



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

El coste neto de la descarbonización: inversión,
impactos y ahorro estructural para la viabilidad de la
transición energética en Europa

Autor: Alejandro Ruiz Gutiérrez

Director: Juan Jaquete Pastor

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

.....

El coste neto de la descarbonización: inversión, impactos y ahorro estructural
para la viabilidad de la transición energética en Europa

.....

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico2024 - 2025..... 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.: Alejandro Ruiz Gutiérrez

Fecha: 09/ 07/ 2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Jaqueto Pastor

Fecha: 09/ 07/ 2025





COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

El coste neto de la descarbonización: inversión,
impactos y ahorro estructural para la viabilidad de la
transición energética en Europa

Autor: Alejandro Ruiz Gutiérrez

Director: Juan Jaquete Pastor

Madrid

Julio de 2025

EL COSTE NETO DE LA DESCARBONIZACIÓN: INVERSIÓN, IMPACTOS Y AHORRO ESTRUCTURAL PARA LA VIABILIDAD DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN EUROPA

Autor: Ruiz Gutiérrez, Alejandro.

Director: Jaquete Pastor, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto analiza la viabilidad económica de la transición energética en la Unión Europea, integrando inversión, ahorro y beneficios. Se cuantifican inversiones adicionales necesarias, emisiones evitadas y ahorros derivados. Los resultados indican que el proceso es viable con un coste neto anual estimado de 550 mil millones de euros y múltiples beneficios estructurales.

Palabras clave: Transición energética, descarbonización, Unión Europea, inversión, electrificación, eficiencia energética, dependencia energética, soberanía energética.

1. Introducción

El proyecto analiza la viabilidad económica y la inversión necesaria para alcanzar la neutralidad climática en Europa para el año 2050, conforme a los objetivos establecidos en el Pacto Verde Europeo y el paquete legislativo “Objetivo 55”. Frente al enfoque tradicional centrado exclusivamente en el estudio de la inversión bruta necesaria para acometer la transición energética, esta investigación introduce una visión más equilibrada y completa, que considera también los beneficios estructurales asociados a la descarbonización: el ahorro en importaciones fósiles y la consecuente reducción del déficit comercial; el incremento de la independencia energética y por tanto la mejora de la soberanía nacional desde un punto de vista económico y geopolítico; y la mejora de la salud pública y su impacto positivo en la productividad. Adicionalmente, el proyecto analiza la comparativa entre la inversión necesaria para llevar a buen puerto la transición energética y la inversión que sería necesaria en caso de que la transición energética no tuviese lugar, con el propósito de evaluar la inversión neta necesaria para acometer la transición, es decir, el esfuerzo inversor *adicional* que debe asumir la sociedad europea para avanzar hacia un sistema energético libre de emisiones netas e independiente de terceros países.

La UE-27 tenía en 2023 una tasa de dependencia energética del 58.4% (mayoritariamente debido a la importación de combustibles fósiles, principalmente petróleo, gas natural y carbón), que se traduce en un déficit de balanza comercial de 380 mil millones de euros anuales en 2024, lo que supone una vulnerabilidad estratégica importante en un contexto de creciente tensión e inestabilidad geopolítica.

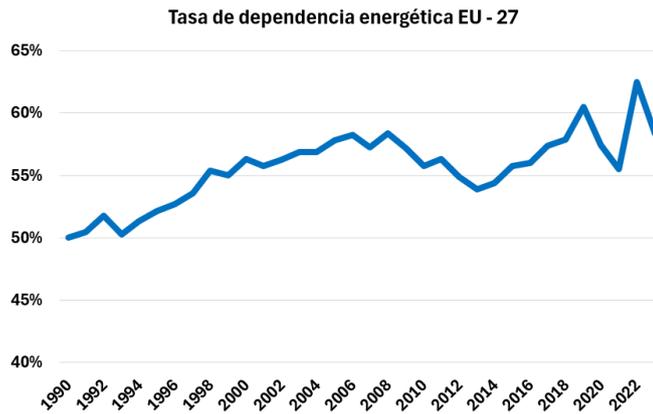


Ilustración 1: Ratio de dependencia energética de la UE27 desde 1990

La transición hacia una economía neutra en emisiones de carbono es, además de un compromiso y una obligación a través del Acuerdo de París, una oportunidad significativa para fortalecer la competitividad industrial, garantizar la seguridad y soberanía energética y reducir la dependencia de importaciones de fuentes de energía contaminantes mejorando la balanza comercial de la UE.

2. Características generales

El proyecto analiza los dos grandes pilares que será necesario transformar durante el transcurso de la transición energética europea: la oferta y la demanda de energía.

El estudio se ha llevado a cabo analizando, en cada caso, la evolución de cuatro indicadores clave: 1) importe de la inversión necesaria en transición energética, cuantificado en EUR 2) importe de reducción económica del déficit energético, resultante de la inversión en transición energética, cuantificado en EUR 3) importe de reducción energética del déficit energético, resultante de la inversión anterior, cuantificado en TWh/año, y 4) reducción neta de emisiones resultante de la inversión anterior, cuantificado en Ton CO₂/año .

En el lado de la oferta, se analiza la transformación del sistema de generación eléctrica europeo, que debe evolucionar hacia un modelo basado en fuentes renovables, interconectado y resiliente. Se abordan aspectos clave como la expansión de la capacidad instalada en solar fotovoltaica y eólica, el refuerzo de las redes eléctricas, la digitalización de los sistemas y el despliegue de tecnologías de almacenamiento, imprescindibles para garantizar la estabilidad del sistema frente a la variabilidad renovable. El estudio evalúa la inversión necesaria en estos ámbitos y su viabilidad económico-financiera, poniendo especial énfasis en los retornos esperados y los instrumentos de financiación que pueden catalizar su implementación.

En el lado de la demanda, se analizan tres sectores prioritarios:

- Edificios, donde se examina el potencial de rehabilitación energética, electrificación del calor mediante bombas de calor y mejoras en la eficiencia del parque inmobiliario europeo, caracterizado por un alto grado de obsolescencia.

- Transporte, con especial atención a la electrificación del parque automovilístico, el desarrollo de infraestructuras de recarga y el papel potencial de tecnologías emergentes como el hidrógeno renovable en el transporte pesado y marítimo.
- Industria, donde se evalúa el uso de tecnologías de electrificación directa e indirecta, la descarbonización de procesos térmicos, la mejora en la eficiencia energética de las bombas de calor y el desplazamiento de los combustibles fósiles y gas natural como fuentes de energía para generación y calor industrial.

En cada uno de estos sectores, se estima la infraestructura necesaria para la transición, se cuantifican las necesidades de inversión anuales, y se calcula la rentabilidad de las actuaciones mediante el cálculo de tasas internas de retorno (TIR) en distintos proyectos empleados para ejemplificar.

Se estima después el impacto que tendrá la transición a distintos niveles, como la balanza energética, las emisiones de GEI, la contaminación y la salud y en la creación de empleo en la eurozona.

Finalmente, se estiman a nivel europeo los ahorros derivados de la transición, gracias a la reducción drástica de importaciones de combustibles fósiles y de la mejora en la salud general de la población asociada a la contaminación del aire, así como los costes sanitarios y la pérdida de productividad que ello implica.

Este enfoque permite dimensionar de forma rigurosa el importe total de inversión necesario para completar la transición, y compararlo con el importe total que la UE invertiría en caso de que la transición no se llevase a cabo, es decir, la inversión que sería necesario acometer en vehículos de combustión interna, instalación y mantenimiento de calderas de gas, instalación y mantenimiento de centrales de generación de electricidad mediante gas o carbón, etc, en caso de que no se llevase a cabo la inversión en la infraestructura asociada a la transición energética. De este modo, el proyecto analiza el esfuerzo inversor *neto* que la UE necesita para la transición.

3. Metodología y desarrollo

La metodología empleada en este estudio combina un enfoque documental y cuantitativo. En primer lugar, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de fuentes provenientes de organismos e instituciones clave en el ámbito energético y financiero, como la Comisión Europea, el Banco Central Europeo, el Banco Europeo de Inversiones, Bruegel, BloombergNEF y McKinsey, entre otros. Estos documentos han servido de base para la construcción de una visión coherente y actualizada sobre las necesidades de inversión, las oportunidades de ahorro y los instrumentos de financiación existentes en el contexto de la transición energética europea.

A partir de esta base empírica, se han definido y modelizado tres escenarios principales, siempre con 2050 como horizonte temporal:

- Escenario S1: incluye medidas consistentes con los compromisos legislativos actuales (Fit for 55), con un grado medio de ambición climática.

- Escenario S2: plantea un aumento de la ambición climática, incorporando medidas adicionales para acelerar la electrificación y la eficiencia energética, con mayor esfuerzo inversor.
- Escenario S3: representa el escenario más ambicioso, alineado con una senda compatible con el Acuerdo de París y los objetivos de net-zero en 2050.

Además, se tiene en cuenta un escenario BAU (Business as Usual), que representa una trayectoria inercial en la que no se llevan a cabo las inversiones necesarias para la transición energética. Se mantiene el uso predominante de combustibles fósiles y tecnologías convencionales, sin alcanzar los objetivos de descarbonización, neutralidad climática, e independencia energética.

También, se han construido modelos comparativos de inversión, que estiman el volumen de inversión bruta anual requerida, los ahorros estructurales proyectados (por reducción de importaciones fósiles, costes sanitarios evitados, etc.), la inversión necesaria en un escenario BAU, y como resultado de la diferencia entre los anteriores, el importe de inversión neta necesaria para la transición. Se ha estimado también la rentabilidad necesaria en cada sector mediante el cálculo de tasas internas de retorno (TIR) por tipo de tecnología y ámbito de actuación (generación, edificios, transporte, industria).

4. Cálculos y resultados

El análisis y los cálculos de la Comisión Europea revelan que las necesidades brutas anuales de inversión para acometer la transición se sitúan en torno a los 1,500 mil millones de euros anuales en todos los escenarios analizados (1,532 mil M€ en S1, 1,538 mil M€ en S2 y 1,535 mil M€ en S3) hasta el año 2050.

Sin embargo, si se tienen en cuenta las inversiones necesarias en el caso “Business as Usual”, sale a la luz que las inversiones *adicionales* representan en realidad la mitad de lo que inicialmente propone la Comisión. Esta reducción se deriva de estimar la inversión adicional comparada con el escenario BAU en el que no se lleva a cabo la transición (de modo que más de la mitad de la inversión debe ser ejecutada de cualquier modo, aunque estructurada de una manera distinta). Así, el esfuerzo inversor real adicional es realmente del entorno de los 790 mil millones de euros anuales (787 mil M€ en S1, 792 mil M€ en S2 y 787 mil M€ en S3).

Si además se tienen en cuenta los ahorros estructurales estimados en 240 mil millones de euros por año, que incluyen el ahorro en importaciones de combustibles fósiles (gas, petróleo y carbón) y la reducción del gasto sanitario vinculado a la contaminación atmosférica, las necesidades netas se reducen hasta el entorno de los 550 mil millones de euros anuales (547 mil M€ en S1, 552 mil M€ en S2 y 547 mil M€ en S3), llegando a una reducción de un 65% con respecto a las estimaciones brutas de la Comisión Europea.

Necesidades anuales netas (miles de millones €)	S1	S2	S3
Inversión bruta	1,532	1,538	1,535
Inversión BAU	(745)	(746)	(748)
Δ BAU	787	792	787
Ahorros	(240)	(240)	(240)
Inversión neta	547	552	547

PIB anual estimado	20,907	20,907	20,907
Inversión neta como % PIB	2.62%	2.64%	2.62%

Ilustración 2: Comparativa de inversión neta necesaria para acometer la transición

Esta nueva cifra, equivalente al 2.6% del PIB anual esperado europeo, representa un esfuerzo adicional asumible en términos macroeconómicos, especialmente si se compara con las consecuencias económicas de la inacción climática o la dependencia energética estructural. Para ilustrar los conceptos descritos se muestra el gráfico de la Ilustración 3, empleando el escenario 1 como ejemplo:

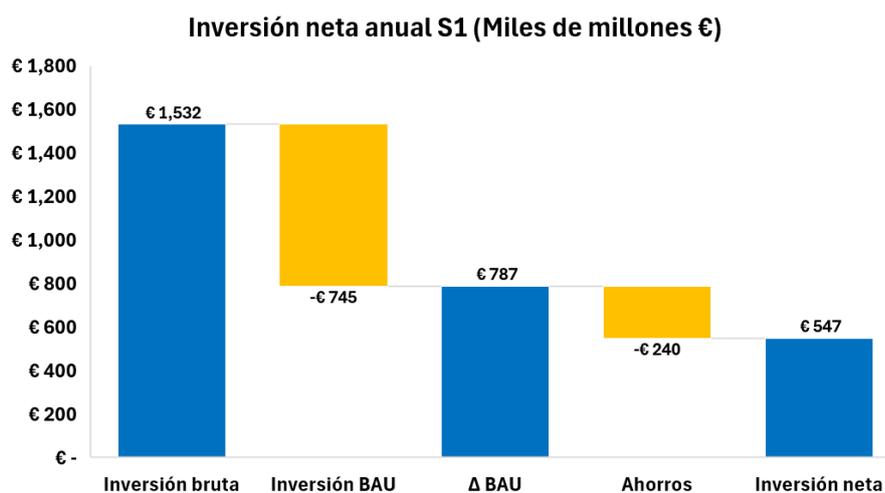


Ilustración 3: Representación gráfica del coste neto anual de la transición energética

5. Conclusiones

En resumen, los resultados del proyecto demuestran que la transición energética europea es un proceso viable, tanto técnica como económicamente y que tendrá los siguientes impactos en los indicadores mencionados anteriormente:

- 1) una inversión media anual neta de unos 550 mil millones de EUR hasta 2050
- 2) un ahorro anual medio de 170 mil millones de EUR asociado a la reducción del déficit energético hasta 2050

3) una reducción del déficit energético desde los -9,088 TWh en 2023 hasta los -1,585 TWh en 2050

4) una reducción media anual de emisiones resultante de la inversión anterior, de 120 Ton CO₂/año hasta 2050.

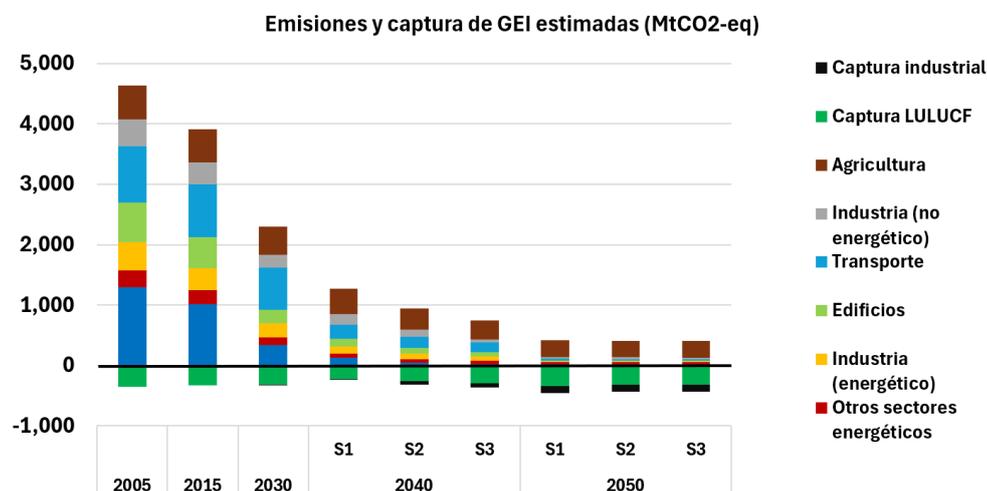


Ilustración 4: Reducción estimada de emisiones de GEI

Además de estos indicadores, se espera una reducción de la tasa de dependencia energética hasta el 12% en 2050, alineado con la soberanía energética que se pretende conseguir.

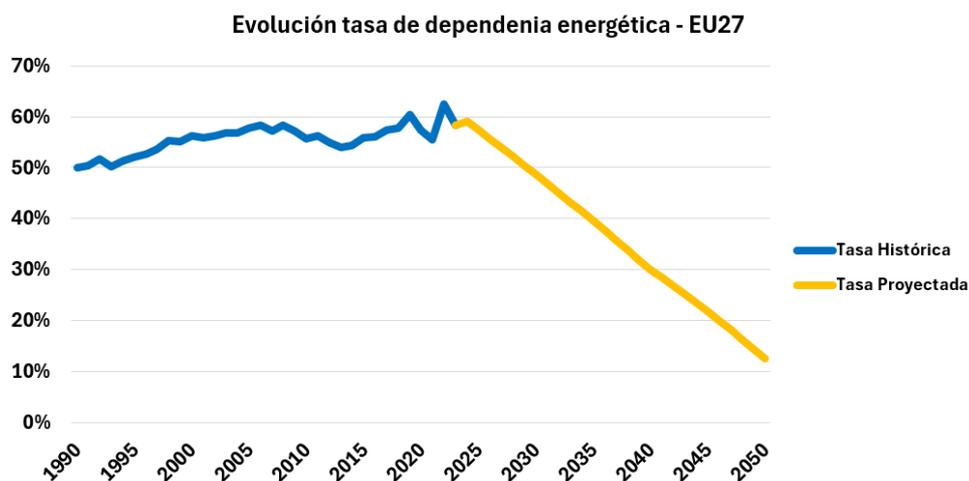


Ilustración 5: Evolución de la tasa de dependencia energética hasta 2050

En definitiva, lejos de representar una carga, la transición energética debe entenderse como una apuesta estratégica a escala europea, cuyo retorno va más allá de lo puramente económico. La inversión adicional necesaria se verá compensada en parte por los beneficios estructurales que genera: ahorro neto en la balanza energética, reducción de la dependencia exterior, reducción de emisiones, mejora de la salud

pública y creación de empleo. Además, la solidez financiera de las inversiones analizadas, con tasas de retorno positivas en múltiples sectores, refuerza su viabilidad económica, algo que puede generar una ola inversora sin precedentes, movilizándolo capital público como privado. En definitiva, acometer esta transformación no solo es viable, sino deseable: representa una oportunidad para reindustrializar Europa sobre bases limpias y sostenibles, fortalecer su soberanía energética e independencia estratégica y liderar la transición climática a nivel global.

THE NET COST OF DECARBONIZATION: INVESTMENT, IMPACTS, AND STRUCTURAL SAVINGS FOR THE VIABILITY OF THE ENERGY TRANSITION IN EUROPE

Author: Ruiz Gutiérrez, Alejandro.

Director: Jaquete Pastor, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project assesses the economic feasibility of the energy transition in the European Union, integrating investment, savings, and associated benefits. It quantifies the additional investments required, avoided emissions, and resulting savings. The findings indicate that the transition is viable, with an estimated net annual cost of €550 billion and significant structural benefits.

Key words: Energy transition, decarbonization, European Union, investments, electrification, energy efficiency, energy dependence, energy sovereignty.

1. Introduction

The project analyzes the economic feasibility and investment requirements for achieving climate neutrality in Europe by 2050, in line with the objectives set out in the European Green Deal and the "Fit for 55" legislative package. In contrast to the traditional approach, which focuses exclusively on estimating the gross investment needed to carry out the energy transition, this research adopts a more balanced and comprehensive perspective that also considers the structural benefits associated with decarbonization: savings on fossil fuel imports and the resulting reduction in the trade deficit; increased energy independence and, consequently, enhanced national sovereignty from both an economic and geopolitical standpoint; and improvements in public health and their positive impact on productivity. In addition, the project compares the investment required to successfully implement the energy transition with the investment that would still be necessary if the transition were not pursued, with the aim of evaluating the net investment effort. That is, it seeks to determine the additional investment burden that European society would need to assume in order to move towards a net-zero emissions energy system that is no longer dependent on third countries.

In 2023, the EU-27 had an energy dependence rate of 58.4%, primarily due to the import of fossil fuels (mainly oil, natural gas, and coal). This translated into a trade balance deficit of €380 billion annually in 2024, representing a significant strategic vulnerability in the context of growing geopolitical tension and instability.

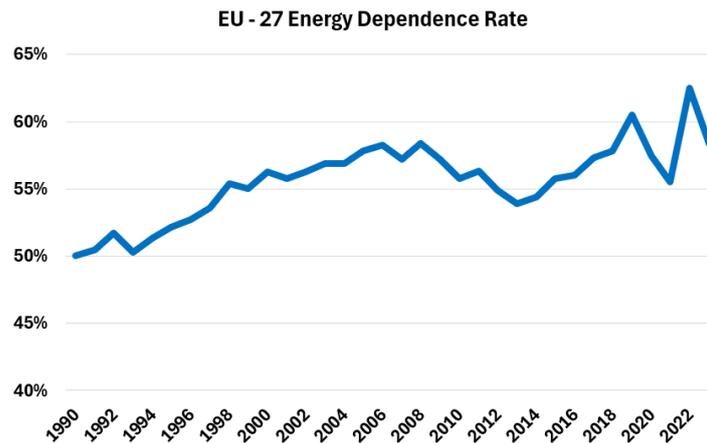


Figure 1: EU-27 energy dependence ratio from 1990

The transition toward a carbon-neutral economy is not only a commitment and obligation under the Paris Agreement, but also a major opportunity to strengthen industrial competitiveness, ensure energy security and sovereignty, and reduce dependence on imports of polluting energy sources, thereby improving the EU's trade balance.

2. Main features

The project analyzes the two main pillars that must be transformed throughout the course of Europe's energy transition: energy supply and energy demand.

The study was conducted by examining, in each case, the evolution of four key indicators: 1) the volume of investment required for the energy transition (quantified in EUR) 2) the economic reduction of the energy deficit resulting from the transition (quantified in EUR) 3) the energy reduction of the energy deficit derived from the same investment (quantified in TWh/year) and 4) the net emissions reduction associated with that investment (quantified in tons of CO₂ per year).

On the supply side, the analysis focuses on the transformation of the European power generation system, which must evolve toward a renewable-based, interconnected, and resilient model. Key elements examined include the expansion of installed capacity in solar PV and wind, the reinforcement of power grids, system digitalization, and the deployment of storage technologies, all essential to ensure grid stability in the face of variable renewable output. The study assesses the investment required in these areas and their economic and financial viability, placing special emphasis on expected returns and financing mechanisms capable of catalyzing deployment.

On the demand side, three priority sectors are analyzed:

- Buildings, where the focus is on the potential for energy renovation, the electrification of heating via heat pumps, and improvements to the efficiency of the European building stock, which is characterized by a high degree of obsolescence.
- Transport, with particular attention to the electrification of the vehicle fleet, the development of charging infrastructure, and the potential role of emerging

technologies such as renewable hydrogen in heavy-duty and maritime transport.

- Industry, where the use of direct and indirect electrification technologies is assessed, along with the decarbonization of thermal processes, improvements in heat pump efficiency, and the substitution of fossil fuels and natural gas for industrial power and heat generation.

For each of these sectors, the required infrastructure is defined, annual investment needs are quantified, and project-level returns are calculated through internal rate of return (IRR) estimates based on representative project examples.

The study also estimates the broader impacts of the transition on variables such as the energy trade balance, greenhouse gas emissions, air pollution and public health, and job creation across the eurozone.

Finally, the study provides EU-wide estimates of the savings generated by the transition, primarily due to the drastic reduction in fossil fuel imports and the improvement in public health associated with reduced air pollution, leading to lower healthcare costs and productivity losses.

This approach allows for a rigorous assessment of the total investment required to complete the transition and compares it against the investment that would be necessary if the transition did not take place, that is, continued investment in internal combustion vehicles, installation and maintenance of gas boilers, and the operation of gas or coal-fired power plants. In doing so, the project determines the net investment effort that the EU must undertake to enable a successful energy transition.

3. Methodology and development

The methodology employed in this study combines a documentary and quantitative approach. First, an in-depth review was conducted of sources from key institutions and organizations in the energy and financial sectors, such as the European Commission, the European Central Bank, the European Investment Bank, Bruegel, BloombergNEF, and McKinsey, among others. These documents served as the foundation for constructing a coherent and up-to-date view of investment needs, potential savings, and available financing instruments within the context of the European energy transition.

Based on this empirical foundation, three main scenarios were defined and modeled, all with 2050 as the time horizon:

- Scenario S1: includes measures aligned with current legislative commitments (Fit for 55), reflecting a moderate level of climate ambition.
- Scenario S2: envisions a higher level of climate ambition, incorporating additional measures to accelerate electrification and energy efficiency, requiring a greater investment effort.
- Scenario S3: represents the most ambitious scenario, fully aligned with a pathway consistent with the Paris Agreement and the net-zero emissions target for 2050.

In addition, a Business-as-Usual (BAU) scenario is considered, representing an inertial trajectory in which the necessary investments for the energy transition are not undertaken. In this scenario, the predominant use of fossil fuels and conventional technologies is maintained, and the goals of decarbonization, climate neutrality, and energy independence are not achieved.

Furthermore, comparative investment models have been developed to estimate the required gross annual investment, the projected structural savings (from reduced fossil fuel imports, avoided healthcare costs, etc.), the investment required under a BAU scenario, and, as the difference between these elements, the net investment required for the transition. Additionally, the sector-specific profitability has been estimated by calculating internal rates of return (IRR) for each type of technology and area of application (generation, buildings, transport, and industry).

4. Calculations and results

The analysis and calculations conducted by the European Commission reveal that the gross annual investment needs to carry out the energy transition amount to approximately €1,500 billion per year across all scenarios analyzed (€1,532 billion in S1, €1,538 billion in S2, and €1,535 billion in S3) through to the year 2050.

However, when accounting for the investments that would be required under a Business-as-Usual (BAU) scenario, it becomes clear that the *additional* investments actually represent only half of what was initially projected by the Commission. This reduction results from calculating the delta versus the BAU scenario, in which a large share of the expenditures would need to be made regardless, albeit in a different structural direction. Thus, the true delta relative to the initial estimates is around €790 billion per year (€787 billion in S1, €792 billion in S2, and €787 billion in S3).

If structural savings are also taken into account, estimated at €240 billion per year, including reductions in fossil fuel imports (gas, oil, and coal) and decreased healthcare expenditures related to air pollution, then the net investment needs fall to around €550 billion annually (€547 billion in S1, €552 billion in S2, and €547 billion in S3), representing a 65% reduction compared to the Commission’s gross investment estimates.

Annual net needs structure (billion 2023 €)	S1	S2	S3
Total Investment	1,532	1,538	1,535
BAU Investment	(745)	(746)	(748)
Δ BAU	787	792	787
Savings	(240)	(240)	(240)
Net Investment	547	552	547

Real GDP anual avg estimate	20,907	20,907	20,907
Net Investment as % GDP	2.62%	2.64%	2.62%

Figure 2: Investment needs comparison to achieve the transition

This revised figure, equivalent to 2.6% of the EU’s expected annual GDP, represents a macroeconomically manageable additional effort, especially when compared to the economic consequences of climate inaction or structural energy dependence. To illustrate the concepts described, Figure 3 is presented below, using Scenario 1 as an example:

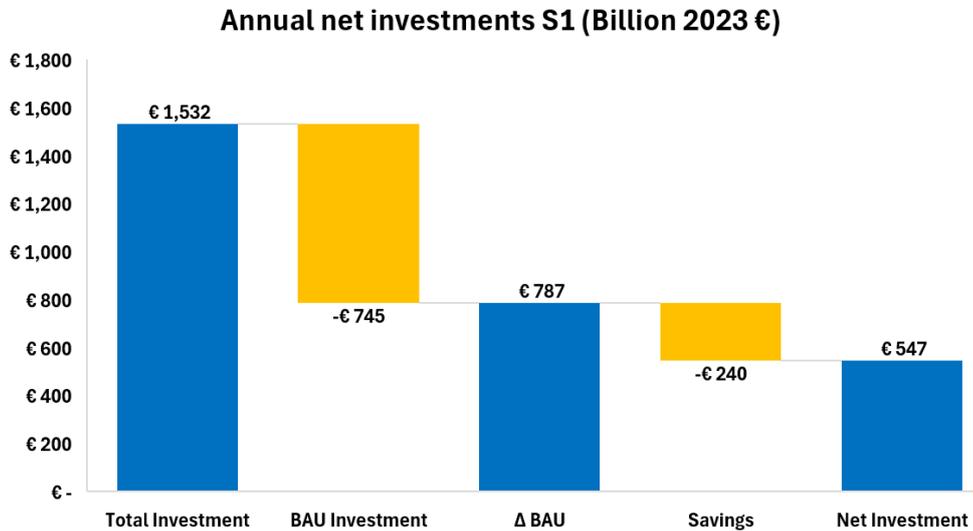


Figure 3: Graphic representation of the annual net investment for the transition

5. Conclusions

In summary, the project’s findings demonstrate that the European energy transition is a technically and economically viable process, which will have the following impacts on the key indicators analyzed:

- 1) an average net annual investment of approximately €550 billion through 2050
- 2) average annual savings of around €170 billion, derived from the reduction of the energy deficit by 2050
- 3) a reduction in the energy deficit from -9,088 TWh in 2023 to -1,585 TWh in 2050
- 4) an average annual emissions reduction of 120 million tons of CO₂ per year through 2050

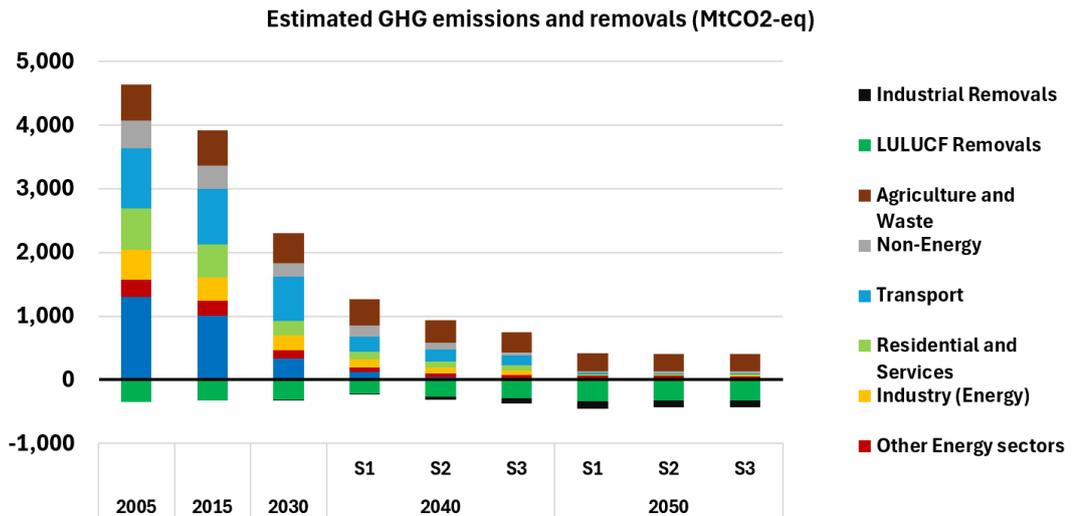


Figure 4: Estimated GHG emissions reduction

Apart from the previous indicators, the energy dependence rate is expected to be reduced down to 12%, aligning with the energy sovereignty that is expected to be achieved.

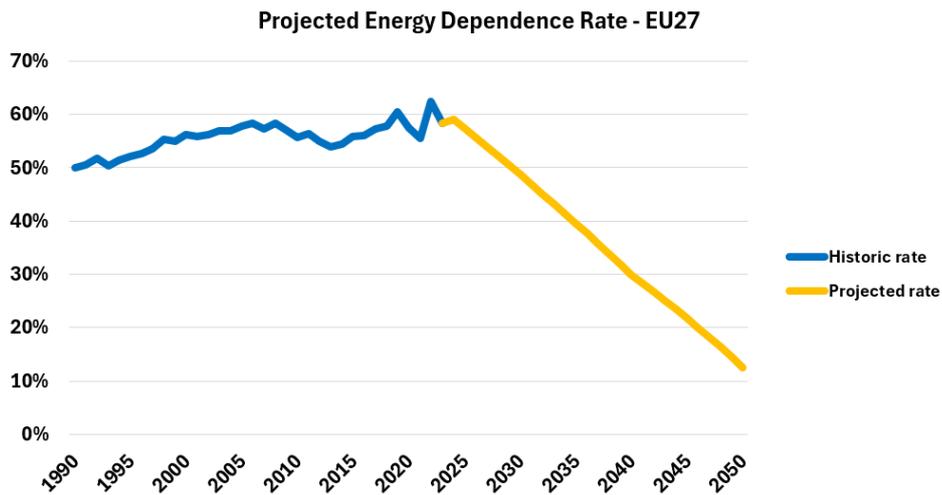


Figure 5: Projected energy dependence rate until 2050

Ultimately, far from being a burden, the energy transition should be seen as a strategic investment at European level, with returns that extend beyond purely economic considerations. The additional investment required will be partially offset by the structural benefits it delivers: a net improvement in the energy balance, reduced external dependence, lower emissions, better public health, and job creation. Moreover, the solid financial performance of the analyzed investments, with positive returns across multiple sectors, reinforces their economic viability, potentially triggering an unprecedented wave of investment, mobilizing both public and private capital. In conclusion, pursuing this transformation is not only feasible, but desirable: it represents an opportunity to reindustrialize Europe on clean and sustainable

foundations, strengthen its energy sovereignty and strategic autonomy, and position the EU as a global leader in the climate transition.

ÍNDICE

1. Introducción	5
2. Perspectiva energética actual en la UE	6
2.1. Déficit energético de la UE.....	6
2.2. Seguridad energética y contexto internacional.....	11
2.3. Emisiones y problemas ambientales asociados	14
2.3.1. Dióxido de Carbono	14
2.3.2. Metano	20
2.4. Objetivos actuales de la UE para el Net Zero	20
3. Transición hacia el objetivo Net Zero	25
3.1. Infraestructura necesaria para la transición.....	25
3.1.1. Generación	25
3.1.2. Demanda	29
3.2. Requerimientos de inversión	35
3.2.1. Generación	35
3.2.2. Demanda	36
3.2.3. Agregado.....	39
3.3. Impacto de la transición energética en aspectos clave	42
3.3.1. Impacto en la balanza y dependencia energética.....	42
3.3.2. Impacto en las emisiones.....	45
3.3.3. Impacto en la contaminación y salud	47
3.3.4. Impacto en el empleo y la economía.....	48
3.3.5. Resumen agregado de los impactos.....	51
3.4. Desafíos en la implementación de la infraestructura necesaria.....	52
3.4.1. Caso de estudio I: Vehículos eléctricos (Producción Europea vs China) ...	52
3.4.2. Caso de estudio II: Descarbonización de edificios	54
4. Análisis económico-financiero	56
4.1. Análisis de rentabilidad de las inversiones por sector	56

4.2. Mecanismos de financiación para la inversión necesaria	61
4.2.1. Instrumentos de financiación pública	61
4.2.2. Instrumentos de financiación privada	64
4.3. Análisis ahorros derivados de la transición	67
4.3.1. Ahorro en importaciones.....	67
4.3.2. Ahorro derivado de muertes evitadas.....	68
4.3.3. Comparativa inversión total vs ahorros.....	68
4.3.4. Comparativa inversión total delta vs ahorros.....	68
5. Conclusiones.....	69
6. Bibliografía	71
7. Anexos.....	80
7.1. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dependencia energética por país en la UE en 2022.....	6
Figura 2: Dependencia energética histórica de la UE desde 1990.....	7
Figura 3: Balance energético UE desde 1990.....	8
Figura 4: Valor de importaciones de productos energéticos de la UE.....	8
Figura 5: Porcentaje de productos energéticos sobre las importaciones totales de la UE.....	9
Figura 6: Importaciones de petróleo crudo en 2021-2024.....	9
Figura 7: Importaciones de GNL en 2021-2024.....	10
Figura 8: Importaciones de gas natural en 2021-2024.....	10
Figura 9: Almacenamiento de gas de la UE a 14 de enero de 2025.....	12
Figura 10: Representación de las fuentes renovables en el consumo de energía final de la UE.....	13
Figura 11: Emisiones de CO ₂ de la Unión Europea (1990-2023).....	14
Figura 12: Emisiones de CO ₂ en la Unión Europea por país (2023).....	15
Figura 13: Emisiones de CO ₂ en la UE per cápita por país (2023).....	16
Figura 14: Cantidad de CO ₂ en la atmósfera (ppm).....	17
Figura 15: Anomalía térmica anual con respecto a la media (1900-2000).....	18
Figura 16: Concentración de Metano atmosférico (partes por billón).....	20
Figura 17: Reducción de emisiones por país con respecto a 2005, fijados dentro del Objetivo 55.....	22
Figura 18: Límites emisiones de turismos y furgonetas nuevas hasta 2035. Fuente.....	23
Figura 19: Mix de producción eléctrica EU27 (1990-2023).....	25
Figura 20: Intensidad de emisiones por generación de electricidad (gCO ₂ equivalentes / kWh).....	26
Figura 21: Mix energético de generación proyectado (2023 – 2050).....	27
Figura 22: Incremento anual de capacidad de energía eólica y fotovoltaica en la UE [GW].....	28
Figura 23: Evolución del consumo energético en edificios (2015-2050).....	30
Figura 24: Tasas de renovación esperadas en edificios residenciales y de servicios (2020-2050).....	30
Figura 25: Mix de energía consumida por edificios residenciales (2015-2050).....	31
Figura 26: Número de bombas de calor en la UE (2020-2050).....	31
Figura 27: Evolución transporte de pasajeros (2015-2050).....	32
Figura 28: Mix de energía consumida por el sector transportes (2015-2050).....	33
Figura 29: Mix de energía consumida por la industria (2015-2050).....	34
Figura 30: Mix de energía empleada como materia prima por la industria (2015-2050).....	35
Figura 31: Inversión media anual necesaria en generación (2030-2050).....	36
Figura 32: Inversión media anual necesaria en edificios residenciales (2030-2050).....	37
Figura 33: Inversión media anual necesaria en edificios residenciales (2030-2050).....	37
Figura 34: Inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050).....	38
Figura 35: Detalle inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050).....	38
Figura 36: Inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050).....	39
Figura 37: Inversión media anual necesaria total (2030-2050).....	40

Figura 38: Inversión total necesaria para la transición (2030-2050)..... 40

Figura 39: Comparación de las necesidades de inversión con un escenario continuista del modelo energético actual..... 41

Figura 40: Proyección del balance energético UE hasta 2050 43

Figura 41: Proyección dependencia energética histórica de la UE hasta 2050 44

Figura 42: Proyección del valor de importaciones de productos energéticos de la UE hasta 2050 ... 45

Figura 43: Proyección de emisiones totales de gases de efecto invernadero en la UE hasta 2050..... 46

Figura 44: Proyección de captura de GEI gracias a LULCF (Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura) hasta 2050..... 46

Figura 45: Proyección de captura de GEI gracias a la captura industrial hasta 2050 46

Figura 46: Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en la UE hasta 2050..... 47

Figura 47: Proyección de impacto en la salud pública en el año 2040 48

Figura 48: Creación y destrucción de empleo asociada a la transición energética en la UE-27 50

Figura 49: Tabla resumen de la inversión necesaria y los impactos derivados de la transición energética en TWh Y MtCO2-eq 51

Figura 50: Distribución de turismos registrados en 2023 por tipo de combustible..... 52

Figura 51: Porcentaje de vehículos eléctricos sobre el total para UE27 53

Figura 52: Composición del precio del gas y la electricidad para los hogares en 2024 55

Figura 53: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos solares 57

Figura 54: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos eólicos..... 57

Figura 55: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación en edificios 58

Figura 56: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación de calor industrial 59

Figura 57: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación de vehículo eléctrico..... 60

Figura 58: Comparación gasto total de vehículo de combustión y eléctrico en 15 años 60

Figura 59: Porcentaje de bonos verdes con respecto al total emitidos en la UE (2014-2023)..... 64

Figura 60: Emisión de bonos verdes en la Unión Europea (miles de millones de euros) 65

Figura 61: Emisión de préstamos vinculados a la sostenibilidad en la UE (2017-2024) 66

Figura 62: Ahorros derivados de las importaciones de petróleo y gas y las muertes prematuras evitadas 67

Figura 63: Comparativa inversión total vs ahorros totales 68

Figura 64: Comparativa inversión delta vs ahorros totales..... 68

Figura 65: Comparativa de inversión neta anual necesaria para acometer la transición..... 69

Figura 66: Comparativa de inversión neta en el escenario 1 70

1. Introducción

La Unión Europea se encuentra en un momento clave desde su creación para decidir su futuro energético. La transición hacia una economía neutra en emisiones de carbono es, además de un compromiso y una obligación a través del Acuerdo de París, una oportunidad significativa para fortalecer la competitividad industrial, garantizar la seguridad y soberanía energética y reducir la dependencia de importaciones de fuentes de energía contaminantes. Actualmente, la UE (27) importa más de la mitad de la energía disponible para sus necesidades [1] (mayoritariamente debido a los combustibles fósiles, al gas natural y al carbón), contando con 1,300,485 ktoe / 15,124.6 TWh importados en 2022 [2], representando altos gastos anuales además de una vulnerabilidad estratégica importante en un contexto de creciente tensión e inestabilidad geopolítica.

La transición energética ocurrirá solo si se da a su vez una profunda transformación de la infraestructura actual. Será necesario el desarrollo e implementación de más fuentes renovables, la electrificación de la demanda o la mejora de la eficiencia energética de los equipos empleados en los hogares, oficinas o industria. Para llevar a cabo este complicado proceso, se estiman unas inversiones de unos 400 mil millones de euros desde hoy hasta 2030 y hasta 575 mil millones en las décadas subsiguientes hasta el año 2050 [3]. Estas cifras son, sin ninguna duda, significativas y superan en gran medida, por ejemplo a las necesidades para la reconstrucción de Europa tras la segunda Guerra Mundial (el plan Marshall aportó a Europa unos 13 mil millones de dólares de la época [32]). A pesar de representar una inversión sin precedentes, la transición energética puede ser no sólo algo que tenga un impacto en la manera de generar y consumir energía (además de mejorar la salud de los ciudadanos), si no repercutir de manera positiva en la economía de la Unión, gracias a los ahorros en el largo plazo de la reducción de importaciones, la disminución de emisiones (evitando sanciones) y fortaleciendo los sectores industriales más innovadores.

Es por todo esto, que el presente trabajo pretende abordar el enorme reto desde la perspectiva no sólo energética, si no también económica, destacando los claros beneficios de la transición en ambos ámbitos, reduciendo el desafío a cuestiones de financiación, adopción tecnológica y ejecución. Se estudiará en el diseño de instrumentos o vehículos de financiación que permitan movilizar todo el capital necesario para cumplir con estos objetivos. Además, se analizará la manera en la que estos mecanismos pueden llegar a reducir el déficit energético europeo actual, contribuyendo a equilibrar la balanza comercial energética y desbloquear la posibilidad de la soberanía energética de la Unión Europea.

2. Perspectiva energética actual en la UE

2.1. Déficit energético de la UE

Balance energético

La Unión Europea enfrenta un importante déficit energético debido a su dependencia de las importaciones para poder satisfacer las necesidades de consumo. Este desequilibrio entre producción interna y demanda final tiene impacto y consecuencias significativas en términos económicos y de seguridad y soberanía energética. Según estudios de la Unión Europea, durante 2022, la media de dependencia energética (definida como $[\text{Importaciones-Exportaciones}] / [\text{Energía bruta disponible}]$) de la misma se situó entorno al 63% [1], con algunos países destacando por su baja necesidad como Estonia, Suecia o Rumanía y otros encabezando la lista como Malta, Chipre, Luxemburgo o Grecia. A continuación, se muestra un gráfico para entender cómo de dependientes son los distintos países miembros para acceder a la energía que los mueve.

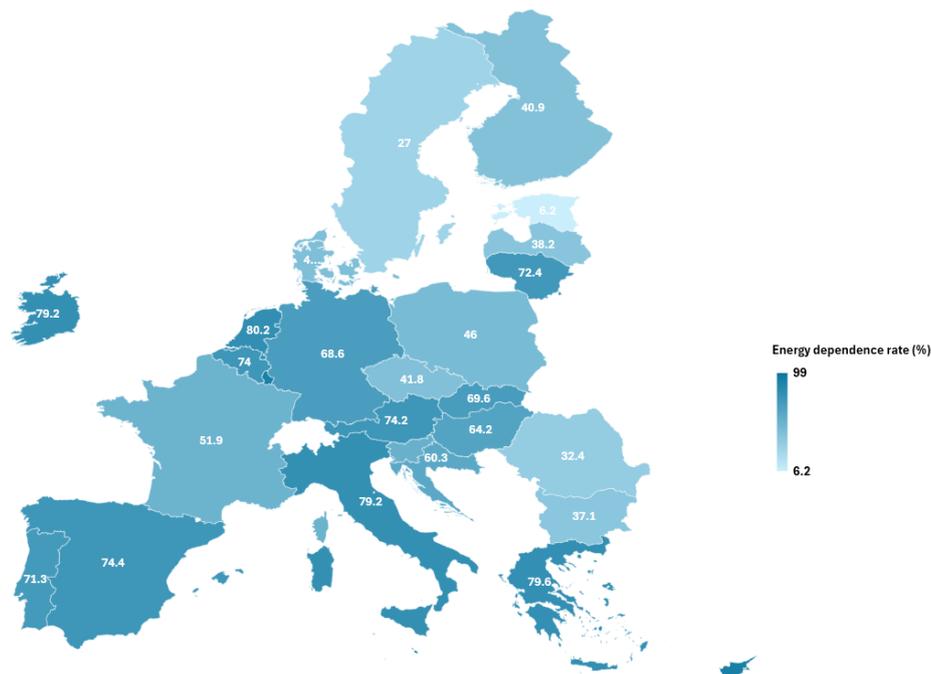


Figura 1: Dependencia energética por país en la UE en 2022. Fuente: Elaboración propia a partir de: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2024>

Además, como se puede observar en la Figura 2, esta dependencia no ha hecho más que crecer desde 1990, siguiendo una tendencia alcista que la ha elevado desde el 50% hasta el 62.5% actual, impulsada principalmente por la caída de la producción interna mediante carbón y nuclear (y la lenta integración de energías renovables que lo compense), el

aumento del consumo de gas importado o el aumento de necesidad de derivados del petróleo por el crecimiento del automóvil.

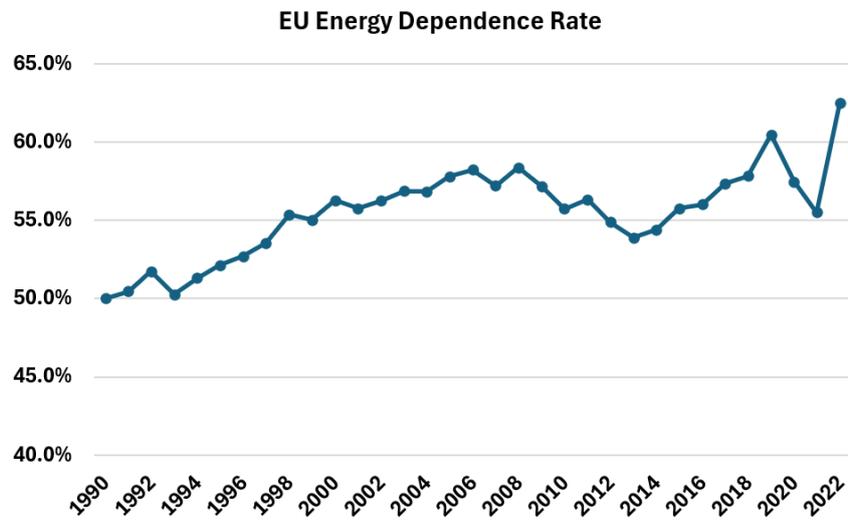


Figura 2: Dependencia energética histórica de la UE desde 1990. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>

Como consecuencia de la falta de capacidad para generar, los países más dependientes se ven en la necesidad de importar de otros para conseguir abastecerse. Estados Unidos es actualmente el principal proveedor de la UE en petróleo y sus derivados (cuenta con un 17% del valor total de importaciones) y en gas natural licuado (con un 47% del total). En cuanto a gas natural, Noruega sigue siendo el principal suministrador para la unión con un 46.6% del total. Además, a pesar de la invasión en 2022 de Ucrania, Rusia sigue figurando entre los principales abastecedores de GNL (17.7%) y de gas natural (17.3%) [5]. Este último punto demuestra la dependencia de países que, a pesar de haber sido sancionados desde Bruselas, siguen beneficiándose de la venta de energía a la comunidad que pretende bloquearlos económicamente.

Según Eurostat [2], en 2023 la Unión Europea exportó un total de 5,052 TWh de energía, mientras que requirió importar 14,141 TWh, resultando en un déficit comercial de energía de 9,089 TWh. Esta dependencia estructural de fuentes externas no es reciente: la UE lleva más de tres décadas registrando saldos energéticos negativos de forma sistemática y que cada año son mayores. Como se puede observar a continuación, el déficit se ha establecido en torno a los 10,000 TWh cada año.

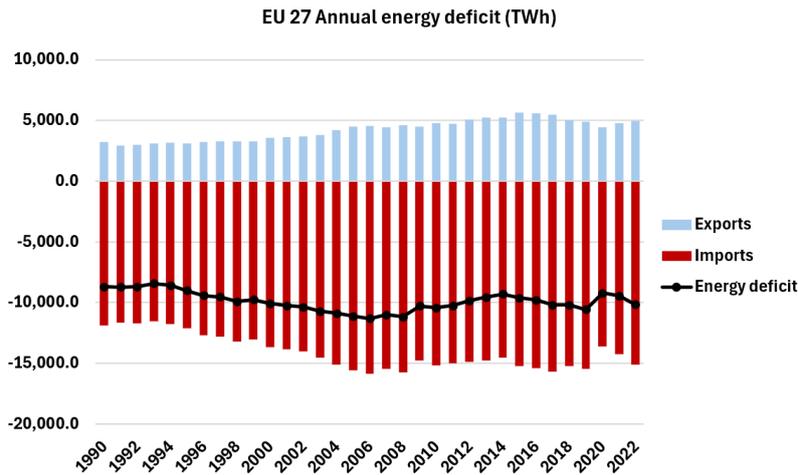


Figura 3: Balance energético UE desde 1990. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>

Impacto económico del déficit energético

El déficit energético de la Unión y la consecuente necesidad de importaciones representa un reto económico debido a la alta dependencia anteriormente mencionada. Durante el año 2022, y como consecuencia de la guerra en Ucrania y las posteriores sanciones aplicadas a Rusia, el suministro de este país hacia la Unión se redujo, causando un aumento significativo del precio gas (con interrupciones de los flujos a través de gasoductos como el Nord Stream 1 y 2) [6]. Así, el gasto en productos energéticos importados alcanzó cifras récord, con un total de 685,700 millones de euros. Desde aquel pico en el tercer trimestre de 2022, se ha visto un descenso en este volumen de compra, lo que ha conseguido también reducir la volatilidad de los precios, estabilizándose alrededor de los 95,000 millones al trimestre [7]. Esto se traduce en unos 380,000 millones anuales, lo que representa un 2.5% del PIB de la UE en 2024.

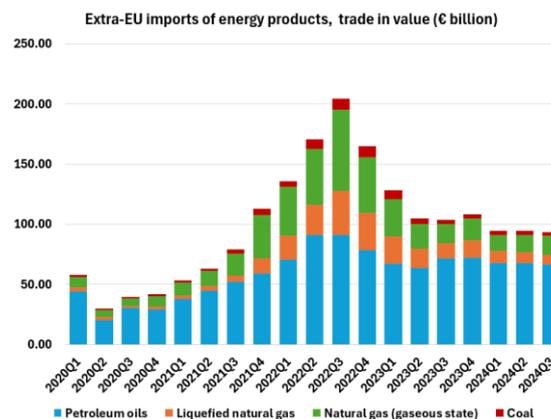


Figura 4: Valor de importaciones de productos energéticos de la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments

En términos de volumen, a pesar de haber diversificado parcialmente las fuentes de suministro, la UE ha sentido el impacto de las fluctuaciones de precios de la energía, amplificando los costes. Según los mismos datos de Eurostat, durante el año 2022, las importaciones de productos energéticos representaron un 22.5 % del total de importaciones, reduciéndose durante los dos siguientes años. Aún así, en el tercer trimestre de 2024, la proporción de estos gastos sigue representando un 15% del total.

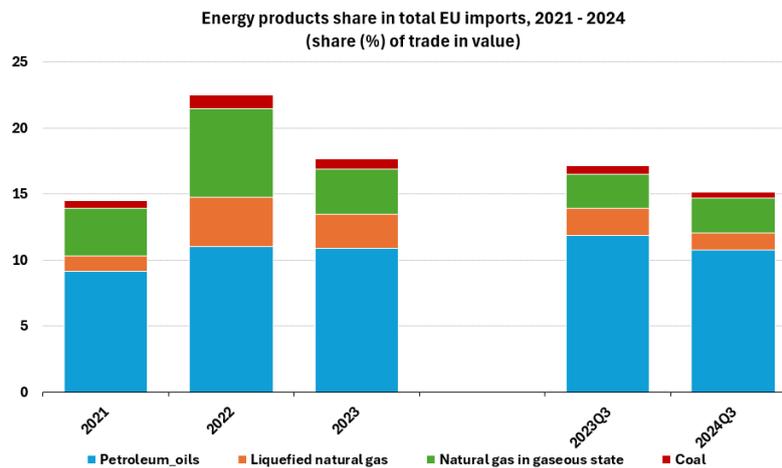


Figura 5: Porcentaje de productos energéticos sobre las importaciones totales de la UE. Fuente: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU imports of energy products - latest developments](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments)

Los principales productos siendo importados son:

- **Petróleo crudo y derivados:** En 2024, el petróleo continúa siendo el principal componente de las importaciones energéticas, representando un 70.6% en valor o un 64.2% en masa del total de importaciones energéticas. Según se puede apreciar a continuación, a pesar de la estabilización de la cantidad de crudo importado, el valor monetario correspondiente aumentó, indicando la subida sufrida en el precio.

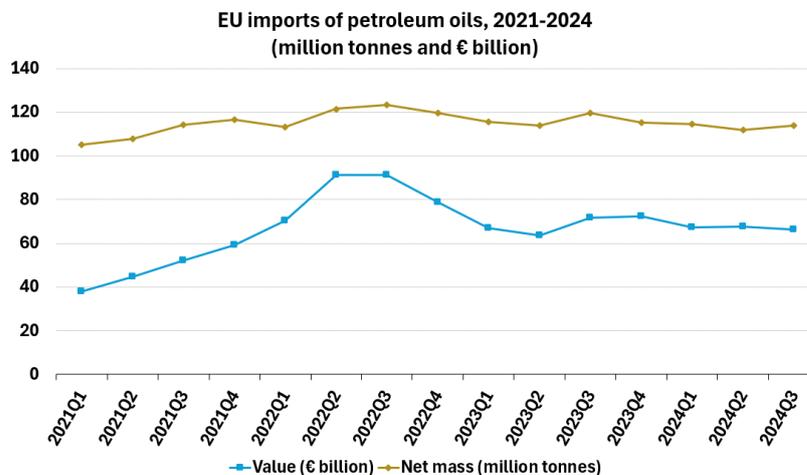


Figura 6: Importaciones de petróleo crudo en 2021-2024. Fuente: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU imports of energy products - latest developments](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments)

- **Gas natural licuado (GNL):** Las importaciones de esta fuente han sufrido los mayores incrementos en los últimos 3 años, con un incremento en volumen de hasta el 42.5% con respecto a 2021, pasando de 11.4 millones de toneladas hasta las 16.3 millones en el tercer trimestre de 2024. La crisis energética sufrida durante 2022 se ve claramente representada en el pico de valor sufrido sin el correspondiente pico proporcional en volumen asociado.

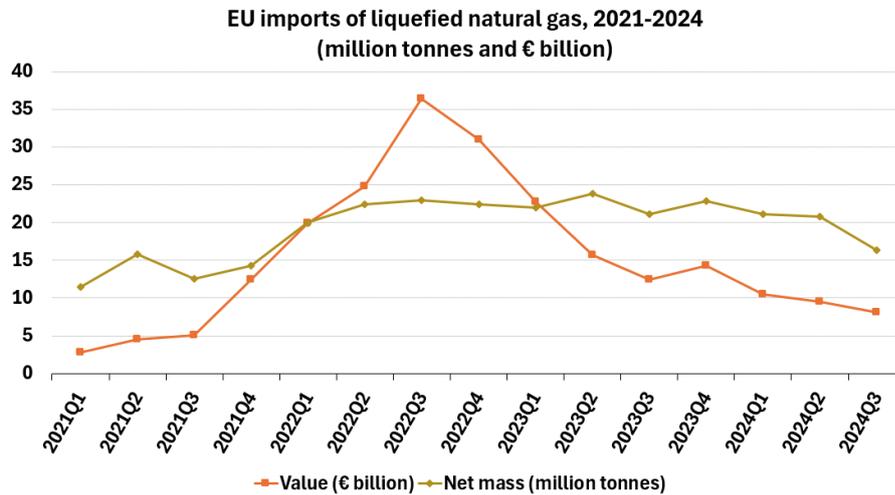


Figura 7: Importaciones de GNL en 2021-2024. Fuente: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU imports of energy products - latest developments](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments)

- **Gas natural en estado gaseoso:** Este ha visto una disminución de su volumen de un 37% desde 2021 en parte debido a las restricciones comerciales y a la caída de la participación rusa en el comercio de este tipo de productos con Europa.

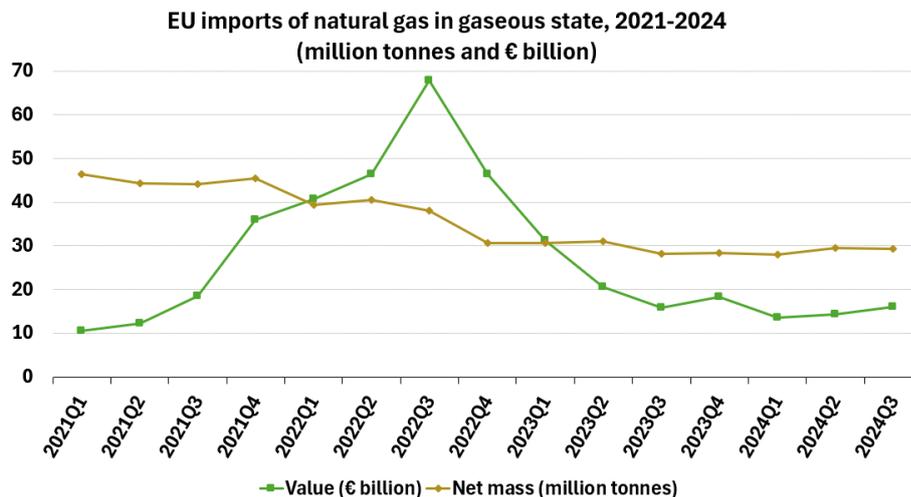


Figura 8: Importaciones de gas natural en 2021-2024. Fuente: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU imports of energy products - latest developments](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments)

El gasto masivo en importaciones energéticas implica una transferencia sustancial de riqueza fuera de la UE, limitando la capacidad del bloque para invertir en otras prioridades

estratégicas, como pueden ser la transición energética, la competitividad industrial o la defensa. En resumen, aunque los datos recientes apuntan a una estabilización en los volúmenes y precios de importación, el déficit energético de la UE sigue representando una carga significativa para su economía y una limitación estructural para su transición hacia un modelo más sostenible.

2.2. Seguridad energética y contexto internacional

Para garantizar la seguridad energética de la comunidad europea y asegurar un suministro asequible, se han propuesto distintas iniciativas en el Parlamento Europeo [8]. Estas están incluidas en el contexto del plan REPowerEU. Este plan, lanzado en mayo de 2022, por la Comisión Europea, tiene como objetivo reducir la dependencia de las importaciones de gas, petróleo y carbón rusos y se basa en puntos clave, ahorro energético, producción de energía limpia y diversificación del abastecimiento de energía de la Unión.

Los puntos más destacables son los siguientes:

- **Diversificación del suministro energético:** Se están aumentando significativamente las importaciones desde otros proveedores como Noruega, Qatar o Estados Unidos además de desarrollar nuevas infraestructuras de GNL. A pesar de ello, la capacidad de interconexión en la Unión es un desafío y la capacidad de importación se encuentra localizada en zonas menos dependientes del gas ruso como la península Ibérica [9].
- **Almacenamiento de gas:** Se establecen objetivos vinculantes para llenar al 80% los depósitos de almacenamiento de gas de la Unión antes del 1 de noviembre de 2022, con el objetivo de un 90% en años posteriores. Recientemente, la suspensión de flujos de gas ruso a través de Ucrania, ha levantado inquietud sobre el suministro de este producto en toda la UE. Actualmente, las reservas en los distintos países de la Unión son las siguientes:

EU Country	Volume of gas in storage at the end of gas day (TWh)	Percentage of working gas volume in storage (%)
Austria	72.9388	71.80%
Belgium	5.1637	58.48%
Bulgaria	3.9357	66.58%
Croatia	2.3723	49.71%

EU Country	Volume of gas in storage at the end of gas day (TWh)	Percentage of working gas volume in storage (%)
Czech Republic	27.3411	60.47%
Denmark	5.7210	55.16%
France	69.1602	51.42%
Germany	178.2825	70.88%
Hungary	43.3804	63.80%
Italy	145.4349	72.69%
Latvia	15.1190	60.48%
Netherlands	70.5096	48.96%
Poland	29.5695	78.87%
Portugal	3.5910	100.59%
Romania	19.6406	58.00%
Slovakia	25.5187	69.00%
Spain	28.0149	78.18%
Sweden	0.0896	88.03%

Figura 9: Almacenamiento de gas de la UE a 14 de enero de 2025. Fuente: GIE (Gas Infrastructure Europe), AGSI

Según declaró la comisión europea el 2 de enero de 2025, se está garantizando el suministro a través de otros itinerarios como pueden ser Alemania o Italia y gracias a los depósitos que se llenaron desde 2022. Así, en diciembre de 2024 los almacenes de la UE se encuentran a un nivel del 73% (esto es superior a la media de un 69% para esa época del año, pero supone un descenso de 14 puntos porcentuales con respecto al 87% de diciembre de 2023) [10].

- **Ahorro energético y reducción de demanda:** El plan de ahorro energético recogido en REPowerEU propone distintas iniciativas para el corto, medio y el largo plazo. Entre ellas, y según dos Reglamentos oficiales, se establece un objetivo voluntario del 15% de reducción del consumo de gas para cada estado miembro (pudiendo pasar a ser obligatorio en casos de emergencia o necesidad) y una

reducción obligatoria del 5% del consumo eléctrico (estableciendo una voluntaria del 10%).

- **Eficiencia energética:** Se incluye también una propuesta de ley en relación a la eficiencia energética para aumentarla en un 13% en 2030 en comparación con el año 2020. En esta misma propuesta, se modifica además la Directiva en relación a la eficiencia energética de los edificios para garantizar infraestructuras de energía fotovoltaica en instalaciones tanto públicas como residenciales.
- **Fomento de las energías renovables:** Se eleva el objetivo de la cuota de energías renovables en el consumo final al 45% para el año 2030, desde el 40% fijado mediante el “Objetivo 55” [11]. Además, se lanza una nueva estrategia específica para la energía solar, con el objetivo de instalar 320 GW de nueva capacidad fotovoltaica para 2025 y 600 GW para el año 2030. También, mediante el Reglamento (UE) 2022/2577 se simplifican los procedimientos para las concesiones de autorizaciones de proyectos de energías renovables, acelerándolas para instalaciones solares, bombas de calor o repotenciaciones de centrales. Actualmente, a pesar de contar con un 43.2% de producción energética en la UE de fuentes renovables [4], solo un 24.5% del consumo de energía final fue de este tipo en 2023, incrementando desde el 23% del año 2022 [12] pero aún lejos del objetivo marcado del 45% dentro de 5 años. Estos números están en línea con las tasas de dependencia energética mencionadas en el punto 2.1, ya que a mayor porcentaje de producción renovable sobre el consumo total, menor es la dependencia energética de importaciones externas, especialmente en petróleo para transporte y en gas para generación eléctrica.

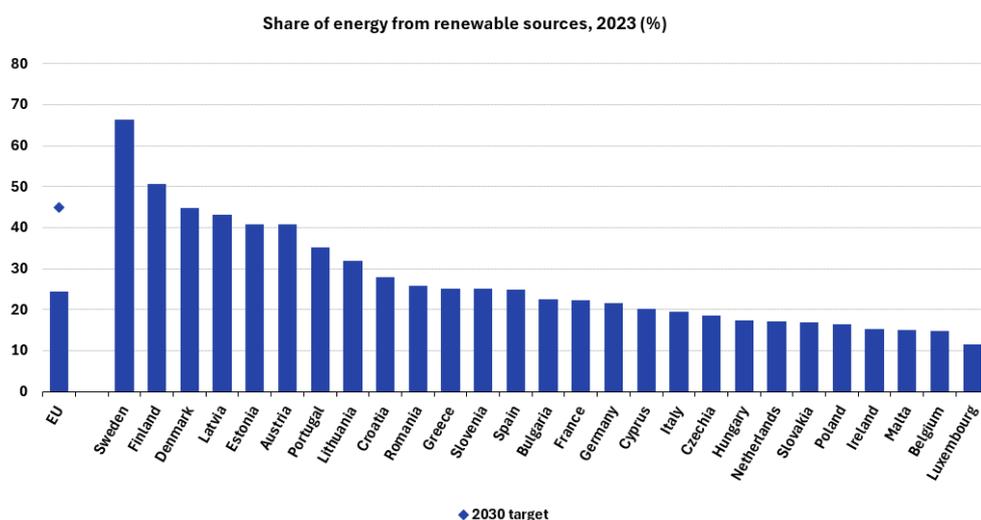


Figura 10: Representación de las fuentes renovables en el consumo de energía final de la UE. Fuente: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics

2.3. Emisiones y problemas ambientales asociados

2.3.1. Dióxido de Carbono

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) representan uno de los principales impulsores del cambio climático global, y los patrones observados en la Unión Europea (UE27) reflejan tanto avances como retos persistentes en la lucha por reducir la huella ambiental. Los datos más recientes indican que, a pesar de las reducciones significativas en las últimas décadas, las emisiones en sectores clave continúan siendo una preocupación central, vinculada a problemas ambientales como el calentamiento global, la degradación de los ecosistemas y la calidad del aire. La Unión Europea, desde 1990, ha pasado de representar un 16.79% de las emisiones globales de CO₂ a un 6.44%, siendo capaz de reducir sus emisiones totales en este mismo periodo en más de un 35%, desde las 3,809.7 millones de toneladas hasta las 2,512.06 actuales [13].

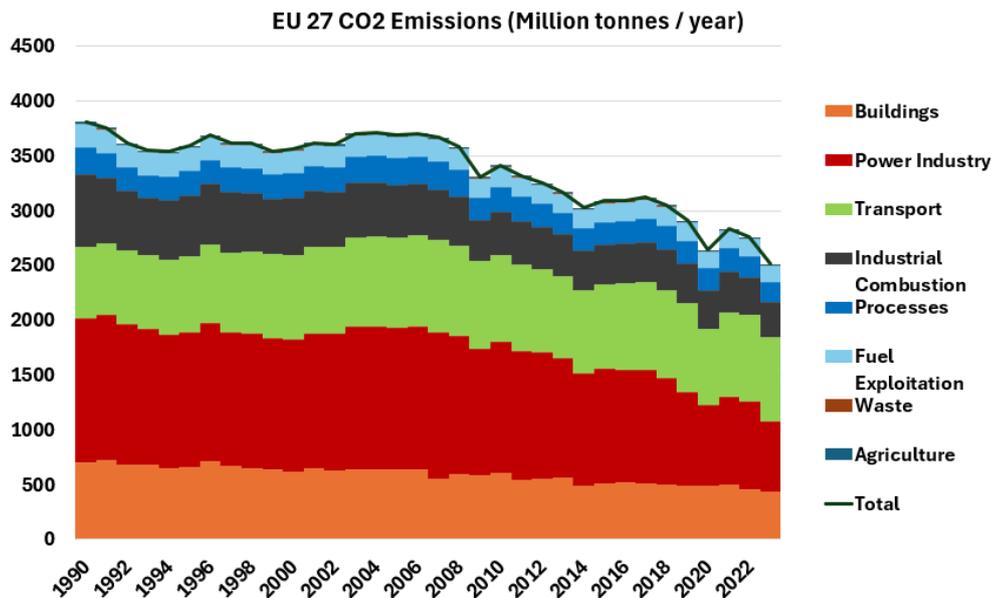


Figura 11: Emisiones de CO₂ de la Unión Europea (1990-2023). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024

Esta figura ilustra la trayectoria de las emisiones de CO₂ en la UE27 entre 1990 y 2023, desglosadas por sectores económicos principales:

- **Edificios:** Aunque las emisiones relacionadas con este sector han disminuido gradualmente, siguen contribuyendo significativamente debido al uso intensivo de energía para calefacción y electricidad.
- **Industria energética:** Este sector ha mostrado una notable disminución, evidenciando el impacto de la transición hacia fuentes renovables y la mejora de la

eficiencia energética. Sin embargo, aún representa una de las mayores fuentes de emisiones.

- **Transporte:** Las emisiones de transporte han mostrado una menor reducción relativa, subrayando la dependencia continua de combustibles fósiles en este sector y la necesidad de alternativas más sostenibles como vehículos eléctricos y transporte público eficiente.
- **Procesos industriales y combustión:** Aunque se han implementado tecnologías para reducir las emisiones, este sector sigue siendo una fuente importante de CO₂ debido a su relación con la producción de cemento, acero y otros materiales clave.
- **Agricultura:** Las emisiones de este sector, aunque menores en comparación, están vinculadas a procesos intrínsecos como la fermentación entérica y el uso de fertilizantes.

Este importante logro a nivel europeo subraya los esfuerzos sostenidos de la comunidad europea por cumplir con los compromisos internacionales, incluyendo el Acuerdo de París [14].

A continuación, se muestra una figura que representa la contribución individual de los Estados miembros al total de emisiones de CO₂ durante el año 2023.

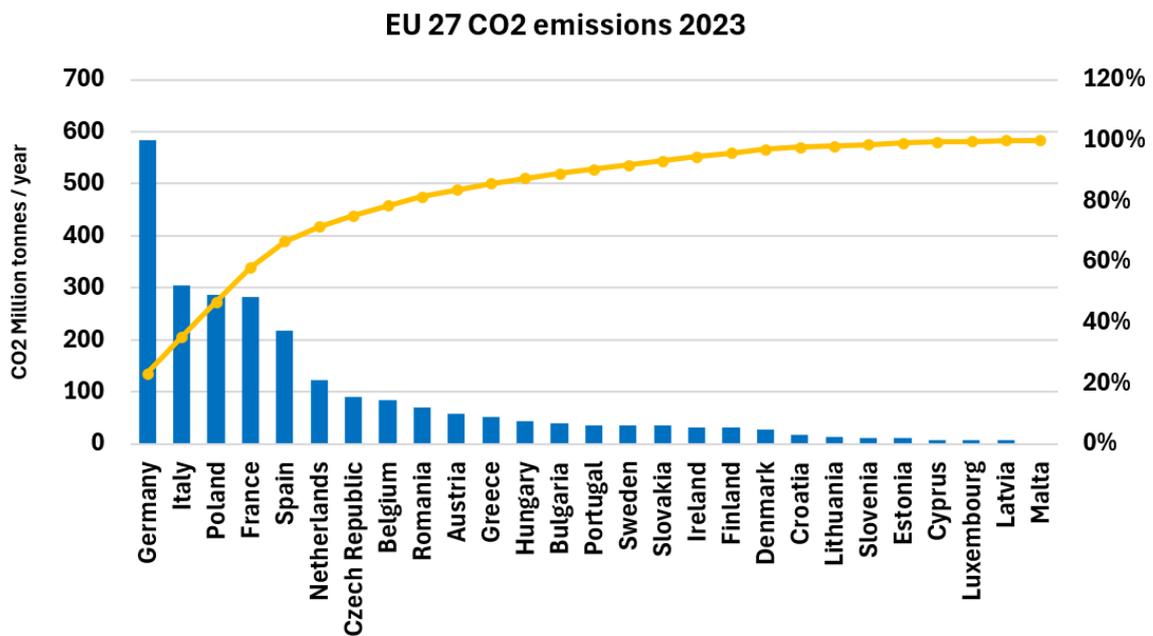


Figura 12: Emisiones de CO₂ en la Unión Europea por país (2023). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024

Actualmente, los países de la Unión con mayores niveles de emisiones asociados son:

- **Alemania (23%)**: Lidera con una contribución superior a 600 millones de toneladas anuales, atribuida a su gran sector industrial y dependencia del carbón.
- **Italia y Polonia (23%)**: Con emisiones cercanas a los 400 millones de toneladas anuales, destacan por su infraestructura energética y actividad industrial intensiva.
- **Francia y España (20%)**: Aunque sus emisiones son menores en términos absolutos, ambos países tienen importantes desafíos en el transporte y la generación de energía.

Por otro lado, países como Malta, Letonia y Luxemburgo contribuyen de manera marginal a las emisiones totales debido a su tamaño poblacional y menor actividad económica intensiva.

Sin embargo, también es relevante tener en cuenta que Alemania es el país más poblado de la unión, seguido por Francia e Italia. Así, resulta más interesante entender que país es menos eficiente a la hora de generar energía sin emitir CO₂ teniendo en cuenta la medida per cápita con el siguiente gráfico, donde destacan países como Luxemburgo, Estonia, República Checa o Polonia:

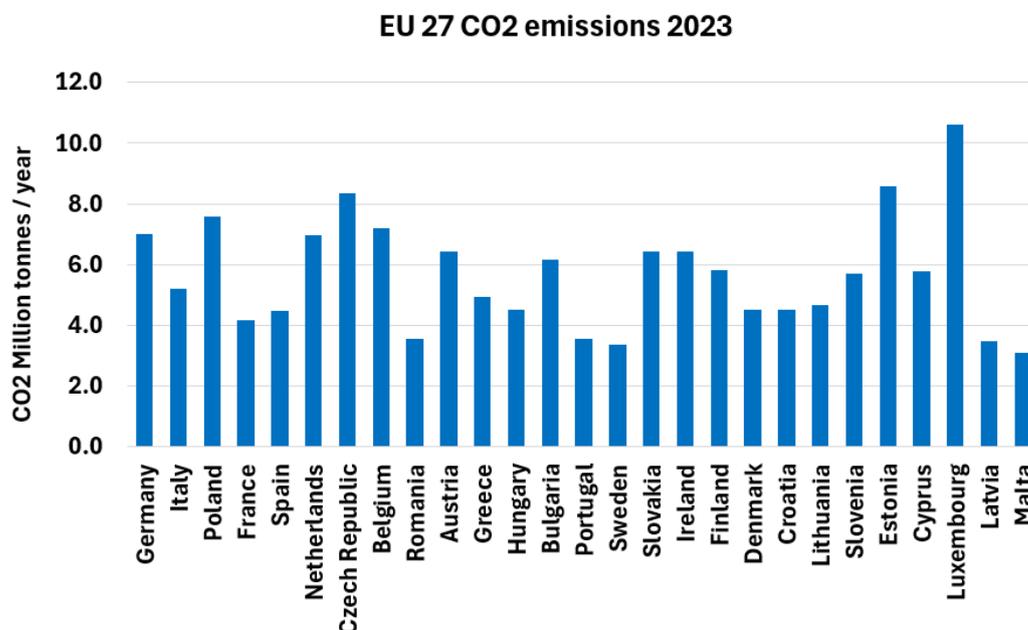


Figura 13: Emisiones de CO₂ en la UE per cápita por país (2023). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024

Implicaciones ambientales y desafíos asociados

Las emisiones de CO₂ representan una de las principales fuerzas detrás de los cambios ambientales que sufre el planeta. La cantidad existente en la atmósfera no ha dejado de aumentar en los últimos años, como se muestra a continuación. Existen así, distintos aspectos y desafíos asociados a la reducción de las emisiones de este compuesto tanto a nivel europeo como mundial.

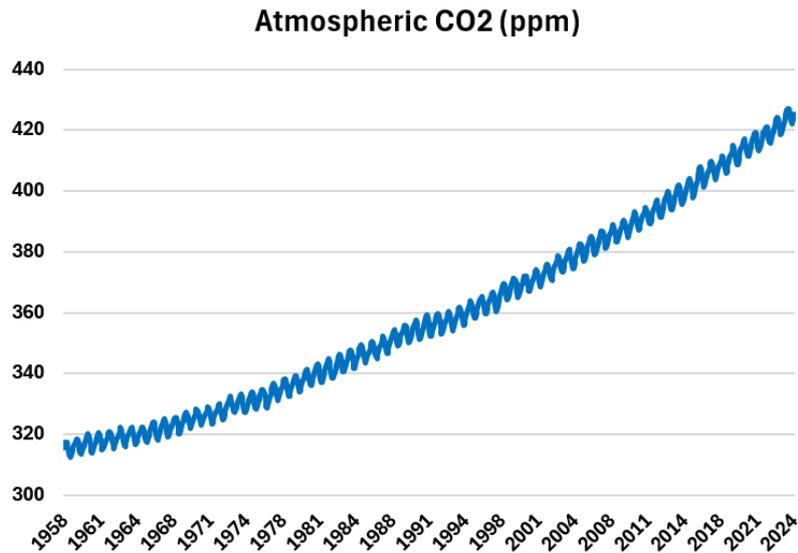


Figura 14: Cantidad de CO₂ en la atmósfera (ppm). Fuente: NOAA, medido en el Observatorio Mauna Loa.
<https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>

En primer lugar, las alteraciones globales climáticas asociadas con estas emisiones son el principal impacto. El CO₂, principal gas de efecto invernadero [15] y su acumulación en la atmósfera desde la era preindustrial, ha provocado el aumento de las temperaturas entre 0.8°C y 1.2°C a nivel mundial, según indica el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [16].

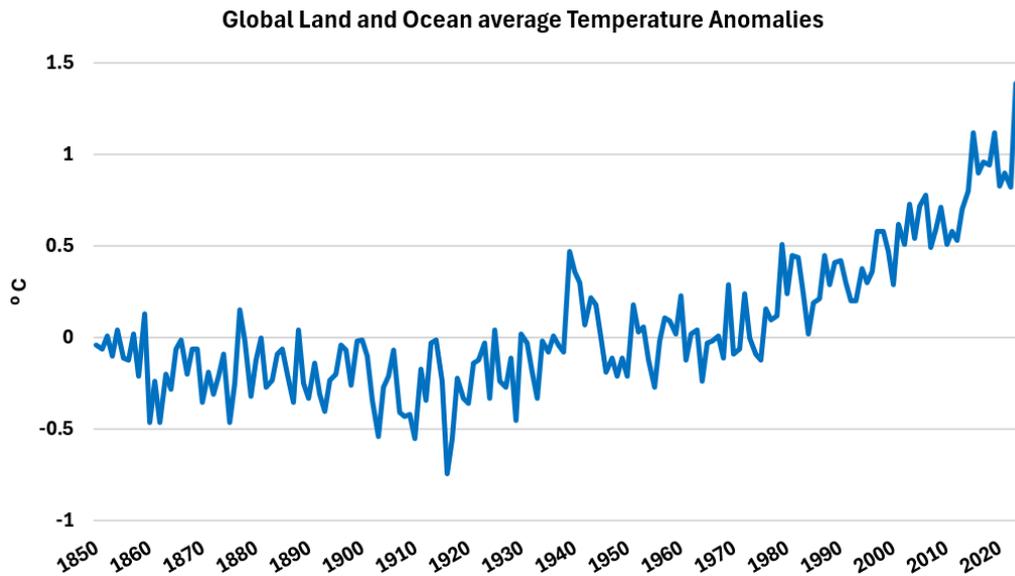


Figura 15: Anomalía térmica anual con respecto a la media (1900-2000). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NOAA: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>

Como consecuencia de ello, los fenómenos climáticos extremos son más frecuentes. Así, los eventos como olas de calor, sequías prolongadas, tormentas más intensas o grandes inundaciones se han vuelto más comunes y severos. Europa, durante el año 2023 sufrió una sequía intensa [17], que afectó a países como España, Francia o Italia, impactando a la agricultura y los ecosistemas naturales. Además, consecuencias como el deshielo y el nivel del mar a causa del calentamiento puede amenazar las distintas infraestructuras costeras europeas y muchas zonas habitables de personas que residen en zonas bajas en Italia, España u Holanda.

En segundo lugar, la calidad del aire y la salud pública están en riesgo. La emisión de CO₂ está asociada a otros contaminantes que pueden estar asociados a enfermedades y problemas de salud para el ser humano. Las emisiones derivadas de actividades como la quema de combustibles fósiles por el transporte o a generación de energía incluyen contaminantes como:

- Partículas finas (PM_{2.5}): Estas, son partículas de carácter sólido o líquido que se encuentran suspendidas en el aire. Tienen un diámetro inferior a las 2.5 micras y pueden tener efectos muy nocivos sobre la salud. Pueden introducirse en el cuerpo mediante la inhalación o la mucosa tragada. Las partículas más pequeñas pueden llegar a penetrar hasta los bronquios o incluso alveolos pulmonares, pudiendo pasar potencialmente al sistema circulatorio. Como consecuencia, se pueden desarrollar problemas como empeoramiento de la función pulmonar, crisis asmáticas o problemas cardíacos [18].

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x): Este es un grupo de gases con alta capacidad reactiva que contienen oxígeno y nitrógeno en proporciones distintas. Muchos no tienen color ni olor, pero el dióxido de carbono (NO₂) genera la característica capa oscura que cubre diversas urbes. Estos compuestos se generan al quemar combustible y las principales fuentes son el tráfico rodado, la generación eléctrica y otras fuentes tanto industriales como domésticas que precisan la quema de combustible. Pueden tener efectos adversos sobre la salud (afectando al sistema circulatorio y respiratorio) y el medio ambiente (provocando acidificación y limitando el crecimiento vegetal), además de ser precursores de la formación de ozono [19].

Las estimaciones de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) indican que la exposición a partículas finales del aire contribuyó a alrededor de 379,000 muertes prematuras en 2018 en la UE [20]. Reducir las emisiones de CO₂ mediante la transición energética también mitiga estos efectos colaterales, lo que resalta la importancia de invertir en soluciones integrales que aborden simultáneamente las emisiones de carbono y la calidad del aire.

Finalmente, los efectos sobre los océanos y su biodiversidad deben ser considerados. El océano actúa como un sumidero de carbono, absorbiendo hasta el 31% del CO₂ generado por el ser humano [21]. Esto provoca distintas consecuencias. Por un lado, disminuye el pH oceánico, aumentando su acidez. Desde la era preindustrial, el pH disminuyó desde un promedio estable de 8.2 hasta 8.1, lo que significa que son un 30% mayor de acidez en los últimos años. Además, según el OPCC, este indicador podría disminuir hasta los 7.8 puntos, resultando en unos océanos un 150% más ácidos que hace 2 siglos [22]. Por otro lado, y como consecuencia de lo anterior, los organismos calcificadores como corales, moluscos o crustáceos pueden ver debilitados sus esqueletos y estructuras de carbonato cálcico, afectando y poniendo en riesgo a ecosistemas completos como los arrecifes de coral, que son hábitats naturales para miles de especies marinas [23].

Además de estos aspectos en materia de salud o ambiental, existe una segunda derivada, relacionada con el concepto de la “externalidad económica”.

Según Economipedia, “una externalidad es una situación en la que los costes o beneficios de producir o consumir un bien o servicio no se reflejan en su precio de mercado”. Es decir, las externalidades son efectos que una actividad genera sobre terceros, sin que estos reciban una compensación o asuman un coste por ello. De este modo, por ejemplo, el Estado invierte cantidades significativas en sus ciudadanos (en educación, transporte o salud) con la expectativa de que estos contribuyan productivamente a la sociedad. Sin embargo, si una persona enferma o fallece prematuramente debido a la exposición a elementos

contaminantes, incurre en un elevado coste sanitario y deja de aportar valor económico durante los años que deja de vivir. Esto implica una pérdida directa de productividad nacional, además de los daños psicológicos para su entorno. De hecho, la OCDE estima que la pérdida de productividad laboral, el aumento de los gastos sanitarios y la disminución de los rendimientos agrícolas del aire podría asociados a la contaminación del aire suponer hasta un 1% del PIB mundial en 2060 [82], y en Estados Unidos se calcula que provoca anualmente unos 16,000 nacimientos prematuros con un coste asociado superior a 4,000 millones de dólares [83].

2.3.2. Metano

El metano, pesar de representar un porcentaje muy inferior en volumen con respecto al CO₂ en emisiones, presenta un potencial muy alto para facilitar el efecto invernadero, haciéndolo el segundo contribuyente más importante al calentamiento después del ya mencionado dióxido de carbono. Según datos de la Nasa [34], este gas metano es capaz de atrapar más calor que el CO₂, pero su vida es mucho menor en la atmósfera (10 años vs cientos de años en el caso del CO₂), representando así una oportunidad accionable más rápida que el CO₂ para reducir el efecto invernadero. Según estimaciones, alrededor de un 60% de las emisiones totales de metano están relacionadas con factores o actividades de origen antropológico, causando un aumento en la cantidad de este gas en la atmósfera que se ha duplicado en los últimos 200 años. Desde los años 80, ha seguido aumentando casi un 20% hasta 2023.

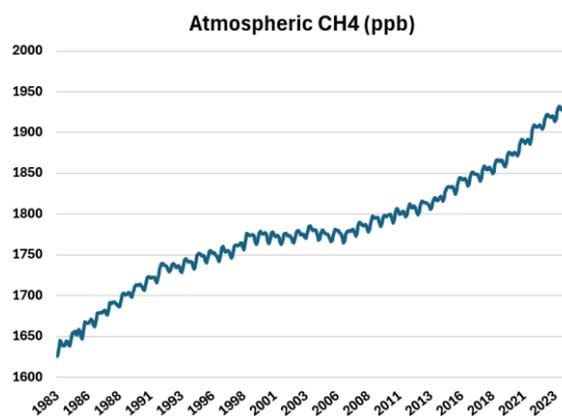


Figura 16: Concentración de Metano atmosférico (partes por billón) Fuente: Nasa.

2.4. Objetivos actuales de la UE para el Net Zero

La Unión Europea, con el objetivo de ser neutra en carbono para el año 2050, ha comenzado con objetivos a menor plazo, como es el caso de 2030. Así, con el objetivo de reducir las emisiones en un 55% para ese año, y en el contexto del Pacto Verde Europeo [24], se lanza

el Objetivo 55. Este paquete de medidas pretende modificar la legislación europea, adaptándola hacia el objetivo mencionado anteriormente. Se pretende generar un marco económico, social y legal que asegure una transición energética equitativa, manteniendo la innovación y una industria competente a la vez de sustentar y reforzar la posición dominante de la unión en la lucha contra el cambio climático. Así, el mencionado paquete incluye diferentes medidas, entre las que destacan:

- **Reforma del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión:** Este mercado de carbono permite intercambios de derechos de emisión para los distintos actores en los sectores de generación, gran consumo de energía o la aviación comercial dentro del EEE. Además, es una herramienta que ha conseguido disminuir las emisiones en la UE hasta un 41% desde el año 2005 [25]. Entre las medidas reformistas destacan ampliar nuevos sectores cubiertos por el RCDE, como el transporte marítimo, modificar el que afecta a edificios y tráfico, la supresión de derechos de emisión gratuitos para algunos sectores y mayor financiación para descarbonizar los sectores actualmente incluidos en el Régimen.
- **Creación del Fondo Social para el Clima:** Este instrumento pretende ayudar financieramente a particulares y empresas afectadas por la reforma mencionada en el punto anterior. Así, las empresas que vendan combustible pagarán por sus derechos de emisión asociados a su actividad y los ingresos procedentes de la venta de estos derechos se incluirán en el fondo. De este modo se pretende ayudar a hogares, microempresas y usuarios del transporte vulnerables. El fondo contará con hasta 65,000 millones de euros de financiación para los estados miembros entre 2026 y 2032 [25].
- **Creación del Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono:** Para compensar la posible fuga de carbono (traslado de la producción de empresas intensivas en carbono a países con políticas de emisión más laxas) de sectores como el cemento, el acero o la electricidad, se obligará a los importadores de productos creados fuera de Unión a comprar certificados MAFC para compensar esa diferencia de precios (ya que aquellos que siguen produciendo en la UE deben comprar derechos de emisión, encareciendo sus precios de venta) [25]. Con esta medida se pretende incentivar a países externos a fijar políticas de precios del carbono. Además, está previsto abarcar más sectores en el futuro dentro del mecanismo.
- **Revisión del reglamento del Reparto del Esfuerzo:** Este reglamento establece ciertos objetivos de reducción de emisiones de GEI en distintos sectores (transporte por carretera, agricultura, edificios, pequeña industria y residuos), que suponen un

60% de las emisiones de la UE. Los objetivos actuales pretenden reducir un 29% las emisiones totales de los sectores mencionados con respecto a 2005, y mediante los nuevos objetivos se pretende incrementar hasta un 40% de reducción [25]. Además, cada Estado contribuirá de manera proporcional, garantizando una reducción igualitaria, como se muestra en el siguiente gráfico:

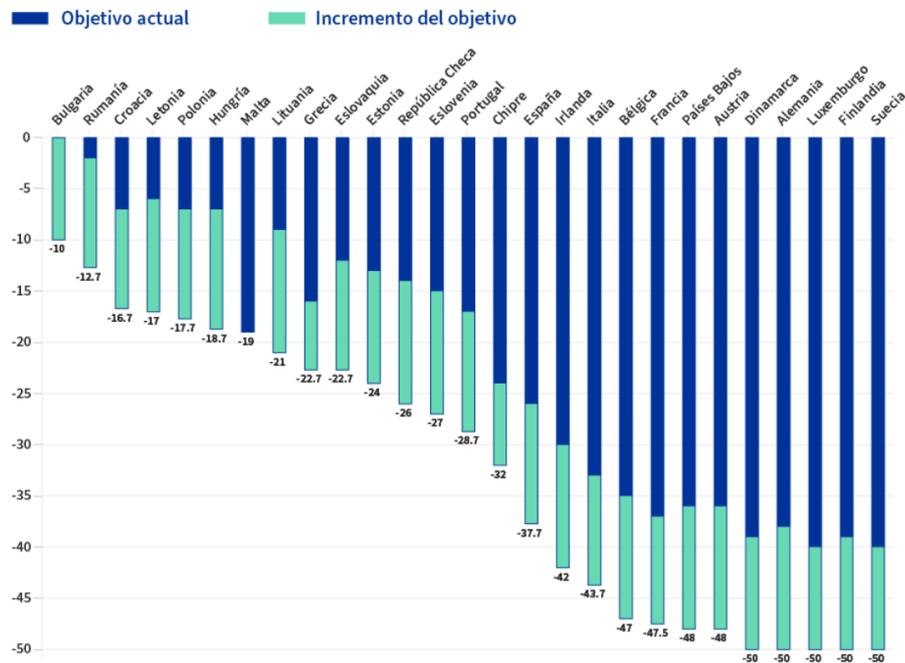


Figura 17: Reducción de emisiones por país con respecto a 2005, fijados dentro del Objetivo 55. Fuente: <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-effort-sharing-regulation/>

- **Revisión límites de emisiones de CO2 de turismos y furgonetas nuevos:** Se pretende mediante esta revisión agilizar la transición hacia movilidad de emisión baja (o cero). Actualmente, estos dos tipos de vehículos suponen un 15% de las emisiones totales de CO2 de la Unión. Se establecen mediante esta propuesta mayores reducciones con un horizonte de reducción del 100% de las emisiones para el año 2035 [25]. Así, todos los turismos y furgonetas nuevas que se introduzcan al mercado de la UE a partir de ese año deberán ser vehículos con cero emisiones. A continuación, se muestra el plan de reducciones actualizado mediante esta revisión.

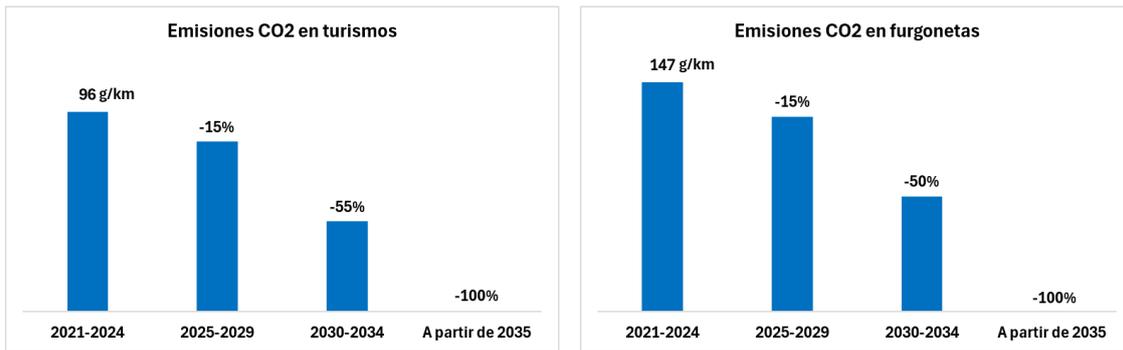


Figura 18: Límites emisiones de turismos y furgonetas nuevas hasta 2035. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Consejo Europeo: <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/>

- **Reducción de emisiones de metano en el sector energético:** Estas nuevas normas, adoptadas en mayo de 2024 por el Consejo, pretenden reducir la cantidad de metano emitido a la atmósfera. Según datos de la EEA, este gas es el segundo después del CO2 en términos de emisiones, pero tiene mayor capacidad para retener calor en el planeta, siendo un GEI considerablemente más potente (en un período de 20 años, el metano tiene 84 veces mayor potencial para el calentamiento global que el dióxido de carbono) [25]. Se pretenden tomar medidas que incrementen las medidas e informes por verificadores independientes. Entre las medidas para reducir las emisiones se encuentran la monitorización de las empresas de petróleo y gas para detección de fugas y necesidades de reparaciones mediante tecnologías (sensores en red, cámaras ópticas, espectroscopía, etc), la mejora de gestión de pozos abandonados y la obligación de incrementar la trazabilidad de las emisiones asociadas a las importaciones de energía, entre otras.
- **Revisión de la Directiva de Eficiencia Energética:** Al mejorar la eficiencia energética, se reduce el consumo en sí, lo que se traduce en menos emisiones de GEI, menor contaminación, una energía más asequible para el ciudadano y una dependencia reducida de la importación de combustibles fósiles. Mediante esta revisión, se pretende reducir un 11.7% el consumo final de energía para 2030 en comparación con las previsiones y objetivos marcados en el año 2020. Se pretende incrementar el descenso del 35.5% tanto para el consumo primario como final (establecido en el objetivo actual) hasta un 40.6% para el primario (indicativo) y un 38% el final (de manera obligatoria). Se reducirá así el consumo final desde los más de 1,000 millones de toneladas equivalentes de petróleo en 2007 hasta los 763 en 2030 (en 2023, el número fue de 894 millones de toneladas equivalentes). Los principales sectores afectados serán el parque inmobiliario, la industria y el transporte.

- **Revisión de la Fiscalidad de la Energía:** Esta iniciativa pretende asegurar unas tasas impositivas más altas asociados a los combustibles más contaminantes, de modo que genere incentivos en productores y consumidores para asumir prácticas más sostenibles. Así, la actualización propuesta se basa en dos áreas principales. Por un lado, modificar la estructura de las tasas mínimas, basándolas en el contenido energético real y el rendimiento de los combustibles, en lugar de depender únicamente del volumen bruto de ventas. Por otro lado, el total de productos sujetos a ser gravados se extenderá, acabando con excepciones actuales. De este modo, en los próximos años se verán afectados los precios del carbón, gas y petróleo y los combustibles para la aviación y el transporte marítimo como el queroseno o el petróleo pesado verán un incremento gradual en sus impuestos (mientras que los combustibles sostenibles se beneficiarán de tasas mínimas del 0% para impulsar su adopción).

3. Transición hacia el objetivo Net Zero

3.1. Infraestructura necesaria para la transición

Para entender las necesidades de infraestructura que la Unión precisa durante las próximas décadas, es necesario segmentarla en dos grupos principales: generación y demanda. La demanda, a su vez, se puede dividir en los principales vectores de demanda de energía (edificios, transporte e industria).

3.1.1. Generación

En primer lugar, para comprender la capacidad de generación limpia necesaria, se requiere analizar el mix energético actual de generación, además de equiparlo con la demanda proyectada para comprender los requerimientos contemplando un escenario Net Zero en 2050.

El mix de producción eléctrica ha variado desde 1990, como se puede observar en la siguiente figura, con un crecimiento significativo de energías renovables a partir del año 2000. Las fuentes combustibles se han visto desplazadas, disminuyendo su porcentaje en la producción desde el 54.5% en 1990 hasta un 37.3% en 2023 [26]. En contraparte, las energías renovables como solar y eólica, han visto como su cuota aumenta desde un 0% y 0.8% respectivamente en el año 2000 hasta el 9.2% y 17.4% en 2023. En términos absolutos, la generación de energía eléctrica de la UE ha crecido desde los 2,275.3 TWh en 1990 hasta 2,750.9 TWh en 2023.

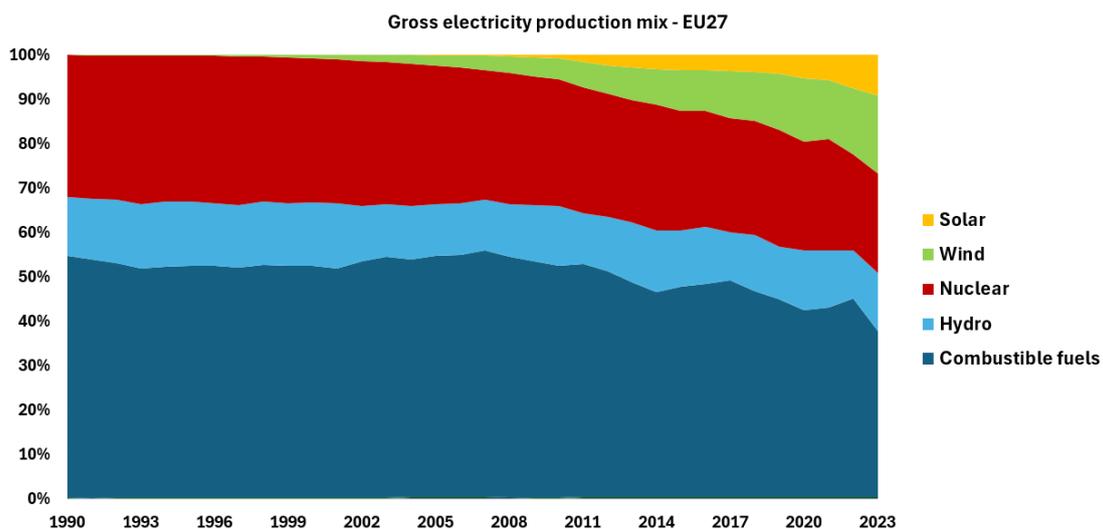


Figura 19: Mix de producción eléctrica EU27 (1990-2023). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat.

Como consecuencia de esta evolución, si se tiene en cuenta la intensidad en gases de efecto invernadero de la generación, se puede observar una tendencia a la baja desde 1990 [27]. Sin embargo, es necesario aumentar la tendencia de descenso actual, si se quiere alcanzar el objetivo 55 para 2030 (55% de reducción con respecto a 1990, en naranja). La intensidad de emisiones se calcula como la división entre las emisiones asociadas a la electricidad de la UE y la producción bruta de electricidad (en kWh).

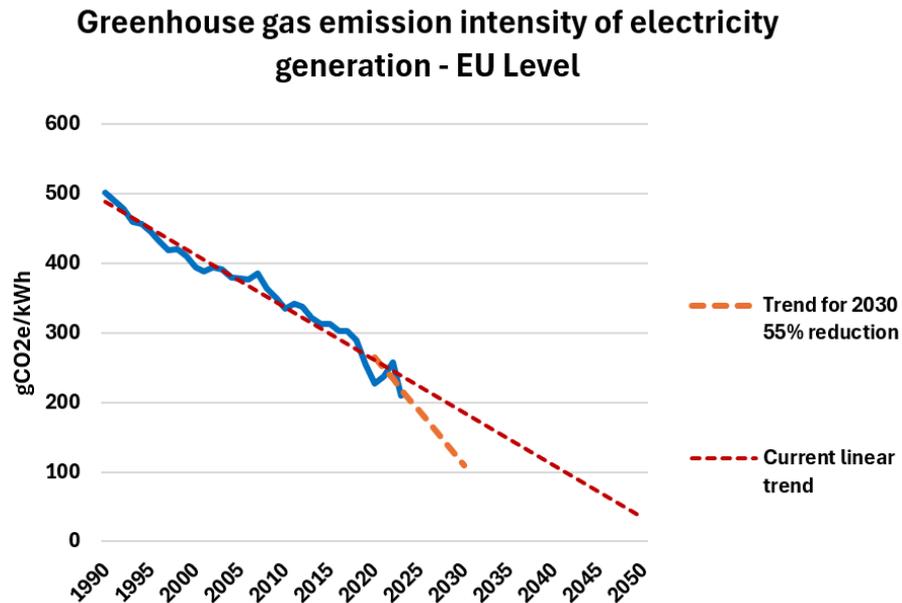


Figura 20: Intensidad de emisiones por generación de electricidad (gCO₂ equivalentes / kWh). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la EEA.

De este modo, y basado en las estimaciones de la Comisión Europea, las décadas venideras requerirán una inversión elevada (que vaya incrementándose) para descarbonizar la generación. Según dichas estimaciones, la demanda eléctrica verá un aumento de entre un 31% hasta un 34% si se comparan datos de 2021 y proyecciones [28], en función del escenario considerado. Así, se espera un incremento de la generación desde los 2,750 TWh en 2023 hasta 3,360 TWh en 2030 [28]. Para las dos siguientes décadas se espera un crecimiento más pronunciado llegando hasta los casi 7,000 TWh en 2050.

Es importante destacar los 3 escenarios considerados por la UE para las distintas estimaciones:

- S1: Este escenario se basa principalmente en las tendencias energéticas establecidas en el paquete *Fit-for-55*, lo que le permite seguir una trayectoria de reducción lineal de las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) entre 2030 y 2050. No

considera medidas específicas adicionales para mitigar las emisiones no relacionadas con el CO₂ más allá de su evolución predeterminada dentro del marco regulatorio actual [29].

- S2: En este caso se asume una reducción de al menos el 85% de las emisiones en 2040, de modo que (y añadido a la tendencia del S1) se incluye un desarrollo más fuerte de las tecnologías de captura de carbono y combustibles sostenibles o “e-fuels”, además de asumir un descenso de otros GEI como el metano por parte del sector agrícola [29].
- S3: Este último escenario considera una reducción de al menos el 90% y asume una industria completamente capaz de capturar CO₂ en todos los procesos industriales, además de aumentar el consumo y producción de “e-fuels” [29].

Este crecimiento no se podría entender el correspondiente cambio en el mix energético. Como se muestra a continuación, se espera una disminución pronunciada de los combustibles fósiles como fuente de energía para la generación eléctrica, además de un crecimiento nunca visto para las fuentes renovables. La energía nuclear se disminuirá en menor medida que los fósiles, pero se mantendrá siempre una base de generación, necesaria para la estabilización del mercado y mitigación de picos de demanda. De este modo, para alcanzar niveles altos de fuentes de energías limpias en 2050, la UE deberá contar con más de un 85% de generación renovable, un 10-15% de generación mediante energía nuclear y una parte residual de combustibles fósiles.

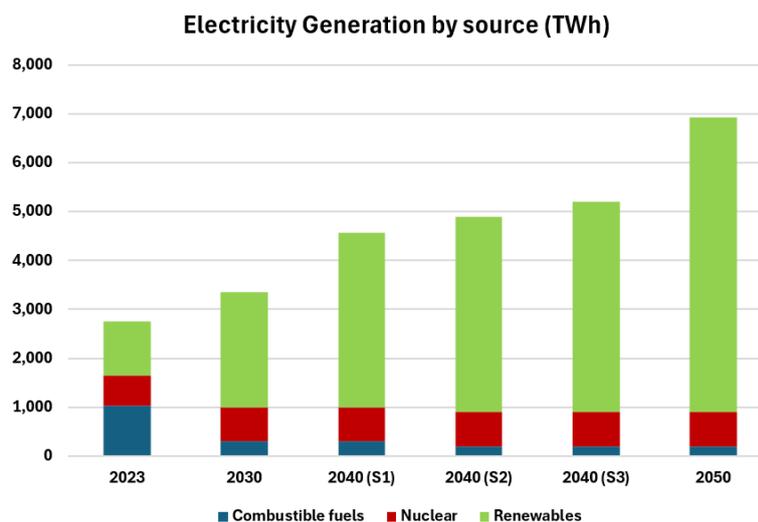


Figura 21: Mix energético de generación proyectado (2023 – 2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Este incremento en generación requerirá de un aumento proporcional de la capacidad a nivel europeo, especialmente en términos de energía fotovoltaica y eólica. Así, y según los

escenarios establecidos, habrá un aumento de capacidad anual de unos 80 GW al año en la década actual, entre 60 y 100 GW en la década 30-40 y entre 80 y 120 GW para los años 40 a 50 [28]. Si se comparan estos números con las dos décadas anteriores, es evidente el aumento y las enormes necesidades que esto conllevará.

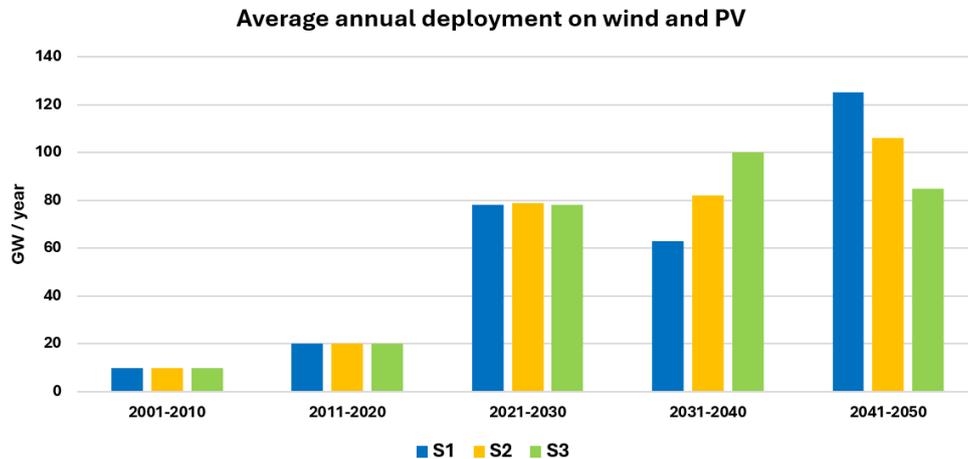


Figura 22: Incremento anual de capacidad de energía eólica y fotovoltaica en la UE [GW]. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Cabe destacar, que este cambio en producción y en mix, acarreará un requerimiento importante de materiales y materias primas. Según el escenario S3, haría falta implementar, aparte de fotovoltaica y eólica, tecnologías tales como baterías para almacenar energía y así poder suplir aquellos momentos de desacople entre generación y demanda, así como electrolizadores y bombas de calor para calefacción. Esto implicaría un total de 500,000 toneladas de cobre para cada año entre 2030 y 2040, lo que representaría entorno a un 20% de la demanda mundial de cobre anual que hubo en 2022 [28]. Además, el desarrollo eólico podría implicar necesidades de 50 mil toneladas de manganeso y 125 mil toneladas de cobre al año, mientras que la solar añadiría demanda de 50 toneladas de galio y 3,000 de germanio anualmente. Por otro lado, las baterías requieren aluminio, litio y cobalto, contando con necesidades de 900 mil, 80 mil y 60 mil toneladas respectivamente de estos materiales.

Los otros dos escenarios representan unas necesidades más reducidas de este tipo de materiales, ya que la capacidad instalada necesaria es un 16% menor para el S1 y un 7% menor para el S2.

3.1.2. Demanda

En el otro lado de la ecuación está la demanda. Esta se puede dividir en distintas partes o vectores, que se revisarán a continuación.

Edificios

El área que ocupan los edificios de carácter residencial crecerá, según espera la UE, hasta un 26% para el año 2050 (comparado con 2015) [28]. Una población que se mantendrá estable hasta entonces, sumada al decrecimiento de las personas por vivienda y el aumento del área de cada nueva vivienda comparada con las actuales resultará en estos números para 2050. Sin embargo, en cuanto a edificios para uso comercial o de servicios se refiere, el crecimiento se espera nulo o incluso negativo para las próximas décadas. En 2022, los edificios residenciales representaron un 26.9% del consumo final de energía [30]. Según indica la UE, el modo de emplear los edificios como una herramienta más para alcanzar los objetivos medioambientales es mediante la eficiencia energética de los mismos. Gracias a esto se podría reducir el consumo necesario de electricidad en los inmuebles, además de disminuir las necesidades de los sistemas de calefacción y refrigeración.

Esta eficiencia se puede entender de dos modos. Por un lado, para los inmuebles ya construidos, se trata de renovar las calderas de gas y gasóleo por bombas de calor y mejorar el aislamiento térmico de los mismos para así reducir su necesidad de calefacción y refrigeración, haciéndolos menos sensibles a la temperatura exterior y por tanto reduciendo su consumo energético además de emplear equipamiento con cada vez mejor eficiencia a la hora de consumir electricidad (ya sea para calentar, enfriar o incluso cocinar). Por otro lado, para aquellos de nueva construcción se trata de adherirse a los nuevos estándares y normativas, como por ejemplo la EPDB [31] que tiene en cuenta los factores necesarios para alcanzar los objetivos.

Todas estas medidas y cambios pretenden conseguir reducciones importantes de demanda en lo que a edificios se refiere, consiguiendo ahorros energéticos de hasta el 38% para 2040 y el 40% en 2050. Es importante indicar que la mayoría de este ahorro vendría gracias a los edificios residenciales (44% vs 31% en servicios para 2050), especialmente en la reducción de uso energético para la calefacción, calentamiento de agua y cocinado de alimentos derivado principalmente del uso de bombas de calor. Otros usos como alumbrado del hogar, electrodomésticos o refrigeración no se verían tan afectados considerando el total de la Unión Europea. Estos aspectos se pueden ver claramente reflejados en las figuras a continuación:

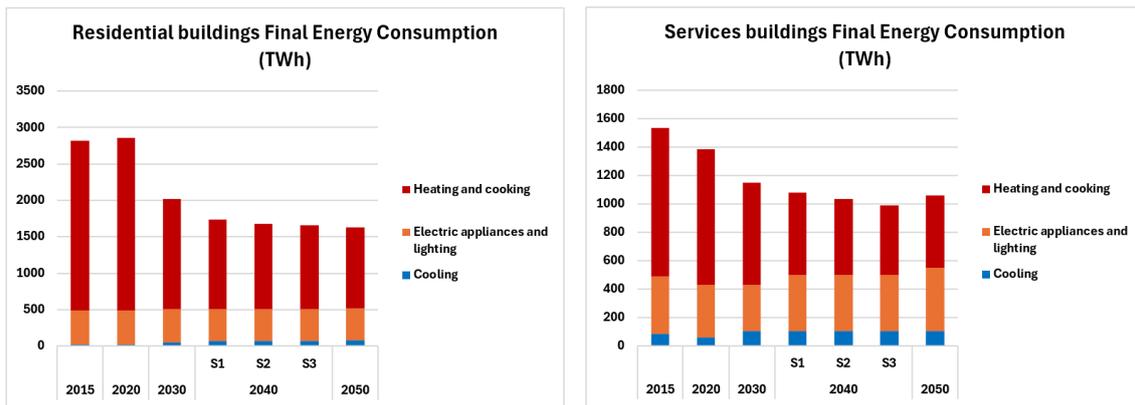


Figura 23: Evolución del consumo energético en edificios (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Esta reducción de consumo de energía final relacionada con calefacción vendrá gracias a los remodelados indicados anteriormente de los sistemas de aislamiento térmico de los edificios. Así, se espera que las tasas de renovación crezcan en la presente década para luego disminuir en las siguientes, pero siempre por encima del ritmo de renovaciones actual o pasados. Como se puede observar en los siguientes gráficos, los escenarios S1 y S3 son contrarios en cuanto a tiempos se refiere, con el primero siendo más pesimista con la proximidad a estos cambios y el segundo asumiendo un mayor ritmo en las décadas más cercanas.

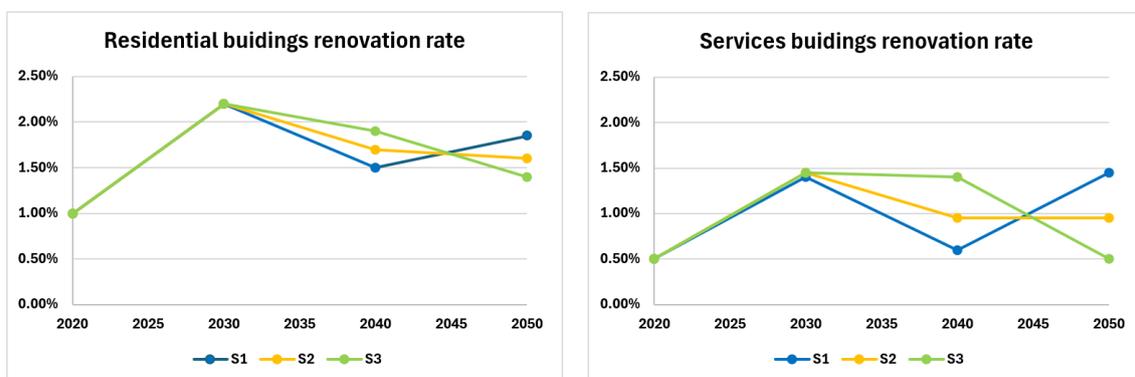


Figura 24: Tasas de renovación esperadas en edificios residenciales y de servicios (2020-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Gracias a esto, se conseguiría una renovación del 55% de los edificios residenciales para 2050 y hasta un 32% en el caso de los de servicios para le mismo año, en términos de aislamiento térmico.

Teniendo en cuenta todos estos cambios, se espera un desplazamiento en las fuentes de energía que suplan la demanda en los edificios. Especialmente, se espera un crecimiento de la electrificación que consiga suplir al gas natural o a los derivados del petróleo a la hora de

abastecer las necesidades energéticas de este sector. Así, la electricidad como fuente cambiará su representación desde el 30% en 2015 hasta casi un 70% del total para el año 2050:

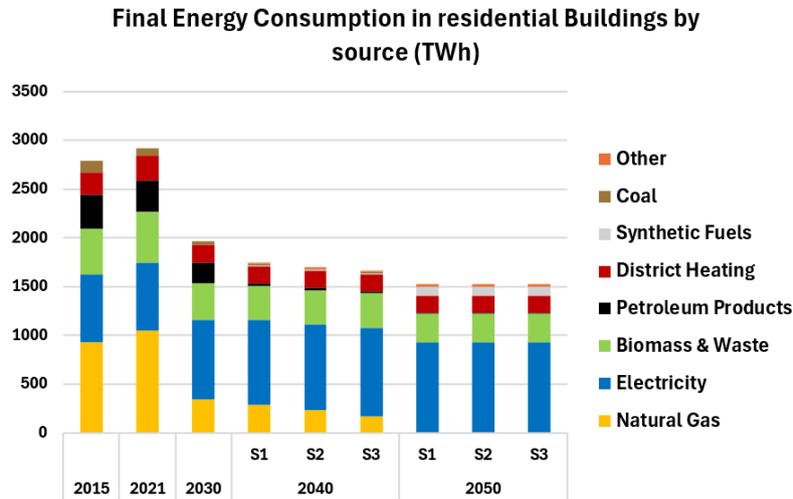


Figura 25: Mix de energía consumida por edificios residenciales (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Este cambio implicará como se ha indicado, un incremento altamente notable de tecnologías como bombas de calor, cambiando la manera en la que los hogares se calientan durante el invierno, de modo que el consumo eléctrico no aumente de manera drástica a la vez que aumenta la adopción de esta tecnología gracias a su alta eficiencia.

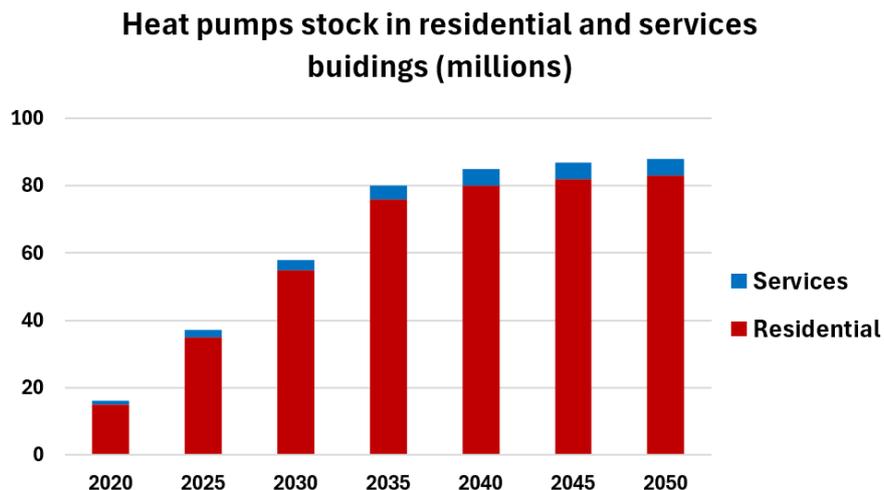


Figura 26: Número de bombas de calor en la UE (2020-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Transporte

En el caso del transporte, al igual que en el apartado anterior se espera un crecimiento de la actividad, pero a su vez un decrecimiento de la energía empleada para el mismo, debido en gran medida a la electrificación generalizada de los vehículos terrestres. Si se observa la actividad (medida en trillones de pasajeros-kilómetro) de transporte no relacionado con mercancías, se espera un crecimiento de hasta un 28% para el año 2050 [28], destacando el aumento en segmentos como el tren o la aviación no doméstica en la Unión. Esto se debe principalmente a la preferencia estructural por el coche privado, el crecimiento de población urbana alrededor de grandes ciudades y a cambios tecnológicos como los vehículos autónomos (si bien podría reducir el número de coches en propiedad, podrían aumentar los kilómetros recorridos si la comodidad y el bajo coste incentivan su uso frente al transporte público).

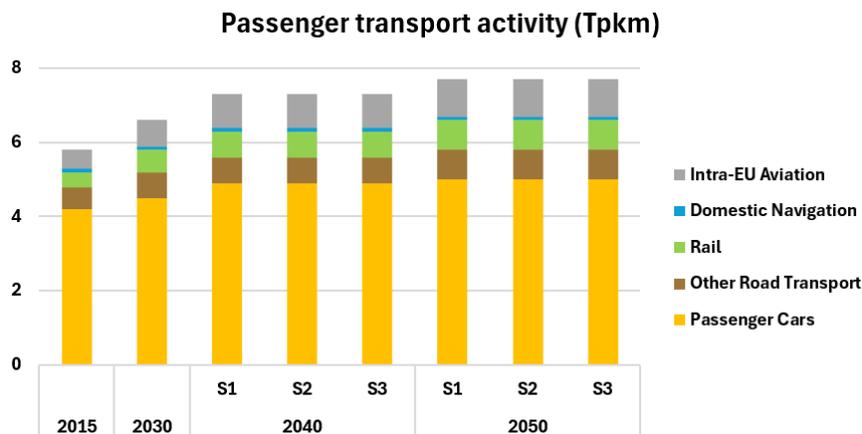


Figura 27: Evolución transporte de pasajeros (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Así, al analizar el mix energético en el sector del transporte, se evidencia que el consumo de combustibles fósiles en la UE se pretende reducir drásticamente, pasando de casi 3700 TWh en 2015 a entre 136 y 180 TWh en 2050 (reducción del 95–96%) [28]. Paralelamente, el consumo de electricidad en transporte se incrementará de menos de 60 TWh en 2015 a 490–500 TWh en 2040 y 615–630 TWh en 2050, representando el 15–16% y el 17% de la electricidad final consumida en la UE, respectivamente [28]. Este fuerte cambio de mix no implica una sustitución directa uno a uno entre energía fósil y electricidad, sino que se apoya en la mayor eficiencia energética de los motores eléctricos frente a los de combustión interna: mientras que un motor térmico típico convierte en movimiento solo el 20–25 % de la energía del combustible, un motor eléctrico puede alcanzar eficiencias del 85–90 %. Esto

implica que, para realizar la misma cantidad de trabajo (por ejemplo, mover un vehículo la misma distancia), se requiere mucha menos energía final si esta proviene de electricidad. Por ello, la electrificación permite reducir drásticamente el consumo total de energía en el transporte, incluso en un contexto de crecimiento de la actividad. Además, la demanda de hidrógeno crecerá de casi nula en 2015 a 405–465 TWh en 2050, requiriendo fuentes de electricidad renovable para su producción [28]. Se espera que otras fuentes como los e-fuels o biofuels crezcan, pero en menor medida y aún así contribuyendo a desplazar a los derivados del petróleo como fuentes de energía para el transporte en la UE para el año 2050.

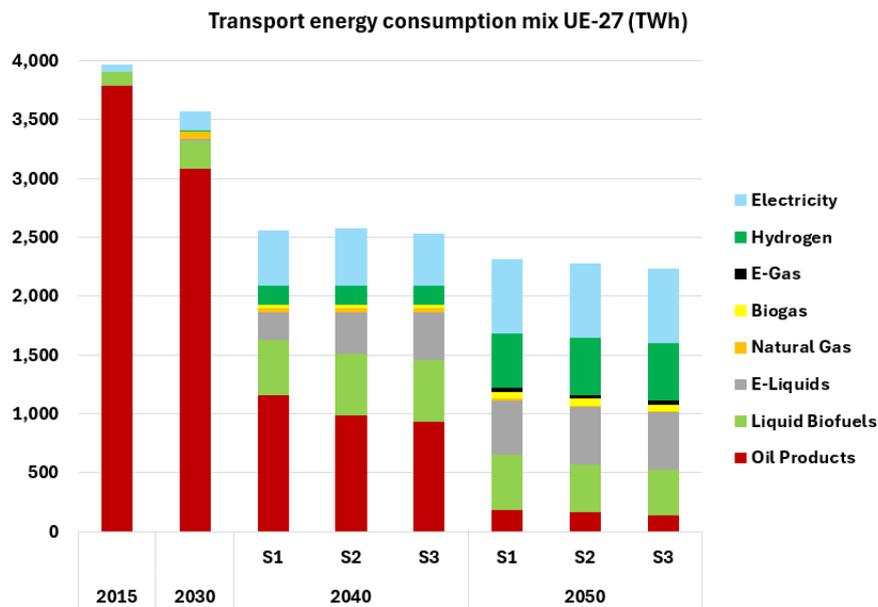


Figura 28: Mix de energía consumida por el sector transportes (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Industria

La industria, representa aproximadamente un 30% de las emisiones totales de la Unión [35]. Es importante diferenciar en el caso de la industria, la energía empleada para alumbrado, calor o uso de maquinarias (75% de la energía en 2019) [84] de la energía usada directamente como materia prima para los procesos, como puede ser la transformación de derivados del petróleo en plástico o bien el betún para el asfalto (25% de la energía industrial en 2019).

Para las distintas proyecciones de consumo de energía hasta 2050, la UE asume diferentes porcentajes de crecimiento de los principales materiales producidos mediante los procesos industriales relevantes para este apartado. Así, se espera que el acero se mantenga estable,

mientras que otros materiales como el aluminio, cemento o petroquímicos crezcan un 35%, 20% y 25% respectivamente, comparados con la producción media de 2025-2020. Otros, como el papel se espera que aumenten en menor medida, más cercano al 5% [28].

Teniendo en cuenta la energía final, se espera que disminuya hasta un 40% en términos totales cuando se compara con 2015 [28], o un 32% desde 2019 [79]. Además de disminuir, se espera que el mix cambie de manera notable, con la electricidad pasando de ser minoritaria (28%) hasta ser la fuente de más del 60% de la energía consumida por la industria, desplazando a los combustibles fósiles y al gas natural (que se espera que desaparezca por completo de este mix para el año 2050 en todos los escenarios considerados).

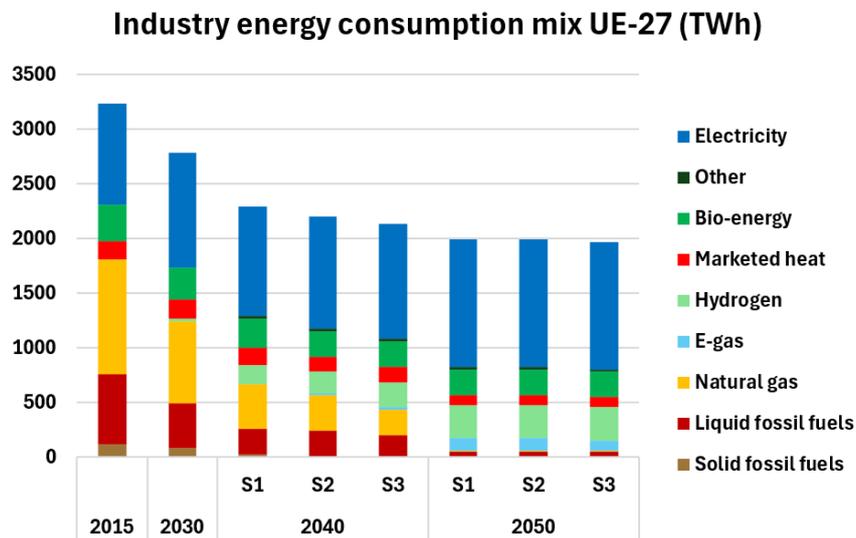


Figura 29: Mix de energía consumida por la industria (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Por otro lado, la materia prima empleada para fabricar productos será difícilmente reemplazable debido a la naturaleza de los mismos. De este modo, no se esperan grandes cambios en las próximas décadas hasta 2050, cuando puede aparecer el hidrógeno como alternativa, desplazando levemente otras materias como combustibles fósiles, pudiendo reducir su consumo en un 10% aproximadamente.

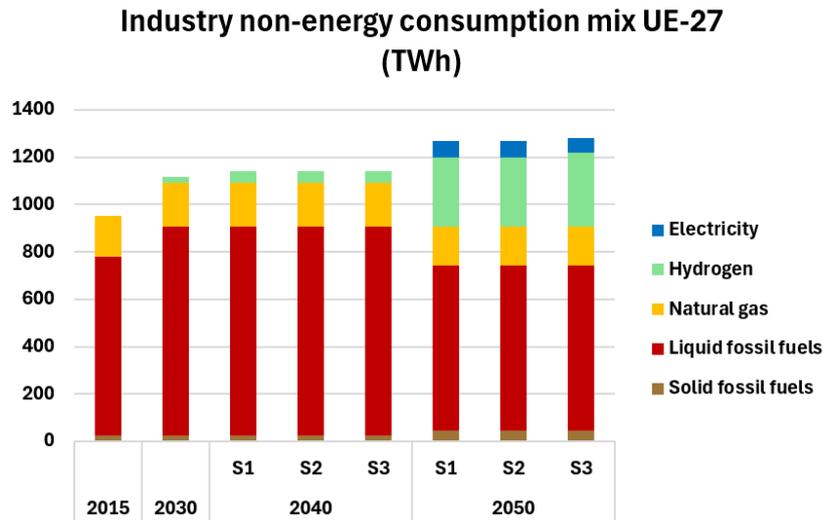


Figura 30: Mix de energía empleada como materia prima por la industria (2015-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.2. Requerimientos de inversión

Para conseguir la transformación necesaria en la infraestructura expuesta en el punto anterior, será necesaria una inversión sin precedentes hasta el año 2050. En este apartado se explican las estimaciones de la Unión Europea [28] sobre estas cantidades para poner en perspectiva la envergadura real del desembolso requerido.

3.2.1. Generación

Las necesidades principales, como se ha indicado anteriormente, se basarán en incrementos en la capacidad de la red y un desarrollo e instalación de fuentes renovables (principalmente eólica y solar). Además, debido a la naturaleza variable de las renovables, será necesario desarrollar capacidad para almacenar energía eléctrica, de modo que pueda emplearse en momentos en las que, por ejemplo, exista ausencia de sol o viento. Como consecuencia también del desarrollo de estas tecnologías, la diseminación de las plantas de producción (en búsqueda de situaciones geográficas óptimas para maximizar la producción) acarreará un inevitable escalado y mejora de la red de transmisión y distribución eléctrica europea. Se esperan así unas necesidades promediadas de unos 140 mil millones de euros en producción anuales (con un 80% de estas de origen renovable), unos 85 mil millones en desarrollo de la red y entre otros, unos 8 mil millones para el desarrollo e implementación de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica [28]. En la figura 31 se puede observar un resumen de las necesidades en generación en función de los distintos escenarios considerados.

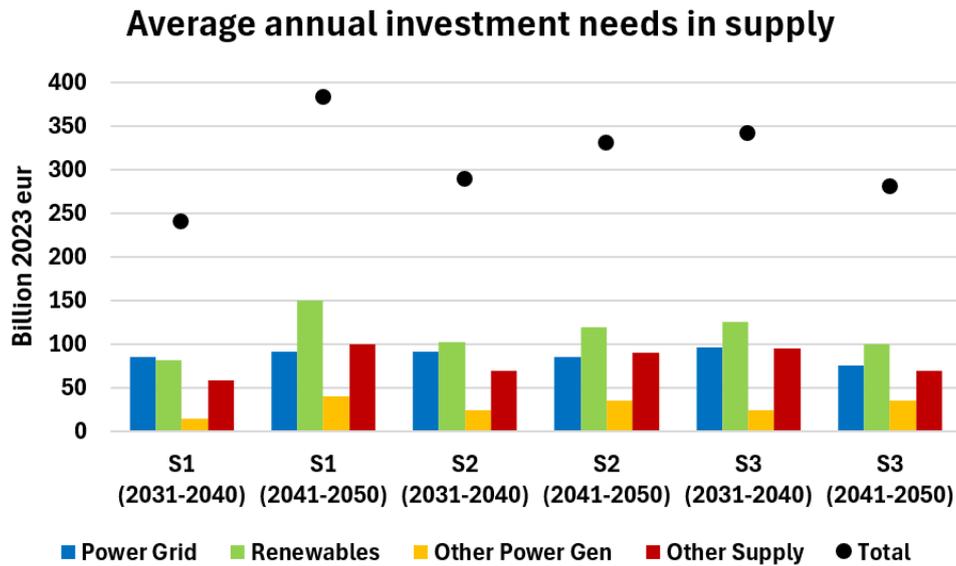


Figura 31: Inversión media anual necesaria en generación (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Teniendo en cuenta estas necesidades en renovables y la instalación estimada del punto 3.1.1, con un rango de unos 80-100 GW extras instalados anualmente, se llega a un coste estimado de 1,261,224 €/MW en la década de 2030-2040 y unos 854,054 €/MW en la siguiente década hasta 2050, algo en línea con los costes actuales e incluso rebajándolos.

3.2.2. Demanda

Del mismo modo que en apartado 3.1.2, la demanda se dividirá en este en edificios, transporte e industria, consiguiendo que la segmentación permita un entendimiento más claro de las necesidades de inversión. Finalmente se mostrará una tabla agregada a modo de resumen.

Edificios

Tanto en el caso de los edificios de servicios o comerciales como para los residenciales, las necesidades monetarias estarán centradas principalmente en sustituir las tecnologías actuales aún dependientes de gas y petróleo para calefacción y refrigeración por nuevas opciones no emisoras. Las construcciones nuevas no representarán más del 4% de las necesidades totales de inversión, mientras que las renovaciones de los edificios actuales estarán en torno al 20% del total del coste anual. Finalmente, las necesidades de equipos energéticos nuevos como calefacción, refrigeración, electrodomésticos o alumbrado representarán el grueso de la inversión, contando con más del 70% de las necesidades totales de inversión.

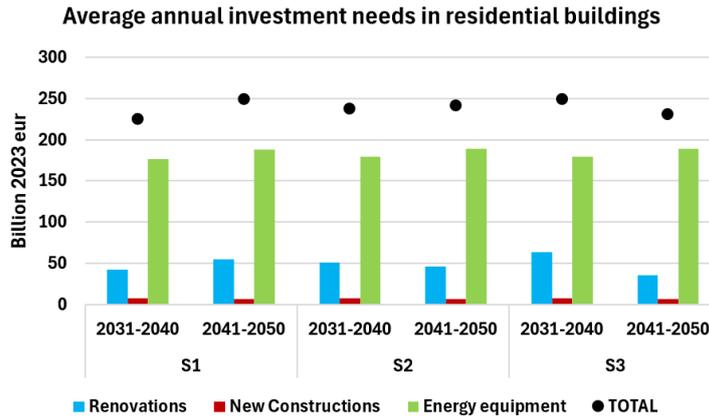


Figura 32: Inversión media anual necesaria en edificios residenciales (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

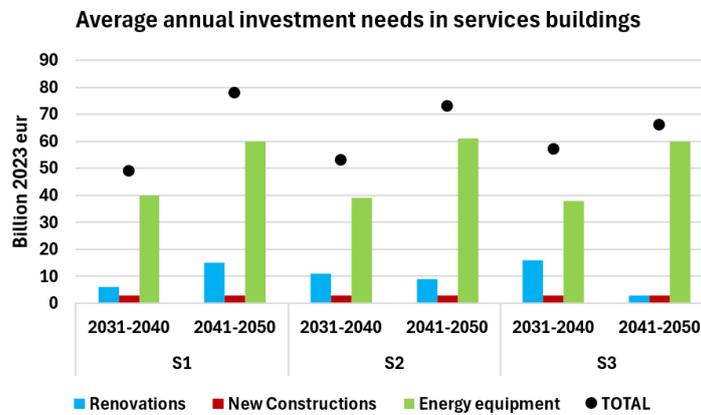


Figura 33: Inversión media anual necesaria en edificios residenciales (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Transporte

Este sector representa la gran mayoría de las necesidades de financiación, promediando unos 870 mil millones de euros al año entre 2030 y 2050 [28], en los distintos escenarios. Se espera que el transporte por carretera represente la mayoría de la inversión, con la adquisición de vehículos privados como grueso del total (entorno al 60%). La media anual de la compra de vehículos privados en términos monetarios en la UE crecerá un 30% con respecto a la década de 2010-2020 debido principalmente a dos factores: un incremento del 18% en la cantidad de vehículos comprados anualmente, así como un aumento esperado de entorno al 10% del coste de compra de un vehículo (teniendo en cuenta que los eléctricos son, de momento, más caros que sus comparables de combustión) [28]. El siguiente método de transporte en cuanto a volumen de inversión necesario serán los camiones seguido de la aviación, el ferrocarril y el transporte público, En cuanto a la infraestructura asociada a las nuevas fuentes de energía para los vehículos (principalmente eléctrica), no se espera que represente más del 2% de las necesidades totales en materia de transporte.

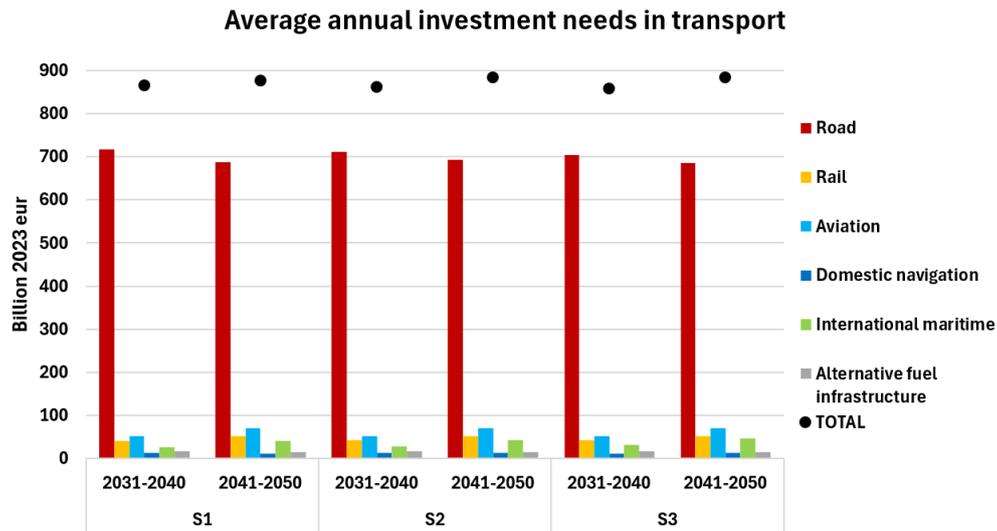


Figura 34: Inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Transport (billion 2023 €)	S1		S2		S3	
	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050
Road	718	688	712	693	704	686
Public Transport	24	29	23	30	24	30
Private cars	531	491	526	494	523	493
Two-wheelers	18	19	18	20	18	20
Trucks	145	149	143	150	139	144
Rail	41	51	42	51	43	52
Aviation	51	70	51	70	52	70
Domestic navigation	13	12	13	13	12	13
International maritime	26	41	27	42	31	47
Alternative fuel infrastructure	16	14	16	15	16	15
TOTAL	866	875	861	885	856	882

Figura 35: Detalle inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Industria

En el caso de este sector, las necesidades son menores (entorno a los 35 mil millones de euros anuales entre 2030 y 2050), pero aun así un esfuerzo será necesario para descarbonizar aquellas que sean especialmente intensivas en uso de energía. La producción de hierros y aceros, así como la de productos químicos serán aquellas que necesiten unas cantidades mayores de capital, seguidas por la producción de papel. La captura de carbono en el caso de la industria tendrá un rol crucial, especialmente en los escenarios 2 y 3, en los cuales se espera una inversión más temprana en estas tecnologías, llegando hasta los 4 mil millones de inversión en la primera década en estos escenarios. [28]. En el caso de las pequeñas y medianas empresas, están representadas en la sección “otros” de la Figura 35. Para este tipo de empresas será más sencilla la descarbonización mediante la electrificación debido a que la mayoría de estas no son altas en intensidad energética para su producción, siendo las grandes empresas manufactureras las que precisan grandes cantidades de

energía tanto para producir así como materia prima que pueden rentabilizar gracias a las economías de escala que alcanzan debido a su tamaño.

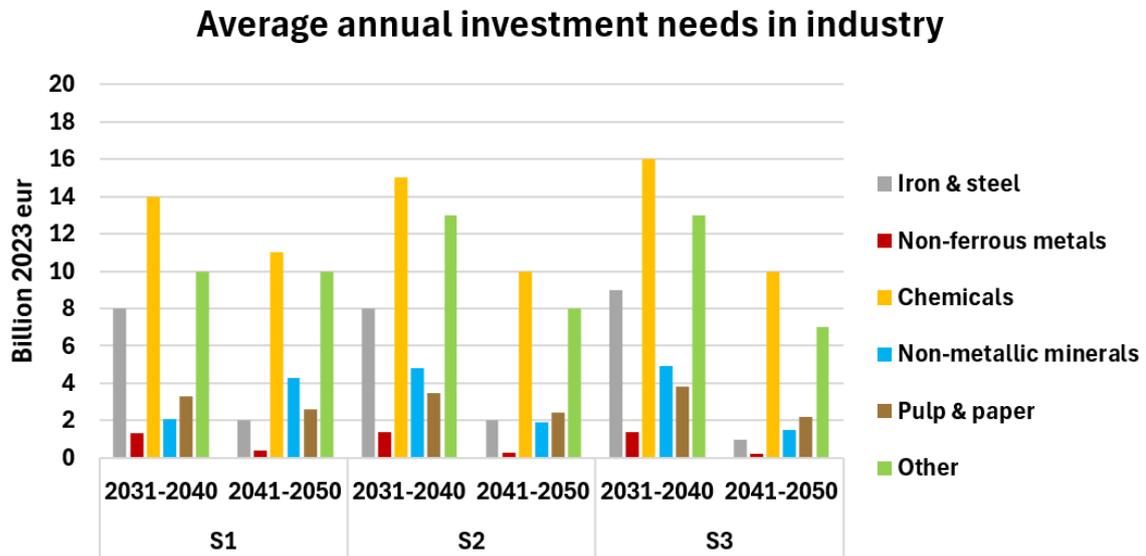


Figura 36: Inversión media anual necesaria en transporte (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.2.3. Agregado

De este modo, y teniendo en cuenta los distintos sectores anteriores, se puede calcular la necesidad total de inversión que la UE requerirá para poder llegar al Net Zero en 2050, según se indica en la Figura 36. Como se puede observar, el total de la inversión media anual para las siguientes dos décadas no supera el 8.1% del PIB total de la UE. Esto ayuda a poner en perspectiva la envergadura del proyecto y a su vez lo establece como algo tangible y factible, si se encuentra el modo de financiar estas necesidades de movilización de capital.

Annual needs (billion 2023 €)	S1		S2		S3	
	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050
Supply	236	377	289	328	341	281
Power grid	79	88	88	81	96	75
Power plants	97	187	128	157	151	133
Other	59	102	72	90	94	73
Buidlings	274	328	290	315	305	297
Residential	225	250	237	242	248	230
Services	49	78	53	73	57	67
Transport	866	875	861	885	856	882
Road	718	688	712	693	704	686
Rail	41	51	42	51	43	52
Aviation	51	70	51	70	52	70
Maritime	39	53	40	55	43	60
Infrastructure	16	14	16	15	16	15
Industry	38	31	46	24	48	22
Agriculture	19	19	19	19	20	18
TOTAL	1,433	1,629	1,505	1,570	1,570	1,501
Real GDP avg estimate	19,444	22,369	19,444	22,369	19,444	22,369
Investments as % GDP	7.4%	7.3%	7.7%	7.0%	8.1%	6.7%

Figura 37: Inversión media anual necesaria total (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Del mismo modo, se puede calcular la necesidad total de inversión para las dos décadas venideras, resultando en números en torno a los 30,000 mil millones de euros totales repartidos en 20 años.

Total needs (billion 2023 €)	S1		S2		S3	
	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050	2031-2040	2041-2050
Supply	2,360	3,770	2,890	3,280	3,410	2,810
Buidlings	2,740	3,280	2,900	3,150	3,050	2,970
Transport	8,660	8,750	8,610	8,850	8,560	8,820
Industry	380	310	460	240	480	220
Agriculture	190	190	190	190	200	180
Total per decade	14,330	16,300	15,050	15,710	15,700	15,000
TOTAL	30,630	30,630	30,760	30,760	30,700	30,700

Figura 38: Inversión total necesaria para la transición (2030-2050). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Con el objetivo de dimensionar y poner en perspectiva el esfuerzo económico adicional que supondrá acometer la transición energética (que no resulta ser tan ingente), se presenta a continuación una comparativa entre las necesidades medias anuales de inversión en los tres escenarios considerados (S1, S2 y S3) y un escenario de referencia Business as Usual (BAU). Este último refleja una trayectoria en la que no se adoptan nuevas políticas climáticas y se abandona el objetivo Net Zero, manteniéndose el uso predominante de tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles y gas.

Así, los distintos sectores se estiman como sigue, en el caso en el que no se diese la transición:

- Supply (generación de electricidad): incluye tanto la inversión en nueva capacidad como el mantenimiento y costes operativos del parque de generación existente. Se ha introducido a partir del escenario *lean* de McKinsey, que estima el coste total del sistema eléctrico (inversiones + OPEX + combustibles) en un escenario sin transición energética.
- Buildings (edificios residenciales y del sector servicios): cifras calculadas a partir de proyecciones basadas en mantenimiento y reposición de equipos térmicos actuales, como son calderas de gas y gasóleo y aires acondicionados y otros electrodomésticos.
- Transport: este valor refleja la continuidad del modelo actual, incluyendo las inversiones asociadas al parque automovilístico convencional y considerando que todas las ventas futuras proyectadas de vehículos en la Unión Europea son de combustión interna. Además, otras partidas relacionadas son calculadas a partir del porcentaje establecido en el transporte por carretera.
- Industry: Se emplea un porcentaje similar al obtenido en los edificios, pero más conservador, representando un 15% de la inversión inicial.
- Agriculture: De manera similar, y siendo aún más conservadores, empleando un 10% de la original.

Annual needs (billion 2023 €)	S1			S2			S3		
	2031-2050	BAU	Δ (Delta)	2031-2050	BAU	Δ (Delta)	2031-2050	BAU	Δ (Delta)
Supply	307	190	117	309	190	119	311	190	121
Buildings	301	135	166	303	135	168	301	135	166
Residential	238	101	136	240	101	138	239	101	138
Services	64	34	30	63	34	29	62	34	28
Transport	871	413	457	873	414	459	869	417	452
Road	703	338	365	703	338	365	695	338	357
Rail	46	21	25	47	21	26	48	21	26
Aviation	61	27	33	61	27	33	61	27	34
Maritime	46	21	25	48	21	26	52	23	28
Infrastructure	15	7	8	16	7	9	16	7	9
Industry	35	5	29	35	5	30	35	5	30
Agriculture	19	2	17	19	2	17	19	2	17
TOTAL	1,532	745	787	1,538	746	792	1,535	748	787

Figura 39: Comparación de las necesidades de inversión con un escenario continuista del modelo energético actual. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Impacto de la transición energética en aspectos clave

La posibilidad de lograr la transición energética en la UE acarrearía diversas consecuencias en su mayoría positivas y de distinta índole, como se verá a continuación. Gracias a los cambios propuestos en los apartados 3.1 y 3.2, se podrían ver efectos en la balanza energética y soberanía de la unión, en las emisiones relacionadas con la manera de conseguir energía para abastecernos además de la competitividad y la creación de empleo.

3.3.1. Impacto en la balanza y dependencia energética

Las proyecciones indican una disminución clara y sostenida del déficit energético de la Unión Europea de aquí a 2050. Este descenso no es un fenómeno coyuntural, sino el resultado de una transformación estructural del sistema energético europeo impulsada por la electrificación, la mejora de la eficiencia energética y el despliegue masivo de generación renovable autóctona.

En particular, la reducción del uso de combustibles fósiles (especialmente petróleo y gas natural) en sectores como el transporte terrestre, la industria térmica y la climatización de edificios, disminuirá la necesidad de importar recursos energéticos del exterior. La electrificación del parque de vehículos y el reemplazo de calderas de gas por bombas de calor reducen de forma directa el volumen físico de hidrocarburos necesarios. A su vez, la modernización de procesos industriales y la optimización del consumo permiten una gestión más eficiente de la demanda, limitando el consumo innecesario.

En conjunto, la combinación de estas medidas estructurales permite reducir no solo el déficit energético cuantitativo, sino también el riesgo estratégico asociado a la dependencia de mercados energéticos inestables.

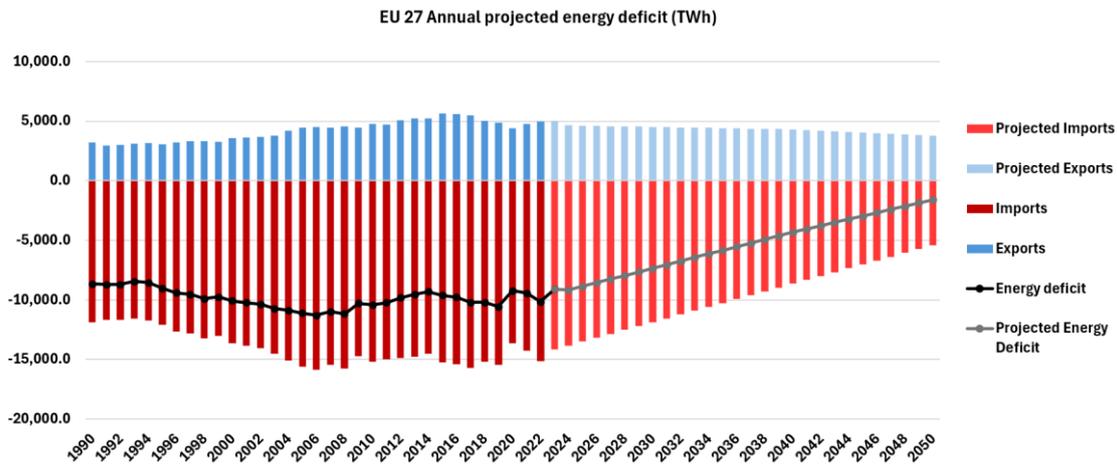


Figura 40: Proyección del balance energético UE hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>

En cuanto a la tasa de dependencia energética, el gráfico de proyecciones de la Figura 41 muestra un descenso sin precedentes de la dependencia energética de la UE, desde niveles estructuralmente estables en torno al 60 % hasta cifras cercanas al 12 % en 2050. Esta caída no se explica únicamente por una sustitución de importaciones fósiles, sino por una reconfiguración sistémica del modelo energético: electrificación masiva, generación renovable distribuida, y mejoras en intensidad energética permiten reducir la necesidad física de importar energía primaria.

Además, parte de esta evolución refleja un cambio en la naturaleza misma de la dependencia: la UE pasará de depender del flujo continuo de hidrocarburos a una mayor exposición a materias primas tecnológicas (litio, níquel, etc.), que no computan como energía importada, pero requieren gobernanza estratégica. En cualquier caso, la tasa de dependencia no podrá caer hasta cero, ya que ciertas industrias seguirán requiriendo derivados del petróleo como materia prima (por ejemplo, para productos químicos o farmacéuticos), lo que asegura una base mínima estructural de importaciones energéticas no sustitutivas.

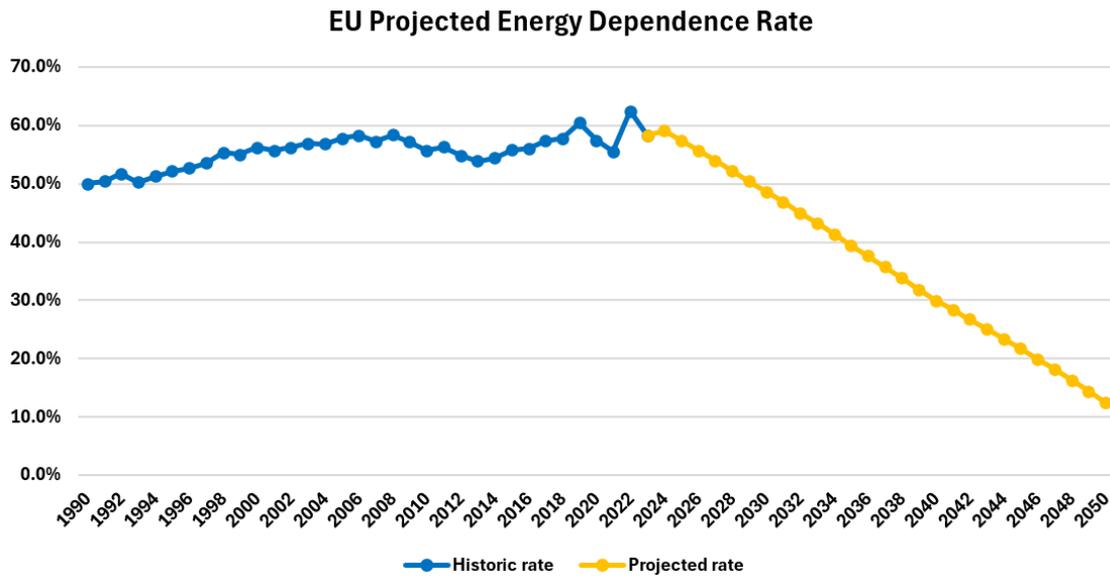


Figura 41: Proyección dependencia energética histórica de la UE hasta 2050. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>

Teniendo en cuenta el gasto actual en importaciones, cerca de 400 mil millones en 2024, se espera un descenso en términos monetarios derivado de las necesidades de combustibles fósiles de un 26% para 2030, entre un 42% y un 47% para 2040 y entre un 55% y un 60% para el año 2050. Así, según datos de la Comisión Europea, se espera que se puedan ahorrar unos 1300 miles de millones de euros de importaciones energéticas en la década de 2030-2040 si se compara con la esperada en 2020-2030 [28]. De este modo se reducirá la representación de estas importaciones desde el 3% del PIB actual hasta el 1.9% en 2030 y al 1% en 2040 [28]. A pesar de la reducción, será necesario mantener una base de petróleo principalmente necesaria para las industrias que lo emplean como materia prima para la fabricación de productos. Además, esta reducción de importaciones de combustibles fósiles se verá reemplazada en parte por importaciones de biomasa o hidrógeno, aunque muy lejos de los niveles actuales en volumen y coste.

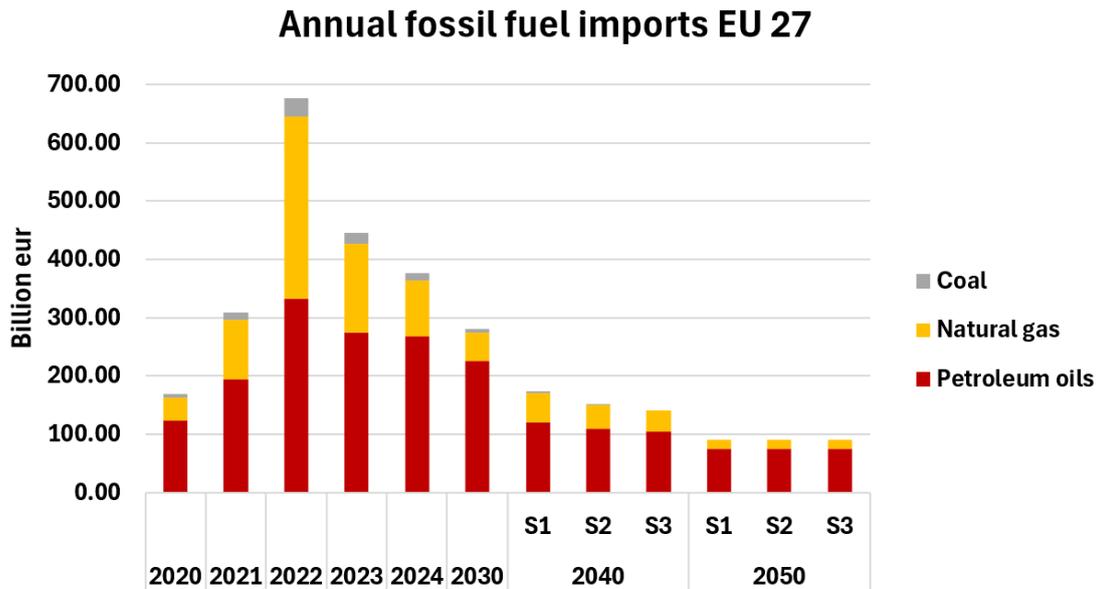


Figura 42: Proyección del valor de importaciones de productos energéticos de la UE hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.3.2. Impacto en las emisiones

Se espera también que las distintas acciones orientadas hacia la transición energética de la unión tengan un efecto positivo en cuanto a la reducción de las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero que provocan el aumento de las temperaturas. Estos son el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y gases fluorados como hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF₆) o trifluoruro de sodio (NF₃). Para tener una visión agregada del impacto total, todos ellos se miden en toneladas equivalentes de CO₂, dado que representa la mayor proporción de todos los GEI en la atmósfera (80.6% en 2022), seguido por el Metano 12.1%, el óxido nitroso (5.3%) y demás gases fluorados (2%) [36] además de ser el gas que más crecimiento ha experimentado en las últimas décadas [37].

Así, según las estimaciones asociadas a la infraestructura e inversión necesaria, la UE espera las siguientes cifras en cuanto a las emisiones de GEI:

GHG emissions (MtCO ₂ -eq)	2005	2015	2030	2040			2050		
				S1	S2	S3	S1	S2	S3
Power and district heating	1,300	1,012	339	123	42	23	21	22	19
Other Energy sectors	277	237	133	71	59	53	39	39	38
Industry (Energy)	469	360	232	126	94	75	6	6	9
Domestic Transport	822	772	583	190	143	120	10	8	7
Residential and Services	648	514	221	119	92	75	20	19	19
Industry (Non-Energy)	343	233	157	139	88	14	7	7	7
Other Non-Energy sectors	101	130	56	33	26	25	23	22	22
International transport	116	107	112	52	46	41	14	12	11
Agriculture	390	385	361	351	302	271	249	249	249
Waste	155	118	87	68	55	55	32	32	32
CO ₂ calibration	15	43	24	3	-1	-1	0	0	0
Non-CO ₂ calibration	5	2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Total Gross GHG Emissions	4,641	3,914	2,301	1,273	943	748	416	413	411

Figura 43: Proyección de emisiones totales de gases de efecto invernadero en la UE hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

Además de las emisiones, se espera que la captura de carbono gracias a medios naturales (LULUCF en inglés, Land Use, Land-Use Change and Forestry) como los bosques o técnicas asociadas al sector industrial como BECCS (Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono) [38] o DACCS (Captura directa de aire) [39], permitan alcanzar el objetivo de emisiones netas cercanas o inferiores a cero para la UE en 2050.

MtCO ₂ -eq	2030	2040			2050		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
Lower level	-314	-222	-262	-290	-334	-318	-319
Central level	-314	-319	-365	-391	-462	-447	-447
Upper level	-314	-380	-423	-450	-525	-510	-509

Figura 44: Proyección de captura de GEI gracias a LULUCF (Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura) hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

MtCO ₂ -eq	2030	2040			2050		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
BECCS	-4	-4	-34	-33	-58	-59	-56
DACCS	0	0	-15	-42	-63	-56	-57
Total Ind Removals	-4	-4	-49	-75	-121	-115	-113

Figura 45: Proyección de captura de GEI gracias a la captura industrial hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

De este modo, el resultado de emisiones esperadas y el camino recorrido hasta entonces se puede observar en la Figura 42, alcanzando emisiones netas negativas en los tres escenarios establecidos por la Unión Europea en el año 2050.

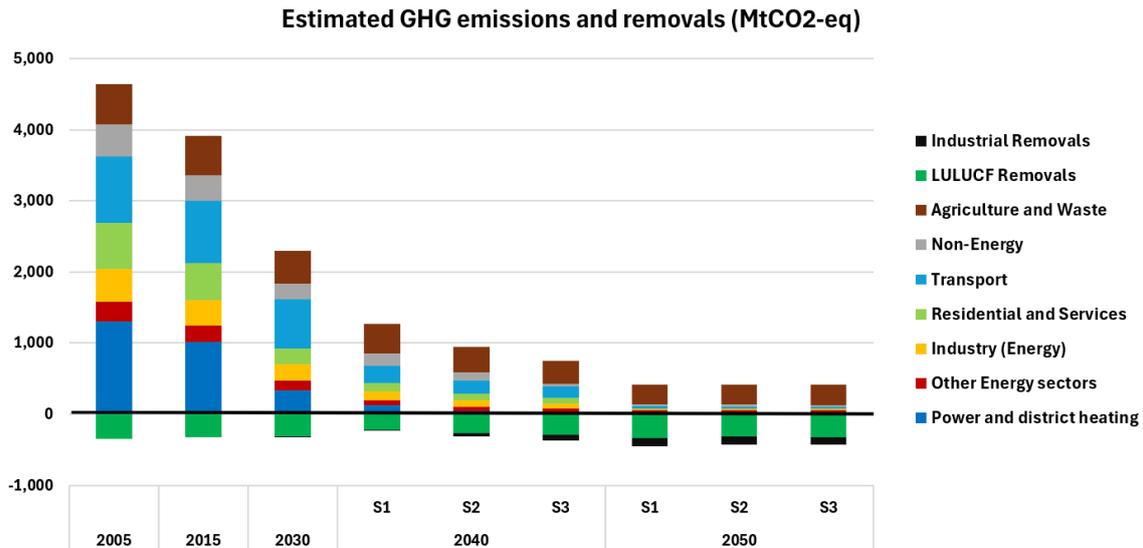


Figura 46: Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en la UE hasta 2050. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.3.3. Impacto en la contaminación y salud

Según datos de la EEA (European Environment Agency), la exposición a partículas en suspensión es responsable de más de 300,000 muertes anuales en los 27 estados miembros [40] (como se indica en el capítulo 2.3.1.), además de problemas asociados con el sistema nervioso y la demencia.

Así, entre 2015 y 2040, según los datos y estimaciones de la Comisión Europea [28], la reducción de contaminantes como PM2.5 y ozono en la UE se traducirá en una disminución del 58% de las muertes prematuras en escenarios S1, S2 y S3, lo que equivale a aproximadamente 270,000 vidas salvadas anualmente. Asimismo, se prevé una reducción del 55% en los años de vida perdidos, es decir, cerca de 3.3 millones de años menos perdidos por exposición a estos contaminantes. Además, la reducción de las emisiones puede disminuir los costes de control de la contaminación en la UE en torno a 25-27 mil millones de euros en S1, S2 y S3. Económicamente, utilizando el Valor de la Vida Estadística (VSL) (4.36 millones de euros por vida) se estima que en 2040 se ahorrarán entre 1,046 y 1,051 mil millones de euros en costes de mortalidad prematura (reducción del 61%), mientras que mediante el Valor del Año de Vida (VOLY) (114,722 euros por año) el ahorro es de aproximadamente 380-382 mil millones de euros (reducción del 56%).

	Indicator	2015	2040 (S1, S2 & S3)	Change 2015-2040 (S1, S2 & S3)	Change 2015-2040 (%)
Primary emissions	Air pollutant emissions (kt)				
	SO ₂	2,316	525 to 529	-1,787 to -1,791	-77.1% to -77.3%
	NO _x	7,392	2,114 to 2140	-5,252 to -5,277	-71.1% to -71.4%
	PM2.5	1,380	521 to 524	-857 to -859	-62.1% to -62.2%
	VOC	6,362	4,494 to 4,503	-1,860 to -1,865	-29.2% to -29.3%
	NH ₃	3,690	3,086 to 3,091	-599 to -604	-16.2% to -16.4%
Public health	Premature mortality caused by PM2.5 exposure				
	Expressed in 1000 cases/year	395	154 to 155	-240 to -241	-60.7% to -61.0%
	Expressed in million life years lost/year	6	2.61 to 2.63	-3.28 to -3.30	-55.6% to -55.8%
	Premature mortality caused by ozone exposure				
	Expressed in 1000 cases/year	71	42	-28	-40.1% to -41.3%
	Expressed in million life years lost/year	0.07	0.04	-0.03	-40.1% to -41.3%
Costs	Economic costs (2023 billion eur/year)				
	Air pollution control	83	56 to 58	-25 to -27	-30.3% to -32.6%
	Premature mortality (VSL)	1,724	673 to 677	-1,046 to -1,051	-60.7% to -61.0%
	Premature mortality (VOLY)	686	304 to 306	-380 to -382	-55.6% to -55.8%

Figura 47: Proyección de impacto en la salud pública en el año 2040. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.3.4. Impacto en el empleo y la economía

En el sector energético se estima que, para 2050, la transición hacia tecnologías limpias generará aproximadamente 1,5 millones de nuevos empleos. De estos, cerca de 700.000 puestos surgirán del impulso en la energía solar, y alrededor de 450.000 se asignarán al sector eólico, fundamentalmente en la fabricación e instalación de infraestructuras renovables, que, pese a considerarse temporales por su vinculación con proyectos específicos, se convertirán en empleos de carácter permanente dada la constante expansión de la capacidad instalada [35].

La renovación y rehabilitación energética de edificios, tanto residenciales como comerciales, se proyecta como otra fuente clave de empleo, con la creación de cerca de 1,1 millones de puestos vinculados a la instalación de sistemas de climatización eficientes, aislamiento térmico y generación distribuida [35].

Por su parte, el sector agrícola se beneficiará de la adopción de nuevas tecnologías (como digestores anaeróbicos y optimización en el manejo de piensos), generando aproximadamente 100.000 nuevos empleos, lo que impulsará una agricultura más eficiente y sostenible [35].

En contraste, el sector automotriz experimentará un desplazamiento, con una pérdida neta estimada de alrededor de 700.000 empleos, ya que la fabricación se orientará

progresivamente hacia tecnologías de cero emisiones. Además, la industria verá una pérdida acentuada mayor, resultando en destrucción total de 3.4 millones de empleos. No obstante, este recalentamiento laboral se compensará con la creación de nuevos puestos en sectores emergentes y una diversificación de la actividad económica a nivel regional.

Adicionalmente, la transformación hacia una economía neta cero exigirá programas de recualificación que abarquen entre 5.5 y 17.7 millones de trabajadores [35], facilitando la transición de profesionales de industrias en declive hacia sectores con alta demanda de habilidades en energías renovables, hidrógeno y tecnologías digitales. Estos nuevos empleos, de carácter en gran parte de alta cualificación, requerirán inversiones coordinadas en formación técnica y educativa, lo que permitirá no solo mitigar los impactos socioeconómicos del desplazamiento laboral, sino también potenciar la competitividad y resiliencia de la economía europea.

En total, para el año 2050, se espera que la transición energética hacia una economía descarbonizada y neutra en emisiones resulte en pérdidas o destrucción de 6.4 millones de empleos, pero a su vez en la generación de 11.3 millones de puestos de trabajo, resultado en un balance positivo neto de 4.9 millones (teniendo en cuenta tanto cambios directos e indirectos o inducidos) [35]. La transición hacia el Net Zero en 2050 implica una reestructuración profunda del mercado laboral europeo, con una generación neta de empleo significativa en sectores como la energía renovable, la agricultura y la rehabilitación de edificios, compensada en parte por la reestructuración en el sector automotriz. De este modo, en la Figura 44 se puede observar de manera segmentada la evolución del mercado laboral (medida en millones de puestos de trabajo) de la Unión impactada por la transición.

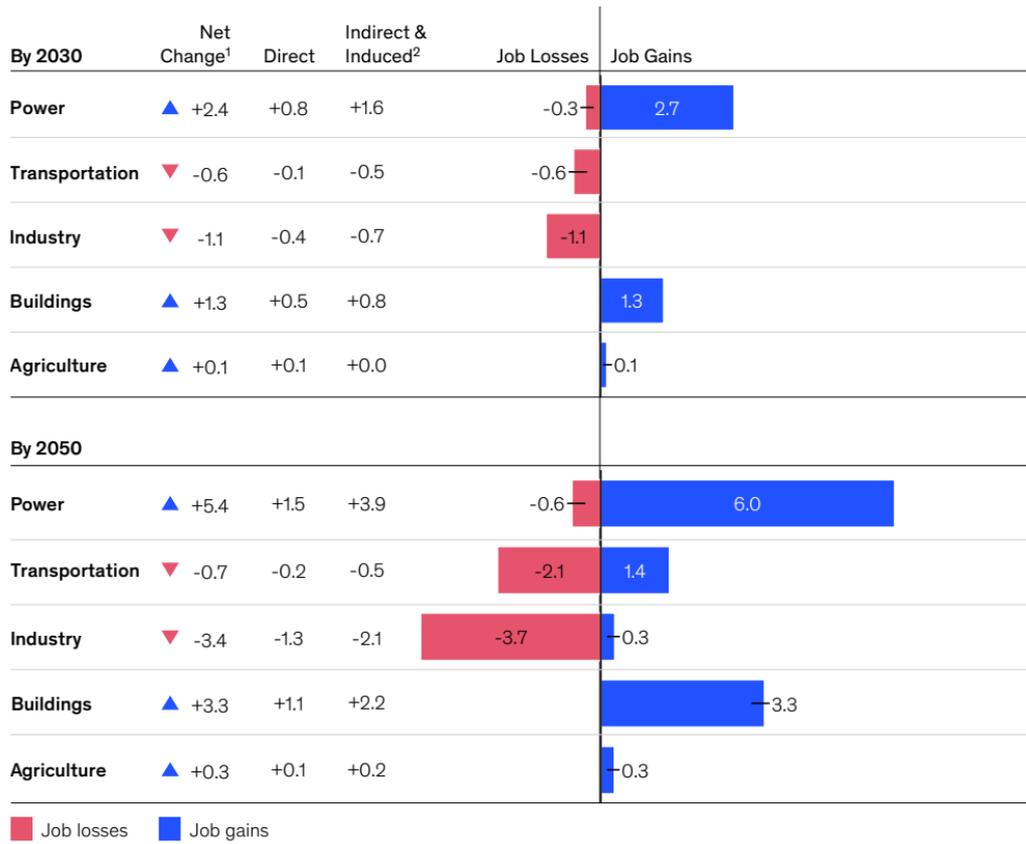


Figura 48: Creación y destrucción de empleo asociada a la transición energética en la UE-27. Fuente: McKinsey & Company: Net-Zero Europe Decarbonization pathways and socioeconomic implications.

3.3.5. Resumen agregado de los impactos

Annual needs (billion 2023 €) / Annual energy needs (TWh) / Annual GHG emissions (MtCO2- eq)	S1						S2						S3					
	2031-2040			2041-2050			2031-2040			2041-2050			2031-2040			2041-2050		
	B€	TWh	MtCO2	B€	TWh	MtCO2	B€	TWh	MtCO2	B€	TWh	MtCO2	B€	TWh	MtCO2	B€	TWh	MtCO2
Generation																		
Supply	236	4500	194	377	7000	60	289	5000	101	328	7000	61	341	5100	76	281	6900	57
Power grid	79			88			88			81			96			75		
Power plants	97			187			128			157			151			133		
Other	59			102			72			90			94			73		
Demand																		
Buildings	274	2814	119	328	2687	20	290	2710	92	315	2687	19	305	2652	75	297	2687	19
Residential	225			250			237			242			248			230		
Services	49			78			53			73			57			67		
Transport	866	2791	242	875	2326	24	861	2733	189	885	2152	20	856	2617	161	882	1977	18
Road	718			688			712			693			704			686		
Rail	41			51			42			51			43			52		
Aviation	51			70			51			70			52			70		
Maritime	39			53			40			55			43			60		
Infrastructure	16			14			16			15			16			15		
Industry	38	2791	265	31	1989	13	46	2198	182	24	1989	13	48	2128	89	22	1977	16
Agriculture	19		351	19		249	19		302	19		249	20		271	18		249
TOTAL	1,433	8,397	1,171	1,629	7,001	366	1,505	7,641	866	1,570	6,827	362	1,570	7,397	672	1,501	6,641	359
Real GDP avg estimate	19,444			22,369			19,444			22,369			19,444			22,369		
Investments as % GDP	7.4%			7.3%			7.7%			7.0%			8.1%			6.7%		

Figura 49: Tabla resumen de la inversión necesaria y los impactos derivados de la transición energética en TWh Y MtCO2-eq. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Europea.

3.4. Desafíos en la implementación de la infraestructura necesaria

Sin lugar a duda la transición energética acarreará distintos problemas y desafío asociados a diversos niveles que pondrán a prueba el desempeño de la industria europea para poder solventarlos. A continuación, se analizarán dos casos de estudio para explicar la complejidad del desafío a llevar a cabo a través de ejemplos de implementación de las medidas a adoptar.

3.4.1. Caso de estudio I: Vehículos eléctricos (Producción Europea vs China)

La adopción del vehículo eléctrico en Europa está aún lejos de niveles significativos. En 2023, unos 10.7 millones de turismos nuevos fueron registrados, con eléctricos puros de batería representando simplemente un 14.5% de las ventas totales [41]. Si se tienen en cuenta todos los vehículos que cuentan con algún tipo de tecnología híbrida o eléctrica, la suma asciende hasta casi el 48%. Si se computan solo aquellos vehículos que son enchufables, el porcentaje se reduce al 22.1%. De este modo, los turismos de combustión pura representan aún el 48.8% de las ventas [41].

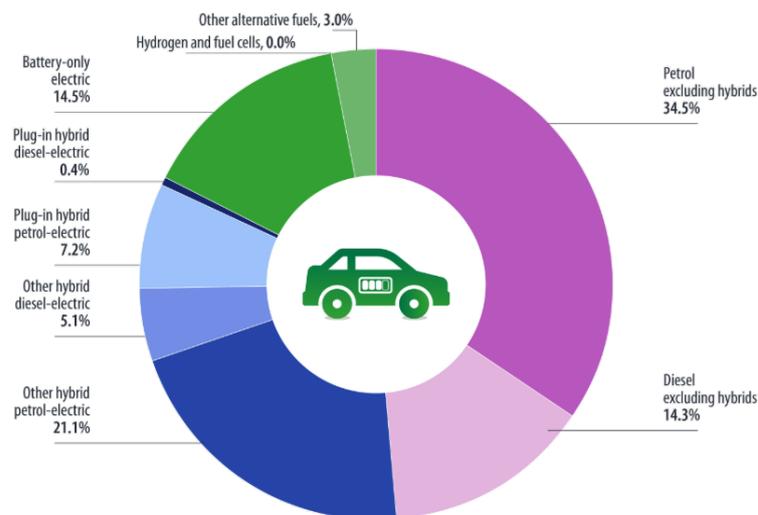


Figura 50: Distribución de turismos registrados en 2023 por tipo de combustible. Fuente: Eurostat

A pesar de los alentadores números de nuevos registros, el parque móvil europeo está aún muy lejos de ser eléctrico. Si se tienen en cuenta el total de turismos registrados en la Unión que pueden circular, el porcentaje de vehículos eléctricos cae hasta un 1.7% en 2023 [42]. Si bien este número ha crecido desde un 0.02% 10 años antes, con un fuerte crecimiento posterior a la pandemia, está aún muy lejos de representar una parte significativa del parque automovilístico a nivel europeo. Cabe destacar que países como Suecia o Dinamarca son líderes en la adopción, con porcentajes de eléctricos sobre el total muy superiores a la media europea, como puede observarse en la Figura 46.

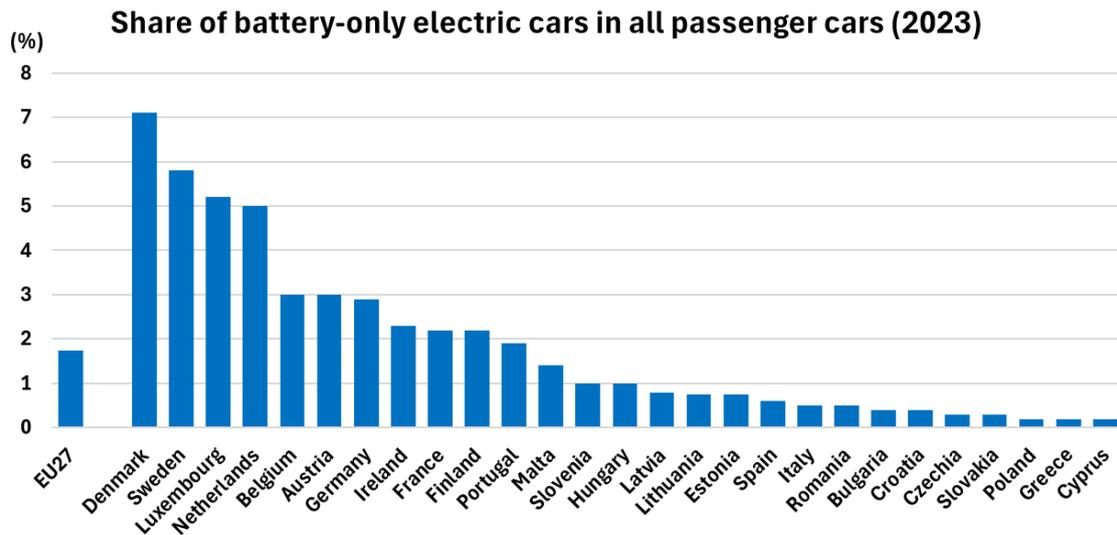


Figura 51: Porcentaje de vehículos eléctricos sobre el total para UE27. Fuente: Eurostat.

Es en este contexto, en el que la industria de vehículos eléctricos en la Unión Europea se enfrenta a un desafío estratégico crucial: la feroz competencia de los fabricantes chinos, cuya capacidad productiva y control de la cadena de suministros han revolucionado el mercado global. Mientras la UE impulsa agresivamente la transición hacia una movilidad sostenible mediante políticas como la prohibición de la venta de coches de combustión interna a partir de 2035 [43] y objetivos ambiciosos de reducción de emisiones, los fabricantes chinos continúan consolidando su liderazgo gracias a menores costes de producción y un alto nivel de integración vertical.

La ventaja competitiva de China se fundamenta en la reducción de costes derivados de subvenciones estatales, una estrategia de apoyo a la industria que ha permitido que los VEB chinos sean significativamente más económicos que sus equivalentes europeos (los fabricantes de la Unión se enfrentan a costes energéticos y de materia prima hasta un 30% superiores, según Mohammed Chahim) [44]. Esta competitividad se ve reforzada por una gestión eficiente de la cadena de suministros: China domina la extracción y procesamiento de materias primas clave, como el litio y el cobalto, y controla grandes segmentos del mercado global de baterías, reduciendo sus costes en alrededor de un 17 % en comparación con la UE [45]. Esto es especialmente significativo dado que las baterías representan hasta un 40% del precio de vehículo eléctrico. Así, según el informe del Banco de España, la cuota de mercado de los VEB chinos en la UE ha pasado del 1 % en 2019 a superar el 50 % de las importaciones en 2023, representando aproximadamente el 40 % de los ingresos totales por exportación de estos vehículos [45].

En respuesta, la UE ha adoptado medidas estratégicas que buscan, por un lado, impulsar la transición hacia la movilidad eléctrica y, por otro, fortalecer la capacidad industrial interna. Entre estas medidas destacan el fomento de la infraestructura de recarga, que debe expandirse de forma uniforme en todos los Estados miembros, y el establecimiento de objetivos vinculantes para la reducción de emisiones en el sector del transporte, con el fin de incentivar la inversión en tecnologías limpias. Además, se han impuesto aranceles provisionales a las importaciones de VEB chinos, destinados a contrarrestar las subvenciones estatales que distorsionan la competencia, aunque estos aranceles han sido objeto de debate político y ajustes posteriores [46].

La unión se enfrenta así a una complicada pregunta que debe encontrar respuesta: ¿Debe aceptar la competencia china para impulsar la adopción de este tipo de vehículos a costa de la sostenibilidad de su propia capacidad industrial y competitividad económica? Se trata de un problema con triple vertiente, buscando así tecnología y energía para una movilidad que sea limpia, segura y a un precio asequible para el consumidor.

3.4.2. Caso de estudio II: Descarbonización de edificios

La descarbonización del sector de inmuebles (tanto residenciales como comerciales) es esencial para alcanzar los objetivos climáticos de la Unión Europea, dado que los edificios representan aproximadamente el 17% de las emisiones totales [13]. Este sector, crucial tanto por su elevada demanda energética como por su impacto en la calidad de vida, requiere una transformación integral que aborde tanto la rehabilitación energética de estructuras existentes como la construcción de edificaciones de cero emisiones. La modernización de edificios antiguos implica intervenciones de gran envergadura, que incluyen la mejora del aislamiento térmico, la sustitución de sistemas de calefacción y refrigeración por alternativas más eficientes y la integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares y bombas de calor. Estas medidas no solo reducen significativamente el consumo de energía, sino que también disminuyen las emisiones de gases contaminantes, contribuyendo a la reducción de las facturas energéticas y al incremento del valor inmobiliario a largo plazo.

Sin embargo, existen diversos desafíos asociados a la transición en este sector. Entre ellos, destaca por ejemplo el retorno a largo plazo asociado a la alta inversión. La renovación energética profunda de edificios requiere inversiones significativas, las cuales en muchos casos superan la capacidad económica inmediata de hogares y pequeñas empresas. Aunque los beneficios se materializan a lo largo de décadas a través de la reducción de costes energéticos y la mejora del confort, el largo período de recuperación financiera desalienta

la adopción de estas tecnologías, sobre todo en un contexto de altos costes de financiamiento. Además, en muchos casos, los beneficios económicos de las renovaciones se distribuyen de manera desigual. Los propietarios son quienes deben asumir el coste de las inversiones, mientras que los arrendatarios, que son los principales beneficiarios de la reducción en las facturas energéticas, no tienen incentivos para financiar las mejoras. Este fenómeno, conocido como "incentivos divididos", dificulta la ejecución de proyectos de eficiencia energética a gran escala, especialmente en el segmento residencial [47].

Por otro lado, si bien las bombas de calor superan en eficiencia energética a las calderas de gas en un factor de tres en promedio, podría parecer que la transición a esta tecnología limpia puede implicar mayores costes de funcionamiento para los consumidores europeos (Figura 52), lo que prolongaría el tiempo de amortización de la inversión. Sin embargo, los elementos como bombas de calor requieren significativamente menor uso de energía (ya que obtienen parte de esta del aire, de la tierra o del agua) para producir una misma cantidad de calor útil al compararlo con las calderas de gas. La creencia anteriormente mencionada se explica, en parte, por la aplicación de impuestos energéticos de forma desproporcionada sobre la electricidad en comparación con combustibles como el gasóleo, el gas natural, el carbón y la biomasa. Además, las facturas eléctricas de hogares y pequeñas empresas suelen incluir recargos por tarifas de red y otros costes adicionales, diseñados para mantener precios competitivos para sectores con alta demanda energética [47]. Igualmente, las tasas que incentivan el despliegue de energías renovables se cargan generalmente sobre la electricidad en lugar de sobre el gas natural.

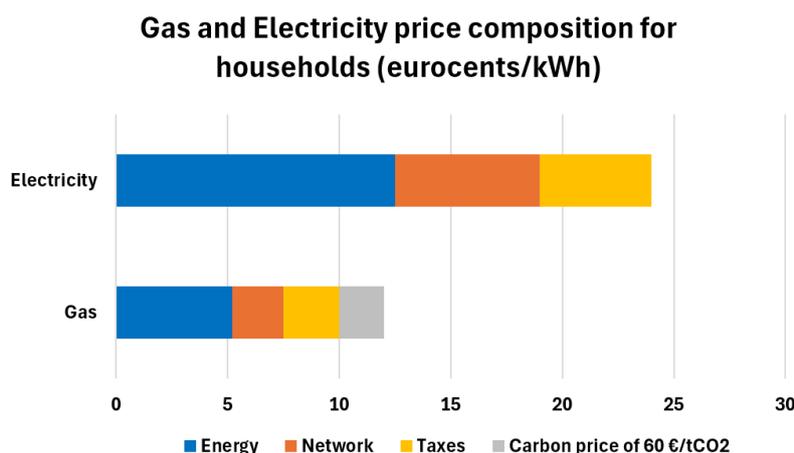


Figura 52: Composición del precio del gas y la electricidad para los hogares en 2024. Fuente: Bruegel

Además, se prevé una reducción de los costes de la electricidad con el incremento en la generación de energías renovables y la entrada en vigor del ETS2, incentivando así la inversión en renovaciones de edificios [48].

4. Análisis económico-financiero

Este último punto del proyecto pretende dar a entender cómo las distintas inversiones necesarias para la transición indicadas en el apartado 3 pueden llegar a ser rentables, siendo así objetivo no sólo del sector público y financiación a nivel gubernamental, sino también para inversores institucionales y privados.

4.1. Análisis de rentabilidad de las inversiones por sector

Para poder analizar el retorno asociado a cada sector, se pueden hacer estimaciones sobre la TIR (Tasa Interna de Retorno), teniendo en cuenta distintas asunciones asociadas a cada uno de estos sectores.

En primer lugar, la TIR se puede calcular como aquella tasa de descuento que hace igualar la inversión inicial con los ahorros futuros traídos al presente. En este caso se tendrá en cuenta que el horizonte temporal es de 25 años (desde 2025 hasta 2050).

$$\text{Inversión inicial} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Ahorro ó Ingreso anual}}{(1+r)^t}$$

Donde:

- r es la TIR
- n es el número de años (horizonte)
- El ahorro anual es constante (flujo neto)
- Se aplican subvenciones sobre el CAPEX cuando corresponda

Generación

Se pueden tomar las siguientes asunciones, poniendo un ejemplo de un parque solar de 1 MW:

- Inversión inicial: 650,000 €. Según fuentes de energía solar [49], el coste promedio de instalación oscila entre los 0.6 €/W y 0.8€/W, de modo que una planta de 1 MW podría suponer una inversión de unos 650,000€.
- Subvención: 0%
- Inversión neta: 650.000 €
- Ingresos netos: 70,000 €. Las horas anuales estimadas de sol en la Unión Europea son 2,595 h [50], pero en este caso se emplean 1900 h para emplear números más

conservadores. Teniendo en cuenta la capacidad del parque y un precio medio de la energía solar de unos 50 € MWh [51] se obtendrían unos 95,000 € de ingresos, que tras descontar unos gastos de 25,000 € de O&M anuales [52], resultan en los 70,000 €.

- Horizonte temporal: 35 años

Con todo esto se obtiene una TIR esperada en torno al 9.5 % para este tipo de proyectos, asumiendo una inflación anual del 2%.

IRR		Inflation					
Sun hours	9.55%	0%	1%	2%	3%	4%	
	1,700	8.74%	8.28%	7.67%	6.84%	5.52%	
	1,800	9.60%	9.17%	8.63%	7.90%	6.81%	
	1,900	10.44%	10.04%	9.55%	8.90%	7.98%	
	2,000	11.26%	10.90%	10.45%	9.86%	9.07%	
	2,100	12.08%	11.74%	11.32%	10.80%	10.09%	

Figura 53: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos solares. Fuente: Elaboración propia.

Se puede estimar también un proyecto de energía eólica on-shore, partiendo de las siguientes asunciones:

- Inversión inicial: 2,400,000 €. Según fuentes del gobierno español [53], el coste promedio de instalación para proyectos de este tipo se encuentra en el entorno de 1€/W, de modo que una planta de 2 MW podría suponer una inversión de unos 2,400,000€ si se emplean números más conservadores.
- Subvención: 0%
- Inversión neta: 2,400,000 €
- Ingresos netos: 280,000 €. Las horas anuales estimadas de viento efectivo en la Unión son aproximadamente 3,500 h, teniendo en cuenta un factor de capacidad on-shore de un 23% [54]. Dado que en este supuesto el parque tiene 2 MW de capacidad instalada y el precio de la energía eólica se estima en 50 €/MWh [55], se obtendrían unos 350,000€ de ingresos anuales, que teniendo en cuenta unos 70,000 € de O&M anuales [56] resultan en los 280,000 €.
- Horizonte temporal: 25 años

Con todo esto se obtiene una TIR esperada en torno al 10.8% para este tipo de proyectos, asumiendo una inflación anual del 2%.

IRR		Inflation				
Wind hours	10.80%	0%	1.00%	2.00%	3.00%	4%
	3,300	10.50%	10.21%	9.85%	9.39%	8.78%
	3,400	10.95%	10.67%	10.33%	9.89%	9.32%
	3,500	11.40%	11.13%	10.80%	10.39%	9.85%
	3,600	11.84%	11.58%	11.27%	10.87%	10.37%
	3,700	12.28%	12.03%	11.73%	11.35%	10.88%

Figura 54: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos eólicos. Fuente: Elaboración propia.

Edificios

Se pueden tomar las siguientes asunciones, poniendo un ejemplo de renovación de una caldera, cambiando una de gas natural por una bomba de calor de aerotermia:

- Inversión inicial: 10,000 €. Según Appa Renovables [57], el coste promedio total de instalación está en 100 €/m2 de modo que una vivienda de tamaño medio de 100 m2 podría suponer una inversión de unos 10,000€.
- Subvención: 30%. Según Bruegel [47], en los programas europeos cofinanciados por los fondos europeos y nacionales, la subvención estatal típica para edificios residenciales ronda entre el 23% y el 60%, según el tipo de inmueble. Para hogares no vulnerables se asume un valor intermedio y prudente del 30%
- Inversión neta: 7,000 €
- Ahorro anual: 380 €. De nuevo según Appa [57], para una situación de estas características, el coste anual de la energía para la caldera de gas sería de unos 580 € anuales, mientras que el de la electricidad para alimentar la bomba de calor (teniendo en cuenta su COP positivo [58]) sería de unos 200 €. De este modo, el ahorro esperado al año es de unos 380 €.
- Horizonte temporal: 20 años

Con todo esto se obtiene una TIR esperada en torno al 0.8 % para este tipo de proyectos. Sin embargo, si la subvención no es suficiente o el coste eléctrico de la bomba es superior debido a aumento de precios de la electricidad, se puede observar como la TIR efectiva podría caer hasta valores negativos para el horizonte temporal establecido, demostrando que la subvención aparece como algo necesario en este caso.

IRR		Subsidy (%)					
		0.80%	0%	15.00%	30.00%	45.00%	60%
Pump annual electricity cost (€)	100.00	-0.39%	1.19%	3.22%	6.01%	10.32%	
	150.00	-1.40%	0.11%	2.05%	4.70%	8.74%	
	200.00	-2.48%	-1.04%	0.80%	3.30%	7.08%	
	250.00	-3.67%	-2.30%	-0.55%	1.80%	5.33%	
	300.00	-4.98%	-3.68%	-2.04%	0.17%	3.44%	

Figura 55: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación en edificios. Fuente: Elaboración propia.

Industria

Se pueden tomar las siguientes asunciones, poniendo un ejemplo de renovación de un proceso de secado de papel industrial, cambiando el gas natural por bombas de calor de aerotermia. Para este caso, se pueden emplear calores residuales de otros procesos para alcanzar en la secadora los 140°C mediante una bomba de calor, suficiente para secar la pulpa de papel [59].

- Inversión inicial: 256,410 €. Según Tappi [60], la necesidad por tonelada de papel producido es de unos 4 MWht. De este modo, asumiendo una producción de 500

toneladas al año y unas 12 horas de funcionamiento, 5 días a la semana, resulta en una necesidad de capacidad de 641 kWt. Teniendo en cuenta que el coste de instalación suele rondar los 400€/kWt [61], resulta en una inversión inicial de 256,410 €.

- Subvención: 20%. Según la EHPA [62], en los programas europeos cofinanciados por los fondos europeos y nacionales, existen distintas subvenciones en un rango que varía entre el 20% y el 60%, según el país. Para este caso se toma el valor más conservador del 20%.
- Inversión neta: 205,128 €
- Ahorro anual: 19,832 €. Teniendo en cuenta una eficiencia de la caldera de gas de un 85% y un precio medio del gas natural de 40€/MWh [63], se obtiene un gasto anual en energía para el proceso 94,118 €, mientras que el de la electricidad para alimentar la bomba de calor (teniendo en cuenta un COP promedio de 3.5 y un precio de la electricidad industrial de 130 €/MWh [28]) sería de unos 74,286 €. De este modo, el ahorro esperado al año es de unos 19,832 €.
- Horizonte temporal: 25 años

Con todo esto se obtiene una TIR esperada en torno al 8.4 % para este tipo de proyectos. Sin embargo, si la subvención no es suficiente o el COP de la bomba es superior debido a aumento de precios de la electricidad, se puede observar como la TIR efectiva podría caer hasta valores negativos para el horizonte temporal establecido.

IRR		Subsidy (%)				
Pump COP	8.37%	0%	10.00%	20.00%	30.00%	40%
	3.0	-2.32%	-1.58%	-0.73%	0.29%	1.53%
	3.3	2.63%	3.58%	4.70%	6.06%	7.76%
	3.5	5.88%	7.02%	8.37%	10.04%	12.16%
	3.8	8.37%	9.67%	11.24%	13.18%	15.69%
	4.0	10.40%	11.85%	13.61%	15.81%	18.66%

Figura 56: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación de calor industrial. Fuente: Elaboración propia.

Transporte

Para estudiar esta última sección, se expone el caso comparativo de compra de coche eléctrico vs de gasolina, estudiando las diferencias incrementales y asumiendo la necesidad de compra, por lo que la inversión inicial no es más que la prima asociada a la compra de un vehículo eléctrico vs de combustión (el primero es más caro).

- Delta inversión inicial: 10,600 €. El precio medio de un vehículo eléctrico en España se encuentra en los 34,000 € [64], mientras que el de combustión es de 26,000 € [65], resultando en un extra de 8,000 €.
- Subvención: 10%. En España, el plan MOVES contempla distintos rangos y en otros estados miembros existen planes similares [66].

- Delta inversión neta: 4,600 €
- Ahorro anual: 860.94 €. Por un lado, se tiene en cuenta el gasto medio de 0.092 €/km en el caso de la gasolina y de 0.028 €/km en el caso del vehículo eléctrico [67] y una distancia media de 11,204 kilómetros por año según datos de la DGT [68], resultando en 715.94 €/año ahorrados. Por otro lado, si se compara el coste de mantenimiento, debido a tener componentes mecánicos más reducidos y un motor más simple, resultan en 513 €/año en el caso del de gasolina y en 368 €/año en el caso del eléctrico de media [69], resultando en 145€/año ahorrados. En total, el ahorro resultante anual por pertenencia de un vehículo eléctrico de 860.94€.
- Horizonte temporal: 15 años. En este caso, la vida útil de un coche es más reducida, por lo que se consideran 15 años en lugar de 25.

Con todo esto se obtiene una TIR esperada del 16.92 % en el caso base para este tipo de proyectos. Sin embargo, si la subvención no es suficiente el coste de la electricidad aumentase, se puede observar como la TIR efectiva podría caer, retrasando el periodo de recuperación. Aún así, y empleando números medios, incluso sin subvención, compensa la compra de un VE gracias al ahorro anual derivado.

IRR		Subsidy (%)					
Annual EV energy cost (€/km)	16.92%	0%	5.00%	10.00%	15.00%	20%	
	0.019	8.67%	12.96%	19.73%	33.09%	81.07%	
	0.024	7.69%	11.84%	18.34%	31.07%	76.40%	
	0.029	6.68%	10.69%	16.92%	29.04%	71.72%	
	0.034	5.65%	9.50%	15.48%	26.98%	67.05%	
	0.039	4.58%	8.29%	14.00%	24.90%	62.36%	

Figura 57: Tabla de sensibilidad rentabilidad proyectos de renovación de vehículo eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Además, como se puede observar en la Figura 58, a los 5 años y medio el vehículo eléctrico que ha sido subvencionado con el 10% empieza a ser más rentable que el de combustión, mientras que sin esta sube hasta los 9 años y medio, complicando más la viabilidad, pero no imposibilitándola.

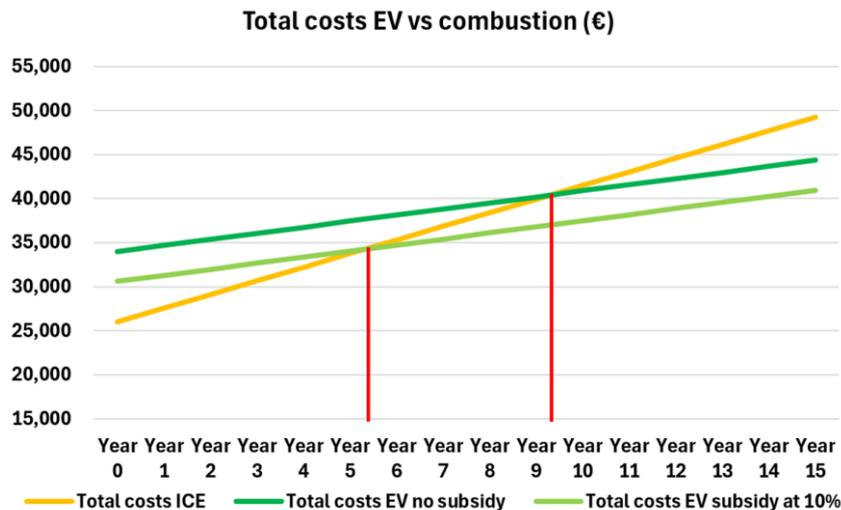


Figura 58: Comparación gasto total de vehículo de combustión y eléctrico en 15 años. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Mecanismos de financiación para la inversión necesaria

Como se ha podido comprobar en apartados anteriores, es necesaria una movilización sin precedentes de capital para poder acometer la renovación del tejido energético europeo. Para ello, se puede contar con financiación pública (como hasta el momento la Unión ha impulsado y pretende aumentar) y privada, de la cual se espera el mayor crecimiento, estimulado también por las iniciativas públicas.

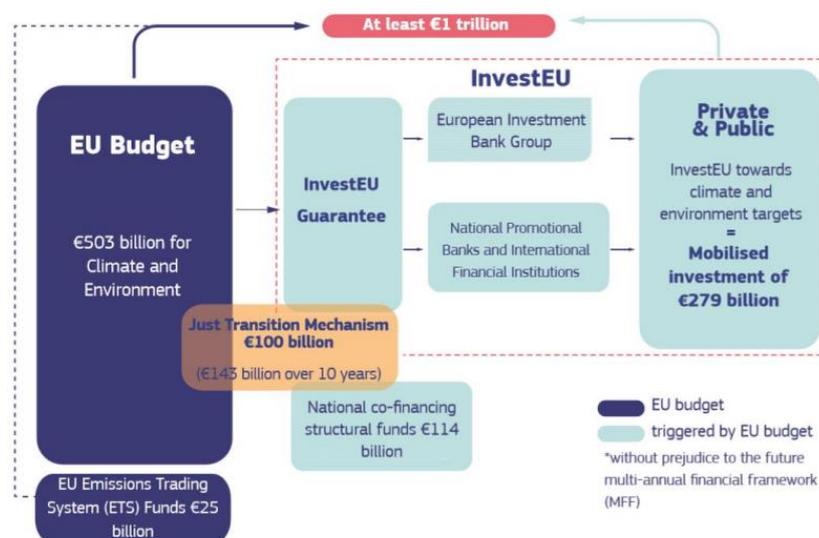
4.2.1. Instrumentos de financiación pública

Fondos estratégicos del Pacto Verde Europeo

El European Green Deal Investment Plan (EGDIP) [71] constituye la piedra angular del enfoque financiero de la transición energética de la UE. Su objetivo es movilizar más de 1 billón de euros entre 2020 y 2030 para acelerar la neutralidad climática, no solo a través de recursos públicos directos, sino también mediante la atracción de capital privado. Se trata de una estrategia de apalancamiento financiero que articula múltiples instrumentos:

- 503,000 M€ del presupuesto comunitario.
- 114,000 M€ de cofinanciación nacional.
- 279,000 M€ a través de InvestEU, con garantía presupuestaria.
- 143,000 M€ mediante el Just Transition Mechanism (JTM).
- 25,000 M€ provenientes de ingresos del Régimen de Comercio de Emisiones (ETS).

Esta estructura modular está diseñada no solo para aportar liquidez, sino para reducir riesgos, facilitar la estructuración de proyectos y atraer a inversores institucionales, en sectores que van desde las infraestructuras energéticas hasta la movilidad o la eficiencia de edificios.



*The numbers shown here are net of any overlaps between climate, environmental and Just Transition Mechanism objectives.

Subvenciones

Las subvenciones públicas constituyen transferencias directas de capital que no requieren reembolso. En el contexto de la transición energética, son especialmente útiles en fases tempranas del ciclo de vida de las tecnologías (por ejemplo, hidrógeno verde, almacenamiento avanzado o captura de carbono), donde los riesgos son elevados y las rentabilidades privadas aún inciertas.

Estas ayudas permiten: reducir el coste inicial de inversión (CapEx), aumentar la rentabilidad ajustada al riesgo, generar señales de confianza que reducen el coste del capital privado y acelerar curvas de aprendizaje que conduzcan a menores costes unitarios en el largo plazo. Sin embargo, en ocasiones estas subvenciones existen en la forma de un reembolso parcial o total de la inversión realizada pasado un tiempo. Esto implica la imposibilidad de muchas personas de adelantar el dinero para un coche o una caldera, al no disponer de ello y aunque sepan que lo recibirán de vuelta pasados unos años.

La UE opera diversos fondos con esta lógica:

- Modernisation Fund (2021-2027): Dotado con ingresos del ETS, este fondo canaliza subvenciones a 13 Estados miembros con rentas más bajas para financiar proyectos de modernización energética, eficiencia, almacenamiento o redes. Se prevén hasta 57,000 M€ en ingresos a 2030, gestionados por el Banco Europeo de Inversiones (BEI), que gestiona los ingresos y los destina a las inversiones aprobadas [72].
- Innovation Fund (2020-2030): Dirigido a tecnologías emergentes de alto impacto (CCS, electrificación industrial, almacenamiento...), este fondo tiene un enfoque paneuropeo y busca movilizar hasta 40,000 M€ para mitigar el riesgo tecnológico. Su diseño contempla subvenciones a fondo perdido y modalidades variables según el rendimiento del proyecto [73].
- Recovery and Resilience Facility (RRF): Aunque concebido como respuesta a la pandemia, al menos el 37% de sus fondos (de un total de 650,000 M€) deben dedicarse a objetivos climáticos. Esto ha permitido canalizar más de 240,000 M€ a medidas de refuerzo de redes, hidrógeno, eficiencia y movilidad eléctrica, articulando el gasto en torno a KPIs vinculantes [74].
- Social Climate Fund (SCF) (2027–2032): Este fondo nace con la expansión del ETS a otros sectores (transporte y edificación). Su intención es doble: compensar el impacto sobre hogares vulnerables y financiar inversiones en eficiencia y transporte limpio. Prevé movilizar unos 86,700 M€, a través de 27 planes nacionales [75].

Garantías y avales

Las garantías y avales públicos por otro lado se pueden consolidar como instrumentos estratégicos para acelerar la inversión en la transición energética. A diferencia de las subvenciones directas, no implican un desembolso presupuestario inmediato, sino que actúan como mecanismos de absorción de riesgo: el Estado asume total o parcialmente las posibles pérdidas en caso de impago o fracaso del proyecto. Esto permite reducir el perfil de riesgo de las inversiones, facilitando su acceso a financiación bancaria o mercados de capitales, y mejorando las condiciones financieras (tipo de interés, plazos, requisitos de garantías reales).

El valor de las garantías públicas es doble: por un lado, permiten el cierre financiero de proyectos complejos o innovadores que, sin respaldo público, quedarían fuera del apetito

inversor privado; por otro, multiplican la inversión movilizada respecto al esfuerzo presupuestario requerido. Instrumentos como *InvestEU*, que utiliza el presupuesto comunitario como colchón de riesgo a través del BEI, han demostrado su eficacia en esquemas anteriores como el Plan Juncker, con multiplicadores superiores a 10x e incluso 15x en algunos sectores [76].

A nivel nacional, entidades como *Bpifrance* (Francia) o *KfW* (Alemania) ofrecen líneas de financiación verde con garantía pública parcial. Estas herramientas han sido decisivas para desbloquear inversiones en sectores como el hidrógeno renovable, la eficiencia energética residencial o las infraestructuras de recarga eléctrica [77].

Se puede así, analizar este tipo de garantías en relación con el caso de las subvenciones directas. Se puede suponer, como ejemplo, un crédito público para la compra de un vehículo eléctrico o una bomba de calor por valor de 10.000 €, respaldado con garantía estatal. Si la tasa de impago es del 10%, el coste esperado sería de 1.000 € por beneficiario (10% de 10.000 €). En comparación, una subvención directa equivalente al 20% de la inversión (2.000 €) asegura la adopción, pero implica un coste fijo superior.

A escala macroeconómica, si el total de inversión necesaria para la transición asciende a 350.000 millones de euros anuales y se canalizara exclusivamente a través de crédito con garantía pública, una tasa de impago del 10% implicaría una pérdida potencial de 35.000 millones al año, cifra similar al coste de un programa de subvención masiva. Sin embargo, si ese mismo esfuerzo presupuestario (35.000 millones) se utilizara para emitir garantías con un multiplicador de 10x a 15x, se podrían movilizar entre 350.000 y 525.000 millones de euros de inversión privada adicional, ampliando así sustancialmente el impacto por euro público comprometido.

Incentivos fiscales

La política fiscal puede ser una herramienta útil, pero a menudo infrutilizada para orientar las decisiones de inversión y consumo. Mediante exenciones, deducciones o tipos reducidos, los gobiernos pueden incentivar tecnologías limpias y penalizar las contaminantes sin necesidad de gasto presupuestario directo.

En el marco del paquete legislativo “Fit for 55” [25], la Comisión Europea ha propuesto la revisión de la Directiva sobre la Fiscalidad de la Energía, con el objetivo de transformar el sistema fiscal energético de la UE en una herramienta coherente con sus objetivos climáticos. En concreto, se plantea una estructura fiscal basada en dos criterios clave: el contenido energético de cada producto y su intensidad de carbono. De este modo, se propone que los combustibles más contaminantes, como el carbón, el gasóleo o el queroseno, soporten una mayor carga fiscal, mientras que las energías limpias (como la electricidad renovable o el hidrógeno verde) se beneficien de tipos reducidos o nulos. La propuesta incluye además la eliminación progresiva de exenciones fiscales actualmente aplicables a combustibles fósiles en sectores como el transporte marítimo, la aviación o la agricultura, que representan una distorsión en la transición energética y un obstáculo a la competencia limpia. Esta reforma pretende enviar señales económicas más eficientes al mercado, fomentar una sustitución tecnológica acelerada y garantizar una mayor equidad fiscal entre consumidores energéticos.

Varios Estados miembros aplican tipos reducidos de IVA a tecnologías eficientes (bombas de calor, aislamientos, paneles solares), incentivando su adopción por hogares e industrias. La Directiva 2022/542 de la UE permite a los Estados miembros aplicar tipos reducidos de

IVA, incluso hasta el 0%, a productos y servicios que promuevan la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Un ejemplo destacado es Alemania, que desde enero de 2023 aplica un tipo del 0 % de IVA a la compra, importación e instalación de paneles solares fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento doméstico [78], siempre que estén conectados a la red eléctrica y se destinen a autoconsumo. Por su parte, Francia mantiene desde hace años un tipo de IVA reducido del 5,5 % aplicable a un conjunto de tecnologías energéticamente eficientes, como las bombas de calor, los sistemas de aislamiento térmico o los paneles solares térmicos y fotovoltaicos [79], siempre que se instalen en viviendas principales de más de dos años de antigüedad.

4.2.2. Instrumentos de financiación privada

Según se ha comprobado en el apartado anterior, la capacidad de financiación pública está lejos de poder satisfacer las necesidades totales de capital para acometer la transición energética en la UE. Así, las instituciones privadas y sus distintos instrumentos y mecanismos aparecen como posible soporte a las iniciativas de carácter público (tanto estatal como supranacional).

Bonos verdes

Este instrumento es el más conocido a la hora de entender la financiación privada de proyectos relacionados con la transición energética. Estos son instrumentos de deuda, cuyos ingresos asociados deben destinarse exclusivamente a financiar proyectos con beneficios ambientales, como energías renovables o mejora de eficiencia energética. En los últimos años, los bonos verdes han pasado a representar menos del 1% del total de bonos emitidos en la Unión Europea, hasta casi un 11% en 2022 en el caso de los corporativos (en los de gobiernos el porcentaje está en el entorno del 5-6% [80]).

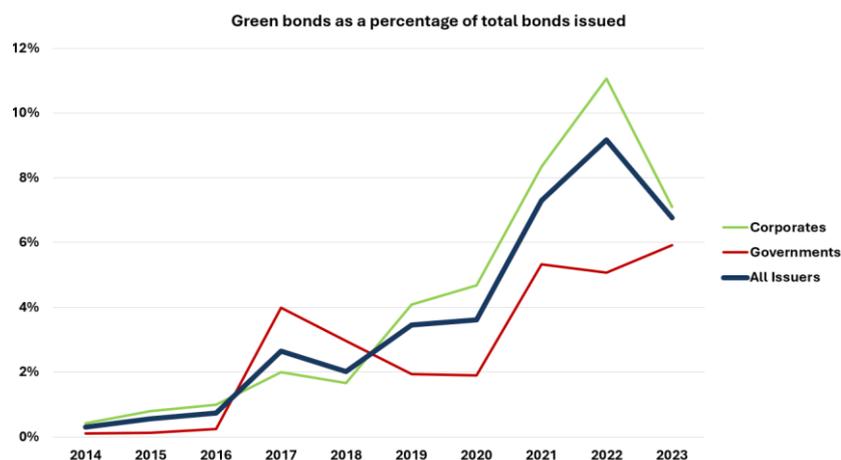


Figura 59: Porcentaje de bonos verdes con respecto al total emitidos en la UE (2014-2023). Fuente: EEA.

En cuanto a la proporción entre entidades públicas y privadas que han emitido este tipo de bonos, se puede una evolución claramente inclinada hacia empresas privadas, que están impulsando esta financiación para cumplir con sus objetivos y los de la Unión en lo que a aspectos climáticos se refiere. Gracias a esto, actualmente el valor total de bonos verdes en emitidos por corporaciones en la Unión es de más de 1000 miles de millones de euros a diciembre de 2024 [81].

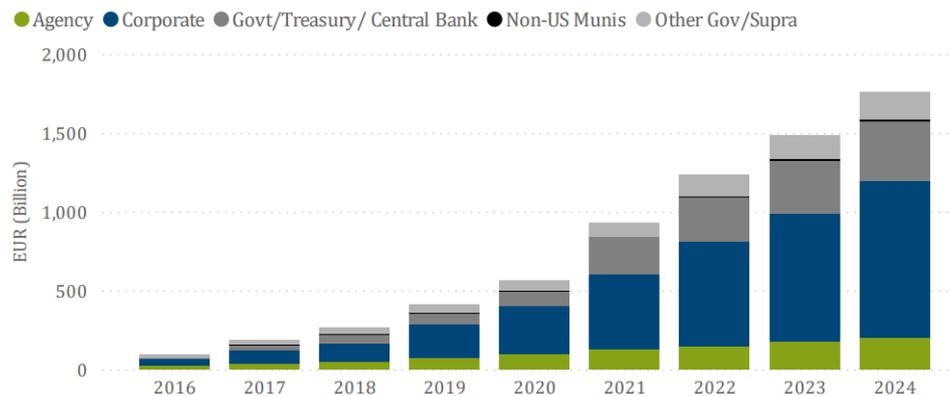


Figura 60: Emisión de bonos verdes en la Unión Europea (miles de millones de euros). Fuente: Refinitiv y AFME.

Sustainability-linked loans (SLLs)

Este instrumento es otra opción de financiación que pueden emplear las corporaciones para financiar sus distintos proyectos. En este caso, el enfoque es distinto, ya que los fondos de los préstamos no tienen por qué destinarse exclusivamente a propósitos sostenibles, pero puede tener un impacto positivo en la transición de manera indirecta y mediante incentivos. De este modo, el préstamo está condicionado al cumplimiento de ciertos indicadores clave de rendimiento (KPIs) relacionados con la sostenibilidad. Si la empresa prestataria mejora sus métricas ambientales, sociales o de gobernanza (ESG), accede a mejores condiciones financieras, como una reducción en el tipo de interés del préstamo. En caso contrario, la penalización financiera sirve de incentivo para acelerar sus compromisos. Este tipo de préstamo se adapta especialmente bien a empresas con una estrategia corporativa global de sostenibilidad, como grandes eléctricas, industrias manufactureras o empresas logísticas. Entre los KPIs más comunes vinculados a la transición energética se encuentran:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- Aumento del porcentaje de energía renovable en el consumo total de la compañía.
- Mejora en la eficiencia energética de los procesos productivos.
- Reducción de la huella de carbono del transporte de mercancías.

En cuanto a la evolución de este tipo de préstamos, desde el año 2017 han experimentado un crecimiento exponencial, llegando a un máximo de 303 miles de millones de euros en 2021, y estableciéndose en los 277 miles de millones de euros durante el año pasado, 2024 [81].

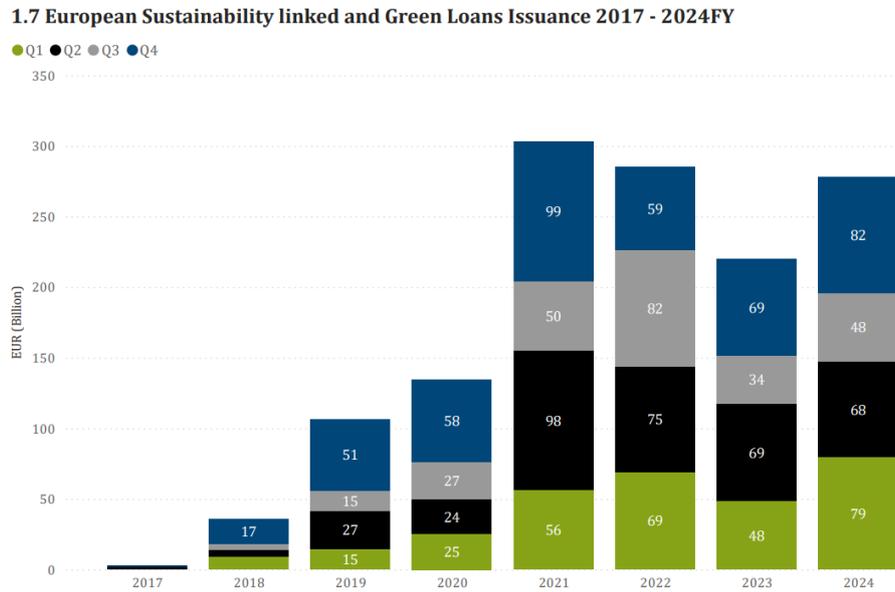


Figura 61: Emisión de préstamos vinculados a la sostenibilidad en la UE (2017-2024). Fuente: Refinitiv y AFME.

4.3. Análisis ahorros derivados de la transición

La transición energética en la Unión Europea no solo es una herramienta clave para alcanzar los objetivos climáticos, sino también una oportunidad económica. A medida que se reducen las emisiones de gases contaminantes y se avanza hacia una matriz energética más limpia y soberana, se generan ahorros sustanciales en dos ámbitos: la disminución de las importaciones energéticas y la reducción de los costes asociados a las muertes prematuras provocadas por la contaminación atmosférica. A continuación, se detallan ambos tipos de ahorros, cuya evolución conjunta se representa en la Figura 59.

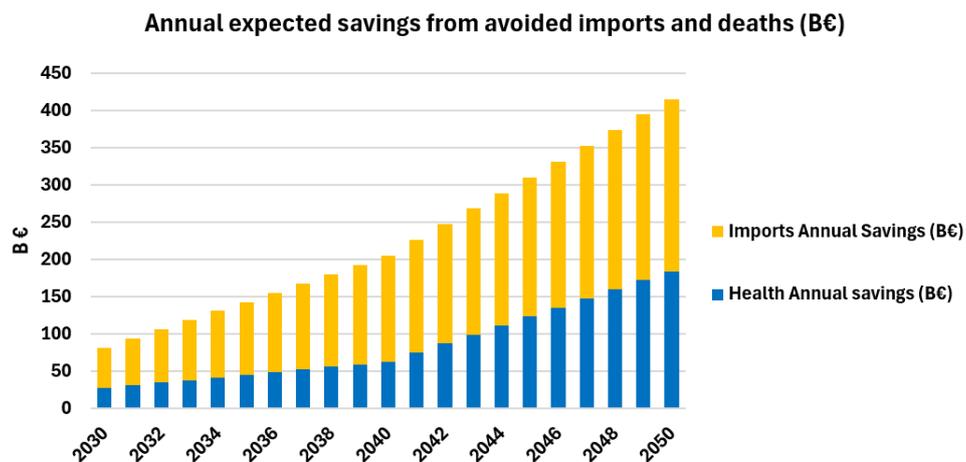


Figura 62: Ahorros derivados de las importaciones de petróleo y gas y las muertes prematuras evitadas. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Ahorro en importaciones

La Unión Europea importa anualmente en torno a 380,000 millones de euros en productos energéticos fósiles, como petróleo, gas natural o carbón [7]. Estos gastos representan una salida neta de capital y una fuente de vulnerabilidad estratégica.

Gracias a la electrificación de la demanda final, el despliegue masivo de energías renovables y la mejora en eficiencia energética, se proyecta una caída significativa en la dependencia energética del exterior. En el escenario considerado, las importaciones se reducen un 47 % en 2040, y alcanzan un 65 % menos en 2050 respecto al nivel de referencia de 2019 (más conservador que el escenario de la Comisión Europea).

Esta evolución permite estimar un ahorro anual progresivo en importaciones, que pasaría de aproximadamente 50,000 millones € en 2030 hasta más de 200,000 millones € en 2050.

4.3.2. Ahorro derivado de muertes evitadas

La contaminación atmosférica, especialmente por partículas finas (PM_{2.5}), óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono troposférico (O₃), provoca cada año cientos de miles de muertes prematuras en la UE. En 2015, se estimaron más de 5,9 millones [28] de años de vida perdidos (YLL) por esta causa y en 2022, unos 3 millones [70].

Las políticas climáticas y de calidad del aire permiten reducir esta carga y los años perdidos. Bajo un escenario conservador, se estima una reducción del 55,8 % de los YLL para 2040 y del 70 % en 2050 con respecto a los niveles de 2022 [28]. Esta mejora sanitaria tiene una traducción económica directa: Empleando el valor de un año de vida (VOLY) (114.700 €/año según la Comisión Europea [28]), los ahorros irán en aumento hasta los 184,000 millones de € en 2050, promediando unos 86,000 millones de € al año desde 2030 hasta 2050.

4.3.3. Comparativa inversión total vs ahorros

Para poner en perspectiva los ahorros derivados de la transición (y cómo estos pueden reducir de manera efectiva las necesidades totales), se muestra a continuación una comparativa con la inversión total necesaria entre 2030 y 2050 según los cálculos del apartado 3.2.3. Así, se observa una reducción de un 16% sobre las necesidades totales gracias a los ahorros anteriormente calculados.

Total needs comparison (billion 2023 €)	S1		S2		S3	
	Needs	Savings	Needs	Savings	Needs	Savings
Total	30,630	4,791	30,760	4,791	30,700	4,791
Total difference	25,839		25,969		25,909	

Figura 63: Comparativa inversión total vs ahorros totales. Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Comparativa inversión total delta vs ahorros

En este caso, y teniendo en cuenta el mismo marco temporal, al partir de un caso de base de inversión menor (ya que solo se muestra el extra con respecto a las inversiones necesarias si no se lleva a cabo la transición), el porcentaje de reducción es mayor, alcanzando el 30% respecto al delta gracias a los ahorros.

Total needs comparison (billion 2023 €)	S1		S2		S3	
	Δ (Delta)	Savings	Δ (Delta)	Savings	Δ (Delta)	Savings
Total	15,734	4,791	15,840	4,791	15,730	4,791
Total difference	10,943		11,049		10,940	

Figura 64: Comparativa inversión delta vs ahorros totales. Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Lejos de representar una carga inasumible, los resultados de este trabajo evidencian que la transición energética de la Unión Europea es un proceso ambicioso pero abordable si se tienen en cuenta los ahorros derivados y el hecho de que la inversión total es en realidad solo un extra con respecto a las inversiones necesarias en el tejido energético si no se acometiese dicha transición. El análisis comparativo entre las inversiones necesarias en un escenario de transición y aquellas que igualmente deberían acometerse bajo un escenario “Business as Usual” demuestra que una parte significativa del esfuerzo inversor sería ineludible incluso sin descarbonizar el sistema energético.

Annual net needs structure (billion 2023 €)	S1	S2	S3
Total Investment	1,532	1,538	1,535
BAU Investment	(745)	(746)	(748)
Δ BAU	787	792	787
Savings	(240)	(240)	(240)
Net Investment	547	552	547

Real GDP anual avg estimate	20,907	20,907	20,907
Net Investment as % GDP	2.62%	2.64%	2.62%

Figura 65: Comparativa de inversión neta anual necesaria para acometer la transición. Fuente: Elaboración propia

Así, los ahorros anuales derivados de una menor dependencia de importaciones energéticas (como petróleo y gas natural), junto con la reducción del coste económico de las muertes prematuras y la pérdida de productividad asociada a la contaminación, ascienden a aproximadamente 240,000 millones de euros anuales. Teniendo en cuenta estos ahorros y la inversión delta asociada a la transición, la cifra anual de necesidades se reduce al entrono de los 550,000 millones. Esta cifra representa una proporción significativamente menor frente a las necesidades anuales estimadas inicialmente (alrededor de 1,500 miles de millones), reduciéndola en un 65% aproximadamente. Esta reducción y su estructura se puede entender mejor gracias a la Figura 66:

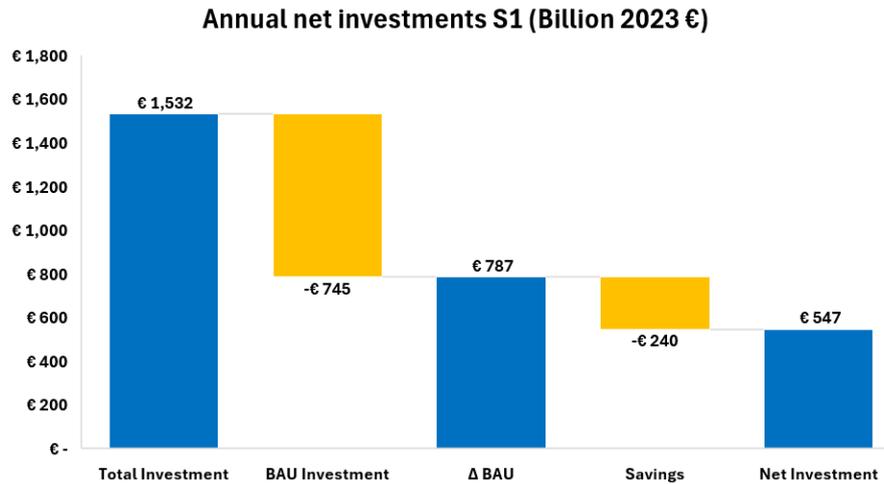


Figura 66: Comparativa de inversión neta en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Esto indica que más que una carga, la transición energética puede considerarse una reasignación eficiente de recursos. Lo que antes se destinaba estructuralmente a importaciones energéticas o a cubrir los efectos negativos del sistema actual (económicos, sanitarios o ambientales), puede ahora emplearse para financiar un nuevo modelo energético, más resiliente, autónomo y tecnológicamente avanzado. Esta transformación conlleva además una reducción estructural de la tasa de dependencia energética, situándola en niveles históricamente bajos y acercando a Europa a una soberanía energética efectiva, un objetivo geoestratégico clave en el contexto actual de incertidumbre internacional. Adicionalmente, el análisis de rentabilidad sectorial realizado, muestra que, bajo ciertas condiciones y con el apoyo adecuado mediante subvenciones o mecanismos financieros optimizados, muchos de estos proyectos alcanzan tasas de retorno positivas.

Por tanto, el reto no es únicamente técnico o financiero, sino de voluntad política, capacidad de ejecución y diseño institucional. La transición debe ser vista como una inversión estratégica a largo plazo, que no solo permitirá alcanzar los objetivos climáticos del Acuerdo de París, sino también transformar el tejido industrial europeo, mejorar la calidad del aire y la salud pública, evitar muertes prematuras y reforzar la soberanía energética del continente. Es, en definitiva, una oportunidad histórica para reindustrializar Europa sobre bases limpias, innovadoras y sostenibles.

6. Bibliografía

- [1] ¿Hasta qué punto dependen los Estados miembros de las importaciones de energía? (Consejo Europeo) <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/#0>
- [2] Eurostat: EU energy Balances: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database/additional-data#Energy%20balances>
- [3] European Commission. (2024). *The future of European competitiveness: A competitiveness strategy for Europe*. https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en
- [4] Shedding light on energy in Europe – 2024 edition. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2024>
- [5] Euro News: ¿Qué países de la UE dependen más de las importaciones energéticas? <https://es.euronews.com/my-europe/2024/12/04/que-paises-de-la-ue-dependen-mas-de-las-importaciones-energeticas>
- [6] Sabotaje del Nord Stream: https://es.wikipedia.org/wiki/Sabotaje_del_Nord_Stream
- [7] Energy imports value (€). EU imports of energy products - latest developments. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU imports of energy products - latest developments](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_latest_developments)
- [8] Turno de preguntas: Cómo garantizar la seguridad energética en la UE en 2023: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739376/EPRS_ATA\(2023\)739376_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739376/EPRS_ATA(2023)739376_ES.pdf)
- [9] EU gas storage and LNG capacity as responses to the war in Ukraine: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729401/EPRS_BRI\(2022\)729401_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729401/EPRS_BRI(2022)729401_EN.pdf)
- [10] Consejo Europeo: ¿Cuánto gas tienen almacenado los países de la UE?: <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/gas-storage-capacity/>

[11] Objetivo 55. Revision of the Renewable Energy Directive: Fit for 55 package
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698781/EPRS_BRI\(2021\)698781_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698781/EPRS_BRI(2021)698781_EN.pdf)

[12] Renewable energy statistics: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable energy statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics)

[13] GHG emissions of all world countries: Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W.E., Quadrelli, R., Riskey Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E. and Pekar, F., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, doi:10.2760/4002897, JRC138862. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024

[14] El acuerdo de París: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

[15] Gas de efecto invernadero (GEI):
https://es.wikipedia.org/wiki/Gas_de_efecto_invernadero

[16] Global Warming of 1.5°C: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-1/>

[17] Parlamento Europeo: Alarma ante la falta de agua en Europa:
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/agenda/briefing/2023-06-12/7/alarma-ante-la-falta-de-agua-en-europa>

[18] PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN Ficha de Información Comunidad de Madrid, 2019:
https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/samb/ficha_particulas_ciudadanos_2019.pdf

[19] Óxidos de Nitrógeno. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico:
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/glosario-de-terminos/glosario-contaminantes/oxiditos-nitrogeno.html>

[20] EEA: Notable mejora de la calidad del aire en Europa en la última década y menos muertes vinculadas a la contaminación:
<https://www.eea.europa.eu/es/highlights/notable-mejora-de-la-calidad>

[21] CSIC: Los océanos absorben el 31% del CO2 generado por el hombre:
<https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/los-oceanos-absorben-el-31-del-co2-generado-por-el-hombre>

[22] IAEA: ¿Qué es la acidificación de los océanos?

<https://www.iaea.org/es/newscenter/news/acidificacion-oceanos-definicion#:~:text=En%20la%20actualidad%2C%20el%20pH,%C3%A1cidos%20que%20en%20aquella%20%C3%A9poca>

[23] ICM-CSIC: Los organismos calcificadores, en jaque por el calentamiento y la

acidificación del océano: <https://www.icm.csic.es/es/noticia/los-organismos-calcificadores-en-jaque-por-el-calentamiento-y-la-acidificacion-del-oceano#:~:text=28%20Noviembre%202022-.Los%20organismos%20calcificadores%2C%20en%20jaque%20por%20el,y%20la%20acidificaci%C3%B3n%20del%20oc%C3%A9ano&text=Se%20trata%20de%20animales%20que,de%20mar%20o%20los%20crust%C3%A1ceos>.

[24] Consejo Europeo: Pacto verde Europeo:

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

[25] Consejo Europeo: Objetivo 55: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>

[26] Eurostat: Gross and net production of electricity and derived heat by type of plant and operator:

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_peh_custom_15223876/default/table?lang=en

[27] Greenhouse gas emission intensity of electricity generation, EU level:

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1/greenhouse-gas-emission-intensity-of-electricity-generation-eu-level?activeTab=658e2886-cbf-4c2f-a603-061e1627a515>

[28] Part 3: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Securing our future: Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024SC0063>

[29] Part 1: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Securing our future: Europe's 2040 climate target and

path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024SC0063>

[30] Eurostat: Energy statistics - an overview: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy statistics - an overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview)

[31] Energy Performance of Buildings Directive:

https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

[32] Plan Marshall: https://es.wikipedia.org/wiki/Plan_Marshall

[33] Economipedia: Externalidad:

<https://economipedia.com/definiciones/externalidad.html#:~:text=Un%20ejemplo%20de%20externalidad%20positiva,las%20utiliza%20no%20est%C3%A1%20contaminando>

[34] Nasa: Metano: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/metano/?intent=111>

[35] McKinsey, (2020). Net-Zero Europe Decarbonization pathways and socioeconomic implication:

<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/how%20the%20european%20union%20could%20achieve%20net%20zero%20emissions%20at%20net%20zero%20cost/net-zero-europe-vf.pdf>

[36] Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía):

<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

[37] CO₂ equivalente:

https://es.wikipedia.org/wiki/CO%E2%82%82_equivalente#:~:text=Dicha%20medida%20de%20CO2,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero.

[38] Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS):

https://es.wikipedia.org/wiki/Bioenerg%C3%ADa_con_captura_y_almacenamiento_de_carbono

[39] Captura directa del aire (DACCS):

https://es.wikipedia.org/wiki/Captura_directa_del_aire

[40] European Environment Agency (2021). Air Quality in Europe 2021:

<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021>

[41] Eurostat: Hybrid & electric cars make up 48% of new registrations:

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241213-4>

[42] Eurostat: 1.5 million new battery-only electric cars in 2023:

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240802-1#:~:text=This%20share%20of%20battery%20only,from%20data%20published%20by%20Eurostat.>

[43] EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained:

https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2022/11/story/20221019STO44572/20221019STO44572_en.pdf

[44] Euronews: La industria automovilística de la UE se enfrenta a la competencia de los vehículos eléctricos chinos:

<https://es.euronews.com/green/2024/10/09/la-industria-automovilistica-de-la-ue-se-enfrenta-a-la-competencia-de-los-vehiculos-electr>

[45] El auge del coche eléctrico en China y su impacto en la Unión Europea:

<https://repositorio.bde.es/handle/123456789/37852>

[46] Euronews: La UE da luz verde definitiva a la imposición de aranceles elevados a los coches eléctricos chinos:

<https://es.euronews.com/business/2024/10/29/la-ue-da-luz-verde-a-la-imposicion-de-aranceles-elevados-a-los-coches-electricos-chinos>

[47] Bruegel: How to finance the European Union's building decarbonisation plan:

<https://www.bruegel.org/policy-brief/how-finance-european-unions-building-decarbonisation-plan>

[48] ETS2: buildings, road transport and additional sectors:

https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en

[49] PV Magazine: <https://www.pv-magazine.es/comunicados/parques-de-energia-solar-en-espana-su-rentabilidad-depende-en-gran-medida-de-sus-medidas-de->

[proteccion/#:~:text=El%20coste%20de%20instalaci%C3%B3n%20de,801.000%20y%20909.000%20de%20euros.](#)

[50] Climate Copernicus EU: https://climate-copernicus-eu.translate.google.com/translate/a/2021/clouds-and-sunshine-duration?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=sge#:~:text=Across%20Europe%20as%20a%20whole,trend%20towards%20increased%20sunshine%20duration.

[51] Strategic Energy Europe: <https://strategicenergy.eu/europe-ppa-prices/#>

[52] Huertos solares: costes de montarlo y su rentabilidad: <https://crowmie.com/huerto-solar/#:~:text=los%20costes%20asociados.-,Coste%20del%20mantenimiento%20de%20un%20huerto%20solar,optimizar%20la%20producci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa.>

[53] Plan estratégico Enerfin: https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/renovables/regimen-economico/26Enero/Proyectos%20de%20inversi%C3%B3n%20e%C3%B3licos%20adjudicatarios%20de%20la%20subasta/EOL_PE3%20ENERFIN%20SOCIEDAD%20DE%20ENERG%C3%8DA%2040%20MW.pdf

[54] Report 2022 European Commission and WindEurope: https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2023/11/ECWE_2022.pdf

[55] LevelTen's PPA Price Index: <https://www.leveltenenergy.com/ppa#PPI-Contact>

[56] The Benefits of Cooperation in a Highly Renewable European Electricity Network: <https://arxiv.org/abs/1704.05492>

[57] Appa Renovables: Informe «El Momento de la Electrificación: Energía Renovable para una Economía Competitiva»: <https://www.appa.es/informe-el-momento-electrificacion-energia-renovable-economia-competitiva/>

[58] Coeficient Of Performance (COP): https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_performance

[59] Euronews: Del papel a la pasta: Las bombas de calor industriales reducirían un 25% de las emisiones de la UE: <https://es.euronews.com/green/2025/02/04/del-papel-a-la-pasta-las-bombas-de-calor-industriales-reduciran-un-25-de-las-emisiones-de>

[60] Tappi: Improved Energy Efficiency in Paper Making Through Reducing Dryer Steam Consumption Using Advanced Process Control:

<https://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/318.455%20doc.pdf?>

[61] BPA: Industrial Heat Pump Market Study: [https://www.bpa.gov/-](https://www.bpa.gov/-/media/Aep/energy-efficiency/emerging-technologies/202403-industrial-heat-pump-market-study.pdf)

[/media/Aep/energy-efficiency/emerging-technologies/202403-industrial-heat-pump-market-study.pdf](https://www.bpa.gov/-/media/Aep/energy-efficiency/emerging-technologies/202403-industrial-heat-pump-market-study.pdf)

[62] Subsidies for industrial heat pumps in Europe: [https://www.ehpa.org/wp-](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/11/EHPA-Subsidies-for-industrial-heat-pumps-in-Europe-1.pdf)

[content/uploads/2024/11/EHPA-Subsidies-for-industrial-heat-pumps-in-Europe-1.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/11/EHPA-Subsidies-for-industrial-heat-pumps-in-Europe-1.pdf)

[63] Dutch TTF Natural Gas Futures: <https://es.investing.com/commodities/dutch-ttf-gas-c1-futures>

[64] Energías renovables: El precio medio de un coche eléctrico en España es de 34.661 euros: <https://www.energias-renovables.com/movilidad/el-precio-medio-de-un-coche-electrico-20230717>

[65] El precio de los coches en España ha subido cuatro veces más que los salarios desde 2019: https://www.elconfidencial.com/motor/industria/2025-01-02/precio-coche-subida-inflacion-salario-espana-electrico-cafe_4034349/#:~:text=Seg%C3%BAn%20un%20estudio%20de%20Sumauto,Y%202025%20puede%20ser%20peor&text=Si%20alguien%20cree%20que%20los,que%20no%20le%20falte%20raz%C3%B3n.

[66] Programa Moves III: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>

[67] Información comparativa sobre el coste de los combustibles de automoción en €/100km:

<https://eurospor100km.energia.gob.es/Paginas/coste%E2%82%AC100km.aspx>

[68] Cuántos kilómetros recorre al año cada coche que circula por España:

<https://motor.elpais.com/actualidad/cuantos-kilometros-recorre-al-ano-cada-coche-que-circula-por-espana/>

[69] El confidencial: De media, la reparación de un coche eléctrico cuesta un 28% menos que la de uno de combustión: https://www.elconfidencial.com/motor/trafico/2024-07-22/taller-reparacion-mantenimiento-electrico-gasolina-diesel-hibrido-solera_3929134/

[70] EEA: Years of life lost attributable to exposure to PM2.5, NO2 and O3, 2022:

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-2024/table-2-years-of-life-lost-attributable-to-exposure-to-pm2-5-no2-and-o3-2022?activeTab=570bee2d-1316-48cf-adde-4b640f92119b>

[71] The European Green Deal Investment Plan and Just Transition Mechanism explained:

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_24

[72] Comisión Europea: Modernisation Fund:

https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en

[73] Comisión Europea: Innovation Fund: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en

[74] Comisión Europea: The Recovery and Resilience Facility:

https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en

[75] Comisión Europea: Social Climate Fund: https://commission.europa.eu/social-climate-fund_en

[76] From the European Investment Bank to the European Parliament and the Council on 2020 EIB Group Financing and Investment Operations under EFSI:

<https://www.eib.org/files/publications/strategies/efsi-2020-report-ep-council-en.pdf>

[77] Bpifrance: Garantie Développement Vert: <https://www.bpifrance.fr/catalogue-offres/garantie-developpement-vert>

[78] Germany: Recently introduced VAT rate of 0% for solar panel systems - New federal instructions: <https://www.dlapiper.com/en/insights/publications/vat-monthly-alert-series/2023/vat-monthly-alert-march-2023/recently-introduced-vat-rate-of-0-for-solar-panel-systems-new-federal-instructions>

[79] Francia reduce al 5,5 % el IVA para sistemas fotovoltaicos de hasta 9 kW:

<https://www.pv-magazine.es/2025/02/11/francia-reduce-al-55-el-iva-para-sistemas-fotovoltaicos-de-hasta-9-kw/>

[80] EEA: Green bonds in Europe:

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/green-bonds-8th->

[eap#:~:text=Green%20bonds%20account%20for%20only,fell%20to%206.8%25%20in%202023](#)

[81] AFME: ESG Finance Report Q4 2024:

<https://www.afme.eu/Portals/0/DispatchFeaturedImages/ESG%20Finance%20Report%20Q4.pdf>

[82] OECD: The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution:

https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/06/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution_g1g68583/9789264257474-en.pdf

[83] TIME: Preterm Births Linked to Air Pollution Cost Billions in the U.S.:

<https://time.com/4274355/air-pollution-preterm-birth/>

[84] EY: Un “Clean Industrial Deal” eficaz y eficiente para Europa:

<https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/es-es/insights/energy-resources/documents/ey-clean-deal-industrial-larga.pdf>

7. Anexos

7.1. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

El proyecto se alinearán con distintos ODS, como se muestra a continuación:

- **Objetivo 3:** Salud y bienestar

En particular, se busca especialmente contribuir con el 3.4, que dice “Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo”. La transición energética permitirá reducir la contaminación atmosférica asociada al uso de combustibles fósiles, reduciendo así los efectos perjudiciales de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la salud y bienestar de los ciudadanos, como puede comprobarse en el apartado 3.3.3. Impacto en la contaminación y salud.

- **Objetivo 7:** Energía asequible y no contaminante

Especialmente, el presente proyecto pretende adherirse a los puntos 7.2 “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas” y 7.3 “De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética”. Según se ha indicado en la memoria, la proporción de fuentes de energía renovable se multiplicará en los próximos años, llegando casi a representar la totalidad de la producción eléctrica.

- **Objetivo 8:** Trabajo decente y crecimiento económico

En este caso, el objetivo que se busca cumplir es el 8.4, que reza: “Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados”. Como se muestra en el apartado 3.3.4. Impacto en el empleo y la economía, el resultado neto en empleo derivado de la transición energética se espera positivo.

- **Objetivo 9:** Industria, innovación e infraestructura

Especialmente el objetivo 9.4 “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas”. En el apartado 3. Transición

hacia el objetivo Net Zero se indican distintas transformaciones que se acometerán en la industria europea que sea alinean con el mencionado objetivo.

- **Objetivo 13:** Acción por el clima

En general, el núcleo del trabajo está alineado con este objetivo, buscando encontrar modos de reducir la factura asociada a la transición, permitiendo a la Unión Europea cumplir con sus metas de neutralidad en carbono para 2050. Estas reducciones de emisiones y el desarrollo e implementación de tecnologías limpias son clave para mitigar el cambio climático y promover un futuro sostenible.