiv.
- [26] IEA. (2025). *AI is set to drive surging electricity demand from data centres while offering the potential.*

- [27] WFW. (2025). *Data Centres: An International Legal and Regulatory Perspective – Spotlight on Spain*.
- [28] Frysztacki, M.M., Hörsch, J. & Brown, T. (2021). *The strong effect of network resolution on electricity system models...* arXiv.
- [29] Reuters (2025). *Poor grid planning could shift Europe's data centre geography, report says* (Ember report).
- [30] Government of the Netherlands. (2022). *Temporary policy for hyperscale data centers*.
- [31] Uptime Institute. (2023). *Data Center Sustainability Report*.
- [32] Kamiya, G. & Bertoldi, P. (2024). *Energy Consumption in Data Centres and Broadband Communication Networks in the EU*. JRC.
- [33] Cao, Z., et al. (2021). *Towards a Systematic Survey for Carbon Neutral Data Centers*. arXiv.
- [34] Buyya, R., Ilager, S., & Arroba, P. (2023). *Energy-Efficiency and Sustainability in New Generation Cloud Computing*. arXiv.
- [35] Batlle, C. (2025). *Que el apagón nos ilumine*. Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas.
- [36] New York Times (2024). *Amazon, Google y Microsoft reavivan el interés en energía nuclear para alimentar sus centros de datos*.
- [37] European Commission – CINEA (2023). *Funding conditions and efficiency thresholds for energy projects*.
- [38] S&P Global Commodity Insights (2023). *European PPA market continues to grow in the first quarter of 2023*.
- [39] DNV. (2025). *Data center energy consumption and growth projections in Spain*. Oslo: DNV Energy.
- [40] Eurostat (2023). *Adoption of cloud services in European enterprises*.
- [41] PwC (2024). *Infrastructure investment scenarios in Spain*.

- [42] RTVE (2025). *España presenta candidatura para acoger gigafactoría de inteligencia artificial en Europa.*
- [43] McKinsey & Company (2024). *The future of cloud and AI infrastructure in Europe.*
- [44] DNV (2025). *Data center growth projections under accelerated AI adoption.*
- [45] Red Eléctrica de España. (2024). *Informe anual del sistema eléctrico español 2024.*
- [46] Eurostat. (2023). *Digital economy and society statistics – enterprises: ICT usage and cloud adoption.*
- [47] PwC. (2024). *Digital Infrastructure Outlook Europe 2024.*
- [48] Red Eléctrica de España. (2025). *Plan de desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021–2026: Sumario ejecutivo (modificado en julio de 2025).*
- [49] Arm (2023). *Energy-Efficient Performance for Cloud Workloads.* White Paper, Arm Ltd., Cambridge.

ANEXO I: TABLAS EVOLUCIÓN DE ESCENARIOS

Año	Crecimiento anual	Potencia proyectada (MW)	Saturación red (%)
2025	0,03	356	0,27%
2026	0,03	367	0,29%
2027	0,03	378	0,30%
2028	0,03	389	0,31%
2029	0,03	401	0,32%
2030	0,03	413	0,33%
2031	0,03	425	0,34%
2032	0,03	438	0,35%
2033	0,03	451	0,36%
2034	0,03	464	0,37%
2035	0,03	478	0,38%

Año	Crecimiento anual	Demanda proyectada Pesimista (TWh)	Saturación red Pesimista (%)	PUE	Renovable en red (%)	Consumo renovable (TWh)	Emisiones (kt/CO2)
2025	0,03	3,1	1,19%	1,7	55%	1,7	140
2026	0,03	3,2	1,28%	1,69	58%	1,9	136
2027	0,03	3,3	1,32%	1,68	61%	2,0	130
2028	0,03	3,4	1,36%	1,67	64%	2,2	124
2029	0,03	3,5	1,40%	1,66	67%	2,3	116
2030	0,03	3,6	1,44%	1,65	70%	2,5	108
2031	0,03	3,7	1,48%	1,64	74%	2,7	98
2032	0,03	3,8	1,53%	1,63	77%	3,0	87
2033	0,03	4,0	1,57%	1,62	81%	3,2	74
2034	0,03	4,1	1,62%	1,61	85%	3,5	60
2035	0,03	4,2	1,67%	1,6	90%	3,8	44

Año	Crecimiento anual	Potencia proyectada (MW)	Saturación red (%)
2025	0,08	356	0,27%
2026	0,08	384	0,30%
2027	0,08	415	0,33%
2028	0,08	448	0,35%
2029	0,08	484	0,38%
2030	0,08	523	0,41%
2031	0,08	565	0,45%
2032	0,08	610	0,48%
2033	0,08	659	0,52%
2034	0,08	712	0,56%
2035	0,08	769	0,61%

Año	Crecimiento anual	Demanda proyectada Moderado (TWh)	Saturación red Moderado (%)	PUE	Renovable en red (%)	Consumo renovable (TWh)	Emisiones (kt/CO2)
2025	0,08	3,12	1,19%	1,7	55%	1,72	140
2026	0,08	3,37	1,34%	1,665	58%	1,95	141
2027	0,08	3,64	1,45%	1,63	61%	2,23	141
2028	0,08	3,93	1,57%	1,595	65%	2,54	139
2029	0,08	4,24	1,69%	1,56	68%	2,89	135
2030	0,08	4,58	1,83%	1,525	72%	3,29	129
2031	0,08	4,95	1,97%	1,49	76%	3,75	120
2032	0,08	5,34	2,13%	1,455	80%	4,28	107
2033	0,08	5,77	2,30%	1,42	84%	4,87	90
2034	0,08	6,23	2,48%	1,385	89%	5,55	68
2035	0,08	6,73	2,68%	1,35	90%	6,06	67

Año	Crecimiento anual	Potencia proyectada (MW)	Saturación red (%)
2025	0,15	356	0,27%
2026	0,15	409	0,32%
2027	0,15	471	0,37%
2028	0,15	541	0,43%
2029	0,15	623	0,49%
2030	0,15	716	0,57%
2031	0,15	823	0,65%
2032	0,15	947	0,75%
2033	0,15	1.089	0,86%
2034	0,15	1.252	0,99%
2035	0,15	1.440	1,14%

Año	Crecimiento anual	Demanda proyectada Optimista (TWh)	Saturación red Optimista (%)	PUE	Renovable en red (%)	Consumo renovable (TWh)	Emisiones (kt/CO2)
2025	0,15	3,12	1,19%	1,7	55%	1,72	140
2026	0,15	3,59	1,43%	1,65	61%	2,17	142
2027	0,15	4,12	1,64%	1,6	66%	2,70	142
2028	0,15	4,74	1,89%	1,55	71%	3,34	140
2029	0,15	5,45	2,17%	1,5	76%	4,12	134
2030	0,15	6,27	2,50%	1,45	81%	5,05	122
2031	0,15	7,21	2,87%	1,4	85%	6,10	112
2032	0,15	8,30	3,31%	1,35	89%	7,36	93
2033	0,15	9,54	3,80%	1,3	93%	8,89	65
2034	0,15	10,97	4,37%	1,25	98%	10,73	24
2035	0,15	12,62	5,03%	1,2	99%	12,49	13

ANEXO II: ALINEACIÓN CON LOS ODS

Este proyecto se alinea directamente con varios de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, abordando áreas clave relacionadas con la sostenibilidad, la innovación y el desarrollo inclusivo. A continuación, se detallan los ODS más relevantes y la contribución del proyecto a cada uno de ellos:

El primero de ellos sería el objetivo número 7, energía asequible y no contaminante. El análisis de la eficiencia energética en los centros de datos fomenta un uso más sostenible de la energía.

Además, se podría decir que este proyecto tiene relación con el noveno objetivo sobre industria, innovación e infraestructura. Al proponer estrategias de optimización y organización para estos centros, se impulsa la construcción de infraestructuras resilientes, y adaptadas a las necesidades del futuro digital.

Todo lo referente a promover prácticas que minimicen el impacto ambiental y el consumo de recursos, una transición hacia fuentes renovables o la reducción de emisiones de carbono derivadas de los centros de datos contribuyen directamente a mitigar el cambio climático, por lo tanto, podrían alinearse con los objetivos 12 y 13, producción y consumo responsables y acción por el clima respectivamente.

Por último, este proyecto también podría alinearse con el último de los objetivos propuestos que trata sobre las alianzas para lograr objetivos ya que fomenta la colaboración entre gobiernos y empresas para desarrollar marcos regulatorios, políticas públicas y soluciones tecnológicas que impulsen un entorno favorable para el desarrollo los centros de datos en un entorno seguro como la unión europea.

ANEXO III: EXPLICACIÓN DETALLADA DEL MODELO

Este anexo documenta la arquitectura, variables, ecuaciones y controles del modelo desarrollado en Excel para estimar, en el horizonte 2025–2035, la energía anual consumida por centros de datos en España, su eficiencia energética (PUE), las emisiones asociadas y un indicador de saturación de red en zonas críticas (Madrid y Aragón). El objetivo es asegurar la reproducibilidad de los resultados presentados en el TFM y facilitar auditorías o futuras ampliaciones.

Alcance y resolución

- **Ámbito:** sistema peninsular español, con observación territorial cualitativa en nodos críticos.
- **Horizonte temporal:** 2025–2035.
- **Resolución temporal:** anual.

Arquitectura del modelo de cálculo

El archivo Modelo_excel.xlsx contiene tres hojas principales:

- Calculos de demanda_Pes → Escenario pesimista.
- Calculos de demanda_Mod → Escenario moderado.
- Calculos de demanda_Op → Escenario optimista.

Cada hoja incluye vectores anuales de capacidad IT instalada (MW), PUE, % renovable en el mix eléctrico, factor de emisión, y resultados de energía anual (TWh), emisiones (ktCO₂) y saturación de red (%).

Variables y unidades

CapITt [MW]: capacidad IT instalada en el año t.

PUEt [-]: Power Usage Effectiveness ≥ 1 .

%Rent [-]: participación de renovables en el mix.

EFt [kgCO₂/kWh]: factor de emisión medio.

EDC,t [TWh]: energía anual consumida por el sector data centre.

Emist [ktCO₂]: emisiones anuales.

SatRedt [%]: porcentaje de saturación de capacidad de red en zonas críticas.

Ecuaciones

1. Energía anual consumida

$$EDC = \frac{CapIT * 8760 h}{10^6}$$

(donde el factor 10^6 convierte de MWh a TWh).

2. Emisiones anuales

$$Emis = EDC * EF$$

3. Saturación de red

$$SatRed = \frac{CapIT}{CapRed} * 100$$

(Se estima un crecimiento anual de la CapRed de un 4,5%).

Procedimiento de reproducibilidad

1. Abrir Modelo_excel.xlsx.
2. Revisar en cada hoja (Pes, Mod, Op) los vectores anuales 2025–2035.
3. Verificar validaciones automáticas de rango.
4. Bloquear las celdas de cálculo y documentar versión (fecha y hash).
5. Exportar resultados a las Tablas 5–8 (Cap. 5–6 del TFM).
6. Para auditoría, sustituir vectores de entrada con datos actualizados y recalcular automáticamente.



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS