



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL, SOCIAL Y ECONÓMICA DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE PAÍSES EUROPEOS CON ALTO POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN SOLAR BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Autor: Gregorio Egea Díaz

Director: Ana María Santos Montes

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

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

Análisis de la sostenibilidad medioambiental, social y económica de los mixes energéticos de distintos países europeos con alto potencial para la generación solar bajo la perspectiva del análisis de ciclo de vida.

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 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.

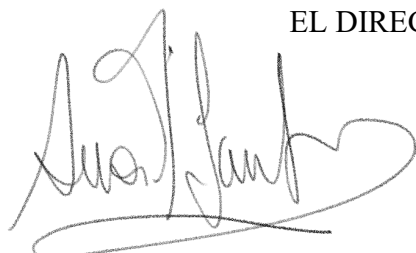


Fdo.: Gregorio Egea Díaz

Fecha: 18./07./22.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo: Ana María Santos Montes Fdo: Carlos Martín Sastre. Fecha: 18/07/2022



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL, SOCIAL Y ECONÓMICA DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE PAÍSES EUROPEOS CON ALTO POTENCIAL PARA LA GENERACIÓN SOLAR BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Autor: Gregorio Egea Díaz

Director: Ana María Santos Montes

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Resumen del proyecto

La sostenibilidad se puede entender como uno de los grandes retos actuales de la humanidad. En el contexto del inminente cambio climático, los países e instituciones han puesto en marcha planes para mitigar los efectos devastadores de la crisis climática y preservar la salud de las personas sin comprometer la de las generaciones futuras. Aunque la preservación del medio ambiente es habitualmente el foco de atención, la sostenibilidad también la componen los aspectos económicos y sociales.

En este contexto, este proyecto analiza la sostenibilidad de los mixes de generación de un conjunto de países contemplando dos escenarios: 2019 y 2030 mediante el uso de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El ámbito geográfico del estudio es Europa por situarse en la vanguardia en la lucha contra la crisis climática y por compartir un marco común de objetivos. Para acotar el perímetro, se escogen además los países que prevén instalar más potencia solar para 2030: Alemania, Bélgica, Bulgaria, Dinamarca, España, Grecia, Holanda, Hungría e Italia.

Siguiendo la metodología ACV, primeramente, recopila información de fuentes oficiales y modela los mixes de los países mencionados a fecha 2019. Para modelar los mixes futuros, se hace uso de los Planes Energéticos y Climáticos Nacionales de 2030 elaborados por los propios países del estudio. Estos planes muestran una clara apuesta por las energías de origen renovable, como se muestra en la figura 1 que son el catalizador necesario para alcanzar la sostenibilidad en los mixes energéticos:

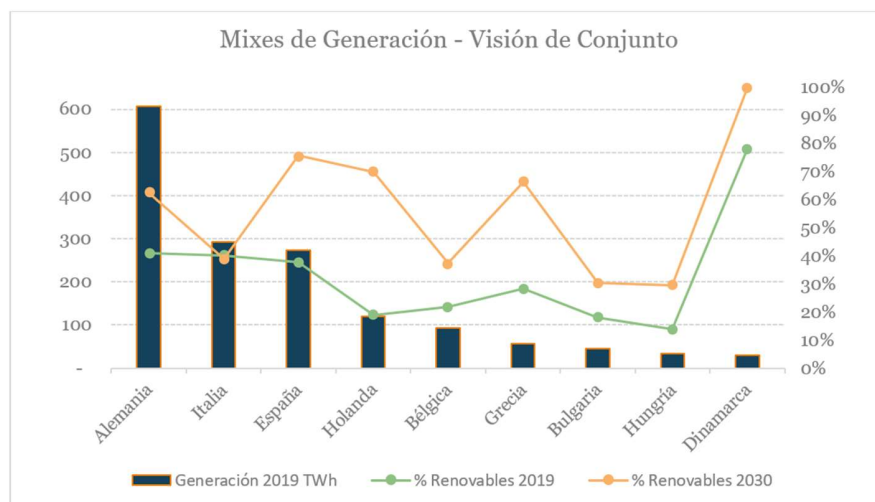


Figura 1. Mixes de generación y presencia de renovables 2019-2030. Fuente: Elaboración propia con datos Eurostat [10].

Como se muestra en la figura 1, todos los países del estudio contemplan en sus planes energéticos aumentar significativamente su generación con renovables y esperan tener al menos un 30% de generación renovable para 2030. Dinamarca, España y Holanda serán los líderes de generación renovable en 2030. Siendo Holanda el país que más aumentará las renovables en su mix. Y cabe destacar que Dinamarca alcanzar 100% de renovables en 2030. Aunque la energía eólica será la predominante de los mixes, la energía solar será la que más aumentará multiplicando por 2,5 su generación total en 2030.

En el Análisis del Ciclo de Vida se emplean la herramienta SimaPro y el modelo de cálculo de impactos *CML-IA baseline V3.06 / EU25* de donde se obtienen los siguientes impactos medioambientales para cada uno de los mixes modelados en torno a la unidad funcional seleccionada, 1kWh de generación eléctrica en baja tensión: Potencial de calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, agotamiento abiótico, oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad y toxicidad humana. Estos impactos ambientales se completan con la huella terrestre u ocupación del terreno. La mayoría de estos impactos son más acusados en las tecnologías de generación con carbón y más respetuosos en el caso de las renovables. Otros casos como la ocupación del terreno o el agotamiento abiótico, se comportan de manera inversa.

Tomando como ejemplo las emisiones de CO₂eq (medida del potencial de calentamiento global), que es el impacto medioambiental habitualmente más vigilado por los planes energéticos, se obtienen los siguientes impactos normalizados por cada una de las tecnologías estudiadas:

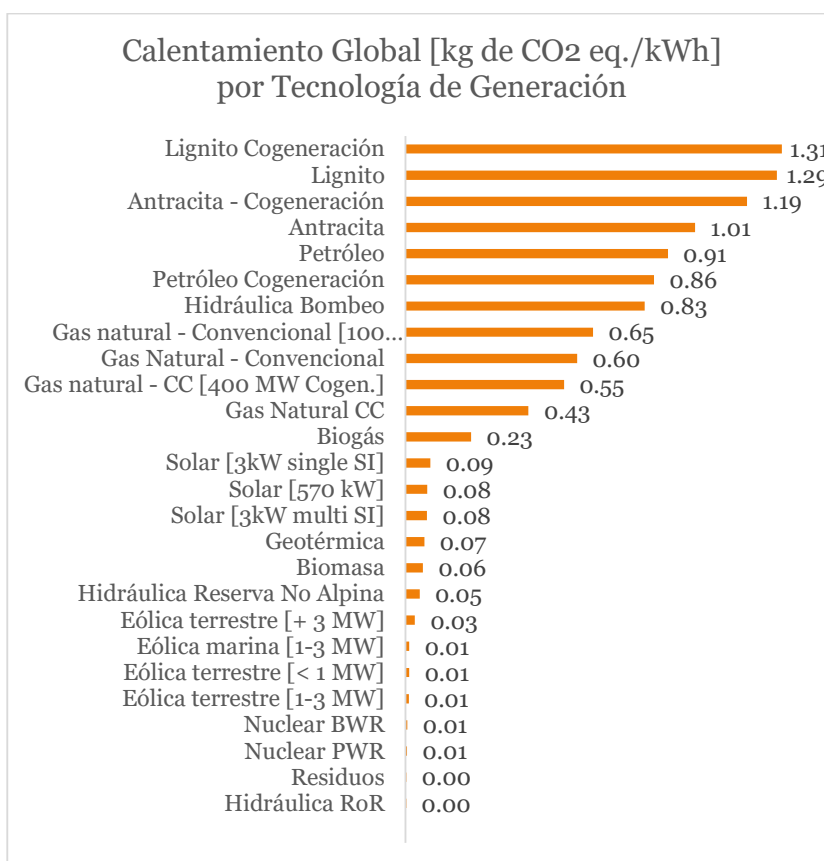


Figura 2. Impacto calentamiento global por tecnología

Como se muestra en la figura 2, respecto al Potencial de calentamiento global las tecnologías de generación basadas en carbón/ petróleo son las que generan mayores emisiones con valores superiores a 1 Kg CO₂/kWh mientras las que generan menores emisiones son las renovables (Hidráulica, eólicas) y, la nuclear.

Después de evaluar los impactos de las diferentes tecnologías de generación se evalúan los impactos medioambientales de los mixes energéticos de los países seleccionados en 2019 y 2030. Para contemplar los aspectos económico y social de la sostenibilidad se añaden al proyecto un análisis de los costes nivelados de la electricidad (LCOE), un análisis de la

aceptación social de los mixes de generación, un análisis de la seguridad de suministro y un estudio sobre la generación de empleo, donde cabe destacar el papel que jugarán las renovables en el año 2030 ya que abaratarán sus costes y producirán la mayor parte del empleo del futuro sobrepasando al liderazgo actual de los combustibles fósiles. La aceptación social favorable hacia las renovables, hacen de causa y/o consecuencia que los mixes futuros de los países sean más aceptados entre los habitantes.

El proyecto finaliza con un análisis multicriterio para evaluar de forma aislada y conjunta los tres aspectos de la sostenibilidad: medio ambiente, economía y sociedad; concluyendo que el gran despliegue previsto de renovables en Europa para el año 2030 no sólo contribuye a crear mixes más sostenibles medioambientalmente, sino también económica y socialmente.

Tras el análisis multicriterio, se evalúan e interpretan los resultados de donde se obtienen ciertas conclusiones:

- Dinamarca, España y Holanda serán los líderes de generación renovable en el año 2030 con 100%, 75% y 70% de su mix energético respectivamente. Siendo Holanda el que más aumentará la presencia de renovables en su mix durante la próxima década (+270%).
- La energía eólica será la mayor fuente de generación de los mixes de los países del estudio, superando al gas natural para 2030.
- La energía solar será la que más crezca en la próxima década al multiplicar por más de 2,5 veces la energía producida en términos absolutos.

Respecto a impactos ambientales por mix energético, y tomando como ejemplo el potencial de calentamiento global, se tienen los siguientes resultados en la figura 3:

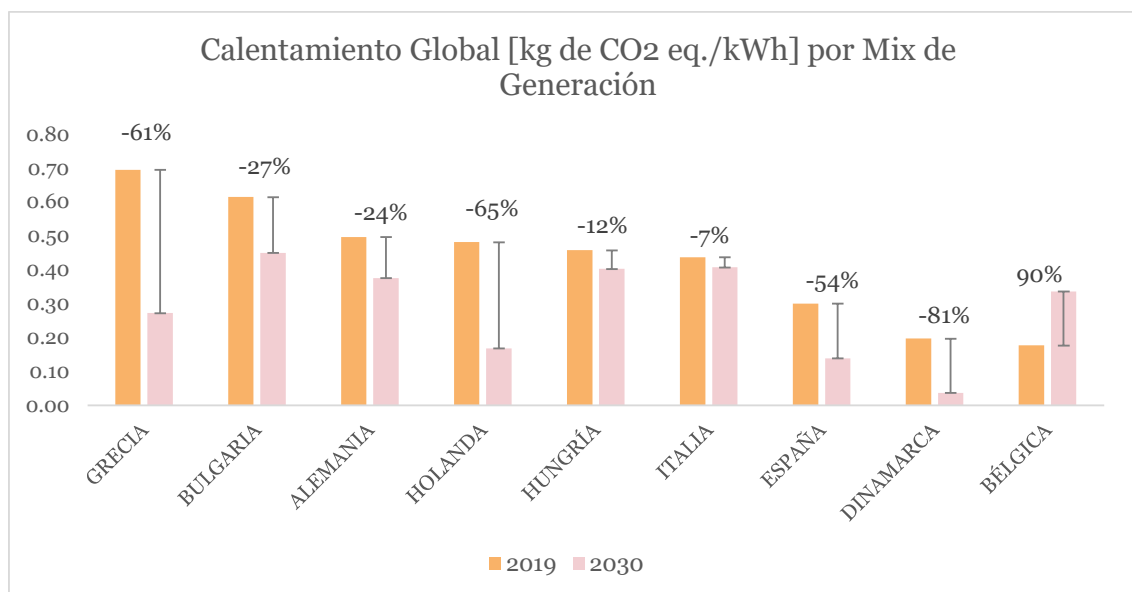


Figura 3. Impacto del potencial de calentamiento global por mix de generación 2019- 2030

- Los planes energéticos y climáticos tienen, de forma generalizada, un impacto positivo en todas las categorías de impacto ambiental (a excepción de la ocupación del terreno y el agotamiento abiótico de materiales).
- Grecia tiene el mix más contaminante en 2019 en las categorías de calentamiento global, como se muestra en la figura 3, y destrucción de la capa de ozono. Por otro lado, es de los países que más reduce sus emisiones en los planes para 2030.
- Bulgaria es el país más contaminante en el resto de las categorías de impacto ambiental: Acidificación, eutrofización, toxicidad/ecotoxicidad y oxidación fotoquímica.
- Bélgica es el país con el mix más respetuoso en términos de calentamiento global, como muestra la figura 3, y del resto de impactos ambientales de alcance local en la actualidad, no obstante, es el único que empeora su situación al prescindir de la nuclear para 2030 cediendo la primera posición a Dinamarca.
- Dinamarca es el más respetuoso con la destrucción de la capa de ozono y en la actualidad y el que más reduce sus emisiones en 2030 por su mix 100% renovable.

En el estudio de costes nivelados de la electricidad, obtenemos las siguientes conclusiones:

- La biomasa es la tecnología de generación más costosa, seguida por la solar de baja potencia. La solar de gran potencia, sin embargo, posee de los costes nivelados más económicos junto con la geotérmica y la eólica terrestre.
- Se prevé que todas las fuentes de generación renovable mejoren sus costes en el futuro, a un mayor ritmo que el de los combustibles fósiles.
- La variación entre costes nivelados de los mixes es poco significativa a fecha 2019. No obstante, Dinamarca y Holanda prevén economizar sus mixes energéticos en un 21 y 18% respectivamente. Por otro lado, Hungría y España encarecerán su generación en un 7 y 10% respectivamente principalmente por su gran apuesta de solar de baja potencia entre otras.

Atendiendo al análisis de impactos sociales, obtenemos las siguientes conclusiones:

- El gran despliegue de renovables tiene un gran impacto sobre la seguridad de suministro de los países: Los países con menos presencia de renovables en 2019 diversifican su mix al incorporarlas en 2030 favoreciendo la seguridad de suministro. Por otro lado, los países con mayor presencia de renovables en la actualidad concentran su mix en torno a ellas eliminando alternativas de generación como los combustibles fósiles.
- Los países aumentan su aceptación entre 2019 y 2030 de forma generalizada como consecuencia de la descarbonización de sus mixes y la reducción de la nuclear.
- Dinamarca posee el mix más aceptado entre sus habitantes y Holanda el más rechazado en la actualidad. Mientras que España posee el mix más aceptado en 2030 y Bulgaria pasa a ser el menos aceptado.
- Las energías renovables, en especial la solar fotovoltaica y la eólica, son las que más incrementarán el número de empleos directos en Europa en 2030.
- Dinamarca, Alemania e Italia poseen los mixes con más empleabilidad de los países en el foco en la actualidad. Por otro lado, España pasa de tener el mix con menos empleabilidad por kWh al que más en 2030 con un incremento del 138%.

Finalmente, con respecto al estudio de las conclusiones del análisis multicriterio de la sostenibilidad, se han obtenido los resultados mostrados en la figura 4 en la escala “0” (más sostenible) – “1” (menos sostenible):



















País y Periodo	Aspecto medioambiental	Aspecto económico	Aspecto Social	Evaluación Conjunta de la Sostenibilidad	
Dinamarca - 2030	0.16	0.00	0.38	0.18	
Holanda - 2030	0.20	0.16	0.31	0.22	
Alemania - 2030	0.36	0.45	0.31	0.38	
Grecia - 2030	0.31	0.68	0.19	0.39	
España - 2030	0.16	0.97	0.05	0.39	
Dinamarca - 2019	0.25	0.69	0.36	0.43	
Bélgica - 2030	0.26	0.64	0.45	0.45	
Italia - 2030	0.33	0.67	0.38	0.46	
España - 2019	0.22	0.65	0.51	0.46	
Italia - 2019	0.35	0.71	0.36	0.47	
Bélgica - 2019	0.12	0.62	0.75	0.49	
Alemania - 2019	0.39	0.64	0.48	0.50	
Bulgaria - 2030	0.45	0.64	0.64	0.58	
Hungría - 2019	0.41	0.76	0.67	0.61	
Hungría - 2030	0.40	1.00	0.44	0.61	
Holanda - 2019	0.34	0.76	0.75	0.62	
Bulgaria - 2019	0.60	0.57	0.80	0.66	
Grecia - 2019	0.76	0.80	0.53	0.69	

Figura 4. Resultados del análisis multi criterio de la sostenibilidad de los mixes energéticos

- Como muestra la figura 4, todos los mixes a fecha 2030 son medioambientalmente más sostenibles que aquellos que presentan los países en la actualidad gracias a las ventajas de la energía renovable, que, por lo general, destacan en los tres aspectos contemplados respecto a los combustibles fósiles.
- Bélgica resulta tener el mix más sostenible en términos medioambientales y el segundo más sostenible en términos económicos en la actualidad debido a su gran presencia de nuclear en el mix. Esto le otorga la tercera posición en el ranking de mixes más sostenibles en el año 2019, posición que pierde por eliminar la nuclear y aumentar radicalmente el consumo de gas natural a modo de compensación en 2030.

- Bulgaria posee en la actualidad el mix más sostenible económicamente, pero ocupa las penúltima y última posición en términos de sostenibilidad medioambiental y sostenibilidad social respectivamente. En 2030, pasa a tener el mix menos sostenible medioambientalmente.
- Grecia posee el mix menos sostenible en la actualidad por ser el menos sostenible en los aspectos medioambiental y económico, no obstante, alcanza la cuarta posición en sostenibilidad en 2030 por sus agresivos planes de descarbonización y apuesta por renovables.
- Holanda es, después de Grecia, el mix menos sostenible en 2019. No obstante, el mix esperado para 2030 es el segundo más sostenible gracias a que pasará a generar más de un 50% de su electricidad con eólica, que contribuye positivamente a los tres aspectos de la sostenibilidad contemplados.
- Dinamarca posee el mix más sostenible tanto en 2019 como en 2030 de todos los modelados equilibrando los aspectos medioambiental y económico. Respecto al aspecto social, ocupa la sexta posición a causa de su mala puntuación en términos de seguridad de suministro, ya que, en 2030, concentra toda su generación en poca variedad de energías renovables.

Abstract

Sustainability can be understood as one of the great challenges facing humanity today. In the context of impending climate change, countries and institutions have launched plans to mitigate the devastating effects of the climate crisis and preserve people's health without compromising that of future generations. Although environmental preservation is usually the focus of attention, sustainability is also composed of economic and social aspects.

In this context, this project analyzes the sustainability of the generation mixes of a set of countries in two scenarios: 2019 and 2030 using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The geographical scope of the study is Europe because it is at the forefront of the fight against the climate crisis and because it shares a common framework of objectives. To narrow the perimeter, the countries that plan to install the most solar capacity by 2030 were also chosen: Belgium, Bulgaria, Denmark, Germany, Greece, the Netherlands, Hungary, Italy, Spain, and Bulgaria.

Following the LCA methodology, it first collects information from official sources and models the mixes of the above-mentioned countries as of 2019. To model future mixes, use is made of the 2030 National Energy and Climate Plans prepared by the countries in the study. These plans show a clear commitment to renewable energies, as shown in Figure 1, which are the necessary catalyst to achieve sustainability in the energy mixes:

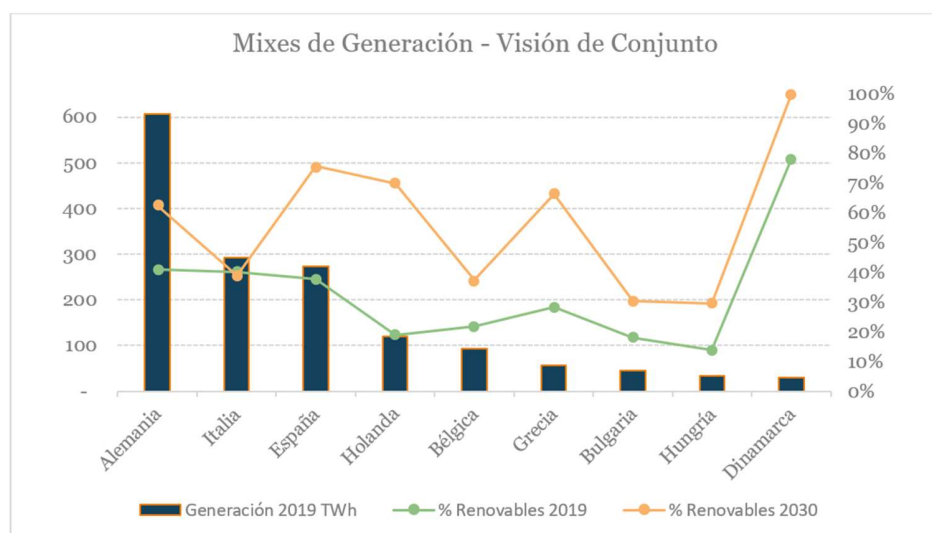


Figura 5. Generation mixes and presence of renewables 2019-2030. Source: Own elaboration with Eurostat data [10].

As shown in Figure 5, all the countries in the study are planning to significantly increase their renewable generation in their energy plans and expect to have at least 30% renewable generation by 2030. Denmark, Spain and the Netherlands will be the leaders in renewable generation in 2030. The Netherlands will be the country that will increase renewables in its mix the most. And it is worth noting that Denmark will reach 100% renewables by 2030. Although wind energy will be the predominant energy mix, solar energy will increase the most, multiplying by 2.5 times its total generation in 2030.

The Life Cycle Assessment uses the SimaPro tool and the CML-IA baseline V3.06 / EU25 impact calculation model, from which the following environmental impacts are obtained for each of the mixes modelled around the selected functional unit, 1kWh of low voltage electricity generation: Global warming potential, ozone layer depletion, abiotic depletion, photochemical oxidation, acidification, eutrophication, ecotoxicity and human toxicity. These environmental impacts are complemented by the land footprint or land occupation. Most of these impacts are more pronounced in coal-fired generation technologies and more respectful in the case of renewables. Other cases, such as land occupation or abiotic depletion, behave inversely.

Taking CO₂eq emissions (a measure of global warming potential) as an example, which is the environmental impact usually most closely monitored by energy plans, the following normalized impacts are obtained for each of the technologies studied:

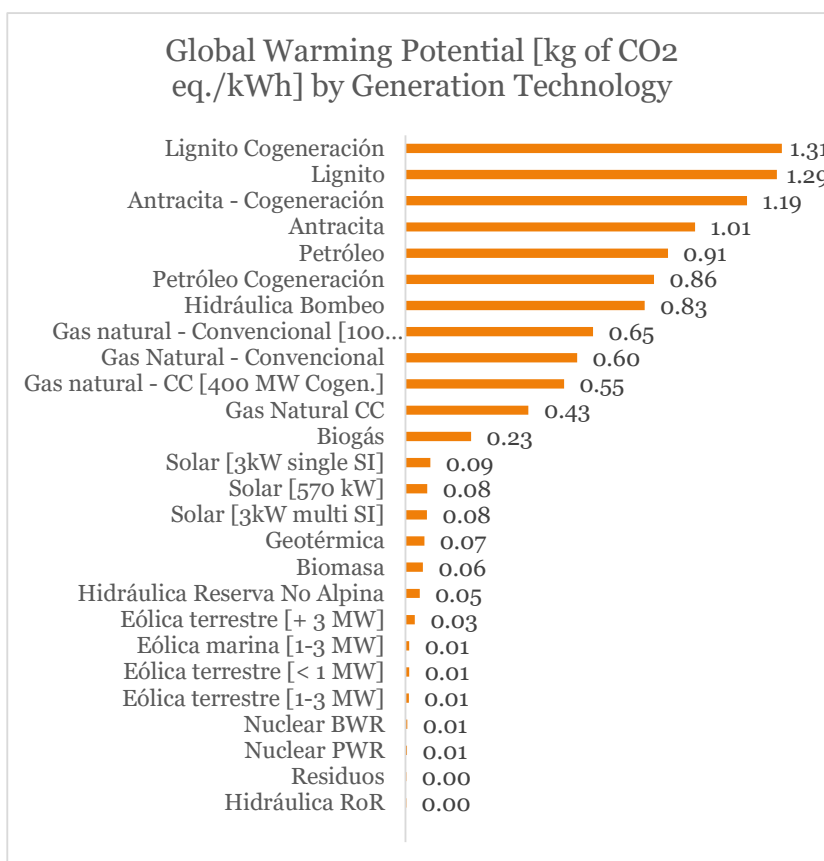


Figura 6. Global warming impact by technology

As shown in Figure 6, with respect to the Global Warming Potential, coal/oil based generation technologies are the ones that generate the highest emissions with values higher than 1 Kg CO₂/kWh while the ones that generate the lowest emissions are renewable (hydro, wind) and nuclear.

After evaluating the impacts of the different generation technologies, the environmental impacts of the energy mixes of the selected countries in 2019 and 2030 are evaluated. In order to contemplate the economic and social aspects of sustainability, an analysis of the levelized costs of electricity (LCOE), an analysis of the social acceptance of the

generation mixes, an analysis of the security of supply and a study on the generation of employment are added to the project, where the role that renewables will play in 2030 should be highlighted, since they will lower their costs and will produce most of the employment of the future, surpassing the current leadership of fossil fuels. The favorable social acceptance of renewables will make the future mixes of the countries to be more accepted among the inhabitants.

The project ends with a multi-criteria analysis to evaluate in isolation and together the three aspects of sustainability: environment, economy, and society; concluding that the planned large deployment of renewables in Europe by 2030 not only contributes to create more sustainable mixes environmentally, but also economically and socially.

After the multi-criteria analysis, the results are evaluated and interpreted, from which certain conclusions are drawn:

- Denmark, Spain and the Netherlands will be the leaders in renewable generation in 2030 with 100%, 75% and 70% of their energy mix respectively. The Netherlands will increase the presence of renewables in its mix the most during the next decade (+270%).
- Wind energy will be the largest source of generation in the mixes of the countries in the study, surpassing natural gas by 2030.
- Solar energy will grow the most in the next decade, multiplying by more than 2.5 times the energy produced in absolute terms.

With regard to environmental impacts by energy mix, and taking global warming potential as an example, the following results are shown in Figure 7:

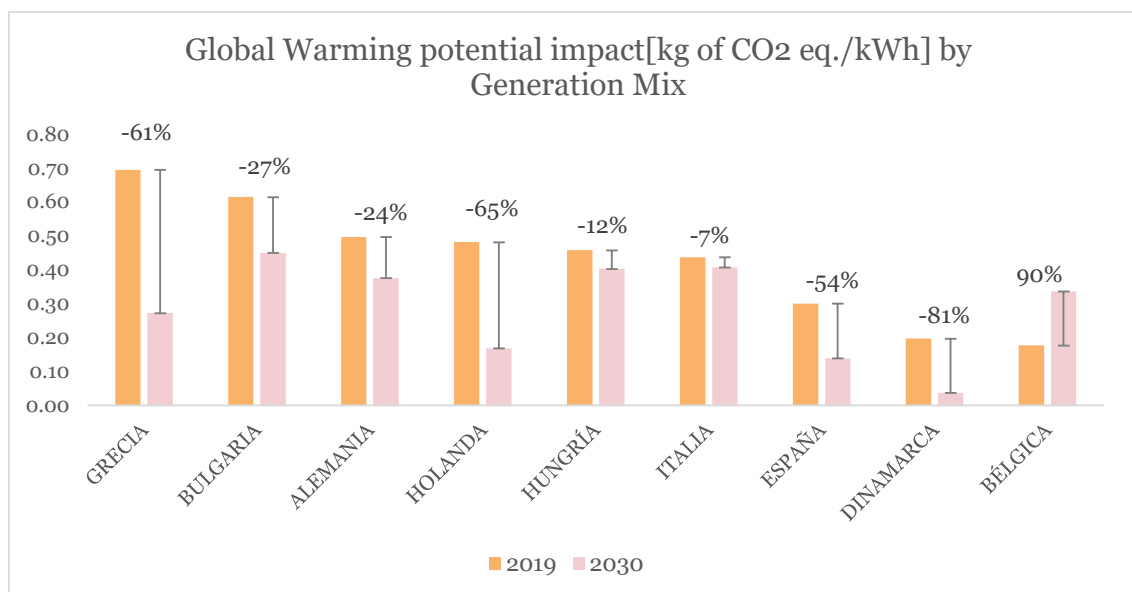


Figura 7. Global warming potential impact by generation mix 2019- 2030.

- Energy and climate plans have, across the board, a positive impact on all environmental impact categories (except for land occupation and abiotic depletion of materials).
- Greece has the most polluting mix in 2019 in the categories of global warming, as shown in Figure 7, and ozone layer destruction. On the other hand, it is among the countries with the highest emission reductions in the 2030 plans.
- Bulgaria is the most polluting country in the remaining environmental impact categories: acidification, eutrophication, toxicity/ecotoxicity and photochemical oxidation.
- Belgium is the country with the most respectful mix in terms of global warming, as shown in Figure 7, and of the other environmental impacts of local scope at present, however, it is the only one that worsens its situation by dispensing with nuclear power by 2030, ceding the first position to Denmark.
- Denmark is the most respectful with the destruction of the ozone layer at present and the one that most reduces its emissions in 2030 due to its 100% renewable mix.

In the study of levelized electricity costs, we obtain the following conclusions:

- Biomass is the most expensive generation technology, followed by low-power solar. Large solar, however, has the lowest levelized costs along with geothermal and onshore wind.
- All renewable generation sources are expected to improve their costs in the future, at a faster rate than fossil fuels.
- The variation between levelized costs of the mixes is insignificant as of 2019. However, Denmark and the Netherlands plan to economize their energy mixes by 21% and 18% respectively. On the other hand, Hungary and Spain will make their generation more expensive by 7% and 10%, respectively, mainly due to their strong commitment to low-power solar power, among others.

The following conclusions can be drawn from the analysis of social impacts:

- The large deployment of renewables has a great impact on the security of supply of countries: countries with less presence of renewables in 2019 diversify their mix by incorporating them in 2030 favouring the security of supply. On the other hand, countries with a greater presence of renewables today concentrate their mix around them by eliminating generation alternatives such as fossil fuels.
- Countries increase their acceptance between 2019 and 2030 in a generalized way as a consequence of the decarbonization of their mixes and the reduction of nuclear.
- Denmark has the most accepted mix among its inhabitants and the Netherlands the most rejected at present. While Spain has the most accepted mix in 2030 and Bulgaria becomes the least accepted.
- Renewable energies, especially solar photovoltaic and wind, are the ones that will increase the number of direct jobs in Europe in 2030.
- Denmark, Germany and Italy have the most employable mixes of the countries currently in focus. On the other hand, Spain will go from having the mix with the lowest employability per kWh to the one with the highest in 2030, with an increase of 138%.

Finally, with respect to the study of the conclusions of the multicriteria analysis of sustainability, the results shown in Figure 8 on the scale "0" (most sustainable) - "1" (least sustainable) have been obtained:



















Country and period	Environmental	Economic	Social	Overall Sustainability	
Denmark - 2030	0.16	0.00	0.38	0.18	
Netherlands - 2030	0.20	0.16	0.31	0.22	
Germany - 2030	0.36	0.45	0.31	0.38	
Greece - 2030	0.31	0.68	0.19	0.39	
Spain - 2030	0.16	0.97	0.05	0.39	
Denmark - 2019	0.25	0.69	0.36	0.43	
Belgium - 2030	0.26	0.64	0.45	0.45	
Italy - 2030	0.33	0.67	0.38	0.46	
Spain - 2019	0.22	0.65	0.51	0.46	
Italy - 2019	0.35	0.71	0.36	0.47	
Belgium - 2019	0.12	0.62	0.75	0.49	
Germany - 2019	0.39	0.64	0.48	0.50	
Bulgaria - 2030	0.45	0.64	0.64	0.58	
Hungary - 2019	0.41	0.76	0.67	0.61	
Hungary - 2030	0.40	1.00	0.44	0.61	
Netherlands - 2019	0.34	0.76	0.75	0.62	
Bulgaria - 2019	0.60	0.57	0.80	0.66	
Greece - 2019	0.76	0.80	0.53	0.69	

Figura 8. Results of the multi-criteria analysis of the sustainability of the energy mixes

- As Figure 8 shows, all the mixes as of 2030 are more environmentally sustainable than those of the countries today thanks to the advantages of renewable energy, which generally excel in all three aspects compared to fossil fuels.
- Belgium has the most sustainable mix in environmental terms and the second most sustainable in economic terms at present due to its large presence of nuclear in the mix. This gives it the third position in the ranking of the most sustainable mixes in 2019, a position it loses by eliminating nuclear and radically increasing the consumption of natural gas by way of compensation in 2030.
- Bulgaria currently has the most economically sustainable mix but ranks second to last and last in terms of environmental sustainability and social sustainability respectively. In 2030, it has the least environmentally sustainable mix.

- Greece currently has the least sustainable mix because it is the least environmentally and economically sustainable, however, it reaches the fourth position in sustainability in 2030 due to its aggressive decarbonization plans and commitment to renewables.
- The Netherlands is, after Greece, the least sustainable mix in 2019. However, the expected mix for 2030 is the second most sustainable thanks to the fact that it will generate more than 50% of its electricity with wind, which contributes positively to all three aspects of sustainability.
- Denmark has the most sustainable mix in both 2019 and 2030 of all those mode led by balancing the environmental and economic aspects. Regarding the social aspect, it ranks sixth because of its poor score in terms of security of supply, as it concentrates all its generation in 2030 on little variety of renewables.

Índice

Capítulo 1. Introducción	28
Capítulo 2. Estado de la Cuestión.....	32
Capítulo 3. Motivación	34
Capítulo 4. Alineación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS).....	35
Capítulo 5. Introducción al Análisis de Ciclo de Vida.....	37
Capítulo 6. Definición del ACV	39
6.1 Objetivo	39
6.2 Alcance.....	40
6.2.1 Definición de la Unidad Funcional.....	40
6.2.2 Alcance Geográfico.....	40
6.2.3 Alcance Temporal.....	42
6.2.4 Herramienta SIMAPRO y BBDD Ecoinvent 3	43
6.2.5 Tecnologías de Generación.....	43
6.2.6 Impactos Medioambientales y Salud Humana	46
6.2.7 Impactos Económicos.....	49
6.2.8 Impactos Sociales	50
Capítulo 7. Análisis de Inventario del ACV.....	52
7.1 Introducción.....	52
7.2 Descripción del Proceso	52
7.3 Modelado de las Tecnologías de Generación.....	54
7.3.1 Generación en Alta Tensión	54
7.3.2 Generación en Media Tensión.....	57
7.3.3 Generación en Baja Tensión	57
7.4 Modelado de Mixes Energéticos	57
7.4.1 Alemania.....	60
7.4.2 Bélgica.....	61
7.4.3 Bulgaria.....	64
7.4.4 Dinamarca.....	65

7.4.5 España.....	67
7.4.6 Grecia.....	70
7.4.7 Holanda.....	71
7.4.8 Hungría.....	73
7.4.9 Italia.....	75
Capítulo 8. Análisis de Impactos.....	78
8.1 Evaluación de Impactos Ambientales y Salud Humana.....	78
8.1.1 Impactos Ambientales de Alcance Global.....	78
8.1.2 Impactos Ambientales de Alcance Local.....	83
8.2 Evaluación de Impactos Económicos.....	93
8.2.1 LCOE Energías Renovables 2019.....	95
8.2.2 LCOE Generación con Combustibles Fósiles 2019.....	98
8.2.3 LCOE Mixes Energéticos 2019.....	101
8.2.4 LCOE Mixes Energéticos 2030.....	102
8.3 Evaluación de Impactos Sociales.....	105
8.3.1 Seguridad de Suministro.....	106
8.3.2 Aceptación Social.....	108
8.3.3 Generación de Empleo.....	110
Capítulo 9. Evaluación de la Sostenibilidad.....	115
9.1 Análisis Medioambiental.....	116
9.2 Análisis Económico.....	122
9.3 Análisis Social.....	123
9.4 Evaluación Conjunta de la Sostenibilidad.....	127
Capítulo 10. Conclusiones.....	130
10.1 Trabajos Futuros y Recomendaciones.....	134
Capítulo 11. Bibliografía.....	137
ANEXO I: Modelos Mixes Energéticos 2019 y 2030.....	143
ANEXO II: Impactos Ambientales.....	145

Índice de Figuras

Figura 1. Mixes de generación y presencia de renovables 2019-2030. Fuente: Elaboración propia con datos Eurostat [10].....	VIII
Figura 2. Impacto calentamiento global por tecnología	IX
Figura 3. Impacto del potencial de calentamiento global por mix de generación 2019- 2030	XI
Figura 4. Resultados del análisis multi criterio de la sostenibilidad de los mixes energéticos	XIII
Figura 5. Generation mixes and presence of renewables 2019-2030. Source: Own elaboration with Eurostat data [10].	XVI
Figura 6. Global warming impact by technology	XVII
Figura 7. Global warming potential impact by generation mix 2019- 2030.	XIX
Figura 8. Results of the multi-criteria analysis of the sustainability of the energy mixes	XXI
Figura 7. Localización de países con mayor previsión de despliegue de energía solar para 2030. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 8. Esquema procedimiento del modelado de mixes en SIMAPRO. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 9. Mixes de generación y presencia de renovables 2019-2030. Fuente: Elaboración propia con datos Eurostat [10].....	59
Figura 12. Mix generación Alemania 2019 - 2030.....	60
Figura 13. Mix generación Alemania 2019- 2030 - Detalle.....	61
Figura 14. Mix generación Bélgica 2019 - 2030	62
Figura 15. Mix generación Bélgica 2019 - 2030 - Detalle	63
Figura 16. Mix generación Bulgaria 2019 - 2030	64
Figura 17. Mix generación Bulgaria 2019 - 2030 - Detalle.....	65
Figura 18. Mix generación Dinamarca 2019 - 2030.....	66
Figura 19. Mix generación Dinamarca 2019 - 2030 - Detalle.....	67
Figura 20. Mix generación España 2019 - 2030.....	68
Figura 21. Mix generación España 2030 - Detalle	69

Figura 22. Mix generación Grecia 2019 - 2030.....	70
Figura 23. Mix generación Grecia 2030 - Detalle	71
Figura 24. Mix generación Holanda 2019 - 2030.....	72
Figura 25. Mix generación Holanda 2019 - 2030 - Detalle.....	73
Figura 26. Mix generación Hungría 2019 - 2030	74
Figura 27. Mix generación Hungría 2019 - 2030 - Detalle	75
Figura 28. Mix generación Italia 2019 - 2030	76
Figura 29. Mix generación Italia 2030 - Detalle	77
Figura 30. Impacto calentamiento global por tecnología	79
Figura 31. Impacto del calentamiento global por mix de generación 2019- 2030	80
Figura 32. Impacto de la destrucción de la capa de ozono por tecnología	82
Figura 33. Impacto de la destrucción de la capa de ozono por mix de generación 2019 - 2030	83
Figura 34. Agotamiento abiótico por mix de generación 2019 - 2030.....	85
Figura 35. Agotamiento abiótico de combustibles fósiles por mix de generación 2019 - 2030	85
Figura 36. Impacto oxidación fotoquímica por mix de generación 2019 - 2030	86
Figura 37. Impacto acidificación por mix de generación 2019 - 2030.....	87
Figura 38. Impacto eutrofización por mix de generación 2019 - 2030	88
Figura 39. Impacto ecotoxicidad por mix de generación 2019 - 2030	90
Figura 40. Evolución de los precios del carbón y el gas natural [48].....	98
Figura 41. Evolución de los costes del carbón y el gas natural [48]	99
Figura 42. LCOE de las tecnologías de generación.....	100
Figura 43. LCOE de los mixes de generación	101
Figura 44. Comparativa LCOE 2019 - 2030 por tecnología de generación	104
Figura 45. LCOE mixes energéticos 2019 - 2030	105
Figura 46. Aceptación social de los mixes energéticos 2019 - 2030.....	110
Figura 47. Miles de empleos directos según la fuente de generación de energía eléctrica	112
Figura 48. Empleabilidad de los mixes energéticos 2019 - 2030.....	114
Figura 49. Estimación proyecciones de costes de baterías de escala red hasta 2030 [59]	135

Índice de Tablas

Tabla 1. Variación prevista de potencia fotovoltaica instalada entre 2019 y 2030. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 2. Agotamiento abiótico por tecnología de generación.....	84
Tabla 3. Ocupación del terreno por tecnología de generación. Fuente: elaboración propia. [44]	92
Tabla 4. Datos de ocupación del terreno por mix de generación 2019 - 2030	93
Tabla 5. Tasas de aprendizaje y parámetros de experiencia por tecnología de generación	103
Tabla 6. Índice IHH completo por mix de generación	107
Tabla 7. Índice IHH renovables por mix de generación 2019 - 2030	108
Tabla 8. Porcentaje de aceptación de las fuentes de generación por país	109
Tabla 9. Matriz de decisión criterios ambientales	118
Tabla 10. Impactos ambientales de los mixes 2019 y 2030 normalizados.....	119
Tabla 11. Puntuación medioambiental de los mixes 2019 - 2030 según método AHP.....	120
Tabla 12. Puntuación medioambiental de los mixes 2019 según método AHP	121
Tabla 13. Puntuación medioambiental de los mixes 2030 según método AHP	122
Tabla 14. Puntuaciones económicas de los mixes 2019 y 2030.....	123
Tabla 15. Tabla de prioridades de los impactos sociales.....	123
Tabla 16. Matriz de decisión criterios sociales.....	124
Tabla 17. Impactos sociales de los mixes 2019 y 2030 normalizados	125
Tabla 18. Puntuación social de los mixes 2019 - 2030 según método AHP	126
Tabla 19. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2019	127
Tabla 20. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2030	128
Tabla 21. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2019 y 2030	129
Tabla 22. Mixes energéticos modelados para 2019.....	143
Tabla 23. Mixes energéticos modelados para 2030.....	144
Tabla 24. Impactos ambientales por tecnología de generación	145
Tabla 25. Impactos ambientales por país y periodo	145

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad puede entenderse como uno de los objetivos necesarios para el desarrollo de la humanidad en el largo plazo. Relacionado con este concepto, el desarrollo sostenible hace referencia a los múltiples procesos y vías para lograrla. Según la UNESCO, el paradigma de la sostenibilidad se basa en tres pilares igualmente relevantes: la sostenibilidad social, económica y medioambiental [1], aspectos que se equilibran con el objetivo de buscar una mejor calidad de vida de las generaciones presentes sin comprometer la de las generaciones futuras.

De estos tres, el componente medioambiental es habitualmente el foco de la opinión, las políticas y acciones dirigidas a alcanzar la sostenibilidad. Esto se debe a que la contaminación ambiental, afectada principalmente por el transporte, la industria y la generación de energía, ha aumentado por la creciente actividad económica, el rápido desarrollo de las tecnologías y las crisis sanitarias y geopolíticas de los últimos años.

Estos factores han empujado a la humanidad a afrontar una época de gran volatilidad en la gestión de la energía, entre otras, que anuncia un cambio de paradigma inminente. Particularmente, la producción de energía en todas sus formas supone un 70% de las emisiones contaminantes totales a nivel mundial, siendo un 25 - 30% atribuible a la producción de electricidad y calor según la fuente [2][3]. Concretamente, se espera que el uso de la electricidad se triplique para el año 2050 [4] con el consecuente incremento en el impacto medioambiental.

En este contexto, naciones y empresas de todo el mundo han puesto en marcha planes para mitigar los impactos medioambientales. La comunidad Europea en especial, elaboró en 2019 los Planes Energéticos y Climáticos Nacionales o NECPs por sus siglas en inglés, donde se traza una ruta hacia una serie de objetivos energéticos y climáticos comunes entre los países miembros a alcanzar en 2030 [5].

La acción fundamental de estos planes se basa en la descarbonización de los mixes energéticos en pos de una gran apuesta por las fuentes de energía renovable, en especial las fuentes solar y eólica. La ruta de actuación de Europa también contempla, de forma prematura, el previsto desarrollo de tecnologías de almacenamiento de electricidad a escala red ya que la generación con fuentes renovables es intermitente, es decir, independientes de la demanda.

Bajo este contexto macro, el inminente cambio de paradigma energético y poniendo el foco en los planes de la Comisión Europea, el presente trabajo modela los mixes energéticos de una selección de países europeos a fecha 2019 y a fecha 2030 y evalúa mediante la metodología del análisis del ciclo de vida los tres aspectos fundamentales de la sostenibilidad.

El objetivo principal es pues analizar y elaborar una comparativa a modo de ranking de sostenibilidad de los distintos mixes modelados y así determinar las políticas más y menos encaminadas a lograr una generación de energía eléctrica más sostenible.

Al tratarse de un objetivo de trabajo amplio, este trabajo analizará los diez países de Europa con mayores expectativas de crecimiento en el potencial de generación de energía solar por ser una de las fuentes que más se han desarrollado en la última década y una de las mayores apuestas hoy en día a nivel internacional. Los países en cuestión son: Hungría, Holanda, España, Dinamarca, Bulgaria, Grecia, Italia, Reino Unido, Bélgica y Alemania.

Para alcanzar este objetivo, se elabora la siguiente hipótesis principal de trabajo:

Los planes energéticos nacionales de la comunidad europea para 2030 logran transformar los mixes energéticos actuales en mixes más sostenibles en los tres aspectos de la sostenibilidad: medioambiental, económico y social.

Para el logro del objetivo general y para poder probar la hipótesis de trabajo se han elaborado una serie de objetivos específicos:

1. Plasmar mediante un modelo los mixes energéticos de los países europeos actuales, de la manera más precisa posible dentro del marco del Análisis del Ciclo de Vida.

- Para lograrlo, será necesario recolectar información de las distintas fuentes oficiales tanto nacionales como europeas complementando y actualizando las bases de datos de la herramienta de trabajo SimaPro.
2. Componer mediante suposiciones fundamentadas unos escenarios de generación plausibles para el año 2030. Para ello será necesario acudir a los planes nacionales de los países del estudio para basar las hipótesis de generación en sus compromisos con la agenda 2030 de los *National Energy and Climate Plans*.
 3. Evaluar los impactos medioambientales, económicos y sociales tanto de los mixes de los países como de las tecnologías de generación de forma aislada. Para ello será necesario normalizar los impactos para su comparabilidad y calcular los costes normalizados para ambos escenarios: actual y 2030.
 4. Evaluar de forma conjunta la sostenibilidad de los mixes para cada uno de los periodos mediante la metodología de análisis multi criterio.

Para exponer y alcanzar los objetivos, el presente documento se estructura en los siguientes capítulos:

El Capítulo 2 expone el estado de la cuestión, donde se revisa la bibliografía relacionada con el objetivo del proyecto para sentar las bases del estudio.

El Capítulo 3 recoge la motivación para la elaboración del estudio, así como poner en valor el objeto del trabajo mientras que en el Capítulo 4, se expone la alineación de los objetivos del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

En el Capítulo 5, se introduce la metodología empleada: El análisis del ciclo de vida (ACV). Esta metodología se compone de tres grandes fases: la definición del ACV, el análisis del inventario y el análisis de impactos que se aplicarán en los Capítulos 6, 7 y 8 respectivamente.

En el Capítulo 9, se evalúan los impactos medioambientales, sociales y económicos de forma conjunta para la comparabilidad entre mixes.

Finalmente, y a modo resumen, se exponen las conclusiones y trabajos futuros del estudio. Un apartado de anexos posterior a las conclusiones permitirá consultar el detalle numérico de todos los impactos.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Este capítulo explora estudios para contextualizar el objeto del trabajo que sirven como referencia para la elaboración de este.

En primer lugar, para el modelado y la parte comparativa del trabajo, se toman como referencia e inspiración de la metodología ACV dos trabajos de fin de grado y dos trabajos fin de máster del repositorio de la Universidad Pontificia de Comillas que dan respuesta a objetivos similares al ámbito buscado, son los realizados por Diego Benito Adrados [6], Antonio Andrés Rebollar Juárez [7], Jorge Goas Martín [8] y Guillermo Quintero Bermejo [9]. Estos proyectos modelan los mixes de generación de energía eléctrica de distintos países, tanto europeos como otras potencias económicas mundiales y las tecnologías de generación para evaluar y comparar sus impactos ambientales y socioeconómicos.

Para la colección de información necesaria para modelar los escenarios de generación se revisan los “National Energy and Climate Plans (NECPs)” como mencionado en el Capítulo 1. Para complementar estos documentos, se consulta también la base de datos registrada en Eurostat [10] y otras múltiples bases de datos de agencias independientes e internacionales como fuentes oficiales de información [11-13].

Debido a la importancia que tiene la energía solar fotovoltaica en los países contemplados, se revisa adicionalmente bibliografía referente tanto a su presencia y desarrollo a nivel mundial [14], como su impacto medioambiental, también desde el punto de vista del ACV como “Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation” [15].

Finalmente, y aunque se decide no modelar en este trabajo, para contextualizar la situación de las tecnologías de almacenamiento, se revisan estudios con las bases de las baterías de escala red en Europa. Por un lado, se consideran investigaciones relacionadas con la taxonomía y fundamentos de la tecnología como “*ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030*” de IRENA [16] o “*Impact of Large*

Scale Battery Energy Storage on the 2030 Central European Transmission Grid de ETH Zurich [17], entre otros [18-24].

Capítulo 3. MOTIVACIÓN

El nivel del mar sube, el Ártico se derrite, los arrecifes de coral mueren, los océanos se acidifican y los bosques arden. Ningún lugar es inmune a las devastadoras consecuencias de la crisis climática. El ejemplo más claro es el impacto del calentamiento global: El aumento de las temperaturas alimenta la degradación del medio ambiente, las catástrofes naturales, los fenómenos meteorológicos extremos, la inseguridad alimentaria y del agua de forma directa, así como generando trastornos económicos o conflictos de forma indirecta [25].

La responsabilidad individual y colectiva de naciones y empresas es fundamental para atajar esta crisis climática. En 2015, 196 países se acogieron al acuerdo de París para controlar las emisiones contaminantes, con el objetivo ambicioso de limitar el calentamiento global a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales [26]. No obstante, los analistas señalan que, incluso si los países cumplen sus compromisos para 2030 y más allá, la temperatura media mundial seguirá aumentando 2,1°C.

Eventos como el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania han comprometido estos planes de los países europeos para ser más sostenibles, afectando directamente a los tres aspectos de la sostenibilidad. La falta de suministro de gas denota la fragilidad que pueden tener los planes energéticos ya que, países como Alemania, se han visto forzados a reactivar sus plantas de generación con carbón en contra de la ruta establecida [27], con el consecuente impacto medioambiental (emisiones), social (aceptación pública) y económico (subida de precios).

Para poder alcanzar los objetivos ambientales surge la necesidad de reforzar los planes energéticos mediante una apuesta a nivel mundial por la energía renovable. Al tratarse principalmente de un reto tecnológico la motivación principal del estudio es pues comprender, comparar y analizar la evolución de los impactos medioambientales de los países europeos como vanguardia en tecnologías y políticas contra el cambio climático para que puedan servir como modelo de países aún en vías de desarrollo que deben aún afrontar retos demográficos y de industrialización.

Capítulo 4. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Este capítulo pone en valor y alinea el contenido del proyecto con los objetivos del desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas en el año 2015 para alcanzar en el año 2030 [28]. Aunque los objetivos marcados son de diversa índole, este proyecto tiene relación directa con los siguientes:

- **ODS número 7: Energía asequible y no contaminante.** Como indica el propio título, este objetivo busca en primer lugar la asequibilidad de la energía: despliegue de renovables, electrificación de países en vías de desarrollo, acceso a fuentes de energía, etc. Y, en segundo lugar, el respeto por el medio ambiente. El presente trabajo se alinea directamente con este objetivo al estudiar alternativas de generación limpias frente a los combustibles para afrontar la gran electrificación de las próximas décadas en los países desarrollados. También se contempla la asequibilidad de los mixes en términos económicos como se mostrará mas adelante. Otro motivo de la alineación con este objetivo es la muestra de países seleccionada, ya que, al estar a la vanguardia en términos energéticos y climáticos, pueden servir de modelo para países aún en desarrollo.

- **ODS número 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.** En la evaluación de los impactos de los distintos países se compararán los distintos efectos en el entorno y sus efectos sobre cambio climático de los distintos mixes de generación determinando qué tecnologías son más y menos contaminantes y qué mixes logran ser más respetuosos con el medio ambiente.

Además, de manera más indirecta, este trabajo coincide con los siguientes ODS:

- **ODS número 3: Salud y bienestar.** Las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera son causantes de muchas enfermedades respiratorias y cardiovasculares. En un

escenario donde las energías renovables hacen que se reduzcan estas emisiones, el bienestar físico de las personas se verá beneficiado.

- **ODS número 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.** Este objetivo se trata también al considerar en este estudio la generación de empleo presente y futuro de los mixes de generación.

- **ODS número 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.** Una de las acciones para atajar el reto demográfico de las ciudades es poder satisfacer la demanda eléctrica de forma sostenible sin comprometer los recursos ni el desarrollo de la sociedad del futuro. Esto solo será posible con un despliegue significativo de renovables en los mixes energéticos mundiales y un despliegue de renovables también fuera del sector eléctrico.

- **ODS número 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.** Este objetivo se contempla en el proyecto en el análisis de los impactos medioambientales, concretamente al analizar la ecotoxicidad del agua dulce, la ecotoxicidad del agua marina, el calentamiento global o la eutrofización, como se mostrará más adelante.

- **ODS número 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.** Este ODS se alinea con los objetivos del proyecto al analizar los impactos medioambientales que pueden producir la generación de energía eléctrica. En especial, la huella terrestre, el calentamiento global u otros impactos precursores de lluvia ácida son los que más dañan los ecosistemas.

Capítulo 5. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis del ciclo de vida o ACV es la metodología empleada para evaluar los impactos a lo largo de la vida de un proceso, no sólo comprende los impactos derivados del funcionamiento del proceso en sí, sino también de fases previas y posteriores como pueden ser instalación, transportes mantenimiento, desmantelamiento, etc.

Este método habitualmente se emplea para evaluar impactos ambientales asociados a un producto o proceso, aunque también es útil para la evaluación de otros impactos de carácter social – económico.

La ISO 14040 [29] establece que dicha metodología se articula mediante 3 fases principales que se aplicarán durante los siguientes capítulos:

- La definición del objetivo y el alcance: establece y acota el propósito del estudio, define la unidad funcional en torno a la cual se normalizan los impactos, define los alcances geográficos, temporales, etc.
- El análisis del inventario, donde se recoge información y se modela el proceso que se va a analizar dando como fruto un inventario cuantificable en torno a la unidad funcional del estudio.
- La evaluación de impactos que “traduce” los inputs modelados del inventario en impactos medioambientales según modelos conocidos. Esta última fase se divide a su vez en otras cinco, de las cuales las tres primeras son obligatorias para considerar un ACV:
 - La selección de categorías de impacto.
 - La clasificación de los elementos del inventario a las categorías de impacto definidas.

- La caracterización, que consiste en la utilización de modelos existentes para cuantificar la contribución de cada elemento del inventario a cada categoría de impacto definida
- La normalización de los resultados en torno a una misma unidad para su comparabilidad.
- La ponderación de resultados según importancia para obtener un resultado único o puntuación.

Se trata de una herramienta internacionalmente extendida y aceptada: la Comisión Europea, ámbito geográfico del estudio, define que es el mejor método disponible para evaluar los posibles impactos ambientales de los productos [30].

La ventaja principal de aplicar esta metodología en este proyecto en concreto es la comparabilidad de resultados, ya que las simplificaciones que requiere el modelado y cálculo de impactos hacen que no se maximice la precisión en el resultado del impacto ambiental, pero permite una alta comparabilidad entre procesos distintos.

Capítulo 6. DEFINICIÓN DEL ACV

6.1 OBJETIVO

El objetivo principal de este estudio ACV es evaluar y comparar la sostenibilidad de los mixes energéticos de los países europeos con alto potencial para la generación de energía solar. El foco en el despliegue de energía solar fotovoltaica se debe a que, junto con la eólica, son las dos que más han crecido en los últimos años y se trata de una de las apuestas principales de la Unión Europea para conseguir reducir la emisión de gases contaminantes.

Se evalúan tanto los escenarios presentes, a fecha 2019 con los datos reales de generación, como los futuros, a fecha 2030. Es importante puntualizar que la evaluación de los escenarios 2030 no es la evaluación del escenario de generación del futuro, es el escenario **objetivo** de generación previsto por los países para alinearse con los objetivos de la comunidad europea.

Como objetivos específicos y para la evaluación de la sostenibilidad en su conjunto se tienen:

1. Evaluación de impactos **medioambientales** y sobre la salud humana de 1kWh de generación de energía eléctrica para cada país y escenario, con su posterior comparativa.
2. Evaluación de impactos **económicos** de 1kWh de generación de energía eléctrica para cada país y escenario, con su posterior comparativa.
3. Evaluación de impactos **sociales** de 1kWh de generación de energía eléctrica para cada país y escenario, con su posterior comparativa.
4. Evaluación y comparativa conjunta de la sostenibilidad de los mixes mediante un análisis multicriterio de los bloques anteriores. Obteniendo un mix óptimo sostenible y desvelando las trayectorias y su eficacia que están llevando a cabo los países europeos para alcanzar una generación sostenible.

6.2 ALCANCE

En este apartado se recoge el perímetro del proyecto según las siguientes categorías.

6.2.1 DEFINICIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL

Una de las ventajas de la metodología de ACV es su comparabilidad. Por esta razón, es necesario evaluar todos los impactos (medioambientales, económicos y sociales) en torno a una unidad funcional para así poder evaluar de forma intuitiva y escalable los distintos impactos y, sobre todo, comparar de forma directa los resultados entre escenarios. La unidad seleccionada es **1 kWh de energía eléctrica generado en baja tensión.**

6.2.2 ALCANCE GEOGRÁFICO

Se decide escoger y evaluar de forma independiente una serie de países de Europa para acotar la magnitud del estudio y como representación de Europa en su conjunto. Para la selección de los países a evaluar, se ha seguido el siguiente procedimiento:

Primero analizan los 22 *National Energy and Climate Plans (NECP)* publicados por los distintos países y recopilados por la Comisión Europea. Estos documentos contienen los planes y políticas energéticos a llevar a cabo en la década 2020-2030.

A continuación, se recogen los datos de potencia instalada total en MW de fotovoltaica a fecha 2019 para todos los países.

Posteriormente, se recogen las previsiones de despliegue de solar para 2030. En el caso de que el país presente más de un escenario de potencia instalada para ese año, se toma el escenario más favorable con la preservación del clima.

Finalmente se escogen los 10 países en los que más se apuesta por la energía solar en términos de variación de potencia instalada prevista resultando en:

País	Variación 2019-2030
Hungría	956%
Holanda	614%
España	433%
Dinamarca	349%
Bulgaria	309%
Grecia	257%
Italia	254%
Reino Unido	213%
Bélgica	209%
Alemania	204%

Tabla 1. Variación prevista de potencia fotovoltaica instalada entre 2019 y 2030. Fuente: Elaboración propia.

Para una mayor comparabilidad, se decide excluir a Reino Unido, pese a que clasifica entre los diez primeros países según los criterios de selección. Esto se debe a que sus planes presentados no siguen la misma estructura que el resto de los países y para lograr un modelado igual de preciso y comparable que el resto hay que hacer hipótesis muy aventuradas.

Los países para estudiar tras la selección aquí descrita serían: Alemania, Bélgica, Bulgaria, Dinamarca, España, Grecia, Holanda, Hungría e Italia.

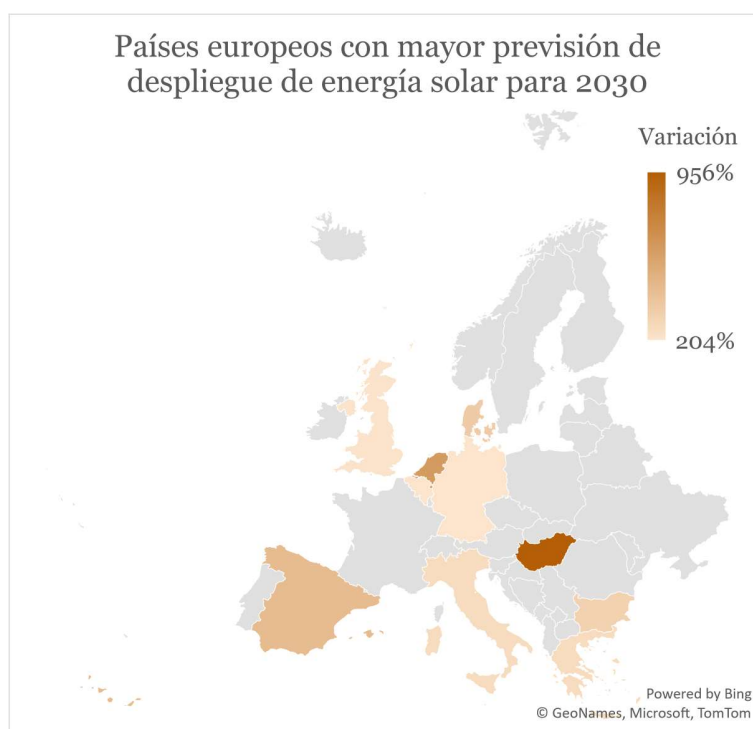


Figura 9. Localización de países con mayor previsión de despliegue de energía solar para 2030. Fuente: elaboración propia.

6.2.3 ALCANCE TEMPORAL

Como mencionado anteriormente se modelan escenarios para dos periodos de tiempo. Por un lado, se recogen los datos del año natural 2019 como escenario presente y el 2030 como escenario futuro.

Respecto a la disponibilidad de los datos, se descarta el periodo 2021 porque pese a que la realización de este proyecto es en el curso académico 2021-2022, los datos para el 2021 no están disponibles en todas las fuentes oficiales de los países o están incompletos.

Con respecto a la calidad de los datos, se descarta el periodo 2020 por su comportamiento atípico respecto a la tendencia de años anteriores debido a la pandemia del Covid-19. Otro motivo para descartar el 2020 como periodo de estudio en favor del 2019 ha sido por la comparabilidad de los datos con el escenario 2030, ya que los NECPs utilizados están publicados a finales del 2019 y presentan los escenarios de evolución a partir de este año.

El periodo 2030 representa, como mencionado anteriormente, el escenario que tienen como objetivo de generación de los países, no tiene por qué asemejarse a lo que ocurrirá en la realidad. De esta manera lo que se evalúa es la sostenibilidad de los mixes buscados por los distintos países en pos de “limpiar” su generación.

6.2.4 HERRAMIENTA SIMAPRO Y BBDD ECOINVENT 3

Para el cálculo de impactos del Análisis de Ciclo de Vida, se ha utilizado el software SIMAPRO, con versión 9.2.0.2. El software está diseñado sobre un pensamiento del ciclo de vida y sostenibilidad y es líder en el análisis de estos ámbitos tanto en el mundo profesional como en el académico [31].

SIMAPRO ofrece multitud de bases de datos, la utilizada en este caso ha sido Ecoinvent 3 [32]. Se trata de una base de datos específica de datos medioambientales para análisis de inventario del ciclo de vida. Esta base de datos se compone de una abundancia de procesos aislados que se pueden componer para formar procesos más complejos. En el caso concreto del proyecto, las diferentes tecnologías de generación eléctrica se componen con sus respectivas ponderaciones para formar los mixes energéticos. SIMAPRO ofrece la posibilidad de actualizar dicha base de datos dentro del entorno del usuario para modelarlos con datos propios.

6.2.5 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN

Las tecnologías de generación que se han utilizado en el modelo han sido las que permitían modelar con un nivel de granularidad lo más preciso posible. A continuación, se detallan organizadas por tipo de combustible.

6.2.5.1 Generación en Alta Tensión

Combustibles Fósiles: suponen el grupo de combustibles más demandados a nivel mundial para la generación de energía. Aunque su disponibilidad es finita, existe una vasta cantidad y a lo largo de los años se han desarrollado técnicas de extracción que los han convertido en una fuente de generación de electricidad relativamente barata. Por el contrario, se trata de la

fuelle de energía que libera más contaminantes con sus consecuentes efectos en el medio ambiente. Se distinguen tres grupos:

- **Carbón:** Este combustible se quema en centrales termoeléctricas para la producción de electricidad. Aunque ha supuesto una parte importante del mix de generación eléctrica en el pasado, la inviabilidad de las plantas y las emisiones de contaminantes han hecho que sufra una desescalada considerable hasta el punto de que regiones del mundo como la Unión Europea, prescindirán por completo de esta tecnología para 2030. Los procesos utilizados para el modelado de esta fuente de energía han sido los siguientes, según el tipo de carbón:
 - **Lignito:** Esta categoría recoge los tipos de carbón con menor poder calorífico hasta los sub bituminosos, hasta los 30 MJ/kg aproximadamente.
 - **Antracita:** Este tipo de carbón recoge los carbones bituminosos y superiores en términos de poder calorífico. Son también conocidos como “carbón duro” (*hard coal* en inglés).
- **Gas Natural:** Este combustible es de los más utilizados a nivel global para la generación de electricidad. Se obtiene de yacimientos naturales y es transportado mediante gasoductos. Es el combustible fósil que menos contaminantes emite, hasta el punto de que, según recientes propuestas de países Europeos, podrá llegar a considerarse energía “verde” según ciertos criterios [33]. Es considerado necesario por muchos para la transición hacia las energías renovables y los mixes energéticos de bajas emisiones.
- **Petróleo:** El petróleo es utilizado fundamentalmente para la energía en el transporte. Para la generación de electricidad es muy residual y, al igual que el carbón, ha ido perdiendo presencia en los mixes energéticos de los países a lo largo de los años en pos de sus propios derivados como el gas natural y otras tecnologías de menor impacto ambiental.

Nuclear: La energía nuclear utiliza como combustible material radioactivo, típicamente Uranio. Este material sufre la fisión de sus átomos en reactores nucleares liberando calor para emplearlo en generar electricidad. Se trata de una fuente de energía que genera controversia ya que, por un lado, es de bajo coste y tiene poco contaminante medioambiental,

pero, por otro lado, genera residuos radiactivos al final de su vida útil y las consecuencias de un accidente son devastadoras. Al igual que el gas natural, existen propuestas en Europa para que pase a considerarse como “verde” para favorecer la transición hacia las renovables [32].

Fuentes renovables: Estas fuentes de energía se caracterizan por ser “inagotables” y por ser obtenidas directamente de la naturaleza. Por esta razón, son fundamentales para asegurar la sostenibilidad de la generación de electricidad. Las fuentes renovables en alta tensión contempladas en este proyecto son las siguientes:

- Eólica: La energía eólica se sirve de las corrientes de viento para la generación de electricidad y es, junto con la solar, la fuente renovable por la que más apuestan los países europeos.
- Hidráulica: Esta fuente renovable aprovecha la energía potencial y/o cinética del agua para la generación de electricidad. Se trata de una de las fuentes de energía más antiguas en el desarrollo de la humanidad y una de las más extendidas a nivel mundial, en Europa en la primera mitad del siglo XX contribuyó de forma significativa al desarrollo industrial y al bienestar en la mayoría de los países de Europa. Hoy en día, se generan casi 650 TWh en un año hidrológico [34].
- Bioenergía: La bioenergía se refiere a todos los tipos de energía derivados de la conversión de fuentes naturales y biológicas disponibles sobre una base renovable. Es una de las fuentes renovables necesarias para la transición energética, para este proyecto se consideran el Biogás y la Biomasa, que aportan ventajas cuando se trata de las prioridades de seguridad energética, asequibilidad y sostenibilidad [35].

6.2.5.2 Generación en Media Tensión

En la generación en media tensión, se considerarán únicamente aquellas tecnologías de generación eléctrica que utilizan los residuos como fuente de energía. La conversión de residuos en energía aprovecha los residuos no peligrosos, que de otro modo irían a parar al vertedero, y los quema, generando vapor para la producción de electricidad. Los humos se recogen, filtran y limpian para minimizar el impacto ambiental [36].

6.2.5.3 Generación en Baja Tensión

En la generación de baja tensión se considera la generación solar fotovoltaica. Los materiales y dispositivos utilizados en los paneles solares convierten la luz solar en energía eléctrica. Para soportar la intemperie durante muchos años, las células de los paneles se intercalan entre materiales protectores en una combinación de vidrio y/o plásticos [37].

En el presente proyecto se consideran distintos tipos que abarcan desde los pequeños módulos de autoconsumo hasta las instalaciones de gran potencia.

6.2.6 IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES Y SALUD HUMANA

Los impactos medioambientales y sobre la salud humana causados por la generación de electricidad se deben principalmente a los gases o contaminantes emitidos al ambiente, que de forma directa o indirecta perjudican el bien estar de las personas o dañan los ecosistemas.

Las categorías de impacto seleccionadas son las incorporadas en el modelo *CML-IA baseline V3.06 / EU25* de la librería de SimaPro. Este modelo desarrollado por El Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden propone 10 categorías de impacto y los métodos necesarios para la evaluación de los impactos [38].

Dichas categorías de impacto, clasificadas por su alcance global (impactos que perjudican el medio ambiente en una escala principalmente global) o por alcance local (aquellos impactos que perjudican principalmente al país o geografía donde se producen las emisiones) se detallan a continuación:

6.2.6.1 Impactos medioambientales de alcance global

Dentro de esta categoría se consideran el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono.

6.2.6.1.1 Calentamiento Global

El calentamiento global es una expresión que se refiere al efecto sobre el clima de las actividades humanas, en particular la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) y la deforestación a gran escala, que provocan la emisión a la atmósfera de grandes

cantidades de "gases de efecto invernadero", de los cuales el más importante es el dióxido de carbono. Estos gases absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra y actúan como mantas sobre la superficie, manteniéndola más caliente de lo que sería. Este calentamiento va acompañado de cambios en el clima con efectos adversos sobre los ecosistemas que habitan el planeta.

Como mencionado anteriormente, en 2016 en El Acuerdo de París sobre el Cambio Climático se estableció el límite del aumento de la temperatura media mundial a "muy por debajo" de 2 °C y se concretó 1,5 °C como un límite de calentamiento objetivo.

Esta categoría de impacto se mide en kg de CO₂ equivalente emitido a la atmosfera y resulta la categoría principal de impacto medioambiental en estudios de sostenibilidad.

6.2.6.1.2 Destrucción de la Capa de Ozono

El agotamiento del ozono se produce cuando se altera el equilibrio natural entre la producción y la destrucción del ozono estratosférico. Aunque puede deberse a fenómenos naturales, las actividades humanas, se consideran la principal causa del agotamiento.

La destrucción de la capa de ozono afecta negativamente a la salud humana y al medio ambiente, ya que permite la penetración de las radiaciones UV en la Tierra. Estas radiaciones pueden causar graves enfermedades en los seres humanos, como cáncer de piel, daños oculares y mutaciones genéticas, etc. Además, el agotamiento del ozono afecta a la vida acuática, a los ciclos biogeoquímicos, a la calidad del aire y contribuye al calentamiento global [39].

Esta categoría de impacto se mide en relación con el CFC-11 y representa la cantidad de ozono destruido por la emisión de un vapor durante toda su vida atmosférica en relación con la causada por la emisión de la misma masa de CFC-11. Para este estudio se utiliza kg de CFC-11 equivalentes como unidad.

6.2.6.2 Impactos medioambientales de alcance local

Dentro de esta categoría de impacto medioambiental se distinguen las siguientes subcategorías:

6.2.6.2.1 Agotamiento abiótico

Esta categoría de impacto es relevante para el medio ambiente ya que aquellos países que tengan un agotamiento abiótico alto acabarán con sus reservas naturales de materiales y de combustible antes. Este impacto, medido en kg de Sb (Antimonio) equivalente, hace referencia al ritmo de extracción de los recursos para generar electricidad a partir de combustibles fósiles. Esta categoría de impacto se divide en dos componentes: un componente referente a los materiales y minerales empleados en la construcción de centrales, que se denominará *Agotamiento Abiótico* solamente, y un componente referente a los combustibles fósiles, que se denominará *Agotamiento Abiótico (comb. Fósiles)*.

Esta categoría de impacto tiene también un componente de impacto social ya que agotar los recursos propios perjudica a la seguridad de suministro de energía eléctrica y aumenta la dependencia de otros países.

6.2.6.2.2 Oxidación Fotoquímica

La oxidación fotoquímica es un fenómeno que ocurre cuando las partículas contaminantes en el aire reaccionan con luz solar dando lugar a otros contaminantes como el ozono. Puede causar problemas respiratorios e irritaciones [40]. Esta categoría se mide en kg de etileno (C₂H₄) equivalente.

6.2.6.2.3 Acidificación

La acidificación se refiere a los compuestos emitidos a la atmósfera que actúan como precursores de la lluvia ácida. Estos contaminantes se emiten durante la combustión de ciertos combustibles fósiles como el dióxido de azufre, de ahí su que se mida típicamente en kg de SO₂ equivalente [41].

6.2.6.2.4 Eutrofización

La eutrofización es el aumento de la concentración de ciertos nutrientes en ecosistemas acuáticos que hace que ciertos organismos y plantas crezcan en exceso. Consumiendo de manera desmedida los nutrientes y oxígeno, afectando al ecosistema acuático y a actividades como la agricultura (riego) o la piscicultura entre otros [42]. La eutrofización se mide en kg de PO₄ equivalente.

6.2.6.2.5 Ecotoxicidad y Toxicidad Humana

La ecotoxicidad o potencial de ecotoxicidad hace referencia a los posibles efectos adversos que una sustancia química contaminante emitida al medio ambiente provoca en un entorno acuático (tanto marino como de agua dulce) o terrestre [43]. De igual forma, la toxicidad humana se refiere a los efectos de las sustancias químicas contaminantes sobre la salud humana. Estas categorías de impacto se miden en kg de 1,4-DB (dicloro benceno) equivalente.

6.2.6.2.6 Ocupación del Terreno

La ocupación del terreno de las centrales de generación es un impacto ambiental, no solo por los materiales y el propio proceso de construcción (que ya está contemplado en las otras categorías de impacto por la metodología ACV) sino por el coste de oportunidad de la superficie utilizada donde podría haber ecosistemas diversos, tierras productivas para alimentación humana o un terreno utilizado para técnicas de compensación de CO₂. La unidad en la que se mide la ocupación del terreno será en m² por unidad de energía eléctrica generada (kWh).

Es predecible que, con los avances tecnológicos, las centrales de generación eléctrica sean más eficientes en 2030 y sean capaces de producir más energía con una misma ocupación del terreno. No obstante, se asume que se mantendrá constante entre los dos periodos de estudio.

6.2.7 IMPACTOS ECONÓMICOS

Los impactos económicos de los mixes de generación eléctrica se evaluarán mediante la metodología de los costes nivelados de la electricidad o LCOE (*Leveraged Costs Of*

Electricity) medidos en €/kWh. Este indicador es utilizado habitualmente para determinar la rentabilidad de un proyecto de generación energética, no obstante, en este estudio se utiliza para la comparativa de la eficiencia económica de las distintas tecnologías y de los mixes de generación.

El LCOE se puede representar a alto nivel mediante la siguiente fórmula:

$$LCOE = \frac{\text{Valor actual neto de los costes de la vida útil de la tecnología}}{\text{Energía eléctrica total producida en la vida útil de la tecnología}}$$

6.2.8 IMPACTOS SOCIALES

Los impactos sociales contemplados en este estudio se pueden clasificar en tres categorías: la seguridad de suministro, la aceptación social y la generación de empleo.

6.2.8.1 Seguridad de Suministro

La seguridad de suministro hace referencia a la capacidad de los países de ofrecer a sus habitantes un flujo de energía eléctrica ininterrumpido, estable y suficiente que permita el desarrollo de la actividad en sociedad. Para cuantificarlo se contempla la categoría de impacto **diversificación del mix energético**:

Para favorecer la seguridad de suministro, los mixes energéticos deben estar diversificados y con cierta presencia de energías renovables, depender fuertemente de una fuente de energía es un riesgo para el funcionamiento de la sociedad. Para medir la concentración de los pesos de las distintas fuentes de generación se utiliza el Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) que se representa mediante la siguiente fórmula:

$$IHH = 10,000 * \sum_{i=1}^n s_n^2$$

Donde:

- n = número de fuentes de generación en el mix energético.
- s = porcentaje de generación dentro del mix tal que $s \in [0,1]$.

Si el indicador vale 10.000, estaremos ante un país que sólo utiliza una fuente de generación. Por otro lado, cuanto más bajo sea el IHH más diversificado será el mix de generación.

6.2.8.2 Aceptación Social

La aceptación social de las fuentes de energía es una categoría de impacto social necesaria para el análisis de ciclo de vida de los mixes de generación de electricidad. Al fin y al cabo, la opinión pública no sólo influye en la actividad económica y social de los países, sino que también deriva en las políticas y el desarrollo de la sociedad, ya que es el público el primer afectado por las consecuencias (ya sean económicas, sociales, morales u otras) de la generación de electricidad según que fuentes.

Algunos ejemplos de consecuencias en las que influye la aceptación pueden ser: El impacto visual y el ruido pueden afectar a la implantación de la energía eólica. En el caso de las centrales hidroeléctricas, la falta de aceptación puede estar relacionada con la transformación del terreno y el traslado de la población [44].

Para cuantificar la aceptación se elaborará, en el capítulo dedicado, una puntuación de las formas de generación a partir de encuestas y estudios europeos y, por ende, obtener una puntuación de los mixes energéticos para su comparación.

6.2.8.3 Generación de empleo

La generación de electricidad tiene un impacto directo en la economía de un país ya que emplea de forma directa o indirecta a un gran número de personas. El impacto sobre el empleo es un indicador importante ya que abandonar ciertas tecnologías tradicionales como el carbón puede suponer la pérdida de un elevado número de empleos. Por otro lado, el desarrollo de nuevas tecnologías de generación supondrá creación de nuevos tipos de puestos de trabajo hasta ahora inexistentes.

Para medir el impacto sobre el empleo de las tecnologías de generación, se recopilará información y se modelará el número de empleos que aporta cada tecnología por cada unidad de energía eléctrica generada.

Capítulo 7. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL ACV

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se recopila y organiza información sobre la generación, políticas y estrategias de los distintos países del estudio y se describe el proceso seguido de modelado de los mixes de generación eléctrica para los años 2019 y 2030 sobre los que, posteriormente, se evaluarán los distintos tipos de impactos.

7.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La metodología del ACV contempla la vida útil completa del proceso de generación de electricidad desde la concepción hasta el desmantelamiento. Comenzando con la extracción de materiales necesarios y la logística para construir las centrales, la extracción de los combustibles y su procesado (solo en el caso de las tecnologías de generación con combustibles fósiles) y todos los subprocesos para el funcionamiento y operación normal de las centrales.

Por la variedad de tecnologías de generación, es necesario tomar un criterio de homogenización. Como explicado en el capítulo 6, la unidad funcional será 1 kWh en baja tensión. Por esta razón, se modelan los escenarios de generación para cada tecnología en su nivel de tensión para posteriormente ir transformando “aguas abajo” hasta agregar toda la generación en baja tensión y poder evaluar los impactos. El procedimiento seguido en SIMAPRO es el mostrado en la siguiente figura:

Procedimiento para el modelado de mixes energéticos en SIMAPRO

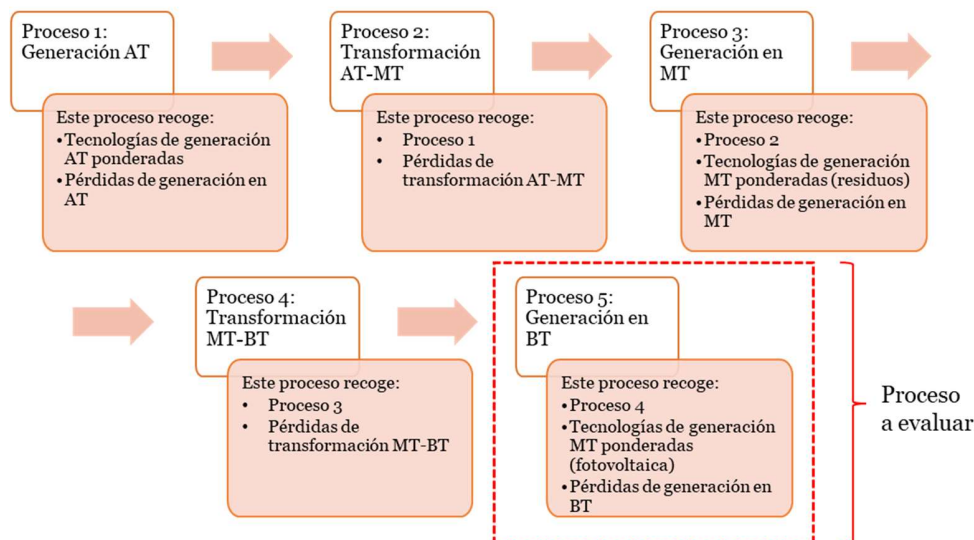


Figura 10. Esquema procedimiento del modelado de mixes en SIMAPRO. Fuente: Elaboración propia.

1. Se crea un proceso de generación eléctrica en alta tensión por cada país y periodo del estudio. En este proceso se recogen las tecnologías pertinentes con su peso porcentual del mix fruto del modelado, así como las pérdidas de la propia generación basadas en la base de datos de Ecoinvent.
2. Se crea un segundo proceso por país y periodo que representa la transformación de AT a MT, así como las pérdidas de red.
3. En un tercer proceso, se modelan las tecnologías que operan en media tensión, así como las pérdidas de generación. También se incluye el peso del proceso de transformación de AT a MT expuesto en el paso anterior para que quede representado toda la generación de AT transformada con sus respectivas pérdidas.
4. De manera similar al paso 2, se crea un proceso por cada país y periodo que representa la transformación de media tensión a baja tensión, así como las pérdidas asociadas.
5. Finalmente, se crea un quinto proceso donde se modelan las tecnologías de generación que operan en baja tensión, las pérdidas de generación y el proceso de transformación del paso anterior. Quedando así representadas todas las tecnologías

correctamente desde el punto de vista de la unidad funcional, 1 kWh de baja tensión.

Este quinto proceso es el que posteriormente se analizará para evaluar los impactos.

El proceso aquí descrito necesita de ciertas hipótesis para poder alcanzar la precisión deseada. Esto se debe a que la información para los modelos de los mixes del 2030 proviene de estimaciones a alto nivel contempladas en los planes energéticos de cada país, que naturalmente contienen menor detalle que los datos de generación real del 2019. Estas suposiciones son principalmente:

- a. Las pérdidas en generación y en transformación de la energía eléctrica se suponen iguales entre los años 2019 y 2030.
- b. Para los casos en los que las proyecciones de la evolución de las tecnologías para el 2030 solo estén disponibles en términos de capacidad instalada, se supone un mismo factor de capacidad que en 2019 para obtener la generación estimada.

7.3 MODELADO DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN

De manera previa al modelo de los mixes de generación de cada país y escenario, es necesario modelar cada una de las tecnologías que pueden componer dichos mixes. En este capítulo se describen los procesos concretos de cada tecnología de generación eléctrica que se han modelado en la herramienta SIMAPRO clasificados por el combustible que utilizan, para ello, se utilizan los datos de la BBDD Ecoinvent.

7.3.1 GENERACIÓN EN ALTA TENSIÓN

- Carbón: Los procesos utilizados para el modelado de esta fuente de energía han sido los siguientes, según el tipo de carbón:
 - Lignito: Esta categoría recoge los tipos de carbón con menor poder calorífico hasta los sub bituminosos, hasta los 30 MJ/kg aproximadamente. Los procesos que han sido modelados en SIMAPRO para este combustible concreto son dos: el primero para central termoeléctrica convencional es “*Electricity, high voltage {COUNTRY} | electricity production, lignite | Cut-off, U*” y el segundo para representar los procesos de cogeneración con lignito

“Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, lignite | Cut-off, U”.

- Antracita: Este tipo de carbón recoge los carbones bituminosos y superiores en términos de poder calorífico. Son también conocidos como “carbón duro” (*hard coal* en inglés). Para modelar los procesos de este tipo de combustible, de igual manera que con el lignito, se han utilizado dos procesos: *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, hard coal | Cut-off, U”* y *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, hard coal | Cut-off, U”* para cogeneración.
- Gas Natural: Para el modelado se han distinguido cuatro procesos: generación en planta convencional, generación en ciclo combinado, cogeneración convencional y cogeneración en ciclo combinado. Los procesos concretos modelados en SIMAPRO son respectivamente: *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, natural gas, conventional power plant | Cut-off, U”*, *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, natural gas, combined cycle power plant | Cut-off, U”*, *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical | Cut-off, U”* y *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical | Cut-off, U”*.
- Petróleo: En este proyecto se han modelado dos procesos con este combustible: en planta convencional *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, oil | Cut-off, U”* y en cogeneración *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, oil | Cut-off, U”*.

Nuclear: Se han modelado dos tipos de centrales nucleares en este proyecto en SIMAPRO, centrales con reactor de agua presurizada (PWR) *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, nuclear, pressure water reactor | Cut-off, U”* y centrales con reactor de agua en ebullición (BWR) *“Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, nuclear, boiling water reactor | Cut-off, U”*.

Fuentes renovables: Las fuentes renovables en alta tensión contempladas en este proyecto son las siguientes:

- Eólica: Se modelan cuatro tipos de instalaciones eólicas según su tipo y potencia: Entre las instalaciones terrestres distinguimos las de turbinas menores de 1 MW, las de turbinas entre 1 y 3 MW y las de turbinas de más de 3 MW. Para las instalaciones de eólica marina solo clasificaremos en turbinas entre 1 y 3 MW. Los procesos en SIMAPRO son respectivamente, “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, wind, <1MW turbine, onshore | Cut-off, U*”, “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore | Cut-off, U*”, “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, wind, >3MW turbine, onshore | Cut-off, U*” y “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore | Cut-off, U*”.
- Hidráulica: Para esta fuente de energía se consideran las tres formas más comunes entre los países de Europa: Hidráulica por bombeo, hidráulica por agua fluyente (típicamente de río) e hidráulica de agua en reservas no alpinas (embalses). Sus respectivos procesos son: “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, hydro, pumped storage | Cut-off, U*”, “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, hydro, run-of-river | Cut-off, U*” y “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region | Cut-off, U*”.
- Bioenergía: Para el caso de la bioenergía, se modelan dos procesos en SIMAPRO, ambos de generación calor-electricidad. El primero referente al uso de biogás “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, biogas, gas engine | Cut-off, U*” y el segundo referente al uso de biomasa “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U*”.
- Geotérmica: Aunque el uso de geotermia para la generación de electricidad es muy residual o incluso nulo para los distintos países del estudio, se modela también un proceso para contemplar la generación de esta fuente renovable: “*Electricity, high voltage {COUNTRY}| electricity production, deep geothermal | Cut-off, U*”.

7.3.2 GENERACIÓN EN MEDIA TENSIÓN

Para representar la generación en media tensión con residuos se utiliza un único proceso en SIMAPRO: “*Electricity, medium voltage {COUNTRY}| electricity, from municipal waste incineration to generic market for | Cut-off, U*”.

7.3.3 GENERACIÓN EN BAJA TENSIÓN

Para la generación en baja tensión, y como se expone en el capítulo 6, se utilizarán únicamente procesos referentes a la generación de electricidad con solar fotovoltaica. Concretamente, los tres procesos modelados son los siguientes:

- Solar baja potencia: Electricity, low voltage {RoW}| electricity production, photovoltaic, 3kWp facade installation, single-Si, laminated, integrated | Cut-off, U. Electricity, low voltage {RoW}| electricity production, photovoltaic, 3kWp facade installation, single-Si, panel, mounted | Cut-off, U.
- Solar alta potencia: Electricity, low voltage {RoW}| electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si | Cut-off, U

7.4 MODELADO DE MIXES ENERGÉTICOS

Para elaborar el modelo que mejor representa los escenarios de generación eléctrica de 2019 se ha utilizado principalmente la base de datos de Eurostat como mencionado anteriormente. Esta fuente proporciona datos de generación eléctrica en GWh clasificados por combustible utilizado. El nivel de desglose de esta fuente no sólo es más detallado que el de las fuentes oficiales proporcionadas por cada país, sino que, además, es común a todos los países estudiados, permitiendo una comparabilidad óptima.

En cuanto al modelado de los mixes de generación para el año 2030, se han utilizado los Planes Energéticos y Climáticos Nacionales, donde cada país expone sus políticas energéticas previstas alineándose en mayor o menor medida con la agenda y objetivos de la

Unión Europea. De la misma manera, estos planes energéticos son altamente comparables ya que se han elaborado siguiendo un marco común.

Pese a que el modelado se ha llevado a cabo en un nivel de desagregación como se mostraba anteriormente, se han agregado las distintas fuentes de generación eléctrica en tres grupos exclusivamente para una mejor visualización de los resultados:

- **Renovables**, que incluye las fuentes de generación Hidráulica, Geotérmica, Eólica, Solar térmica, Solar fotovoltaica, Mareomotriz, Biocombustibles, Biogases y Biomasa.
- **Combustibles Fósiles**, que incluye la generación con Carbón, Petróleo y derivados, Gas Natural y otros Gases.
- **Nuclear**, pese a ser considerado un combustible fósil, se decide clasificarlo como un tercer grupo de generación a parte por tener un modo de funcionamiento e impactos ambientales distintos al resto de combustibles.

Los mixes modelados se resumen en la figura de a continuación, el detalle completo de los resultados del modelo se recoge en el Anexo I:

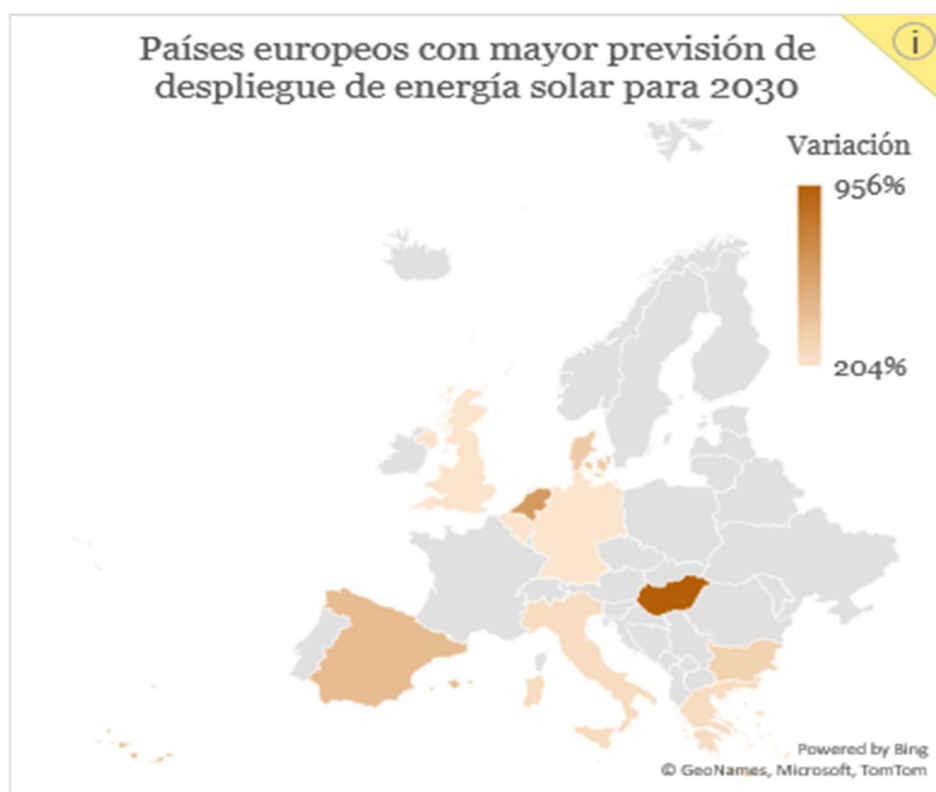


Figura 11. Mixes de generación y presencia de renovables 2019-2030. Fuente: Elaboración propia con datos Eurostat [10].

La figura muestra los países ordenados de izquierda a derecha por su electricidad generada en TWh durante el año 2019. Las dos líneas con marcadores indican la penetración porcentual en el mix para 2019 (verde) y para 2030 (naranja).

En esta visión de conjunto se puede observar cómo todos los países tienen el objetivo de aumentar su penetración de renovables en el mix para el año 2030, concretamente en un 24% en promedio de los países del estudio. Cabe destacar Holanda, con el mayor de los aumentos previstos desde un 19 a un 70%. También cabe destacar Dinamarca, que siendo la que más porcentaje de renovables poseía en 2019, pretende lograr el 100% de la generación para 2030.

A continuación, se expone el escenario resultante de cada uno de los países y periodos.

7.4.1 ALEMANIA

En el año 2019, Alemania generó por encima de los **600 TWh** de energía eléctrica, con la distribución que se muestra en la Figura 12:

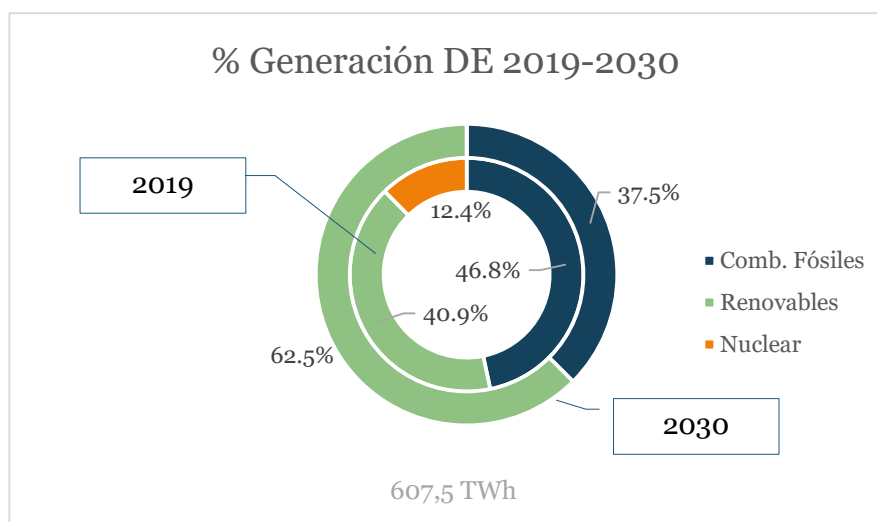


Figura 12. Mix generación Alemania 2019 - 2030

Como se muestra en la Figura 12, Alemania, tiene una generación de fuentes predominantemente fósiles (combustibles fósiles y nuclear abarcan en torno al 59% del mix) y un porcentaje nada despreciable de fuentes renovables, de más del 40%.

Para el año 2030, se ha modelado un mix energético en base al escenario más a favor de la protección del medio ambiente que presentan en su NECP, el “*Climate Action Plan scenario*”.

Este escenario se caracteriza por la completa erradicación de la energía nuclear para el 2025, y la progresiva desaparición del carbón hasta el año 2040. Fortaleciendo aún más las renovables como la solar fotovoltaica y la eólica. La evolución energética del país se rige bajo el principio de “*Efficiency first*” donde buscan desarrollar sus tecnologías de generación de manera eficiente, sostenible y asegurando el suministro.

En un nivel más desagregado, como muestra la Figura 13, se puede observar cómo la situación energética de Alemania es altamente dependiente del carbón, siendo esta la

fuente principal con un 28,2%. La categoría “Carbón” recoge, para este caso, principalmente lignito y hulla con 65 y 30% respectivamente. También se aprecia que las dos energías renovables principales son la energía eólica, tomando el segundo puesto en el mix, y la solar fotovoltaica, ocupando el quinto puesto de la generación eléctrica total.

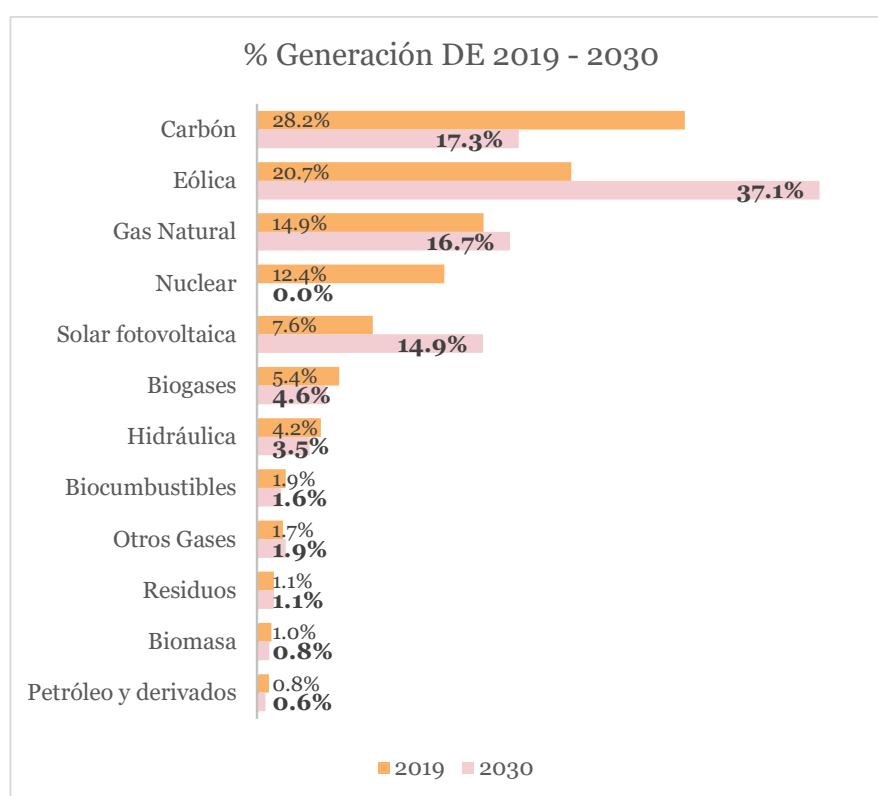


Figura 13. Mix generación Alemania 2019- 2030 - Detalle

Para 2030, las energías renovables se abren paso lideradas por la solar, casi duplicando su generación en términos absolutos, y la eólica, aumentando su generación, en términos absolutos, en cerca de un 80%. Ambas compensan la eliminación de la energía nuclear y la progresiva desaparición del carbón hasta el año 2050.

7.4.2 BÉLGICA

En el año 2019, en Bélgica se generaron más de **90 TWh** de energía eléctrica. El Mix se compone por un 22% atribuible a energías renovables y un 78% a combustibles fósiles,

siendo de estos predominante la generación nuclear con un 46% del total como se muestra en la Figura 14.

Para el escenario de generación eléctrica de Bélgica en el año 2030, se ha utilizado el escenario WAM (*With Additional Measures Scenario*) que presentan las fuentes oficiales del país en su plan energético y climático. Este escenario, es el que más apuesta por la conservación del medio ambiente y el desarrollo de renovables mediante políticas de incentivos y fiscales. Concretamente, marcan como objetivo de renovables un 37,4% de la generación eléctrica total y apuestan por una eliminación total de la energía nuclear para el año 2025. Las renovables suplen parte de la desaparición de la energía nuclear pasando del 22 al 37% y el resto es compensado por otros combustibles fósiles como se muestra en la Figura 14 de a continuación:

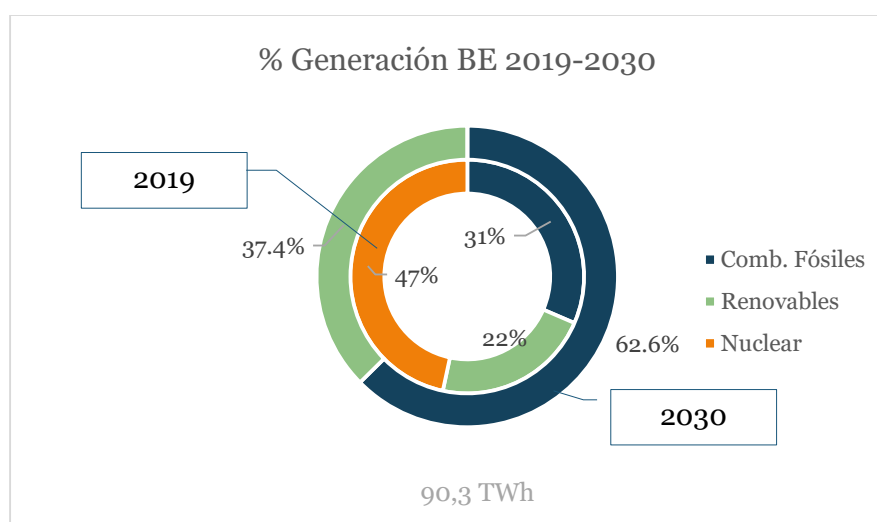


Figura 14. Mix generación Bélgica 2019 - 2030

En un nivel más desagregado, los pesos de cada tecnología de generación en el mix energético de Bélgica en 2019 y 2030 son los que se muestran en la Figura 15:

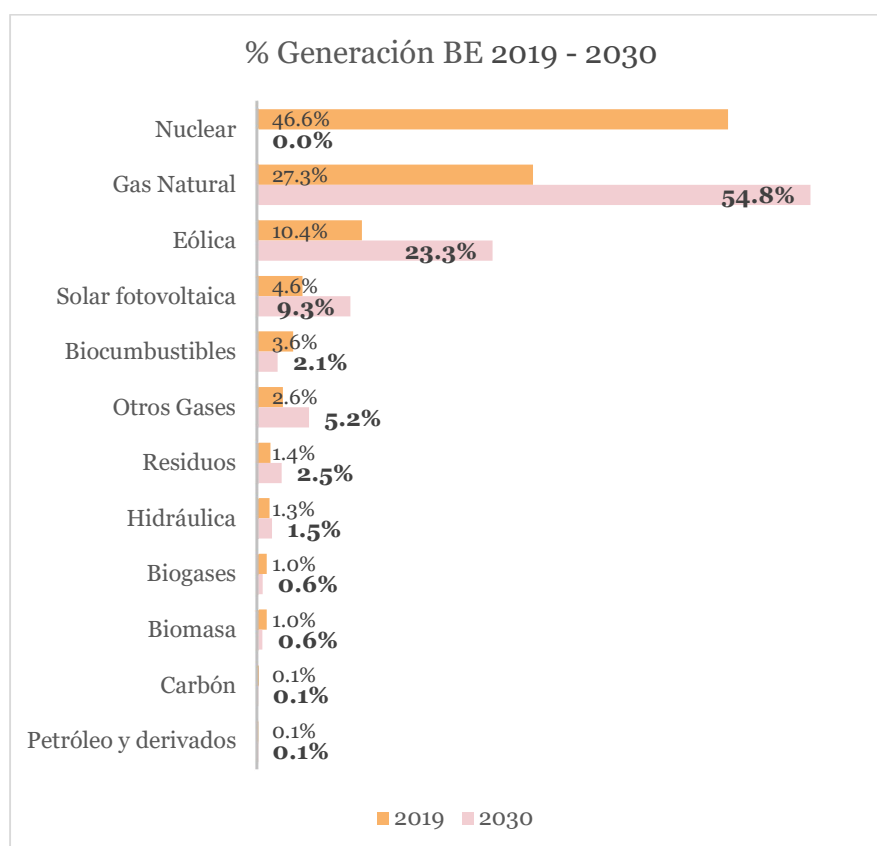


Figura 15. Mix generación Bélgica 2019 - 2030 - Detalle

Como mencionado anteriormente, la nuclear supone la primera fuente de generación del mix en 2019. Atendiendo al resto de combustibles fósiles, se observa que Bélgica tiene una generación con carbón casi despreciable, pero tiene una fuerte dependencia del gas natural, que supone más de un quinto de la generación total. Respecto a las energías renovables, encabezan la lista la generación eólica y la solar fotovoltaica con pesos del orden de 10,4% y 4,6% respectivamente. Ambas suponen más de dos tercios del total de las renovables del país.

El desarrollo previsto de las renovables durante la próxima década está impulsado por las dos tecnologías principales hoy en día: la eólica con un aumento previsto del 150% en términos de generación, y la solar fotovoltaica con un aumento previsto del 130%.

El resto de la generación eléctrica a compensar por la desaparición de la nuclear es “absorbida” por el gran aumento en el consumo de gas natural, que pasa a ser el combustible

principal para la generación energética del país, convirtiéndose así en el país de Europa en el que más se prevé crecer su dependencia de los combustibles fósiles. Esta dependencia podría entenderse como movimiento hacia una energía limpia en el marco del reciente borrador emitido por la Comisión Europea, donde se inician procesos de consulta para poder considerar fuentes como el Gas Natural o la energía nuclear como energías “verdes”:

7.4.3 BULGARIA

En 2019 se generaron en Bulgaria **44,2 TWh** de energía eléctrica. Su mix de generación de energía eléctrica depende en gran medida de los combustibles fósiles (37% nuclear y 45% de otros combustibles fósiles) y cuenta con una presencia de en torno al 18% de generación renovable como muestra la Figura 16.

El plan de desarrollo energético para 2030 de Bulgaria se caracteriza por apuntar a reducir las emisiones contaminantes de manera significativa mediante el desarrollo de las renovables. No obstante, apuestan por mantener sus centrales nucleares activas y por no eliminar por completo la generación con carbón, por su alta dependencia de ambas.

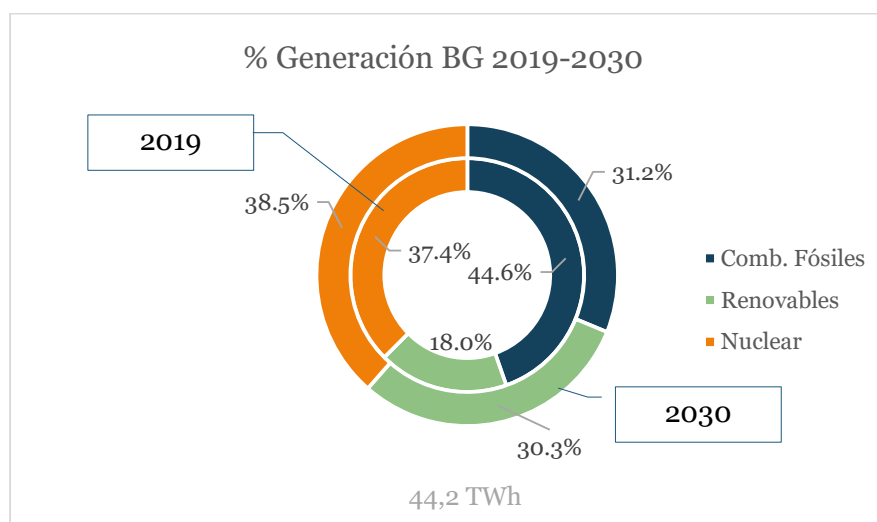


Figura 16. Mix generación Bulgaria 2019 - 2030

Atendiendo al detalle del mix en la Figura 17, se observa que la fuente principal de generación de electricidad en 2019 es el carbón (principalmente lignito) con cerca del 39%

de los GWh de generación total. La nuclear ocupa el segundo puesto seguida por la mayor de las renovables para este país, la eólica.

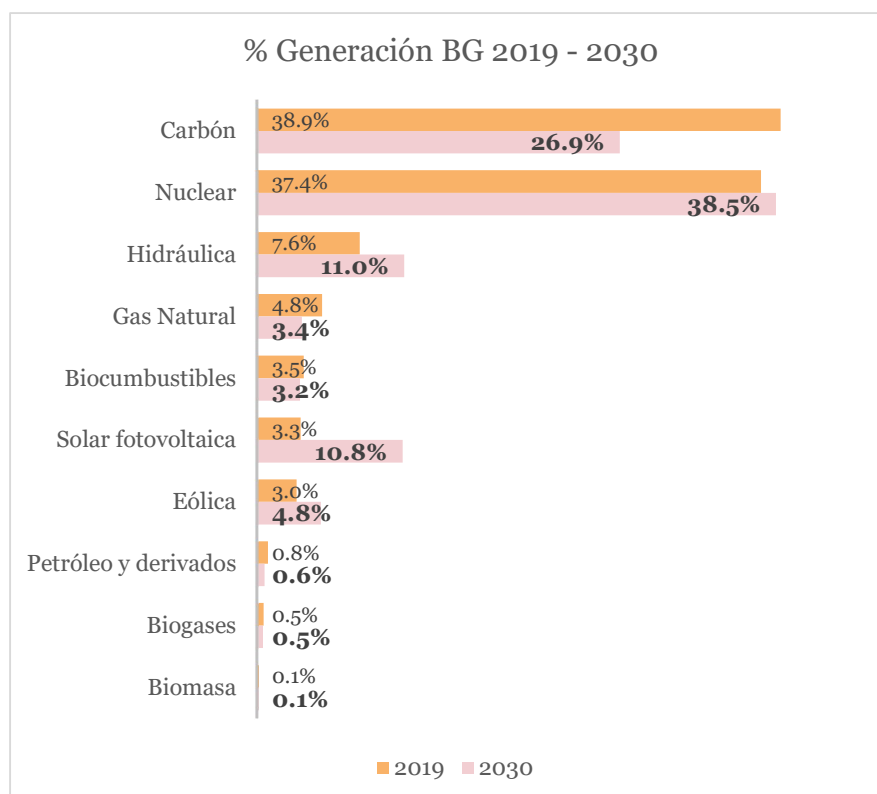


Figura 17. Mix generación Bulgaria 2019 - 2030 - Detalle

La energía solar fotovoltaica es la tecnología por la que más se apuesta, se espera que la generación en 2030 sea más del triple de la actual. A esta le siguen la eólica y la hidráulica con aumentos del 55 y 39% de generación en términos absolutos respectivamente. La figura 17 muestra como el aumento en renovables compensa la reducción en carbón y cómo la nuclear se mantiene en términos absolutos.

7.4.4 DINAMARCA

En Dinamarca se generaron en torno a **29,5 TWh** de energía eléctrica a fecha 2019. Su mix energético en 2019 se caracteriza por la fuerte presencia de renovables y la ausencia de energía nuclear como muestra la Figura 18.

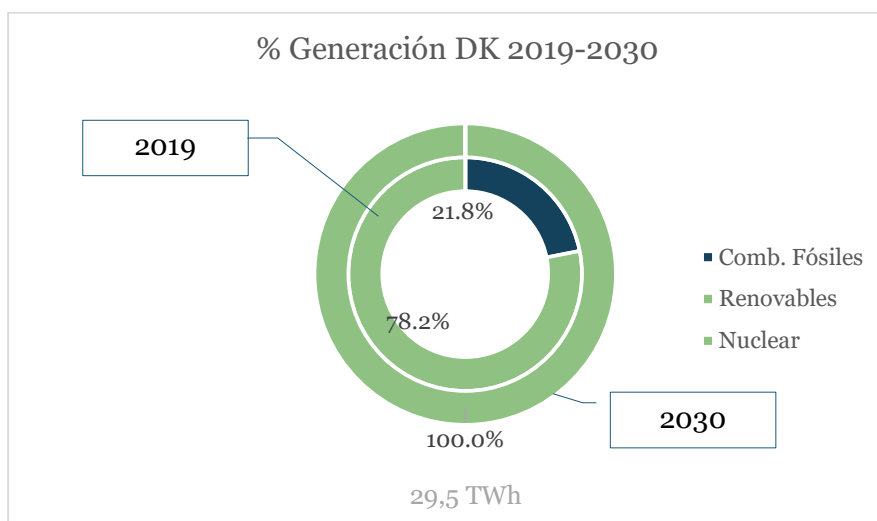


Figura 18. Mix generación Dinamarca 2019 - 2030

Para el año 2030, Dinamarca ha puesto en marcha políticas para seguir invirtiendo en renovables y para acabar progresivamente con el carbón con el objetivo de generar electricidad 100% proveniente de fuentes renovables.

Este incremento en renovables será gracias a la eólica, que pasará a generar el 75% de la generación total (siendo cerca del 60% de esta *offshore*) y la solar, que sextuplicará su generación en términos absolutos.

Atendiendo al detalle de la distribución de la generación eléctrica de la Figura 19:

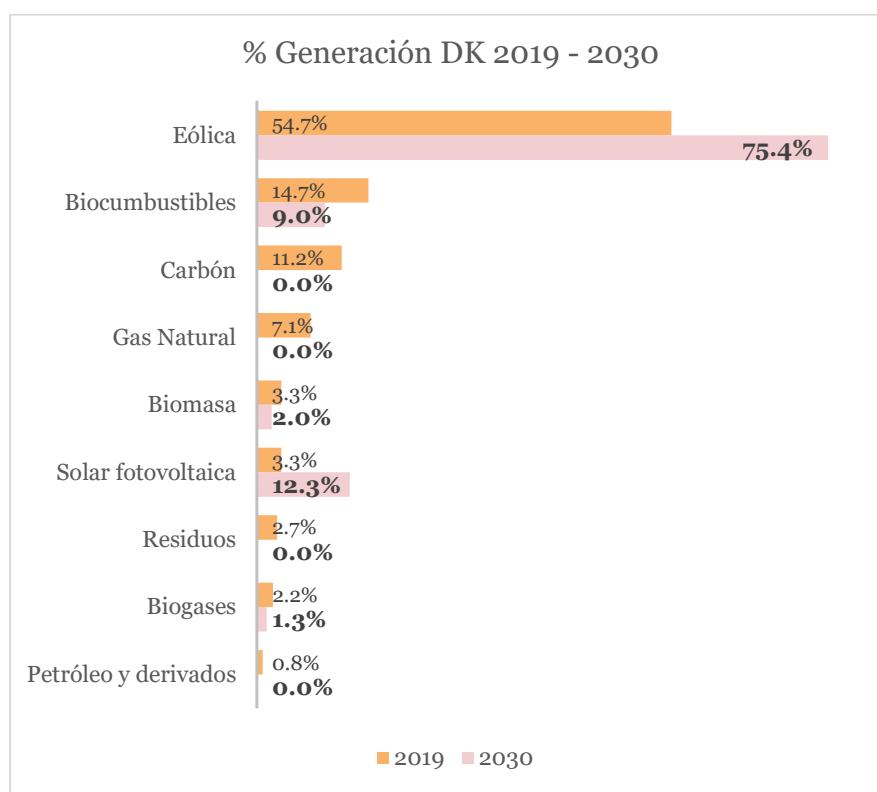


Figura 19. Mix generación Dinamarca 2019 - 2030 - Detalle

Las condiciones geográficas y climáticas de Dinamarca juntamente con sus políticas a favor de las renovables han hecho que la generación eólica haya supuesto más del 50% de la generación total en 2019 y un 70% del conjunto de renovables. Más del 20% de esta generación eólica se produjo en estaciones *offshore*, una tecnología por la que apuestan en el país danés gracias a su gran superficie costera. Las siguientes renovables con más presencia son la bioenergía y la solar fotovoltaica.

Respecto a los combustibles fósiles, el carbón supone algo más de la décima parte de la generación total (principalmente hulla) y el Gas Natural un 7%.

7.4.5 ESPAÑA

En España se generaron **273 TWh** de energía eléctrica con la siguiente distribución:

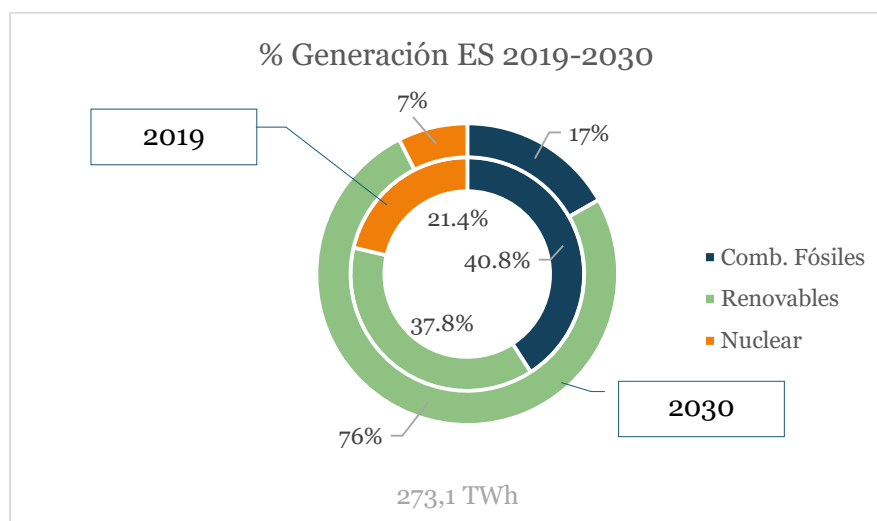


Figura 20. Mix generación España 2019 - 2030

La generación nuclear supuso una quinta parte de la generación total en 2019, como se observa en la Figura 20. El resto de la generación fue gracias a fuentes renovables y otros combustibles fósiles a partes iguales aproximadamente.

Para el escenario 2030, se ha modelado el “Escenario Objetivo” expuesto en el Plan Nacional de Energía y Clima por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Este escenario tiene como objetivo superar el 75% de generación mediante fuentes renovables y reducir de manera significativa la nuclear y el resto de los combustibles fósiles, sin eliminarlos aún del todo, para el año 2030.

En más detalle, España presenta unos mixes de generación a 2019 y a 2030 mostrados en la Figura 21:

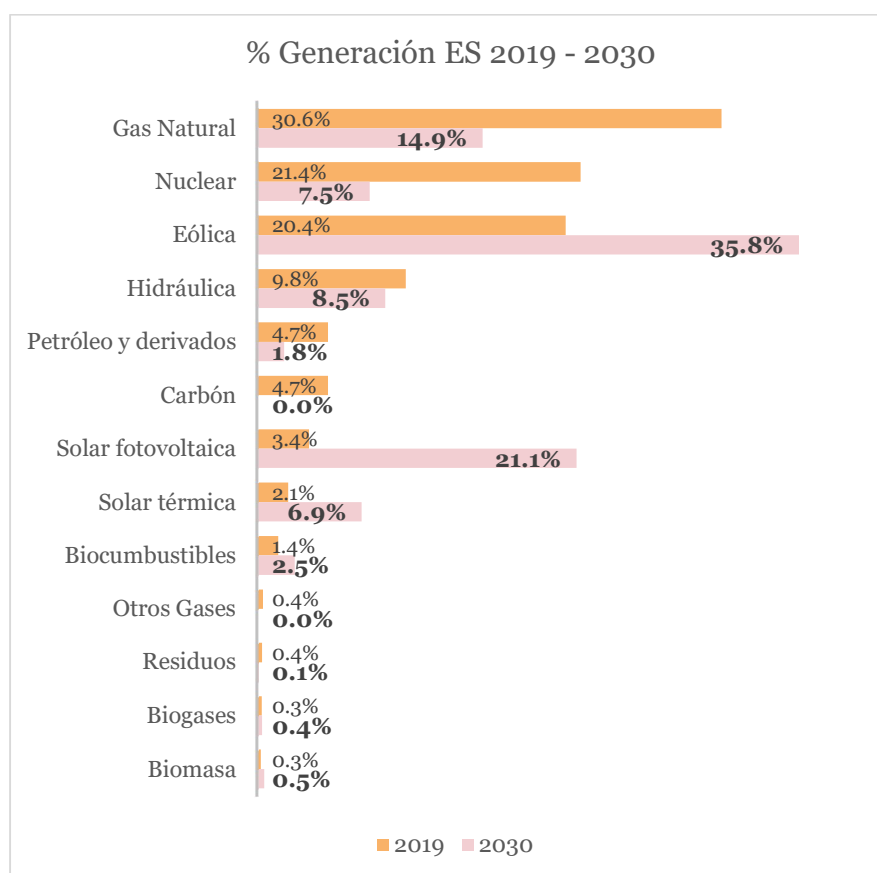


Figura 21. Mix generación España 2030 - Detalle

Como muestra la Figura 21, la tecnología principal en 2019 fue el Gas Natural con más del 30% del total, seguida por la nuclear. Cabe destacar que España tiene una producción de electricidad proveniente del carbón relativamente baja, un 4,7% (la más baja de los países del estudio). Respecto a las renovables, la principal fue la eólica con más del 20% de la generación, seguida por la hidráulica y la solar (fotovoltaica y térmica).

En el Escenario Objetivo de 2030 se pretende reducir en un 40% la generación eléctrica por Gas Natural y en un 60% la nuclear en términos absolutos. Supliendo esta generación con renovables, principalmente con fotovoltaica y eólica, que se prevé que se septupliquen y dupliquen respectivamente como muestra la figura:

7.4.6 GRECIA

En Grecia se generaron **57,1 TWh** de electricidad en 2019, de los cuales, el 28% fueron por energías renovables y el 72% por combustibles fósiles, en ausencia de nuclear.

En el plan energético y climático de Grecia para el año 2030, se plantea como objetivo alcanzar los dos tercios de producción de energía eléctrica con fuentes renovables como se muestra en la Figura 22. El motivo es poder compensar la desaparición del carbón (del cual tienen una alta dependencia) para reducir significativamente la emisión de gases de efecto invernadero.

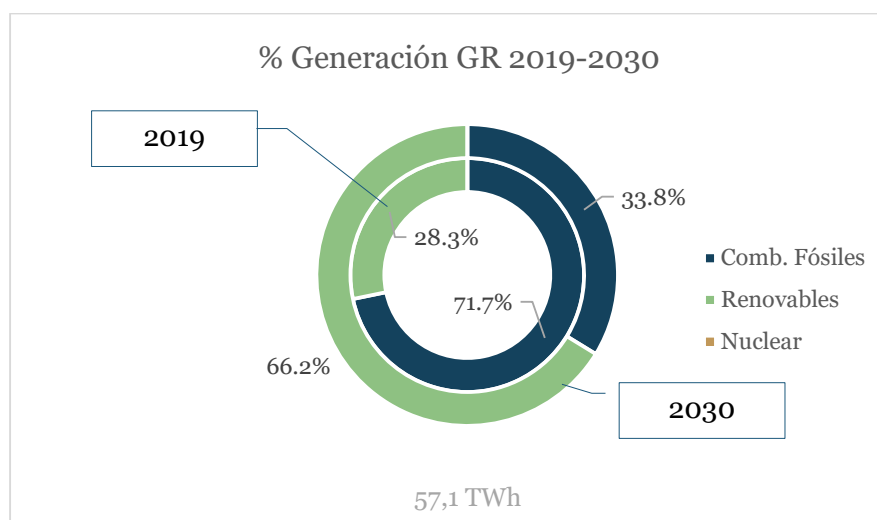


Figura 22. Mix generación Grecia 2019 - 2030

Atendiendo al detalle de la Figura 23, Entre los combustibles fósiles a fecha 2019, destacan el Gas Natural con el 40% de la generación total y el carbón, principalmente lignito, con el 21%. Entre las renovables, de manera similar al resto de países del estudio, predominan la eólica y la solar fotovoltaica con un 13 y 8% de la generación total aproximadamente.

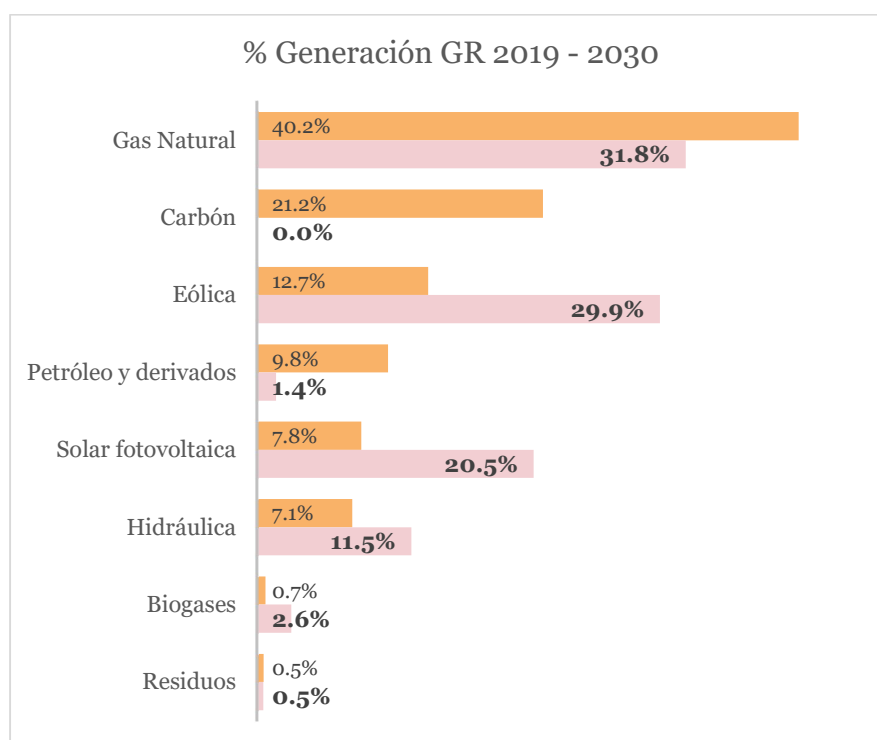


Figura 23. Mix generación Grecia 2030 - Detalle

Como se muestra en la Figura 23, a parte del carbón que desaparece del mix, el resto de los combustibles fósiles también sufren reducciones significativas compensando esta desaparición están las fuentes eólica y fotovoltaica que crecen casi en la misma proporción pasando a generar un 30 y 21% del mix respectivamente.

7.4.7 HOLANDA

En Holanda se generaron **120,4 TWh** de electricidad en el periodo 2019. Su mix energético se caracteriza por una abundante generación de fuentes fósiles y una única planta nuclear activa que suministra el 3% de la electricidad total generada. Las renovables no llegan al 20% convirtiendo a Holanda en el segundo país con el mix menos renovable del estudio (después de Hungría).

Para realizar el modelado del mix energético de Holanda en 2030, se toman los valores presentados en su plan nacional de energía y clima. En este, presentan una serie de políticas

para lograr alcanzar el 70% de renovables reduciendo significativamente la generación con combustibles fósiles como se muestra en la Figura 24:

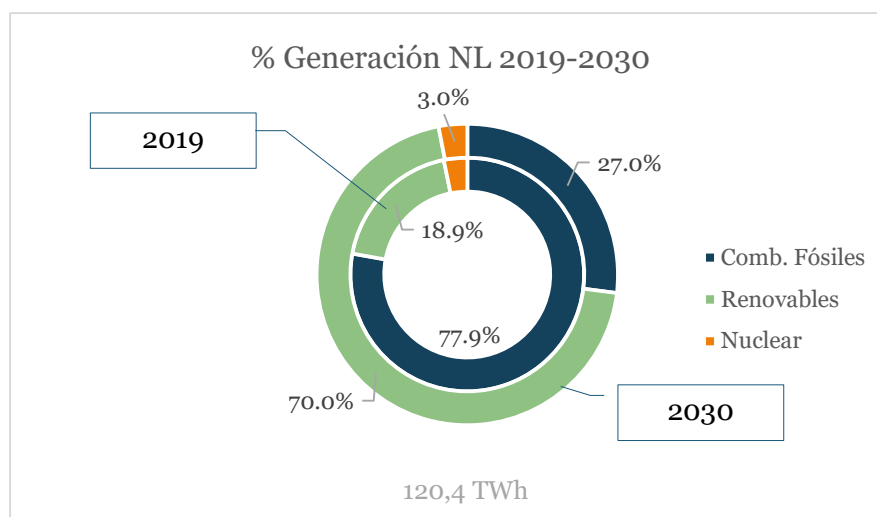


Figura 24. Mix generación Holanda 2019 - 2030

En la Figura 25 de a continuación, se puede observar que la mayor parte de los combustibles fósiles a 2019 la compone el Gas Natural, con un 58,5% de la generación, seguido por el carbón, principalmente hulla, con un 14,7%. Se puede también observar que, en línea con la tendencia europea, las dos tecnologías renovables predominantes son la eólica y la fotovoltaica con el 9,6 y 4,4% respectivamente.

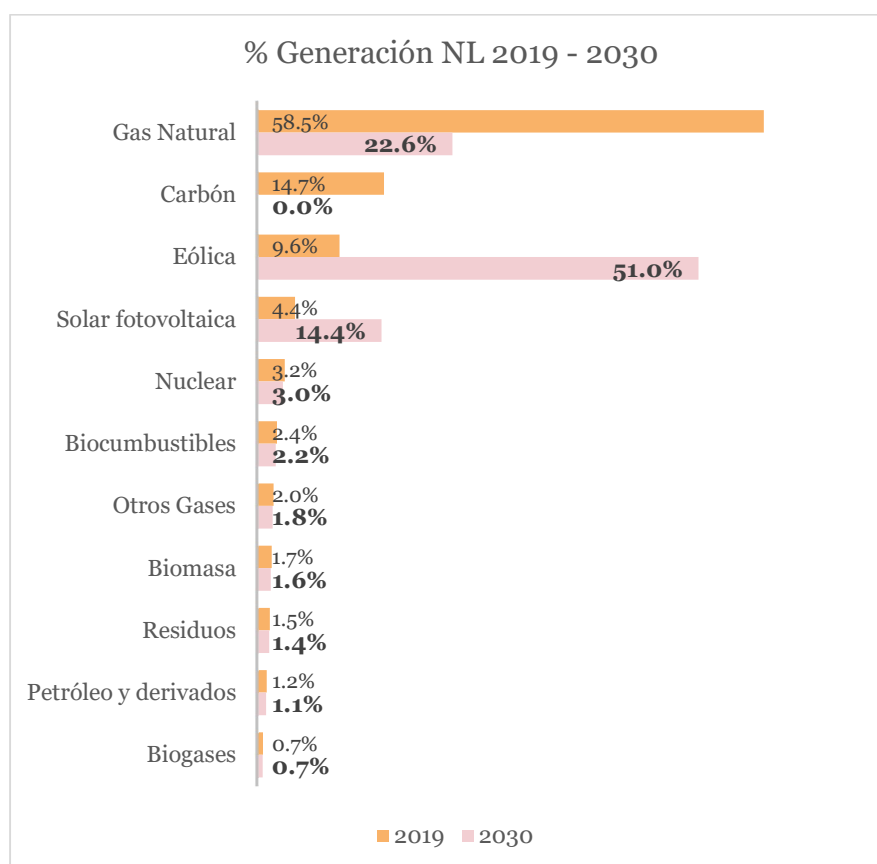


Figura 25. Mix generación Holanda 2019 - 2030 - Detalle

En 2030 se pretende acabar con la producción de gas doméstico, aunque seguirán siendo importadores de Gas Natural para la generación de electricidad. También se tiene como objetivo eliminar el carbón del mix y suplir estas fuentes de generación con un radical incremento en energía eólica y fotovoltaica, principalmente por los proyectos en curso de eólica marina u *offshore* con la que se pretende generar hasta 49TWh en 2030.

7.4.8 HUNGRÍA

Hungría generó en 2019 34 TWh de electricidad. Su mix energético destaca por tener una gran presencia de nuclear repartidas entre cuatro estaciones de 500MW de potencia cada una. La presencia de renovables es la menor de los países del estudio con un 14% y el resto de los combustibles fósiles suponen un 38% del total.

El escenario WAM (*With Additional Measures*) del NECP de Hungría para 2030 expone los planes de evolución de su mix para 2030 como se muestra en la Figura 26:

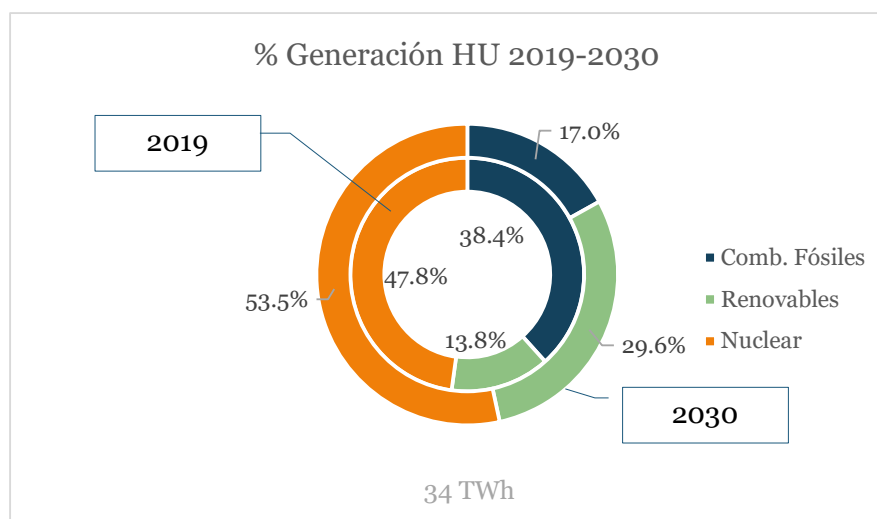


Figura 26. Mix generación Hungría 2019 - 2030

Además de la generación nuclear, Hungría tiene una dependencia de la generación con gas natural en 2019 ya que supone una cuarta parte de la generación total. La escasa generación renovable la lidera la tecnología solar fotovoltaica, con un 4,4% del mix y la eólica con un 2,1%.

Contrario a las políticas del resto de países, Hungría prevé aumentar, además de las renovables, su capacidad nuclear pasando a generar más del 50% de la electricidad del país para 2030. Concretamente, y como se muestra a continuación en la Figura 27, el aumento de renovables será liderado por la fotovoltaica que pasará a suponer el 18% de la generación total, sin cambios significativos en el resto de las fuentes renovables. Se prevé también acabar con la generación con carbón y reducir la generación con gas natural.

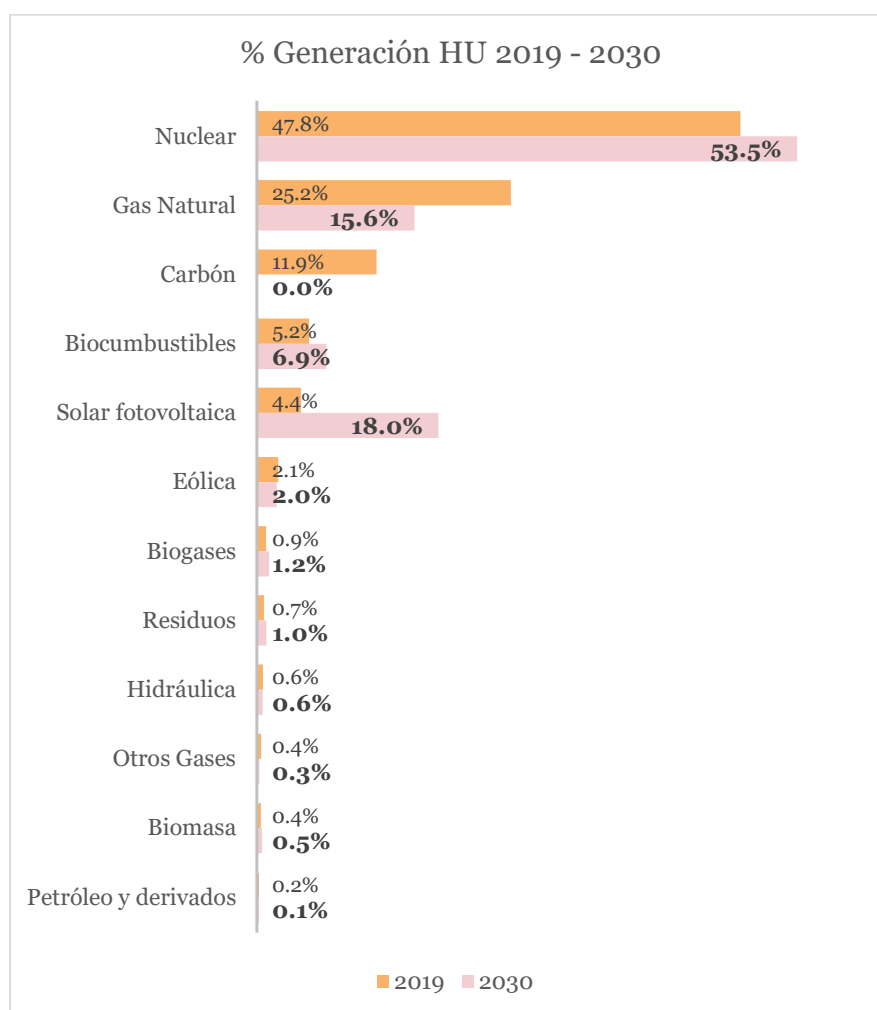


Figura 27. Mix generación Hungría 2019 - 2030 - Detalle

7.4.9 ITALIA

En Italia se generaron **293,2 TWh** en 2019. Su mix tiene una presencia del 40% de renovables y ausencia de nuclear como se muestra en la Figura 28.

Los planes energéticos de Italia contemplan un aumento en términos absolutos de las renovables (un 6% en hidráulica, un 24% en eólica y un 46% en solar), no obstante, proyectan también un aumento significativo de la energía eléctrica generada total hasta los **340TWh**. Esto hace que el aumento de las renovables no se vea reflejado en el mix, ya que el resto de los combustibles crecen en una proporción muy similar.

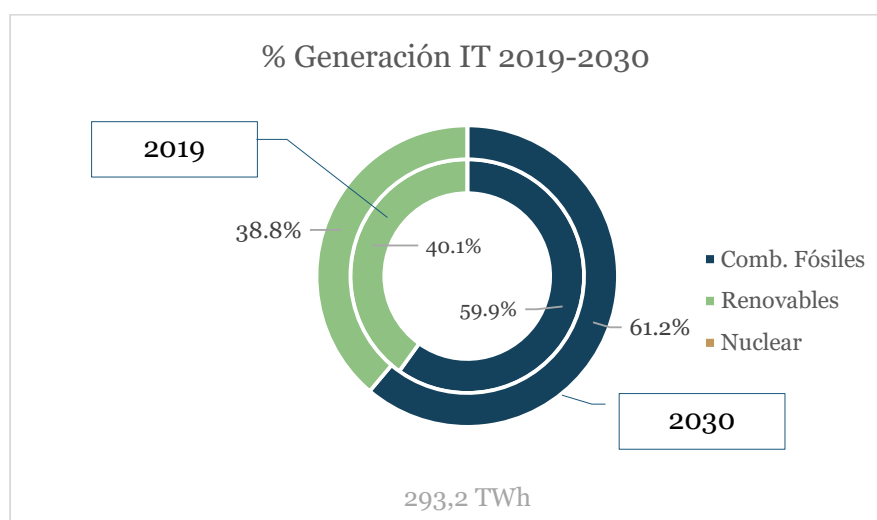


Figura 28. Mix generación Italia 2019 - 2030

Atendiendo al detalle de la Figura 29, se aprecia que el combustible más utilizado para la generación de energía eléctrica en 2019 es el gas natural con 48,3% del mix, seguido por las renovables. De estas, la principal es la hidráulica seguida por la solar y eólica.

Como también se muestra en la Figura 29, el escenario 2030 elimina la generación con carbón del mix y ha de compensar con un gran aumento en el gas natural.

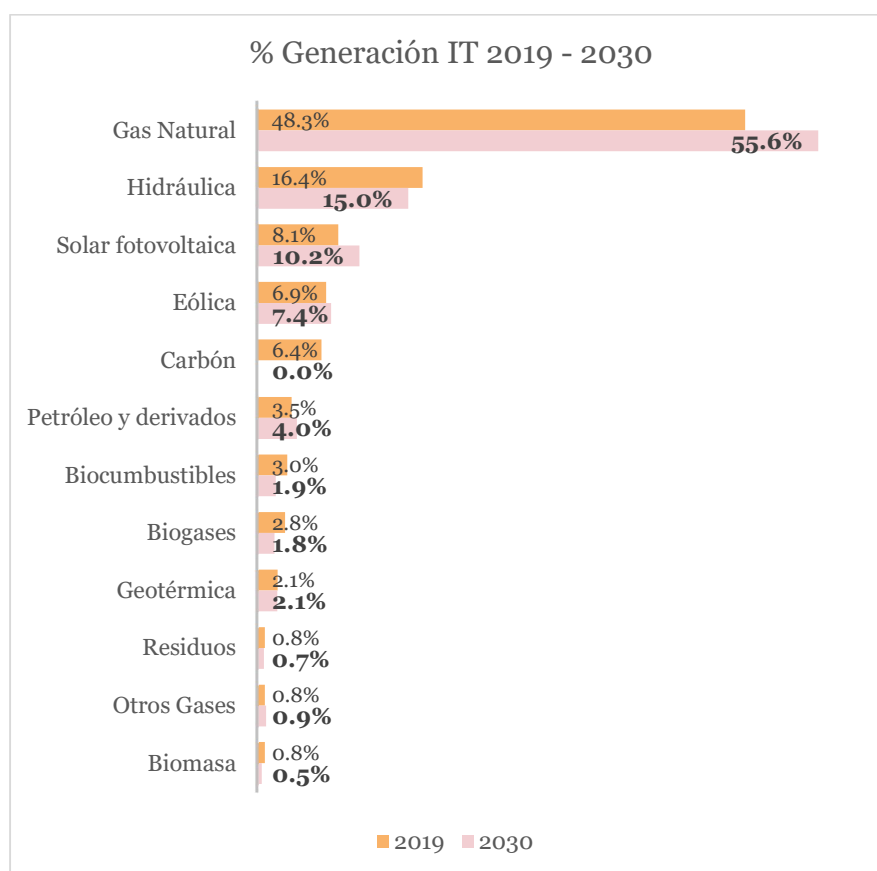


Figura 29. Mix generación Italia 2030 - Detalle

Capítulo 8. ANÁLISIS DE IMPACTOS

Una vez definidos los objetivos y el inventario del Análisis del Ciclo de Vida se evalúan en este capítulo los impactos del proceso en la tercera fase de esta metodología. Este capítulo muestra los resultados obtenidos y recalca las observaciones directas de cada impacto en términos de comparabilidad entre los elementos analizados. No trata de obtener conclusiones ni valoraciones de carácter global que corresponden al análisis conjunto de la sostenibilidad en el Capítulo 9.

Se han distinguido tres tipos de impactos a evaluar: primero, se analizan los impactos relacionados con el medio ambiente y la salud humana según las categorías expuestas en el Capítulo 6. A continuación, se evalúan los impactos económicos de los mixes energéticos siguiendo principalmente la metodología LCOE. Finalmente, se hace una evaluación de los impactos sociales de los mixes de generación de electricidad de cada país y periodo.

8.1 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES Y SALUD HUMANA

En este apartado se exponen y evalúan los impactos de las distintas tecnologías de generación y de los mixes de los países sobre cada una de las categorías de impacto ambiental que se han seleccionado para este estudio. El detalle completo y agregado de impactos ambientales diferenciado por tecnología y por mix de generación se encuentran en el Anexo II.

8.1.1 IMPACTOS AMBIENTALES DE ALCANCE GLOBAL

8.1.1.1 Calentamiento Global

La principal categoría de impacto medioambiental a tratar como resultado del ACV es el Calentamiento Global medido en kg de CO₂.equivalente La Figura 30 muestra los resultados tras evaluar cada uno de los modelos de las tecnologías del estudio.

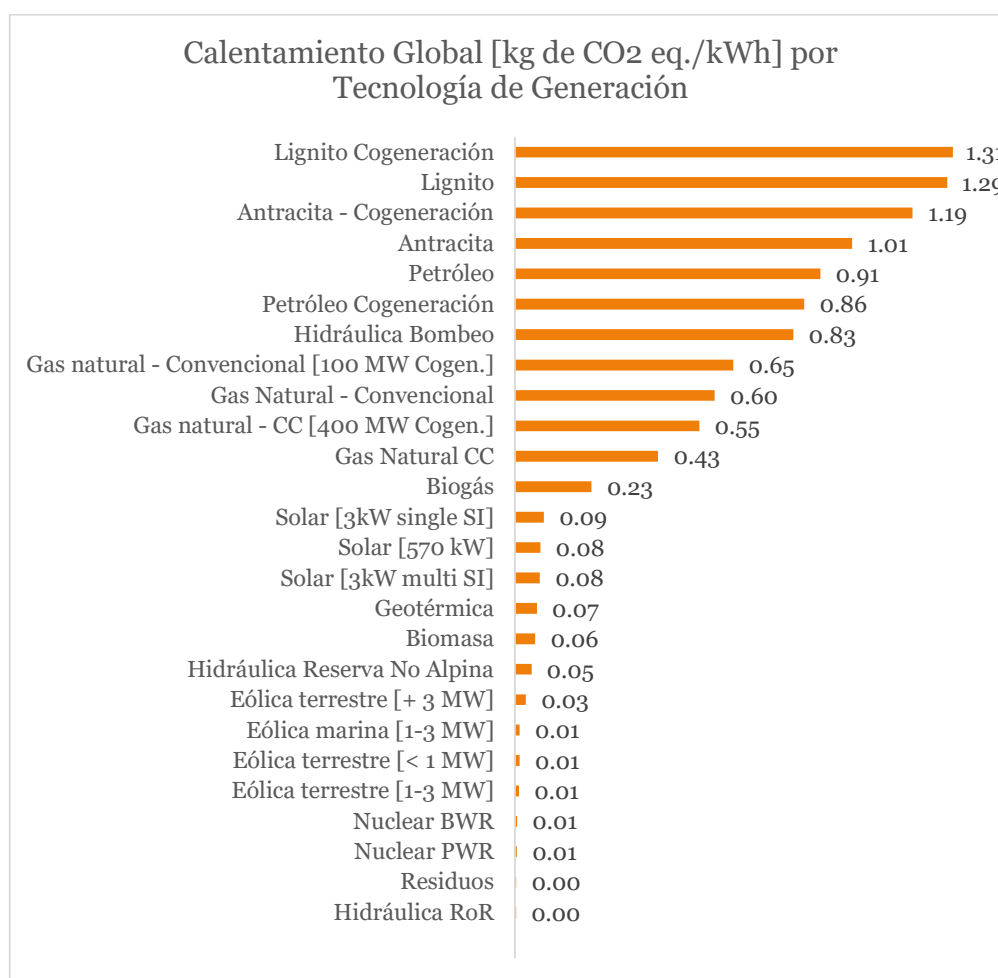


Figura 30. Impacto calentamiento global por tecnología

En la figura anterior se puede apreciar cómo las fuentes de generación que más contribuyen al calentamiento global son todas aquellas relacionadas con los combustibles fósiles, especialmente carbón, aportando más de 1 kg de CO₂ equivalente por cada kWh de electricidad generado. Al carbón, le siguen en petróleo y el gas natural.

De entre las renovables, se puede apreciar que la solar fotovoltaica (en todas sus formas) contribuye al calentamiento global de manera significativamente superior a la eólica o a la nuclear. La tecnología más respetuosa resulta ser la hidráulica de agua fluuyente.

Tras el contexto de los impactos por tecnología, se analizan a continuación los impactos de los mixes de los países estudiados. Estos mixes tienen unas emisiones en promedio de 0,43

kg de CO₂ equivalente por cada kWh generado para el año 2019, reduciéndose una tercera parte hasta los 0,29 para el año 2030. El desglose por país se muestra en la figura 31. El detalle de los valores se puede consultar en la Tabla 25 del Anexo II.

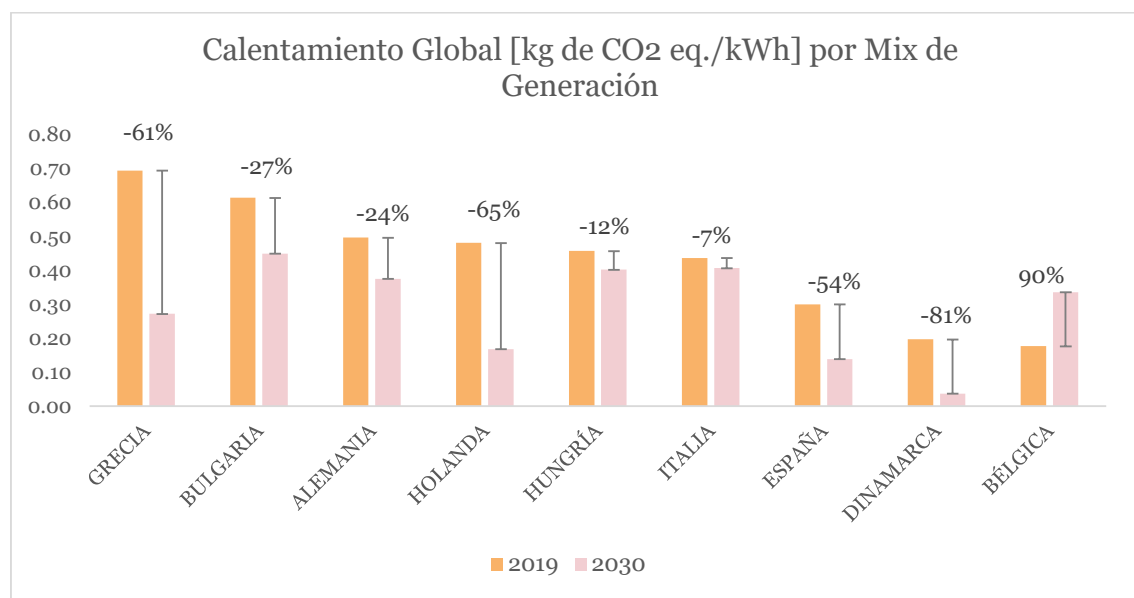


Figura 31. Impacto del calentamiento global por mix de generación 2019- 2030

Grecia encabeza el ranking de mayores emisiones de kg de CO₂ equivalente en 2019 por su alta dependencia del carbón y del gas ya que es el tercer país del estudio con más dependencia en ambas tecnologías. Esto se suma a la ausencia de nuclear en su mix que lo posiciona en el país que más contribuye al calentamiento global por kWh generado. No obstante, observamos que obtiene el tercer mayor decrecimiento porcentual con un -61% en sus emisiones al compararlas con las de 2030 gracias a la erradicación del carbón y a la disminución del gas en pos de las renovables.

Bulgaria y Alemania ocupan el segundo y tercer puesto en la lista de mayores contribuyentes al calentamiento global en 2019 por kWh generado. Aunque ambos tienen una mayor dependencia del carbón que Grecia, su impacto es algo menor por la mayor presencia de nuclear en el caso de Bulgaria (37% de su mix 2019) y por una mayor presencia de renovables en el caso de Alemania (41% del mix en 2019). Se aprecia que estos dos países tienen reducciones del 27 y 24% al compararlos con sus escenarios de 2030 por su reducción parcial en el uso del carbón. Estos descensos no les posicionan por debajo de la media en

2030 ya que Bulgaria y Alemania son dos de los países que no erradican por completo el uso del carbón y, en el caso de Alemania, por además eliminar la dependencia de la energía nuclear.

Holanda, con un mix de gran dependencia del gas y carbón, ocupa el siguiente puesto en el escenario 2019, pero se posiciona como uno de los mixes más respetuosos con el calentamiento global en 2030 gracias a su gran penetración de renovables, especialmente la eólica (51% del mix en 2030).

Hungría, Italia y España poseen mixes de baja exposición al carbón, por eso su posición en la segunda mitad del ranking. No obstante, estos tres países utilizan en gran medida el gas natural, otro de los combustibles que más contribuyen al calentamiento. Los tres países reducen sus emisiones en los escenarios 2030 al eliminar el carbón, reducir el gas y aumentar las renovables, aunque España presenta el descenso más significativo.

Dinamarca presentaba en 2019 un mix energético bajo en combustibles fósiles y aún así se trata del país con la mayor reducción de emisiones de calentamiento global al encontrarse entre sus políticas para 2030 la generación 100% renovable.

Finalmente, en lo que respecta al calentamiento global, Bélgica pasa de ser el menos contaminante de los países tratados en 2019 al cuarto mayor en 2030. Al eliminar por completo la nuclear, se ve obligado a suplir esa generación con gas y renovables.

8.1.1.2 Destrucción de la Capa de Ozono

La segunda de las categorías de impacto medioambiental analizada es la destrucción de la capa de ozono medido en kg de CFC-11 equivalentes. En la figura 32 se muestran los impactos de la destrucción de la capa de Ozono por tecnologías, el impacto de las tecnologías de generación sobre esta categoría difiere de los impactos sobre el calentamiento global, ya que las tecnologías más contaminantes en este aspecto son el petróleo, el gas y más derivados. De entre las renovables, las más contaminantes son la hidráulica por bombeo y la biomasa seguidas por la solar fotovoltaica, que, en este caso, contaminan más que el carbón, la eólica o la nuclear.

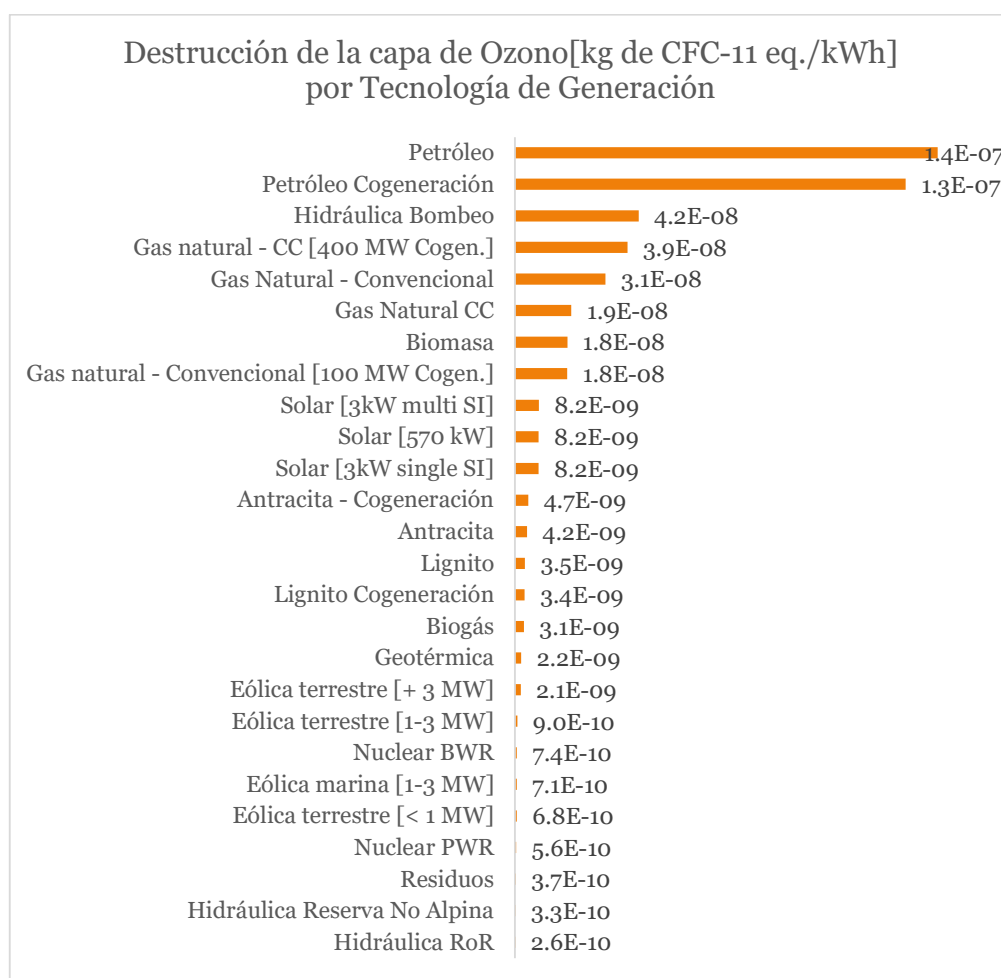


Figura 32. Impacto de la destrucción de la capa de ozono por tecnología

Atendiendo a los mixes energéticos y su evolución prevista de la Figura 33, se observa también una reducción de entorno al 11% promedio en las emisiones de CFC-11 equivalentes. El detalle se puede consultar en la Tabla 25 del Anexo II.

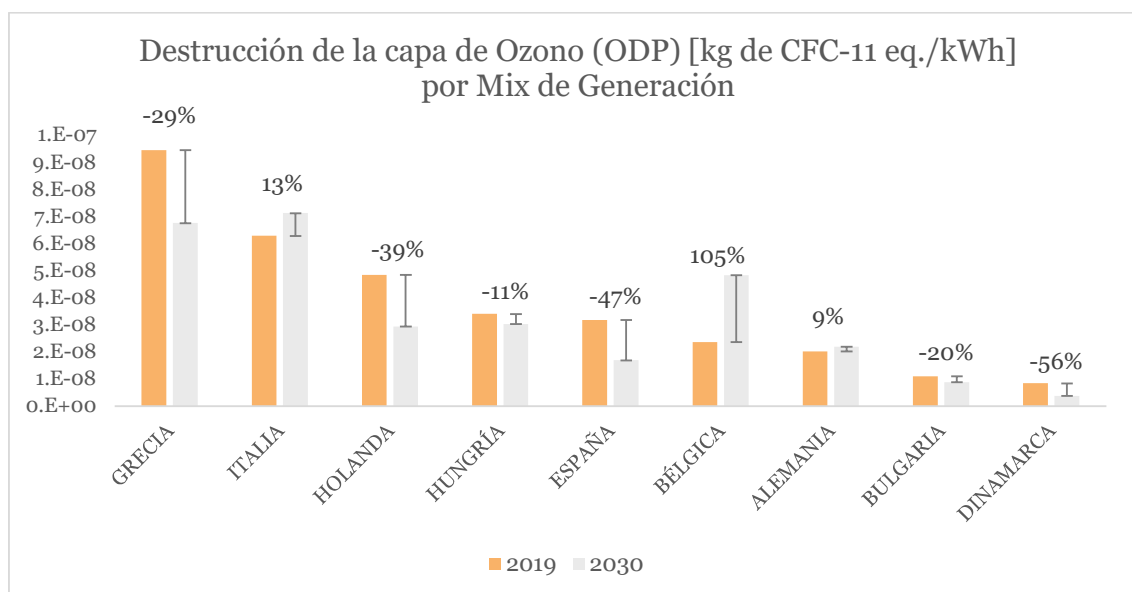


Figura 33. Impacto de la destrucción de la capa de ozono por mix de generación 2019 - 2030

De nuevo, Grecia es el más contaminante y uno de los más comprometidos con el medio ambiente al reducir casi en un 30% sus emisiones de CFC-11 eq por kWh generado.

Italia, Bélgica y Alemania empeoran su posición con respecto a la destrucción de la capa de ozono al ser los únicos tres países contemplados que en 2030 tendrán un mayor peso del gas en el mix que el que tenían en 2019. El resto de los países disminuyen sus concentraciones de manera significativa por su gran apuesta en renovables, cabe destacar Dinamarca, con una reducción de más del 50%, siendo de nuevo, el mix más respetuoso y el más comprometido en este aspecto.

8.1.2 IMPACTOS AMBIENTALES DE ALCANCE LOCAL

8.1.2.1 Agotamiento Abiótico

El agotamiento abiótico, medido en kg de Sb equivalente por cada kWh generado para el caso de materiales y minerales empleados o en MJ/kWh para el caso de los combustibles fósiles, presenta los impactos por tecnología de generación recogidos en la Tabla 2 de a continuación:

Agotamiento Abiótico	[kg de Sb/kWh]	Comb. Fósiles [MJ/kWh]
Antracita	2.20E-07	9.80
Antracita - Cogeneración	2.62E-07	10.85
Biogás	5.88E-07	1.01
Biomasa	2.06E-07	0.73
Eólica marina [1-3 MW]	9.91E-07	0.16
Eólica terrestre [+ 3 MW]	8.08E-06	0.16
Eólica terrestre [< 1 MW]	8.94E-07	0.35
Eólica terrestre [1-3 MW]	7.06E-07	0.15
Gas natural - CC [400 MW Cogen.]	2.81E-07	7.61
Gas Natural - Convencional	6.40E-07	10.56
Gas natural - Convencional [100 MW Cogen.]	9.58E-07	8.81
Gas Natural CC	1.21E-07	10.55
Geotérmica	1.62E-07	0.71
Hidráulica Bombeo	5.39E-07	10.29
Hidráulica Reserva No Alpina	3.13E-08	0.05
Hidráulica RoR	2.49E-08	0.04
Lignito	3.66E-07	11.32
Lignito Cogeneración	3.73E-07	11.42
Nuclear BWR	1.99E-07	0.09
Nuclear PWR	1.93E-07	0.08
Petróleo	2.52E-07	11.24
Petróleo Cogeneración	2.70E-07	10.58
Residuos	1.10E-08	0.04
Solar [3kW multi SI]	8.75E-06	0.85
Solar [3kW single SI]	8.62E-06	0.98
Solar [570 kW]	4.54E-06	0.86

Tabla 2. Agotamiento abiótico por tecnología de generación

De la tabla anterior, se puede apreciar, que la energía solar fotovoltaica y la eólica son las que más agotamiento abiótico presentan por sus altos consumos en metales y minerales para su construcción. Por otro lado, en cuanto al agotamiento abiótico de combustibles fósiles, predominan las centrales térmicas con carbón y gas natural.

Combinando los resultados del agotamiento abiótico de las tecnologías, y asumiéndolo constante entre 2019 y 2030, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 34 para los mixes de generación:

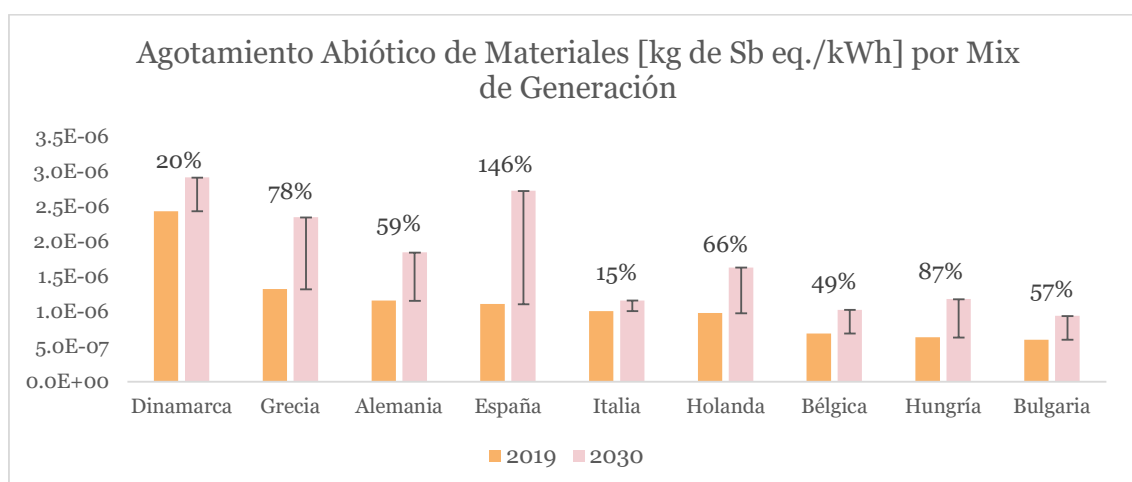


Figura 34. Agotamiento abiótico por mix de generación 2019 - 2030

El agotamiento abiótico de los materiales y minerales incrementa de manera significativa en todos los países en el escenario 2030 por la gran apuesta de renovables y por la reducción o eliminación de centrales de combustibles fósiles, que resultan ser más eficientes en este impacto concreto. Cabe destacar el escenario particular de España, que eleva sus niveles de agotamiento abiótico sensiblemente superior al resto (+146%) entre 2019 y 2030.

Con respecto al agotamiento abiótico de los combustibles fósiles para los distintos mixes y escenarios se obtienen los siguientes impactos recogidos en la Figura 35:

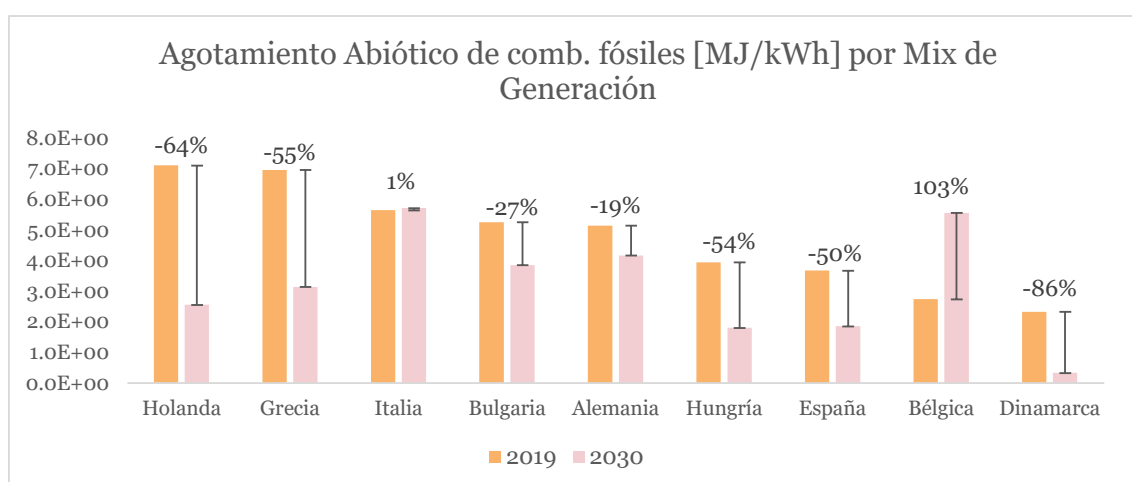


Figura 35. Agotamiento abiótico de combustibles fósiles por mix de generación 2019 - 2030

Por lo general, y de manera contraria a lo que sucedía con el agotamiento de materiales, todos reducen su agotamiento de combustibles fósiles al prescindir de carbón y gas.

Bélgica es la excepción. Al igual que con otros impactos ambientales, duplica su agotamiento abiótico de combustibles fósiles al eliminar su generación con nuclear y reemplazarla (en parte) por gas natural. Aquellos países que más “descarbonizan” su electricidad son los que consiguen las reducciones más grandes en esta categoría de impacto (Dinamarca, Holanda y Grecia).

8.1.2.2 Oxidación Fotoquímica

La oxidación fotoquímica se mide en kg de etileno equivalente. Encabezan la lista de más contaminantes el carbón en todas sus formas, el gas y el petróleo seguidas por las renovables (la solar, la eólica y la hidráulica). Finalmente se ubican la nuclear, los residuos y la hidráulica de agua fluente como las menos contribuyentes a esta categoría de impacto ambiental.

En más detalle, los impactos de cada mix y escenario son los incluidos en la Figura 36:

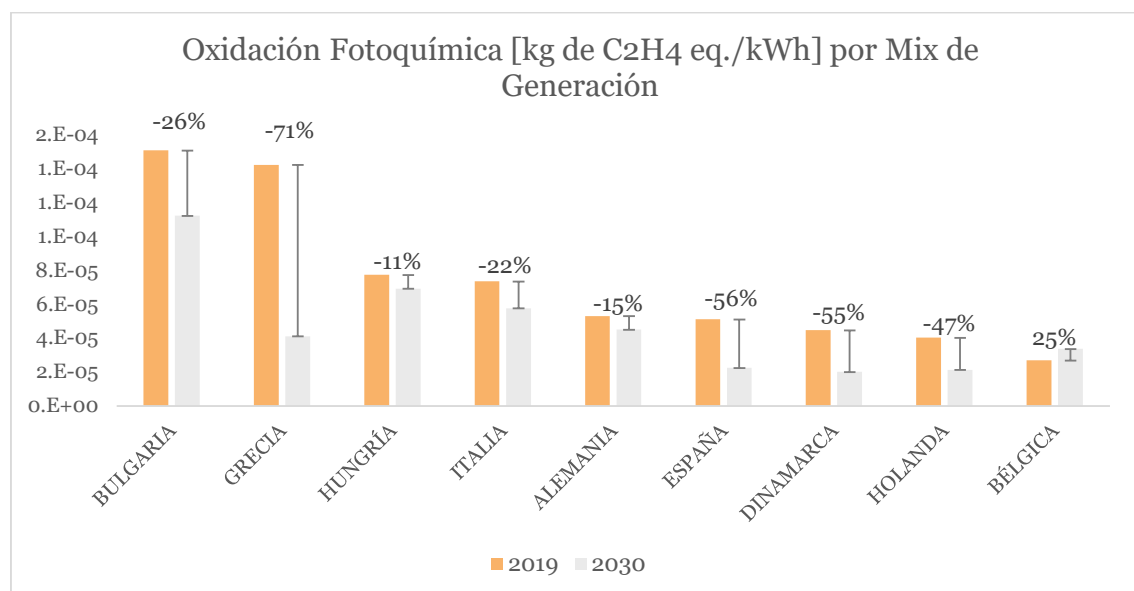


Figura 36. Impacto oxidación fotoquímica por mix de generación 2019 - 2030

El conjunto de los países experimenta un descenso promedio en las emisiones de etileno equivalente del 36%. De la Figura 36 se aprecia cómo todos mejoran su situación en 2030 salvo Bélgica que, pese a ser el mix más “limpio” en cuanto a oxidación fotoquímica, aumenta sus emisiones por kWh en un 25% entre los dos periodos estudiados.

Nuevamente Grecia, ocupa una de las posiciones más contaminantes y a la vez con más reducción en emisiones por kilovatio hora para su escenario 2030. Por otro lado, y de manera similar a otros impactos ambientales, Hungría, Italia y Alemania, se encuentran en la mitad superior de la lista y presentan las menores reducciones con respecto a esta categoría de impacto.

8.1.2.3 Acidificación

El impacto sobre la acidificación, medida en kg de SO₂ equivalente, presenta unas reducciones generalizadas en los escenarios de 2030 frente a los de 2019, a excepción de Bélgica que empeora su situación como se muestra en la Figura 37:

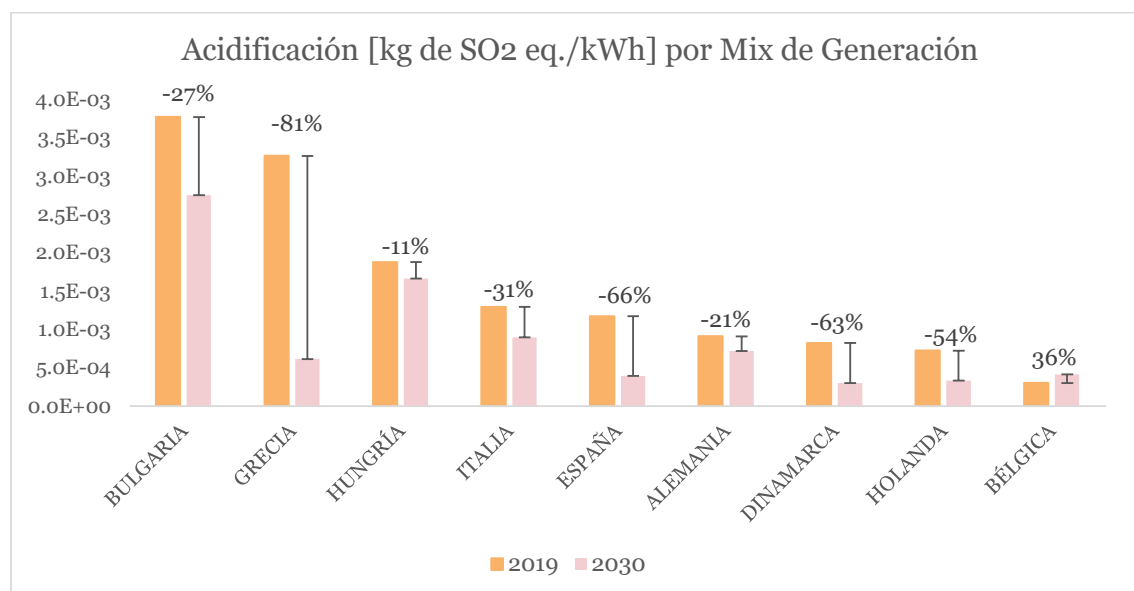


Figura 37. Impacto acidificación por mix de generación 2019 - 2030

Como se muestra en la figura anterior, Grecia, España, Dinamarca y Holanda son los que más consiguen rebajar sus emisiones por unidad de energía generada por su mayor apuesta de renovables y reducción de combustibles fósiles.

8.1.2.4 Eutrofización

Respecto a los impactos ambientales sobre la eutrofización, cabe destacar que el Lignito es la tecnología más dañina ya que contribuye más de 4 veces más por kWh que la Antracita y 70 veces más que el gas natural. Por esta razón los efectos ambientales de los mixes en esta categoría tienen una dispersión mayor que lo que presentan otras categorías de impacto.

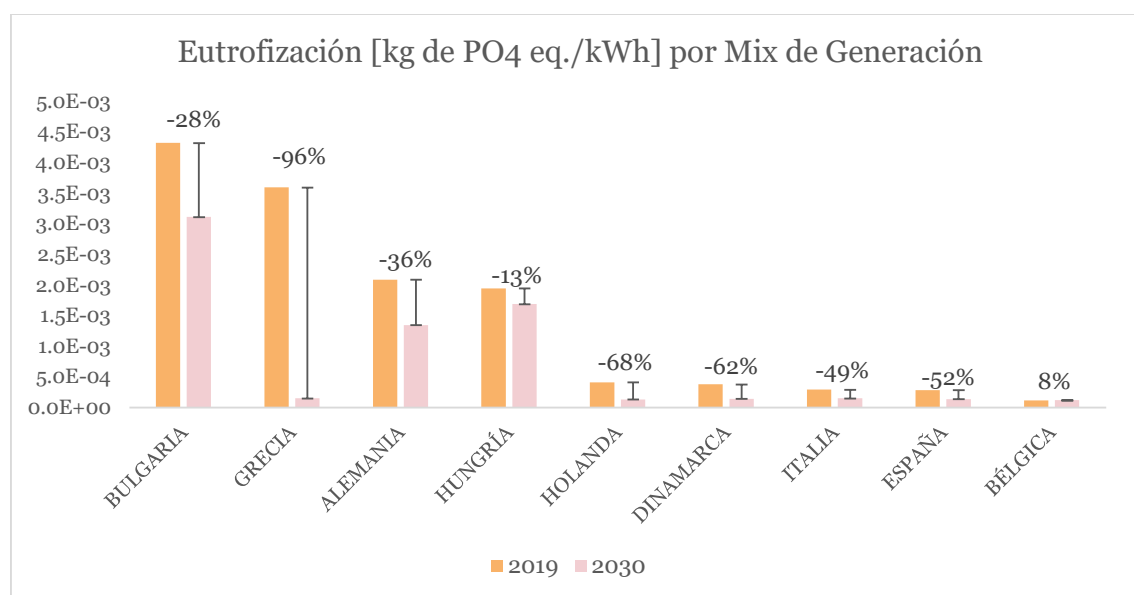


Figura 38. Impacto eutrofización por mix de generación 2019 - 2030

Como se expone en la Figura 38, las reducciones de PO₄ por kWh de electricidad generado son generalizadas con un 48% en promedio.

8.1.2.5 Ecotoxicidad y Toxicidad Humana

Los impactos sobre la ecotoxicidad se miden en kg de 1,4-DB equivalentes por kWh generado de electricidad. Para la evaluación de esta categoría se contemplan cuatro aspectos simultáneamente: la ecotoxicidad terrestre, del agua dulce, del agua marina y la toxicidad humana.

Las formas de generación que más contribuyen a la ecotoxicidad son aquellas basadas en carbón, especialmente en lignito. De entre las renovables más contaminantes, se encuentran

la hidráulica por bombeo, el biogás o la solar; todas ellas superando a algunos combustibles fósiles como el gas natural o la nuclear.

La magnitud de estos impactos difiere según el tipo de ecotoxicidad: La ecotoxicidad terrestre es la menor de todas con unos órdenes de magnitud de entre 10^{-5} y 10^{-3} kg de 1,4-DB equivalente en función del tipo de generación. Por otro lado, la toxicidad humana y la ecotoxicidad del agua dulce oscilan entre los 10^{-3} y 10^0 según la tecnología de generación. Finalmente, el ámbito más impactado de la ecotoxicidad es el agua marina, cuyos órdenes de magnitud oscilan entre 10^0 y 10^3 kg de 1,4-DB equivalentes por kWh generado. Consecuentemente, los impactos de los mixes de generación se encontrarán también en estas horquillas mencionadas para cada uno de los tipos de toxicidad como se muestra en la figura 39 de a continuación:

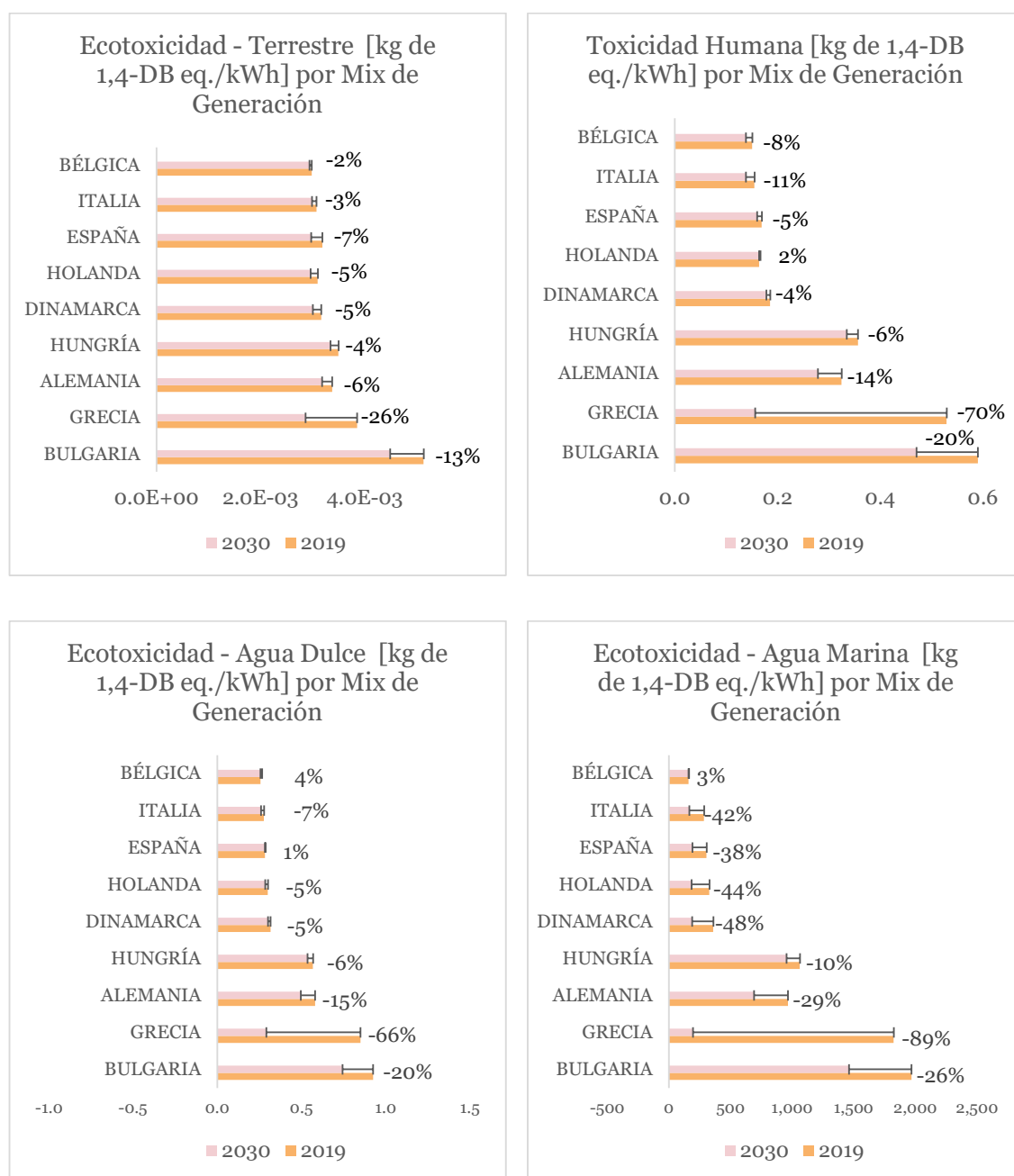


Figura 39. Impacto ecotoxicidad por mix de generación 2019 - 2030

Al analizar los resultados de toxicidad, se observan tendencias similares al resto de impactos medioambientales (*i.e.* Bulgaria y Grecia ocupan los puestos más contaminantes, Bélgica pese a tener el menor impacto medioambiental, empeora su situación en 2030, etc.).

8.1.2.6 Ocupación del Terreno

Para la ocupación del terreno se toma como referencia el estudio “*Land-use intensity of electricity production and tomorrow’s energy landscape*” [45]. Este estudio recopila y calcula la intensidad del uso de la tierra para la generación de electricidad en todas las principales fuentes de electricidad y en una amplia distribución geográfica. Los autores se centran únicamente en la huella terrestre de la electricidad utilizando un conjunto de datos que abarca 66 países y 45 estados de Estados Unidos y se referencian datos procedentes de 17 estudios publicados.

Debido a la escasez de detalle en comparación con las tecnologías consideradas para este proyecto, se toman los datos de la referencia mencionada anteriormente y se asumen las siguientes hipótesis:

1. Se toma la media de las observaciones del estudio referenciado.
2. Se toman los valores de huella terrestre directa más la indirecta, es decir, no sólo el espacio ocupado por la construcción de las centrales, sino también el espacio requerido para su funcionamiento (*e.g. la separación entre aerogeneradores, las tierras destinadas a la producción de la biomasa, etc.*).
3. La eólica marina supone una huella terrestre nula, ya que únicamente ocupa terreno submarino.
4. Las tecnologías solares de baja potencia se consideran con huella terrestre nula. Esto se debe a que se instala típicamente en edificaciones ya existentes para autoconsumo.
5. Se asume que los tres tipos de centrales hidráulicas contempladas en este proyecto tienen una huella terrestre igual al dato proporcionado en la referencia.
6. Se asume que la energía eólica terrestre tiene una ocupación del terreno igual a la estimación proporcionada por estudio de referencia independientemente de la potencia de los aerogeneradores.
7. Se asume que la generación con carbón y gas natural convencional ocupa el mismo terreno que las centrales de carbón y gas natural de cogeneración con calor respectivamente.

8. Se asume que el Petróleo y derivados se comportan igual que la generación de gas natural por ausencia de datos.

Tras la implementación de estas hipótesis en conjunto con el estudio referenciado, el impacto de la huella terrestre de las distintas centrales eléctricas resulta como se recoge en la Tabla 3 de a continuación:

Tecnología de generación	[m²/kWh]
Antracita	1.1E-02
Antracita - Cogeneración	1.1E-02
Biogás	2.3E-01
Biomasa	1.6E+00
Eólica marina [1-3 MW]	0.0E+00
Eólica terrestre [+ 3 MW]	1.5E-01
Eólica terrestre [< 1 MW]	1.5E-01
Eólica terrestre [1-3 MW]	1.5E-01
Gas natural - CC [400 MW Cogen.]	1.9E-02
Gas Natural - Convencional	1.9E-02
Gas natural - Convencional [100 MW Cogen.]	1.9E-02
Gas Natural CC	1.9E-02
Geotérmica	1.5E-04
Hidráulica Bombeo	1.5E-01
Hidráulica Reserva No Alpina	1.5E-01
Hidráulica RoR	1.5E-01
Lignito	1.1E-02
Lignito Cogeneración	1.1E-02
Nuclear BWR	1.5E-04
Nuclear PWR	1.5E-04
Petróleo	1.9E-02
Petróleo Cogeneración	1.9E-02
Residuos	1.5E-03
Solar térmica parabólica	1.1E-02
Solar térmica torre	1.1E-02
Solar [3kW multi SI]	0.0E+00
Solar [3kW single SI]	0.0E+00
Solar [570 kW]	2.1E-02

Tabla 3. Ocupación del terreno por tecnología de generación. Fuente: elaboración propia. [44]

De la tabla anterior, se aprecia cómo las energías renovables (a excepción de la eólica marina y de la fotovoltaica para el autoconsumo) tienen una intensidad energética menor que las centrales térmicas con combustibles fósiles en términos de ocupación del terreno convirtiendo a este impacto ambiental en uno de los mayores perjudicados por el plan de despliegue de renovables de la Unión Europea. La energía nuclear logra el primer puesto en cuanto a eficiencia del uso de terrenos y la biomasa y el biogás los menos eficientes.

Los resultados de la ocupación de los mixes teniendo en cuenta la ocupación de las distintas centrales, en m²/kWh de electricidad generado son los que se muestran en la Tabla 4 de a continuación:

[m ² /kWh]	2019	Ranking 2019	2030	Ranking 2030	Variación [%]
Dinamarca	3.60E-01	1	2.23E-01	1	-38%
Hungría	1.02E-01	2	1.32E-01	2	29%
Holanda	9.37E-02	3	8.96E-02	4	-4%
España	8.13E-02	4	1.22E-01	3	50%
Alemania	7.60E-02	5	7.46E-02	6	-2%
Italia	7.29E-02	6	6.28E-02	7	-14%
Bélgica	4.45E-02	7	5.13E-02	8	15%
Grecia	4.38E-02	8	8.09E-02	5	85%
Bulgaria	3.20E-02	9	3.87E-02	9	21%

Tabla 4. Datos de ocupación del terreno por mix de generación 2019 - 2030

Los países con más presencia de nuclear o carbón en 2019 son los más eficientes en cuanto a huella terrestre, mientras que aquellos con más presencia de solar o eólica (Dinamarca u Holanda) tienen una mayor ocupación del terreno por cada kWh generado.

Aquellos países que mejoran su eficiencia en este ámbito para 2030, como Dinamarca o Italia, lo logran gracias a la gran apuesta por la eólica off-shore o por la solar de autoconsumo y aquellos que la empeoran, como Grecia o España, se debe principalmente a la eliminación del carbón en pos del gas o de renovables.

8.2 EVALUACIÓN DE IMPACTOS ECONÓMICOS

La evaluación económica es el segundo aspecto fundamental para la evaluación conjunta de la sostenibilidad. La metodología utilizada para la evaluación de los mixes será el LCOE o coste nivelado de la energía que, en alto nivel, puede representarse mediante la siguiente fórmula:

$$LCOE = \frac{\text{Valor actual neto de los costes de la vida útil de la tecnología}}{\text{Energía eléctrica total producida en la vida útil de la tecnología}}$$

Si se desgrana la fórmula, se pueden observar los factores de los que depende:

$$LCOE = \frac{I + \sum_{t=1}^n \frac{FO\&M_t + VO\&M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- I : Costes de inversión inicial medido en euros.
- $FO\&M_t$: Costes fijos de operación y mantenimiento de las centrales en el año t medido en euros.
- $VO\&M_t$: Costes variables de operación y mantenimiento de las centrales (excluyendo combustible) en el año t medido en euros.
- F_t : Costes de combustible en el año t medido en euros.
- E_t : Energía total producida en el año t medida en kWh. Será el resultado de la potencia instalada aplicando el factor de capacidad de la central específica.
- r : Tasa de descuento.
- n : Vida útil estimada de la central medida en años.

Debido a la alta variabilidad en muchos de los factores del LCOE (cómo el precio del combustible, costes de inversión y mantenimiento u otros) según la geografía, las políticas y el año, se toma como referencia el estudio “*Cost of Energy (LCOE): Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments*” [46] publicado por la propia Comisión Europea en 2020 sobre datos de 2018.

La referencia ha sido escogida como principal por los siguientes motivos:

1. Por la proximidad al periodo de estudio. Se asumirá que los resultados obtenidos con fecha 2018 tendrán una diferencia despreciable con la fecha de interés: 2019
2. Por la precisión y calidad de la información, ya que se nutre de una base de datos construida de forma empírica a raíz de casi 2.000 observaciones de centrales eléctricas.
3. Por el ámbito geográfico de este proyecto, ya que el foco de la referencia es la Unión Europea (en comparación con otras regiones) y está publicado por la Comisión Europea.

4. Por el objetivo del proyecto: ya que se busca la mayor comparabilidad posible, es preferible tomar una referencia principal para modelar el coste nivelado de las distintas tecnologías, que realizar estimaciones provenientes de fuentes diversas.

De forma complementaria a la referencia principal y para las estimaciones de vida útil de las centrales y costes de operación y mantenimiento, se toma “*Technology pathways in decarbonization scenarios*” publicado por ASSET conteniendo también datos a fecha 2018 [47]. Finalmente, para las tasas de descuento se utilizará un 3% para las tecnologías tradicionales y un 7% para las tecnologías renovables de gran escala, factores típicos de la literatura del sector.

Los distintos parámetros y costes nivelados de electricidad según la tecnología se detallan a continuación:

8.2.1 LCOE ENERGÍAS RENOVABLES 2019

El análisis de costes de las energías renovables se caracteriza (por lo general) por no incurrir en costes de combustible, ya que se sirven de elementos naturales como la luz o el viento para la producción de electricidad. Los parámetros de inversión, costes de mantenimiento y factores de capacidad se detallan a continuación con referencia al estudio empírico mencionado anteriormente:

8.2.1.1 Eólica Terrestre

La eólica terrestre alcanzó, a fecha 2018, más de 160 GW de capacidad instalada en la Unión Europea, con unos factores de capacidad del 32% en promedio. Los costes de inversión de las observaciones de los estudios mencionados se sitúan en torno a los 1.600 €/kW y los costes de operación y mantenimiento (*i.e. fijos y variables*) en 30 €/kW/año en promedio, teniendo en cuenta el aumento anual de los mismos. La vida útil se supone 25 años.

Con estos parámetros, y aplicando la metodología mencionada anteriormente, se obtiene un coste nivelado de la energía para este tipo de centrales de **0,0597 €/kWh**, que se asumirá igual para los distintos tipos de eólica terrestre contemplados ya que los factores para el cálculo son fruto de un promedio de observaciones de centrales de distinta potencia.

8.2.1.2 Eólica Marina

Los costes para este tipo de centrales son bastante específicos según el tipo de proyecto, la distancia de la costa, etc. Los proyectos más modernos, además, utilizan turbinas de mayor tamaño para aumentar los factores de capacidad y reducir los costes.

La inversión en Europa es de 3.300 €/kW, significativamente mayor que la eólica terrestre, pero con factores de capacidad de entre 45 y 50% (para el cálculo se toma la media: 47,5%). Los costes de operación y mantenimiento anuales rondan el 2% de la inversión inicial. La vida útil se supone también de 25 años.

Con estos factores se obtiene un coste nivelado de **0,0843 €/kWh**.

8.2.1.3 Solar

Los paneles solares son una de las tecnologías que más han innovado en la última década y se puede apreciar en su alta tasa de aprendizaje y, por ende, en su drástica reducción de costes. El CAPEX promedio para esta tecnología de generación es de 900€/kW en Europa, con un factor de capacidad muy variable (ya que depende de la irradiación solar de cada país) pero que se toma en 15% como promedio europeo.

Con un coste de O&M del 2% de la inversión anualmente y una vida útil de 25 años, se obtiene un LCOE de **0,0724 €/kWh**

Los paneles solares de baja potencia, típicamente instalados en zonas residenciales y para autoconsumo, tienen un LCOE promedio más alto de media **0,133 €/kWh**.

Para el caso de la solar térmica, aunque solo está presente de forma relevante en el mix de España, se considerará un coste de 0,183 €/kWh equivalente al valor estimado por la referencia para el *Concentrated Solar Power*.

8.2.1.4 Geotérmica

Aunque la geotermia no está tan extendida por Europa como lo está en Estados Unidos, es una tecnología que ha reducido a la mitad sus costes en un 50% desde 2013 según las

observaciones recogidas en la referencia, obteniendo un LCOE promedio de **0,062 €/kWh** en un rango de entre 0,030 y 0,100.

8.2.1.5 Hidráulica

Los factores de la hidráulica son muy variables ya que las observaciones recogen centrales hidráulicas de distinto tipo (de agua fluyente o de embalse), no obstante, se hace la distinción entre aquellas centrales de más y menos de 10MW de capacidad.

A efectos del proyecto, se asume que las centrales de menos de 10MW corresponden con aquellas de agua fluyente y reservas alpinas, y las centrales de más de 10MW corresponden con las reservas de agua en embalse y bombeo. Con unas vidas útiles de 50 años, unos factores de capacidad de 22 y 30% respectivamente y unos costes de operación y mantenimiento del 2 y del 3% de la inversión respectivamente se obtienen unos costes nivelados de la electricidad de **0,080 €/kWh** para las centrales menores de 10MW y **0,123 €/kWh** para las centrales mayores de 10MW.

8.2.1.6 Biomasa

Para la Biomasa, a diferencia de otras renovables, es necesario considerar el coste del combustible. Para ello, el estudio tiene en cuenta unos costes de combustibles de entre 30 y 42 €/MWh teniendo en cuenta que el poder calorífico es de 5.5 MWh por tonelada de biomasa.

Contando con un factor de capacidad de entre 70 y 80%, una inversión en el entorno de los 3.000€/kW y unos costes de operación del 4%, se estima que el coste nivelado de la electricidad para la UE es de **0,151 €/kWh**

8.2.1.7 Biogás

El coste de inversión de las instalaciones de biogás varía para los países de la Unión Europea dependiendo del tamaño de la instalación. De entre las observaciones contempladas, se observa un rango de coste de inversión entre 1.700 €/kW y 15.000 €/kW. Los factores de capacidad y vida útil son parecidos a los de biomasa: 77% y 25 años, pero los costes de

operación son el 2% de la inversión. Con estos factores se obtiene un coste nivelado de **0,082 €/kWh** de electricidad generado.

8.2.2 LCOE GENERACIÓN CON COMBUSTIBLES FÓSILES 2019

Los costes de la generación con combustibles fósiles dependen en gran medida de los costes asociados al propio combustible (carbón, gas natural, uranio, etc.). Las estimaciones del precio del gas natural y el carbón son las más variables y se han obtenido del plan de referencia europeo de 2016 [48], donde se modelan las rutas de los precios de los combustibles, así como otras tendencias energéticas para 2050. La fecha de publicación hace que se obvien las alteraciones atípicas de los precios por la pandemia del COVID-19 en 2020 o por el conflicto de Rusia y Ucrania en 2022. Los resultados son los de las Figuras 40 y 41:

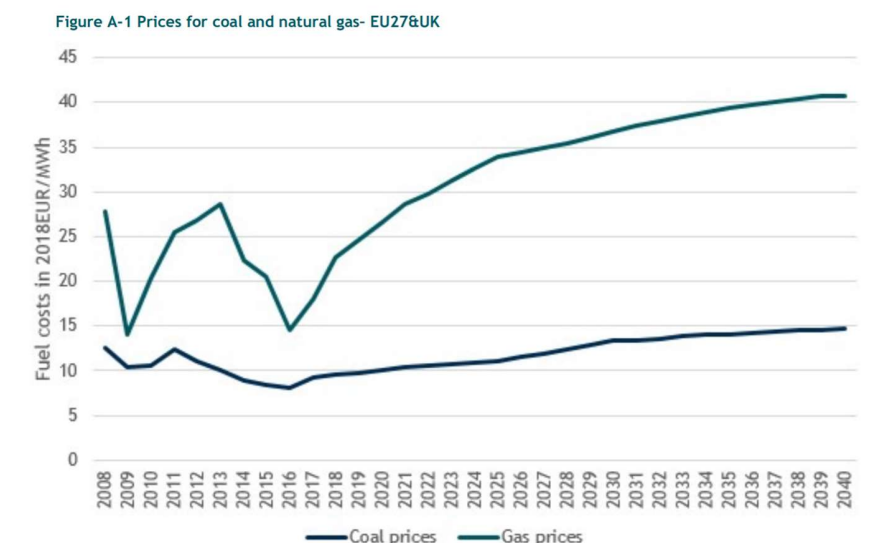


Figura 40. Evolución de los precios del carbón y el gas natural [48]

Los costes de generación con gas y carbón, también se ven afectados por el coste asociado a la emisión de CO₂. Teniendo en cuenta las estimaciones de las fuentes anteriores y factores de emisión de 0,44 y 1 toneladas de CO₂ por cada MWh para el gas y el carbón respectivamente, los costes de emisiones de carbono son los siguientes:

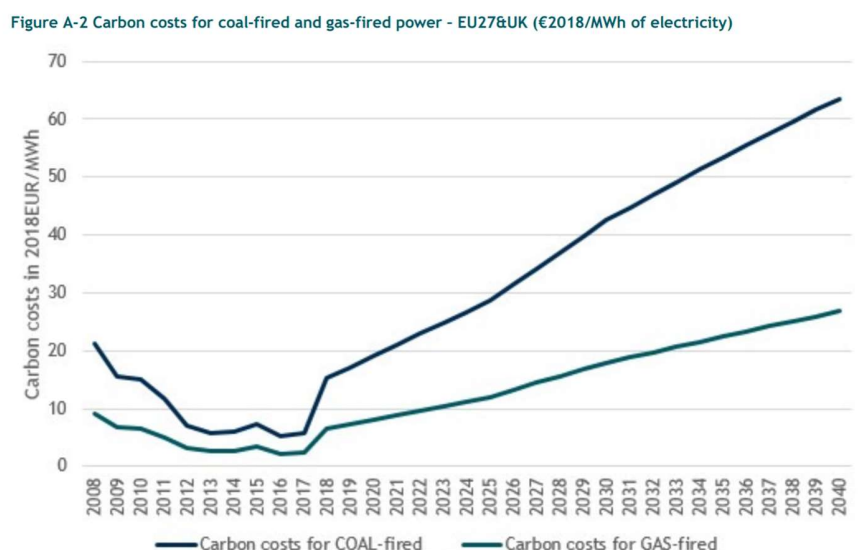


Figura 41. Evolución de los costes del carbón y el gas natural [48]

8.2.2.1 Gas Natural

Para el coste nivelado de la electricidad con gas natural, se distinguen dos centrales: las convencionales y las de ciclo combinado, ambas con una vida útil estimada de 30 años.

El cálculo del LCOE obtenido para las observaciones de los países de la UE teniendo en cuenta los factores y los precios de combustibles estimados es de entre 0,05 y 0,1 €/kWh (se decide utilizar la media del rango: **0,075 €/kWh**) para las centrales convencionales, y de entre 0,094 y 0,107 €/kWh para las de ciclo combinado (se decide utilizar **0,101 €/kWh**).

8.2.2.2 Carbón

Las centrales térmicas con carbón están en pleno proceso de desaparición como se ha mostrado en el modelado de los mixes en el Capítulo 7. Aun así, es necesario considerarlo para las centrales aún operativas de los mixes en 2019. Se toma el coste nivelado promedio resultante del estudio de **0,090 €/kWh** y se asume igual para todos los tipos de centrales considerados en el proyecto.

8.2.2.3 Nuclear

La generación eléctrica con nuclear se caracteriza por sus altos factores de capacidad (típicamente más del 90%). El coste de combustible nuclear no es tan variable como el gas

o el carbón y se asume de 10 €/MWh, como muestra la referencia. Debido a que los proyectos de construcción de centrales nucleares son inexistentes en Europa desde hace más de una década (salvo dos casos en Finlandia y en Francia), no hay datos suficientes para elaborar una estimación del coste nivelado apropiada.

Para poder modelar esta forma de generación, se asume el que el coste nivelado de las centrales de Europa se asemeja al de Estados Unidos de **0,082 €/kWh**, donde sí hay datos suficientes para realizar un cálculo bajo la misma metodología y mismas fuentes que el resto de las tecnologías.

El resumen de los costes nivelados de la generación eléctrica según la fuente se recoge en la Figura 42:

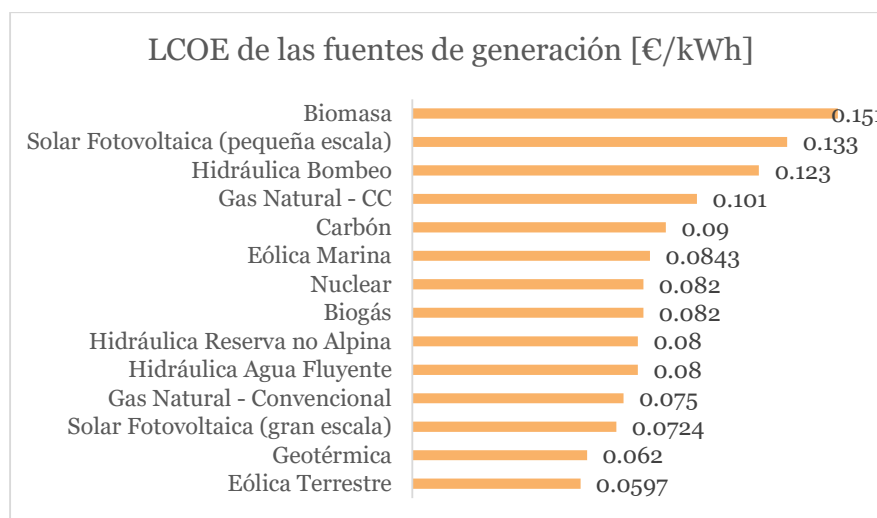


Figura 42. LCOE de las tecnologías de generación

De la Figura 42, se aprecia como las tecnologías más emergentes, eólica y solar fotovoltaica, son de las más económicas a fecha 2019 por sus recientes reducciones en precios y pese a sus menores factores de capacidad. No obstante, la solar de pequeña escala y la eólica marina que presentan beneficios ambientales sobre la solar y la eólica convencionales, presentan aún precios relativamente elevados por ser una tecnología aún menos madura.

Por otro lado, la generación con combustibles fósiles que tradicionalmente ha sido más barata que la renovable, ha aumentado sus costes por su alta sensibilidad a los precios de los combustibles situándose en una posición mayor en el ranking de costes, motivando aún más su progresiva desaparición dando paso a las energías renovables.

8.2.3 LCOE MIXES ENERGÉTICOS 2019

Utilizando los costes nivelados obtenidos anteriormente, se modelan los costes por unidad de energía eléctrica generada de cada mix energético del 2019 como se muestra en la Figura 43 de a continuación:

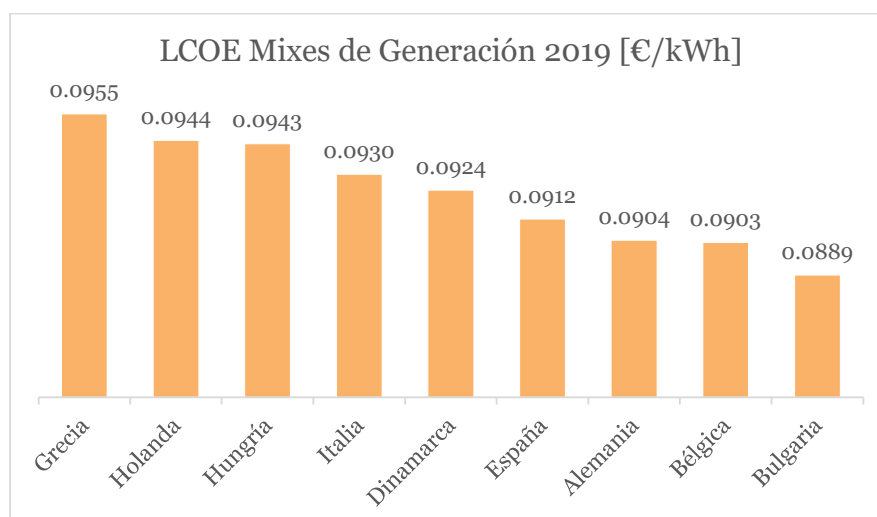


Figura 43. LCOE de los mixes de generación

Aunque la variación del coste entre mixes es pequeña, se ve sensiblemente afectada principalmente por la presencia del gas natural en CC. Es una de las formas de generación más costosas de las contempladas. Grecia y Holanda tienen los mayores pesos de esta tecnología dentro de sus mixes y en comparación con el resto de los países (33 y 35%). Dinamarca, pese a producir un 43% de la electricidad con eólica (la más económica) se encuentra en la mitad del ranking por su elevado consumo de biomasa: el 18% de su mix.

Países como España o Alemania, se sitúan por debajo de la media de los países contemplados por su gran presencia de eólica o solar, que son ya más competitivas en términos de coste que las tradicionales. Bélgica y Bulgaria ocupan las posiciones más económicas por el gran

peso de nuclear en su mix que, pese a no ser de las más competitivas, sí lo es de entre los combustibles fósiles.

8.2.4 LCOE MIXES ENERGÉTICOS 2030

Para modelar cómo será el coste nivelado de la electricidad de los mixes en los escenarios 2030, es necesario estimar cómo evolucionarán los costes actuales de las tecnologías durante la próxima década. Para ello, se utilizará las curvas de aprendizaje o experiencia de las tecnologías de generación.

Este método “muestra cómo el coste medio de la producción de un bien se va reduciendo en función del incremento en el volumen de producción acumulada, y la experiencia obtenida a lo largo del proceso de producción de todas las unidades acumuladas. En otras palabras, producir nuevas unidades, con el paso del tiempo, debido a la interacción de diversos factores entre los que destaca la experiencia, es cada vez más barato” [49].

Aplicado a los costes de generación, las curvas de aprendizaje estiman el decrecimiento en el coste nivelado según aumenta la capacidad instalada (y, por ende, la producción) de las distintas tecnologías de generación. Los motivos de esta reducción en costes prevista son múltiples, desde la innovación en la tecnología y logística o las economías de escala. Para los combustibles fósiles, se asume que el coste nivelado en 2030 será igual al de 2019 ya que las políticas europeas están alineadas en torno a la erradicación progresiva de estas tecnologías. Por tanto, se asume que estas fuentes de generación no son susceptibles de beneficiarse de innovaciones tecnológicas u otro tipo de eficiencia.

El cálculo de la curva de experiencia que se aplica a cada una de las fuentes de generación renovable se rige por la siguiente fórmula:

$$LCOE_{2030} = LCOE_{2019} * X^{\alpha}$$

Donde:

- X = Aumento proporcional en la energía producida de la tecnología en cuestión.
- α = Parámetro de experiencia.

Es necesario primeramente obtener el parámetro de experiencia de la tecnología de la tasa de aprendizaje, descrita por la siguiente fórmula:

$$Tasa\ de\ Aprendizaje = 1 - 2^{\alpha}$$

Las tasas de aprendizaje son calculadas típicamente de forma empírica debido a la multitud de factores que las condicionan y a la variabilidad según periodo y geografía observados. Para determinarlas, se toma como referencia el modelo “*World Energy Outlook 2021*” elaborado por la agencia IEA [50]. Este modelo estima unas tasas de aprendizaje futuras basándose en recopilaciones de diversos estudios empíricos a nivel europeo e internacional. Se obtienen las siguientes tasas de aprendizaje y sus consecuentes parámetros de experiencia recogidos en la Tabla 5:

Fuente de generación	Tasa de Aprendizaje	Parámetro de Experiencia
Carbón	-	-
Nuclear	-	-
Gas Natural	-	-
Biogás	5%	-0.074
Biomasa	5%	-0.074
Eólica Marina	15%	-0.234
Eólica Terrestre	5%	-0.074
Geotérmica	5%	-0.074
Hidráulica	1%	-0.014
Residuos	5%	-0.074
Solar Fotovoltaica	20%	-0.322
Solar Térmica	10%	-0.152

Tabla 5. Tasas de aprendizaje y parámetros de experiencia por tecnología de generación

Estos parámetros se utilizan para calcular la curva de experiencia de los costes calculados para el periodo 2019, obteniendo así una estimación del LCOE para 2030 en la Figura 44:

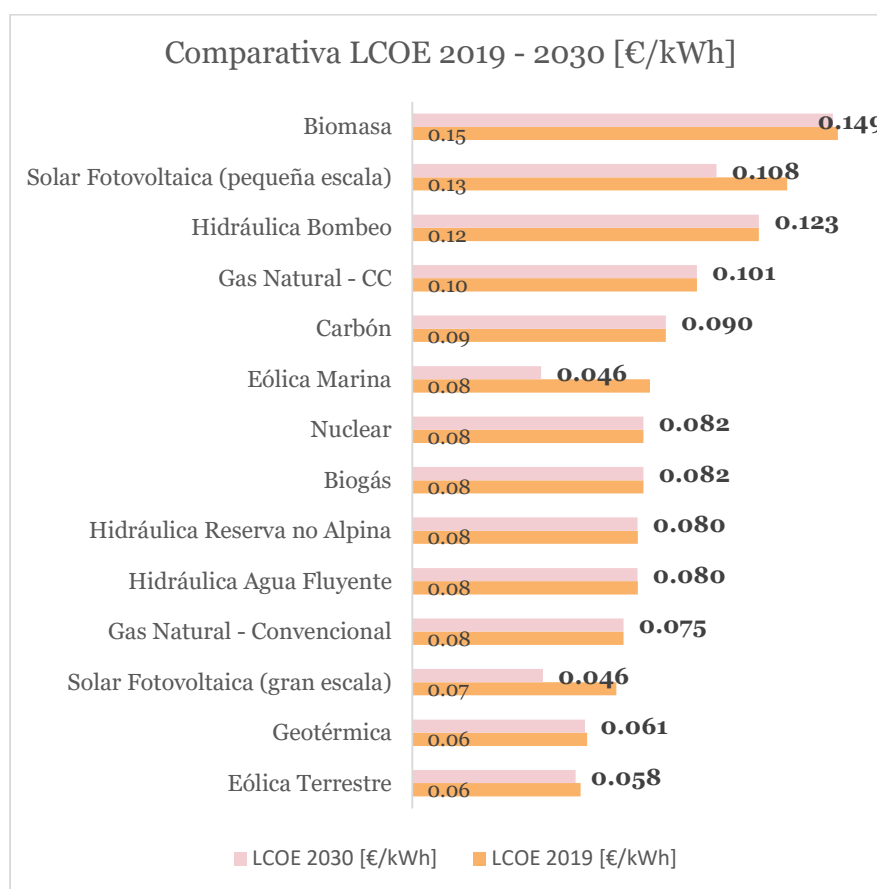


Figura 44. Comparativa LCOE 2019 - 2030 por tecnología de generación

La eólica marina junto con la solar fotovoltaica de gran escala son las que más ven reducidos sus costes gracias a su gran despliegue y a sus elevadas tasas de aprendizaje y serán también las dos fuentes más baratas en 2030. El resto de las tecnologías renovables contempladas, también sufren una reducción en sus costes nivelados de generación de electricidad, pero en menor escala.

Estos costes nivelados estimados para el periodo 2030 se ponderan para estimar los costes nivelados de los mixes energéticos de 2030, dando lugar a los resultados que contiene la Figura 45:

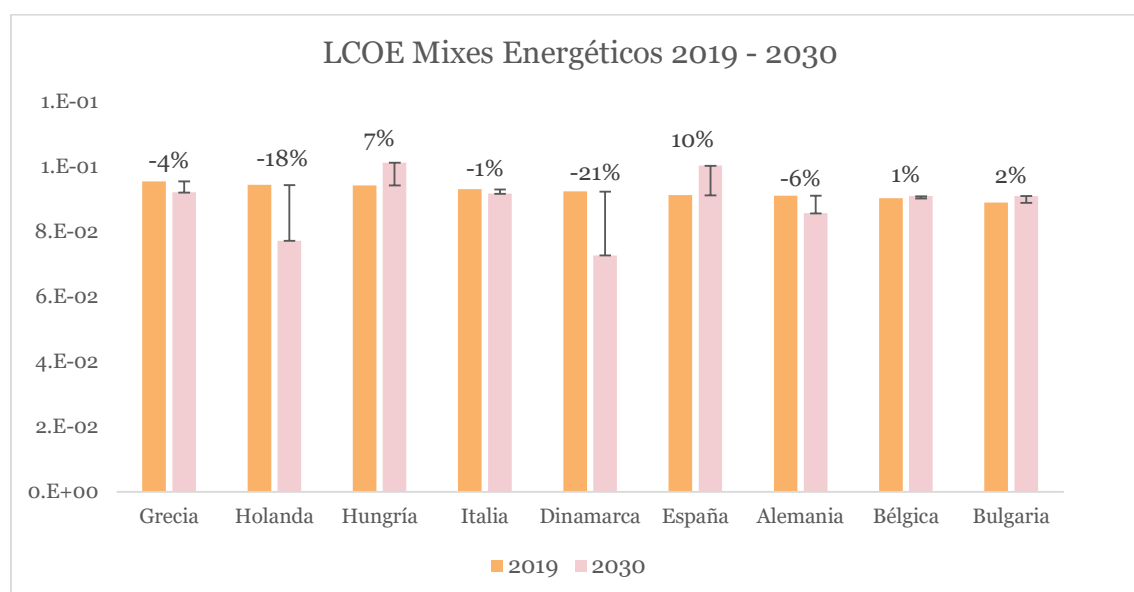


Figura 45. LCOE mixes energéticos 2019 - 2030

La variabilidad entre los costes nivelados de generación de electricidad entre los mixes de 2019 y 2030 no es excesiva como se ve en la Figura 45. La tendencia es a reducir los costes por las grandes ventajas que presentan en este aspecto las fuentes solar de gran escala y eólica para 2030. No obstante, la eliminación de combustibles fósiles (en especial el gas natural que presenta costes relativamente bajos) en pos de otras renovables como la biomasa de altos costes de generación, castiga a los mixes encareciendo el coste nivelado promedio del país.

Sólo Holanda y Dinamarca alcanzan reducciones significativas en sus costes de generación para 2030 con reducciones de 18% y 21% respectivamente.

8.3 EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOCIALES

Finalmente, en este apartado se evalúan los impactos sociales según las categorías definidas en el Capítulo 6: La seguridad de suministro, la aceptación social y la generación de empleo.

8.3.1 SEGURIDAD DE SUMINISTRO

Para evaluar la seguridad de suministro se ha seleccionado la diversificación del mix energético como mencionado anteriormente en el Capítulo 6. Es importante para la seguridad de suministro ya que concentrar en pocas fuentes la generación de electricidad supone un riesgo para la continuidad del suministro. Recientemente se ha puesto de manifiesto la importancia de la diversificación energética con el conflicto bélico de Rusia y Ucrania, ya que el primero, suministró a fecha 2021 el 32% del gas consumido en Europa [51].

Para medir la diversificación energética se utilizará el Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH), es un índice utilizado para medir concentración, aunque típicamente es utilizado en la economía y finanzas para medir competencia de mercados o diversificación de carteras de inversión [52]. Consiste en sumar los cuadrados de las ponderaciones de cada tecnología de tal manera que el índice más alto representa el mix más concentrado, y el índice de menor valor, el más diversificado.

Es importante contemplar dos aspectos de la diversificación energética:

1. Diversificación energética completa o diversificación entre todas las fuentes de generación: un mix proporcionará más seguridad de suministro (menos riesgo de interrupción) cuanto más diversificado esté. Se calculará con el índice IHH_{Completo} .

$$IHH_{\text{Completo}} = 10.000 * \sum_{i=1}^n s_n^2$$

siendo n el número de fuentes en el mix y s su ponderación respectiva.

2. Diversificación energética entre renovables y combustibles fósiles: Este segundo tipo de diversificación consiste en poseer un equilibrio entre fuentes fósiles y fuentes renovables. Un mix energético puede estar suficientemente diversificado y proporcionar un suministro continuo, pero si la presencia de renovables no es la suficiente, existen riesgos de calidad o precio del suministro por la dependencia de los combustibles fósiles (por agotamiento de estos, políticas medioambientales, aranceles, etc.). Por contra, un mix con una muy alta presencia de energías renovables intermitentes como la solar o la eólica, también es peyorativo en términos de la

seguridad de suministro ya que la generación con este tipo de tecnologías es totalmente independiente de la demanda (i.e. depende de las condiciones meteorológicas). Este segundo aspecto se calculará con el índice $IHH_{\text{renovables}}$.

$$IHH_{\text{renovables}} = 10.000 * (s_{\text{renovable}}^2 + s_{\text{fósiles}}^2)$$

Teniendo en cuenta los mixes modelados en el Capítulo 7 (detalle completo en Anexo I), el valor del IHH_{completo} mostrando los niveles de concentración/diversificación de los mixes queda como se muestra a continuación en la Tabla 6:

IHH_{completo}	2019	Ranking 2019	2030	Ranking 2030	Variación
Bulgaria	2807	1	2297	3	Diversifica
Hungría	2700	2	3208	1	Concentra
Bélgica	2678	3	1639	5	Diversifica
España	1538	4	1241	7	Diversifica
Grecia	1513	5	1394	6	Diversifica
Dinamarca	1407	6	2621	2	Concentra
Holanda	1279	7	1868	4	Concentra
Italia	988	8	1157	8	Concentra
Alemania	972	9	986	9	Concentra

Tabla 6. Índice IHH completo por mix de generación

De la tabla 6, se observa cómo Bulgaria ocupa el primer puesto en concentración de sus tecnologías a fecha 2019 ya que concentra casi el 50% de su generación en torno a la nuclear, no obstante, consigue diversificar su mix en el escenario 2030 situándose en la tercera posición. Bélgica, España y Grecia son los otros 3 países del estudio que diversifican su mix en el escenario 2030.

De los países que concentran su mix, cabe destacar el caso de Dinamarca que partiendo de un mix relativamente diversificado empeora su situación para 2030 ya que su generación eólica alcanza a ser el 65% de la generación total. Concretamente, 45% de eólica marina y 20% terrestre.

Se puede observar que el comportamiento general es que aquellos con más concentración en 2019 tienden a diversificar para 2030 y viceversa.

Atendiendo ahora al segundo aspecto de la diversificación, en función de la mayor o menor presencia de renovables, obtenemos los siguientes resultados del $IHH_{\text{renovables}}$ recogidos en la Tabla 7:

País	Renovables 2019	IHH ₂₀₁₉	Renovables 2030	IHH ₂₀₃₀	Variación
Dinamarca	78%	6,588	100%	10,000	Concentra
Alemania	41%	5,150	63%	5,348	Concentra
Italia	40%	5,195	39%	5,251	Concentra
España	38%	5,298	76%	6,320	Concentra
Grecia	28%	5,943	66%	5,493	Diversifica
Bélgica	22%	6,517	37%	5,316	Diversifica
Holanda	19%	6,938	70%	5,800	Diversifica
Bulgaria	18%	7,048	30%	5,774	Diversifica
Hungría	14%	7,626	30%	5,836	Diversifica

Tabla 7. Índice IHH renovables por mix de generación 2019 - 2030

De la tabla anterior, se observa el aumento generalizado del peso de renovables en el mix, no obstante, para aquellos países que ya tenían una alta presencia en 2019 (Dinamarca, Alemania, Italia y España), aumentar las renovables supone una concentración de su mix entorno a tecnologías intermitentes que puede ser perjudicial para la seguridad del suministro.

Por otro lado, los países que tenían una menor presencia de renovables en 2019 y la aumentan para 2030, consiguen diversificar sus fuentes de generación de electricidad favoreciendo la soberanía energética.

8.3.2 ACEPTACIÓN SOCIAL

La aceptación social constituye uno de los impactos sociales más importantes para el desarrollo energético de las sociedades. Para evaluar esta categoría de impacto, se toma como referencia la encuesta realizada por European Social Survey “*Public Perceptions on Climate Change and Energy in Europe and Russia*” [53], donde los encuestados se les pregunta, entre otras cosas, qué nivel de presencia deberían tener las diferentes fuentes de generación de electricidad dentro del mix total: muy alta, alta, media, baja, no sabe o no contesta. Las respuestas a esta consulta vienen clasificadas por tecnología y por país.

Para elaborar la puntuación de las tecnologías y posteriormente de los mixes, se considerará el porcentaje de encuestados de cada país que consideran que la tecnología en cuestión debería tener una presencia alta o muy alta. Para los países donde no hay suficientes respuestas como para obtener resultados significativos, se tomará el resultado promedio de países colindantes. Los resultados se resumen en la Tabla 8 de a continuación:

	Carbón	Gas	Nuclear	Hidráulica	Solar	Eólica	Biomasa
Alemania	5	18	3	72	87	76	38
Bélgica	4	25	11	67	84	86	47
Bulgaria ¹	13	31	19	69	78	72	45
Dinamarca ²	3	18	8	76	78	71	42
España	11	22	9	78	94	93	62
Grecia ³	9	33	12	70	89	81	57
Holanda	2	8	6	73	90	83	51
Hungría	22	31	35	70	93	86	70
Italia	9	33	12	70	89	81	57
Promedio	8.6	24.3	12.8	71.7	86.9	81.0	52.1

Tabla 8. Porcentaje de aceptación de las fuentes de generación por país

De la tabla anterior, se observa que las energías renovables son las que más apoyo reciben, en especial la solar y eólica ya que más del 80% opina que debería tener una presencia alta o muy alta en el mix de generación en ambos casos. De los combustibles fósiles, el carbón es el más castigado por la opinión pública (8,6%) seguido por la nuclear (12,8%) y el gas natural (24,3%).

A partir de estas puntuaciones de opinión del público se establecen las puntuaciones de los mixes para 2019 y 2030 utilizando las respectivas ponderaciones de las tecnologías con la opinión que reciben en cada región. De esta manera se obtiene una puntuación de cada país elaborada con la aceptación de sus propios habitantes mostrada en la Figura 46.

¹ Se asumen los valores promedio del total de los países encuestados por falta de información.

² Se asumen los valores promedio de los países colindantes: Alemania, Noruega y Suecia

³ Se asumen los valores de Italia por ser el país más cercano con información estadísticamente significativa

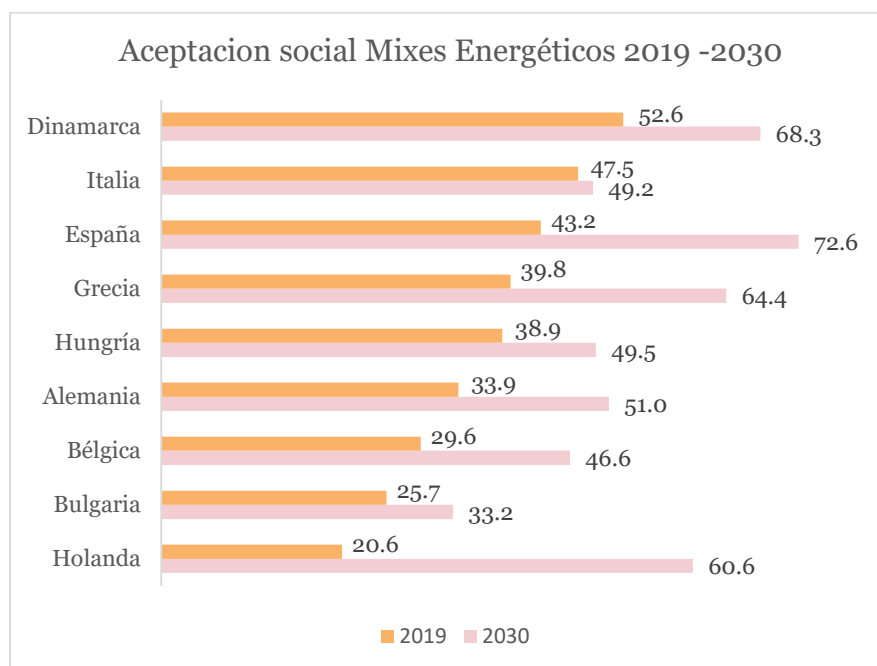


Figura 46. Aceptación social de los mixes energéticos 2019 - 2030

Los planes energéticos nacionales con las previsiones de 2030 responden en todos los casos estudiados a la opinión del público, ya que se aprecia un aumento generalizado de la aceptación de los mixes entre los periodos 2019 y 2030. Dinamarca, Italia y España poseen los mixes más aceptados por sus respectivas sociedades en 2019 y Holanda, Bulgaria y Bélgica los que menos.

En 2030, España se posiciona con el mix mejor valorado por su gran apuesta por la solar y eólica y Holanda, teniendo el mix peor valorado, consigue el mayor aumento en términos de aceptación social al incrementar su peso en renovables en más del 250% para 2030.

8.3.3 GENERACIÓN DE EMPLEO

Para el cálculo de generación de empleo por tecnología y región, la literatura al respecto típicamente suma los empleos generados en cada parte del proceso desde la concepción hasta el funcionamiento de cada tecnología de generación. Comprendiendo así los empleos generados en manufactura, construcción, operación y mantenimiento y suministro de combustible (si aplica) entre otros para cada fuente de generación de electricidad.

El cálculo de empleos en cada uno de los sumandos anteriores consiste en multiplicar la capacidad instalada en cada región y por cada tecnología anualmente por un factor estimado de empleo de la tecnología y por un factor de empleo propio de la región. Para el caso concreto de este proyecto se emplea como referencia el estudio “*Outlook on employment effects of a Global Energy Transition*” [54], donde se particularizan cada uno de estos factores según los escenarios energético/climáticos y región. Esta fuente se selecciona como referencia entre las existentes principalmente por su actualidad, su base de cálculo geográfica similar a la de interés y por su colección de referencias a agencias y organismos internacionales oficiales y a los escenarios 2030 para la preservación del clima.

Respecto a la estimación de los empleos según fuente de generación para 2030, la fuente referenciada utiliza los factores de empleo actuales ajustado por una tasa de crecimiento/decrecimiento estimado de la tecnología elevado al número de años hasta 2030.

$$\begin{aligned} \text{Factor de empleo}_{\text{tecnologi}_{2030}} \\ = \text{Factor de empleo}_{\text{tecnologia}_{2019}} * \text{Tasa de crecimiento}^{n^{\circ}\text{años}} \end{aligned}$$

Además, para el modelado de los empleos generados por tecnología se toman concretamente el escenario más favorable a la preservación del clima (1.5 °C) y la región compuesta por los países Europeos pertenecientes a la OECD por su adecuación a la muestra de países modelados en este estudio, como mencionado anteriormente.

Con las suposiciones aquí mencionadas y en base a la referencia, las estimaciones de empleo por fuente de generación para 2019 y para 2030 se recogen en la siguiente Figura 47:

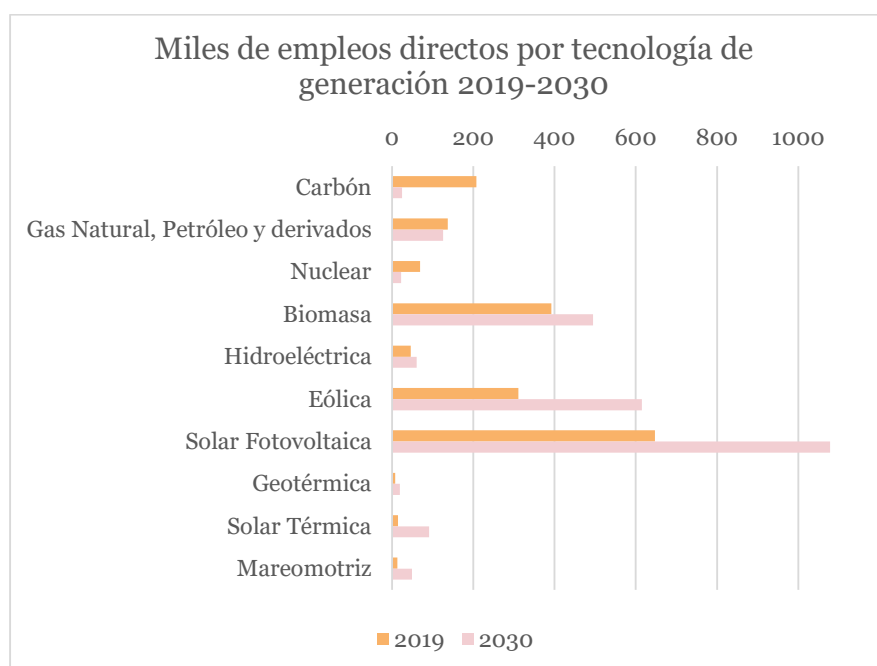


Figura 47. Miles de empleos directos según la fuente de generación de energía eléctrica

Este escenario y región contemplados suponen el mayor número de creación de empleos totales, ya que se ven aumentados en más de 700,000 en la totalidad del sector energético entre 2019 y 2030 hasta alcanzar los 2,5M de empleados directos de los cuales el 94% son relacionados con energías renovables y el 40% corresponden a la solar fotovoltaica que supera el millón de empleos generados en 2030.

Se observa la tendencia descendente en generación de empleo en las categorías de combustibles fósiles, especialmente en carbón y nuclear cuya generación de empleo se ve reducida en 87 y 68% respectivamente. Por otro lado, renovables como la fotovoltaica o la eólica aumentan su generación de empleo directo en 67 y 98% respectivamente.

Para el cálculo de generación de empleo de los mixes de generación modelados, es necesario primeramente normalizar el número de empleos en torno a la unidad funcional. Para ello, se divide la estimación de empleos de la referencia entre la energía eléctrica generada por el conjunto de países de la muestra para cada fuente de generación y periodo de estudio. De esta manera se obtiene la empleabilidad de cada tecnología medida en $\frac{\text{n}^\circ \text{ empleos}}{\text{kWh generado}}$.

Esta medida de empleabilidad es fruto de un cociente de elementos provenientes de distintas bases de cálculo: por un lado, el numerador contiene el número de empleos totales por tecnología para los países Europeos de la OECD y, por otro lado, el denominador contiene la suma de energía eléctrica generada por cada tecnología en los países de la muestra.

Por este motivo es necesario asumir la hipótesis de que el conjunto de los 9 países modelados es representativo del conjunto de países de la OECD. Es decir, que este conjunto tiene un mix de generación proporcional al que tiene la OECD europea en su conjunto. Con esta hipótesis el dato de empleabilidad individual carece de precisión y por tanto de sentido en su interpretación, no obstante, nos sirve por tener una alta comparabilidad entre fuentes de generación, que es la filosofía y objetivo de la metodología ACV aplicada.

Las tecnologías con más empleabilidad a fecha 2019 (número de empleos por cada kWh) son la mareomotriz, la solar, la bioenergía y la geotérmica; todas de fuentes renovables. Estas son seguidas por las tecnologías de generación con carbón, la hidráulica, la nuclear y las tecnologías de generación con gas natural o petróleo. Finalmente, en la última posición de este ranking se encuentra la eólica, siendo la más “eficiente” en cuanto a empleos requeridos para la generación de 1 kWh de energía eléctrica.

Los resultados de empleabilidad mix de generación de energía eléctrica, tras normalizar los empleos por tecnología en torno a la unidad funcional, son los recogidos en la Figura 48:

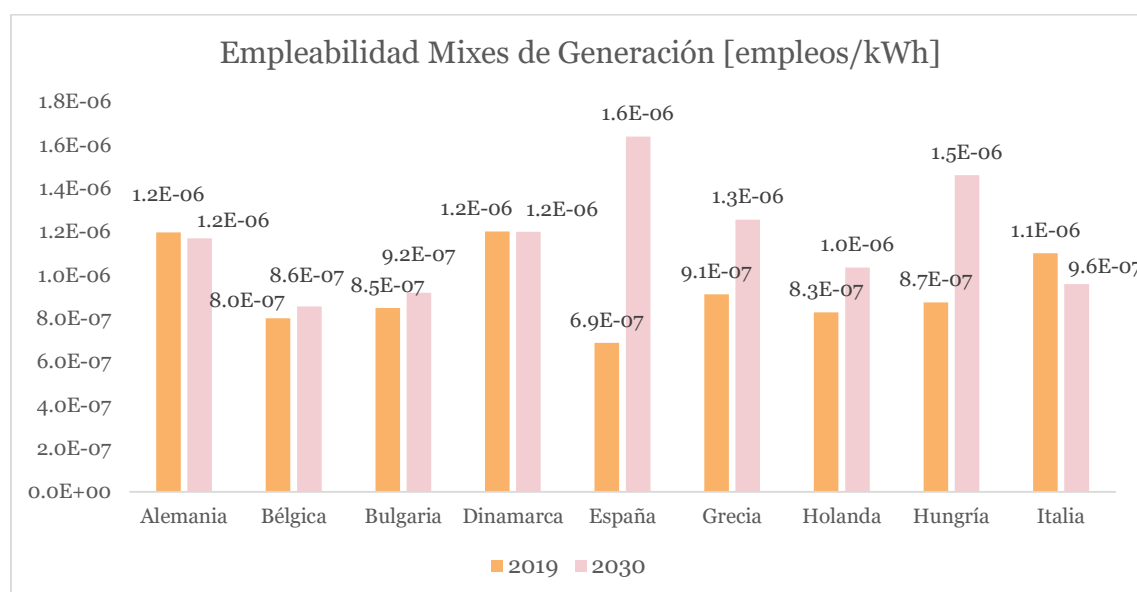


Figura 48. Empleabilidad de los mixes energéticos 2019 - 2030

Como explicado anteriormente, las tecnologías renovables son, a excepción de la eólica, fuentes de alta empleabilidad. Por esta razón y como se muestra en la Figura 48, países como Dinamarca, Alemania e Italia tienen una alta empleabilidad en 2019, por su gran presencia de renovables en el mix, pero no consiguen aumentar su empleabilidad en el escenario 2030 por su poco aumento de estas en términos proporcionales y en especial por el gran desarrollo previsto de la energía eólica.

Por otro lado, los países que más apuestan por la solar como son España, Hungría, Grecia u Holanda son los que más ven aumentada la empleabilidad de sus mixes. Concretamente España, pasa de tener el mix con menor empleabilidad al mix que más empleos genera por kWh de electricidad generado.

Capítulo 9. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD

Este capítulo evalúa la sostenibilidad de los mixes de generación de los países contemplados en los periodos 2019 y 2030 así como de las tecnologías de generación que los componen. Para ello, se evalúan de forma conjunta los impactos analizados previamente según los criterios medioambiental, económico y social.

Dada la amplitud del concepto sostenibilidad en muchos casos, se decide emplear la metodología del análisis de decisión multicriterio o MCDA por sus siglas en inglés. A diferencia del análisis de ciclo de vida donde se evalúan impactos cuantificables, esta metodología requiere de ciertos inputs basados en interpretación para ponderar cada uno de los criterios. El MCDA es usado típicamente para evaluar los resultados de un análisis del ciclo de vida, permite la obtención e interpretación de conclusiones globales y sienta las bases para la toma de decisiones [55]. Para este caso, el interés de usar este método reside en encontrar la mejor y peor de las opciones comparadas (mixes energéticos y escenarios) en términos de sostenibilidad.

Concretamente, dentro de la filosofía del MCDA, se decide seguir el método AHP elaborado por Thomas L. Saaty [56]. Este método es una técnica estructurada para organizar y analizar decisiones complejas, basada en las matemáticas y la psicología que, de forma cuantitativa y jerárquica, prioriza diversas opciones según criterios múltiples. El método sigue los siguientes pasos:

1. Se asigna a cada categoría de impacto un nivel de prioridad, comenzando con “1” en la categoría más relevante y creciente en las siguientes. Categorías con importancias similares podrán tener mismos niveles de prioridad. De esta manera los criterios del nivel de prioridad “1” será igual de importantes que los elementos en el mismo nivel de prioridad, dos veces más importantes que los criterios de nivel “2”, tres veces más que los de nivel “3”, etc.
2. Se obtienen unos pesos de cada categoría de impacto en función de su nivel de prioridad siguiendo la siguiente fórmula:

$$W_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$

Donde:

- W_j es el peso de cada categoría de impacto j .
- r_j es el nivel de prioridad asignado a la categoría de impacto j .
- n es el número de categorías de impacto analizadas.

Para el cálculo de estos pesos, se utiliza como recurso una calculadora específica que requiere como único input establecer dos a dos los niveles de prioridad definidos en el paso 1 para todos los criterios contemplados [57].

3. Una vez obtenidos los pesos de cada criterio y en paralelo, se normalizan en una escala del 0 al 1 los impactos numéricos de cada una de las opciones, asignando un 0 al mejor valor, un 1 al peor valor. Para los valores intermedios, se aplica una escala lineal entre el mejor y peor valor obteniendo un número entre el 0 y el 1.
4. Finalmente, se suman los productos de cada peso de la categoría de impacto por su valor normalizado en cada una de las opciones obteniendo una puntuación para cada opción contemplada. En este caso, se obtiene una puntuación para cada mix y periodo.

De forma previa al análisis conjunto de la sostenibilidad, se analizan de forma conjunta los impactos de cada uno de tres criterios utilizados: medioambiental, económico y social.

9.1 ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

Para el análisis medioambiental se decide que los impactos definidos como “de alcance global”: el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono; ocupen el primer nivel en el análisis multicriterio. Esta decisión se fundamenta por el foco de la comunidad europea en responder ante estos dos impactos en sus planes energéticos y climáticos para 2030 y por

ser dos indicadores mundialmente relevantes en cuanto a la preservación del medio ambiente.

En un segundo nivel de prioridad, se decide situar a aquellos impactos ambientales considerados anteriormente como “de alcance local” (que afectan principalmente a las inmediaciones de las instalaciones donde se genera la electricidad) y que además juegan un papel importante en el componente social de la sostenibilidad. Estos criterios son: el agotamiento abiótico, que no solo impacta medioambientalmente, sino que compromete la seguridad de suministro de los países al agotar sus reservas de materiales y combustibles fósiles, y la ocupación del terreno, que además de la huella ecológica que produce impacta en el coste de oportunidad de los terrenos para otras actividades necesarias en la sociedad (agricultura, vivienda, reforestación, etc.).

Finalmente, en un tercer nivel de prioridad, se incluyen como criterios el resto de los impactos descritos anteriormente como de alcance local (Oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización, etc.).

Con este criterio de ponderación, se elabora una matriz de decisiones según los tres niveles de prioridad descritos, el peso de cada criterio es el que será utilizado para ponderar los impactos de cada mix de generación. Los resultados se muestran en la Tabla 9:

	C.G.	D.C.d.O.	A.A.	A.A.C.F.	O.F.	T.H.	ET.	E.A.D.	E.A.M.	A	E	O.d.T.
Calentamiento Global	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2
Destrucción Capa de Ozono	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2
Agotamiento Abiótico	0.5	0.5	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
Agotamiento Abiótico C.F.	0.5	0.5	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
Oxidación Fotoquímica	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Toxicidad humana	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Ecotoxicidad Terrestre	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Ecotoxicidad Agua Dulce	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Ecotoxicidad Agua Marina	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Acidificación	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Eutrofización	0.333	0.333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Ocupación del terreno	0.5	0.5	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
Peso del criterio	0.169	0.169	0.099	0.099	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.099

Tabla 9. Matriz de decisión criterios ambientales

Para una mejor visualización, los nombres de los impactos se representan con sus iniciales siendo:

- C.G. - Calentamiento Global
- D.C.d.O. - Destrucción Capa de Ozono
- A.A. - Agotamiento Abiótico
- A.A.C.F. - Agotamiento Abiótico Combustibles Fósiles
- O.d.T. - Ocupación del terreno
- O.F. - Oxidación Fotoquímica
- T.H. - Toxicidad humana
- E.T. - Ecotoxicidad Terrestre
- E.A.D. - Ecotoxicidad Agua Dulce
- E.A.M. - Ecotoxicidad Agua Marina
- A - Acidificación

- E - Eutrofización

Tras establecer los pesos de los criterios medioambientales, se normalizan los impactos de cada mix energético según la escala mencionada, se otorgará un “0” al menor impacto ambiental (y, por ende, el más favorable) y un “1” al mayor impacto. Los impactos intermedios serán normalizados en una escala porcentual del 0 al 1 según su distancia con el máximo y el mínimo.

La normalización de los impactos se realiza tres veces, la primera considerando todos los mixes (2019 y 2030) para puntuar los mixes independientemente del año al que pertenezcan. La segunda y tercera normalización corresponde a los mixes del 2019 y del 2030 respectivamente, para poder puntuar los mixes de forma aislada al año que pertenecen.

Los resultados de la primera normalización se muestran en la Tabla 10 de a continuación:

Pais	Periodo	C.G.	D.C.d.O.	A.A.	A.A.C.F.	O.d.T.	O.F.	T.H.	ET.	E.A.D.	E.A.M.	A	E
ALEMANIA	2019	0.699	0.181	0.445	0.543	0.134	0.252	0.413	0.227	0.486	0.446	0.176	0.469
	2030	0.515	0.200	1.000	0.428	0.130	0.191	0.311	0.141	0.357	0.294	0.121	0.293
BÉLGICA	2019	0.213	0.219	0.126	0.237	0.038	0.052	0.027	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000
	2030	0.455	0.491	0.344	0.516	0.059	0.104	0.000	0.033	0.015	0.002	0.032	0.002
BULGARIA	2019	0.878	0.080	0.084	0.648	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	2030	0.628	0.056	0.286	0.463	0.021	0.705	0.735	0.717	0.727	0.719	0.706	0.712
DINAMARCA	2019	0.243	0.051	0.341	0.213	1.000	0.188	0.105	0.133	0.089	0.111	0.150	0.063
	2030	0.000	0.000	0.909	0.000	0.583	0.000	0.088	0.061	0.067	0.016	0.000	0.007
ESPAÑA	2019	0.400	0.309	0.000	0.429	0.150	0.237	0.069	0.144	0.040	0.081	0.251	0.040
	2030	0.155	0.145	0.554	0.181	0.275	0.018	0.049	0.048	0.045	0.017	0.027	0.006
GRECIA	2019	1.000	1.000	0.183	1.000	0.036	0.935	0.865	0.437	0.888	0.920	0.854	0.827
	2030	0.358	0.703	0.618	0.379	0.149	0.160	0.040	0.000	0.051	0.020	0.090	0.009
HOLANDA	2019	0.676	0.492	0.164	0.750	0.188	0.154	0.057	0.104	0.066	0.094	0.122	0.071
	2030	0.199	0.283	0.659	0.261	0.176	0.009	0.063	0.042	0.042	0.014	0.009	0.004
HUNGRÍA	2019	0.640	0.334	0.129	0.509	0.214	0.438	0.484	0.279	0.466	0.500	0.455	0.435
	2030	0.556	0.292	0.456	0.444	0.304	0.375	0.435	0.211	0.417	0.440	0.393	0.375
ITALIA	2019	0.608	0.651	0.119	0.603	0.125	0.408	0.037	0.093	0.032	0.070	0.286	0.043
	2030	0.563	0.743	0.185	0.595	0.094	0.287	0.000	0.056	0.004	0.004	0.172	0.009

Tabla 10. Impactos ambientales de los mixes 2019 y 2030 normalizados

Una vez normalizados los impactos de cada país en la escala 0-1, se elabora la suma ponderada con los pesos de los criterios obtenidos previamente de la matriz de decisión,

obteniendo así una puntuación de cada mix en términos medioambientales mostrados en la Tabla 11:

Puntuaciones totales	Puntuación Medioambiental
BÉLGICA - 2019	0.1196
DINAMARCA - 2030	0.1608
ESPAÑA - 2030	0.1619
HOLANDA - 2030	0.1997
ESPAÑA - 2019	0.2220
DINAMARCA - 2019	0.2479
BÉLGICA - 2030	0.2607
GRECIA - 2030	0.3121
ITALIA - 2030	0.3348
HOLANDA - 2019	0.3412
ITALIA - 2019	0.3470
ALEMANIA - 2030	0.3643
ALEMANIA - 2019	0.3884
HUNGRÍA - 2030	0.4006
HUNGRÍA - 2019	0.4080
BULGARIA - 2030	0.4532
BULGARIA - 2019	0.5988
GRECIA - 2019	0.7565

Tabla 11. Puntuación medioambiental de los mixes 2019 - 2030 según método AHP

El mix Belga de 2019 es el mix energético más responsable en términos medioambientales según los criterios y categorías contempladas. Ocupa la primera posición pese a no poseer el mayor porcentaje de renovables en su mix. Esto es por dos razones:

1. La priorización de criterios da importancia especial a categorías de impacto como el agotamiento abiótico o la ocupación del terreno, que son categorías de impacto ambiental que, por lo general, no benefician a las tecnologías de generación renovable.
2. La mayor parte del consumo de combustibles fósiles en Bélgica es nuclear, que es la fuente no renovable más respetuosa con el medio ambiente en la mayor parte de categorías de impacto analizadas.

El mix más contaminante es el de Grecia en 2019, ya que casi tres cuartas partes de su generación son con combustibles fósiles.

Si se analizan de forma aislada los mixes de 2019 siguiendo el mismo procedimiento, obtenemos las siguientes puntuaciones según el método ponderado normalizado en la Tabla 12:

Puntuaciones 2019	Puntuación Medioambiental
BÉLGICA	0.0648
ESPAÑA	0.1670
DINAMARCA	0.2198
ITALIA	0.3243
HOLANDA	0.3290
HUNGRÍA	0.3839
ALEMANIA	0.4049
BULGARIA	0.5859
GRECIA	0.7771

Tabla 12. Puntuación medioambiental de los mixes 2019 según método AHP

Como se apreciaba en el análisis conjunto de la tabla anterior, Bélgica es el mix más sostenible medioambientalmente por su combinación de nuclear y renovables, seguido por los mixes con menos presencia de tecnologías de generación eléctrica con carbón.

En los escenarios 2030, Dinamarca obtiene la mejor de las puntuaciones en términos de responsabilidad medioambiental al incorporar en sus políticas una generación 100% renovable. Le siguen los mixes de España y Holanda al ser los siguientes en la lista de mayor peso de renovables en el mix. Bélgica desciende hasta la cuarta posición al prescindir de su generación nuclear. El mix más contaminante según los escenarios 2030 es el de Bulgaria, que apuesta por mantener el consumo de combustibles fósiles y el despliegue de renovables es moderado en sus planes nacionales como se muestra en la Tabla 13.

Puntuaciones 2030	Puntuación Medioambiental
DINAMARCA	0.2044
ESPAÑA	0.2093
HOLANDA	0.2591
BÉLGICA	0.3592
GRECIA	0.4209
ITALIA	0.4707
ALEMANIA	0.4970
HUNGRÍA	0.5648
BULGARIA	0.6354

Tabla 13. Puntuación medioambiental de los mixes 2030 según método AHP

9.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Estudiar el análisis económico de forma aislada mediante el análisis multicriterio carece de sentido ya que para este proyecto sólo se ha considerado un único criterio para la evaluación y comparación: el LCOE.

No obstante, para la futura evaluación conjunta, se normalizan los resultados en la escala del 0 al 1 de la misma forma que con el análisis medioambiental, como si se hiciera el análisis multicriterio con una única categoría de prioridad 1. Se obtienen los siguientes resultados en la Tabla 14 de a continuación:



















Puntuaciones Totales:	Puntuación Económica	
Dinamarca - 2030	0.0000	
Holanda - 2030	0.1579	
Alemania - 2030	0.4539	
Bulgaria - 2019	0.5694	
Bélgica - 2019	0.6156	
Bélgica - 2030	0.6392	
Bulgaria - 2030	0.6404	
Alemania - 2019	0.6437	
España - 2019	0.6487	
Italia - 2030	0.6656	
Grecia - 2030	0.6787	
Dinamarca - 2019	0.6899	
Italia - 2019	0.7126	
Hungría - 2019	0.7557	
Holanda - 2019	0.7607	
Grecia - 2019	0.7981	
España - 2030	0.9676	
Hungría - 2030	1.0000	

Tabla 14. Puntuaciones económicas de los mixes 2019 y 2030

Al solo tener en consideración el LCOE como criterio en este análisis, el ranking tanto para los resultados 2019 como 2030 respeta el mismo orden que el expuesto en el Capítulo 8 en la evaluación de los impactos económicos.

9.3 ANÁLISIS SOCIAL

Para el análisis social se decide establecer el siguiente orden de prioridades entre las categorías de impacto evaluadas mostrado en la Tabla 15:

Tabla de prioridades	Prioridad
Aceptación social	1
Seguridad de suministro	2
Generación de empleo	3

Tabla 15. Tabla de prioridades de los impactos sociales

La aceptación social ocupa la primera posición ya que influencia en gran medida las políticas y actitudes de un país ante las diferentes opciones de generación de electricidad. En cierto modo, actúa como causa directa o indirecta de cualquier otra categoría de impacto que pueda ser evaluada bajo el abanico de análisis social como por ejemplo la seguridad de suministro (*e.g. las políticas de erradicación de la nuclear provienen generalmente de la aceptación social y no de motivos económicos, ambientales o de seguridad de suministro*).

La seguridad de suministro ocupa la segunda posición en la escala de prioridades debido a que es un factor, que, de forma similar a la aceptación social, es necesario para que puedan existir otras categorías de impacto social. Sin seguridad de suministro energético, un país no puede garantizar el desarrollo del resto de las actividades económicas o sociales de un país. Y si puede garantizarlo, es de forma interrumpida y a un alto coste, perjudicando a los sectores más vulnerables de la sociedad.

Finalmente, la generación de empleo ocupa la tercera posición en la escala de prioridades. Aunque es un factor relevante, el empleo en generación de electricidad no es, por lo general una fuente de empleo relevante cuando consideramos la economía completa de un país. En Europa, se estima que el número de empleados en el sector de la energía son entre 1,5 y 2 millones de personas. Teniendo en cuenta que el total de empleados en Europa se sitúa entre 150 y 160 millones de personas [58], el porcentaje atribuible a empleos relacionados con energía se sitúa en torno al 1% (menos aún si se atiende a los específicos de generación de electricidad).

A raíz de estas prioridades, se obtiene la matriz de decisión mostrada en la Tabla 16:

	Aceptación Social	Seguridad de Suministro	Generación de Empleo
Aceptación Social	1	2	3
Seguridad de Suministro	0.5	1	2
Generación de Empleo	0.333	0.5	1
Peso del criterio	0.540	0.297	0.163

Tabla 16. Matriz de decisión criterios sociales

Para la normalización de los impactos sociales de cada mix, se ha de proceder de manera ligeramente distinta a la normalización de impactos ambientales. Esto se debe a que los impactos de aceptación social y de empleabilidad son más favorables cuanto más alto sea el valor del impacto, por lo que la escala del 0-1 utilizada asignará para estos casos el valor “0” al impacto más alto (*i.e. más favorable*) y el valor “1” al más bajo. El resto de los valores recibirán un valor intermedio proporcional a la distancia con el máximo. Adicionalmente, la seguridad de suministro se normaliza equiponderando por sus subcategorías de impacto (IHH_{completo} e $IHH_{\text{renovables}}$). Los resultados se muestran en la Tabla 17 de a continuación:

Pais	Periodo	Aceptación Social	Seguridad de Suministro	Empleabilidad
ALEMANIA	2019	0.745	0.000	0.465
	2030	0.415	0.024	0.493
BÉLGICA	2019	0.828	0.522	0.881
	2030	0.501	0.166	0.823
BULGARIA	2019	0.903	0.606	0.831
	2030	0.757	0.361	0.758
DINAMARCA	2019	0.384	0.246	0.460
	2030	0.083	0.869	0.462
ESPAÑA	2019	0.565	0.142	1.000
	2030	0.000	0.181	0.000
GRECIA	2019	0.631	0.203	0.765
	2030	0.159	0.130	0.402
HOLANDA	2019	1.000	0.253	0.853
	2030	0.232	0.267	0.635
HUNGRÍA	2019	0.649	0.642	0.804
	2030	0.444	0.571	0.187
ITALIA	2019	0.483	0.008	0.566
	2030	0.450	0.052	0.716

Tabla 17. Impactos sociales de los mixes 2019 y 2030 normalizados

Una vez obtenidos los pesos de los criterios y normalizados los impactos de los mixes, se procede a ponderar estos obteniendo una puntuación social de los mixes en la Tabla 18:



















Puntuaciones totales	Puntuación Social	
España - 2030	0.0537	
Grecia - 2030	0.1899	
Holanda - 2030	0.3082	
Alemania - 2030	0.3117	
Dinamarca - 2019	0.3554	
Italia - 2019	0.3556	
Italia - 2030	0.3752	
Dinamarca - 2030	0.3785	
Hungría - 2030	0.4396	
Bélgica - 2030	0.4540	
Alemania - 2019	0.4780	
España - 2019	0.5103	
Grecia - 2019	0.5255	
Bulgaria - 2030	0.6394	
Hungría - 2019	0.6722	
Bélgica - 2019	0.7459	
Holanda - 2019	0.7541	
Bulgaria - 2019	0.8028	

Tabla 18. Puntuación social de los mixes 2019 - 2030 según método AHP

En estos resultados de la Tabla 18, se aprecia que Dinamarca tiene el mix más sostenible socialmente a fecha 2019 y España en 2030. Por otro lado, Bulgaria es el mix menos sostenible socialmente a fecha 2019 y a fecha 2030 pese a su avance.

También se observa cómo, de manera general, los mixes de 2030 en la segunda mitad de la tabla presentan puntuaciones de sostenibilidad social superiores a las de 2019, poniendo de manifiesto que, más allá de las políticas individuales, las políticas energéticas y climáticas que se plantean desde la Unión Europea tienen también en cuenta el aspecto social de la sostenibilidad.

9.4 EVALUACIÓN CONJUNTA DE LA SOSTENIBILIDAD

Este capítulo aplica la misma metodología utilizada para el análisis de los aspectos medioambientales, económicos y sociales para realizar un análisis conjunto de la sostenibilidad de los mixes estudiados combinando los tres aspectos anteriores.

Aunque el foco de las políticas y la opinión está puesto en controlar y reducir las emisiones contaminantes y la preservación del medio ambiente, la sostenibilidad desde el punto de vista de la literatura del ACV, contempla igualmente los otros aspectos aquí estudiados: el económico y el social. Por esta razón, se decide otorgar el mismo nivel de prioridad a cada una de las tres categorías para la ponderación de los valores normalizados.

Poniendo en práctica esta filosofía, se obtienen los siguientes resultados para 2019 mostrados en la Tabla 19:










Puntuaciones 2019	Aspecto medioambiental	Aspecto económico	Aspecto Social	Evaluación Conjunta	
Dinamarca	0.2198	0.5269	0.1214	0.2894	
España	0.1670	0.3468	0.3763	0.2967	
Bélgica	0.0648	0.2021	0.7363	0.3344	
Alemania	0.4049	0.3248	0.3176	0.3491	
Italia	0.3243	0.6260	0.1228	0.3577	
Bulgaria	0.5859	0.0000	0.8288	0.4716	
Hungría	0.3839	0.8146	0.6245	0.6077	
Holanda	0.3290	0.8363	0.7905	0.6519	
Grecia	0.7771	1.0000	0.3996	0.7256	

Tabla 19. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2019

Dinamarca, seguido por España y Bélgica, tienen los mixes más sostenibles a fecha 2019 según las categorías contempladas. Grecia, seguido por Holanda y Hungría los menos sostenibles como se iba intuyendo en los análisis independientes de las categorías de impacto.

Para el periodo de estudio 2030, Dinamarca vuelve a obtener la mejor puntuación en sostenibilidad del análisis multicriterio, convirtiéndose en el mix modelado más sostenible de todos los contemplados, mientras que el mix de Hungría empeora su posición relativa al

resto de mixes energéticos obteniendo la calificación de menos sostenible en 2030 como se muestra en la Tabla 20:










Puntuaciones 2030	Aspecto medioambiental	Aspecto económico	Aspecto Social	Evaluación Conjunta	
Dinamarca	0.2044	0.0000	0.4089	0.2044	
Holanda	0.2591	0.1579	0.3674	0.2614	
España	0.2093	0.9676	0.0505	0.4091	
Grecia	0.4209	0.6787	0.2278	0.4425	
Alemania	0.4970	0.4539	0.3970	0.4493	
Bélgica	0.3592	0.6392	0.5659	0.5214	
Italia	0.4707	0.6656	0.4743	0.5369	
Bulgaria	0.6354	0.6404	0.7940	0.6899	
Hungría	0.5648	1.0000	0.5204	0.6951	

Tabla 20. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2030

Si se evalúan de forma conjunta todos los mixes, se aprecia en la Tabla 21 como todos los mixes de los países contemplados avanzan en el ranking de sostenibilidad, en mayor o menor medida. Destacan entre estos Dinamarca y Holanda, los que más avanzan en la evaluación:



















País y Periodo	Aspecto medioambiental	Aspecto económico	Aspecto Social	Evaluación Conjunta	
Dinamarca - 2030	0.1608	0.0000	0.3785	0.1798	
Holanda - 2030	0.1997	0.1579	0.3082	0.2220	
Alemania - 2030	0.3643	0.4539	0.3117	0.3767	
Grecia - 2030	0.3121	0.6787	0.1899	0.3936	
España - 2030	0.1619	0.9676	0.0537	0.3944	
Dinamarca - 2019	0.2479	0.6899	0.3554	0.4311	
Bélgica - 2030	0.2607	0.6392	0.4540	0.4513	
Italia - 2030	0.3348	0.6656	0.3752	0.4585	
España - 2019	0.2220	0.6487	0.5103	0.4603	
Italia - 2019	0.3470	0.7126	0.3556	0.4717	
Bélgica - 2019	0.1196	0.6156	0.7459	0.4937	
Alemania - 2019	0.3884	0.6437	0.4780	0.5034	
Bulgaria - 2030	0.4532	0.6404	0.6394	0.5777	
Hungría - 2019	0.4080	0.7557	0.6722	0.6120	
Hungría - 2030	0.4006	1.0000	0.4396	0.6134	
Holanda - 2019	0.3412	0.7607	0.7541	0.6187	
Bulgaria - 2019	0.5988	0.5694	0.8028	0.6570	
Grecia - 2019	0.7565	0.7981	0.5255	0.6934	

Tabla 21. Evaluación conjunta de la sostenibilidad de los mixes 2019 y 2030

Capítulo 10. CONCLUSIONES

Este capítulo recopila las conclusiones extraídas durante el modelado de los mixes y del análisis de los impactos expuestos en los capítulos anteriores.

Tras la realización de este trabajo, se obtiene como conclusión general que las acciones que están llevando a cabo los países de la Comisión Europea en términos de energía y clima (descarbonización y despliegue de energías renovables), tienen un efecto positivo en los tres aspectos de la sostenibilidad de los mixes energéticos del futuro: medioambiental, económico y social quedando probada la hipótesis de trabajo de este proyecto.

A raíz de esta conclusión general, se exponen a continuación las conclusiones particulares del proyecto:

Con respecto a las hojas de ruta de los países estudiados de cara a cumplir con los objetivos medioambientales, obtenemos las siguientes conclusiones de la apuesta por energías renovables:

- Todos los países del estudio contemplan en sus planes energéticos aumentar significativamente su generación con renovables y esperan tener al menos un 30% de generación renovable para 2030.
- Dinamarca, Alemania e Italia son los líderes actuales en generación con renovables de entre los países contemplados con 78%, 41% y 40% de presencia de renovables en sus respectivos mixes.
- Dinamarca, España y Holanda serán los líderes de generación renovable en el año 2030 con 100%, 75% y 70% de su mix energético respectivamente. Siendo Holanda el que más aumentará la presencia de renovables en su mix durante la próxima década (+270%).
- La energía eólica será la mayor fuente de generación de los mixes de los países del estudio, superando al gas natural para 2030.

- La energía solar será la que más crezca en la próxima década con un aumento de más de x2,5 en términos absolutos.

Con respecto a la generación con combustibles fósiles, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los países del estudio contemplan en sus planes energéticos la erradicación de la generación con carbón para 2030 salvo Bulgaria y Alemania, que reducen su presencia en el mix significativamente.
- Los países del estudio eliminan por completo la presencia de nuclear en sus mixes para el año 2030 a excepción de España, que la reduce en cerca de un 60%, y Hungría, que es el único país que promueve este tipo de fuente con la construcción de 4 nuevas centrales, aumentando la nuclear en su mix en un 20% para 2030.

Con respecto al impacto medioambiental que tienen las tecnologías de generación de energía eléctrica y por tanto los mixes energéticos de los países, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La generación con carbón, en todas sus formas, constituye la forma de generación más contaminante siendo la que más contribuye al calentamiento global, a la acidificación, a la oxidación fotoquímica, a la eutrofización y a la toxicidad humana, terrestre y acuática.
- La energía nuclear, seguida por las renovables, en especial la hidráulica, eólica y solar, son las más respetuosas con las emisiones contaminantes.
- La generación con gas natural, petróleo y derivados son las tecnologías que más contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.
- Las renovables tienen, por lo general, un impacto más negativo que los combustibles fósiles en la ocupación del terreno. En especial la generación con biomasa tiene el mayor impacto si además contamos la ocupación indirecta. Las dos excepciones son la eólica *offshore* que no ocupa terreno físico al estar en el mar y la solar fotovoltaica de pequeña escala o autoconsumo, que por lo general se sitúa en infraestructuras existentes sin ocupar nuevo terreno.

Respecto a las conclusiones de impactos ambientales por mix energético:

- Los planes energéticos y climáticos tienen, de forma generalizada, un impacto positivo en todas las categorías de impacto ambiental (a excepción de la ocupación del terreno y el agotamiento abiótico de materiales).
- Grecia tiene el mix más contaminante en 2019 en las categorías de calentamiento global y destrucción de la capa de ozono. Por otro lado, es de los países que más reduce sus emisiones en los planes para 2030.
- Bulgaria es el país más contaminante en el resto de las categorías de impacto ambiental: Acidificación, eutrofización, toxicidad/ecotoxicidad y oxidación fotoquímica.
- Bélgica es el país con el mix más respetuoso en términos de calentamiento global y del resto de impactos ambientales de alcance local en la actualidad, no obstante, es el único que empeora su situación al prescindir de la nuclear para 2030 cediendo la primera posición a Dinamarca.
- Dinamarca es el más respetuoso con la destrucción de la capa de ozono y en la actualidad y el que más reduce sus emisiones en 2030 por su mix 100% renovable.

En el estudio de costes nivelados de la electricidad, obtenemos las siguientes conclusiones:

- La biomasa es la tecnología de generación más costosa, seguida por la solar de baja potencia. La solar de gran potencia, sin embargo, posee de los costes nivelados más económicos junto con la geotérmica y la eólica terrestre.
- Se prevé que todas las fuentes de generación renovable mejoren sus costes en el futuro, a un mayor ritmo que el de los combustibles fósiles.
- La variación entre costes nivelados de los mixes es poco significativa a fecha 2019. No obstante, Dinamarca y Holanda prevén economizar sus mixes energéticos en un 21 y 18% respectivamente. Por otro lado, Hungría y España encarecerán su generación en un 7 y 10% respectivamente principalmente por su gran apuesta de solar de baja potencia entre otras.

Atendiendo al análisis de impactos sociales, obtenemos las siguientes conclusiones:

- El gran despliegue de renovables tiene un gran impacto sobre la seguridad de suministro de los países: Los países con menos presencia de renovables en 2019 diversifican su mix al incorporarlas en 2030 favoreciendo la seguridad de suministro. Por otro lado, los países con mayor presencia de renovables en la actualidad concentran su mix en torno a ellas eliminando alternativas de generación como los combustibles fósiles.
- Las energías renovables tienen una gran aceptación entre la población europea lideradas por la solar. Las fuentes de generación de combustibles fósiles reciben el mayor rechazo, en especial el carbón.
- Los países aumentan su aceptación entre 2019 y 2030 de forma generalizada como consecuencia de la descarbonización de sus mixes y la reducción de la nuclear.
- Dinamarca posee el mix más aceptado entre sus habitantes y Holanda el más rechazado en la actualidad. Mientras que España posee el mix más aceptado en 2030 y Bulgaria pasa a ser el menos aceptado.
- Las energías renovables, en especial la solar fotovoltaica y la eólica, son las que más incrementarán el número de empleos directos en Europa en 2030.
- Dinamarca, Alemania e Italia poseen los mixes con más empleabilidad de los países en el foco en la actualidad. Por otro lado, España pasa de tener el mix con menos empleabilidad por kWh al que más en 2030 con un incremento del 138%.

Finalmente, con respecto a las conclusiones del análisis multicriterio de la sostenibilidad, se extraen las siguientes conclusiones:

- Todos los mixes a fecha 2030 son medioambientalmente más sostenibles que aquellos que presentan los países en la actualidad gracias a las ventajas de la energía renovable, que, por lo general, destacan en los tres aspectos contemplados respecto a los combustibles fósiles.
- Bélgica resulta tener el mix más sostenible en términos medioambientales y el segundo más sostenible en términos económicos en la actualidad debido a su gran presencia de nuclear en el mix. Esto le otorga la tercera posición en el ranking de mixes más sostenibles en el año 2019, posición que pierde por eliminar la nuclear y aumentar radicalmente el consumo de gas natural a modo de compensación en 2030.

- Bulgaria posee en la actualidad el mix más sostenible económicamente, pero ocupa las penúltima y última posición en términos de sostenibilidad medioambiental y sostenibilidad social respectivamente. En 2030, pasa a tener el mix menos sostenible medioambientalmente.
- Grecia posee el mix menos sostenible en la actualidad por ser el menos sostenible en los aspectos medioambiental y económico, no obstante, alcanza la cuarta posición en sostenibilidad en 2030 por sus agresivos planes de descarbonización y apuesta por renovables.
- Holanda es, después de Grecia, el mix menos sostenible en 2019. No obstante, el mix esperado para 2030 es el segundo más sostenible gracias a que pasará a generar más de un 50% de su electricidad con eólica, que contribuye positivamente a los tres aspectos de la sostenibilidad contemplados.
- Dinamarca posee el mix más sostenible a fecha 2019 y el más sostenible a fecha 2030 de todos los modelados equilibrando los aspectos medioambiental y económico. Respecto al aspecto social, ocupa la sexta posición a causa de su mala puntuación en términos de seguridad de suministro, ya que, en 2030, concentra toda su generación en poca variedad de energías renovables.

10.1 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

Para finalizar el capítulo de conclusiones, se consideran una serie de recomendaciones y trabajos futuros en el ámbito de este proyecto.

En primer lugar, este proyecto se desarrolla en torno a una idea principal, la del inminente cambio de paradigma energético que vendrá liderado por el desarrollo masivo de las fuentes de generación de energía renovables durante los próximos años. El trabajo no contempla el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, concretamente baterías de ion-litio de escala red. Sólo en dos de los veintidós planes energéticos revisados se hace mención del desarrollo de baterías de almacenamiento: Alemania y España, este último además estima en 11.900 GWh (en torno a un 3% del total) la electricidad proveniente de las mismas.

Resultaría interesante profundizar y complementar en el trabajo en este ámbito a medida que los países incluyan en sus planes objetivos de desarrollo de las tecnologías de almacenamiento ya que la realidad es que serán necesarias como indican diversas fuentes. El reporte elaborado por Batstorm en colaboración con la Comisión Europea [59], sitúa en 36 GWh la capacidad instalada en todo el mundo. Según la fuente, como se muestra a continuación, presenta unos costes de inversión todavía caros, pero en un claro decrecimiento: síntoma del desarrollo inminente de este tipo de recurso.

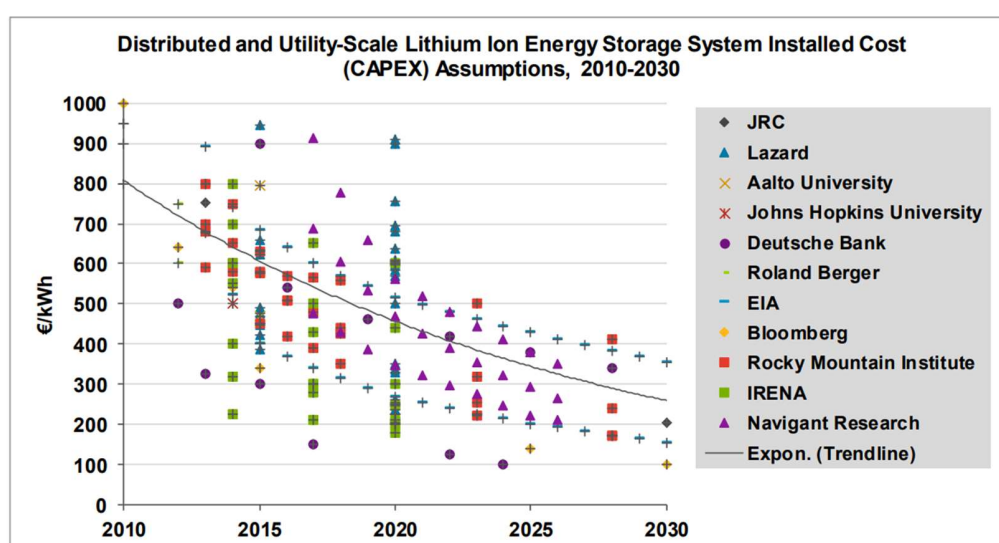


Figura 49. Estimación proyecciones de costes de baterías de escala red hasta 2030 [59]

En segundo lugar, resultaría interesante profundizar más en el aspecto económico. Este trabajo sólo analiza la eficiencia energética en términos de coste nivelado de la electricidad y su evolución en base a las curvas de aprendizaje de las tecnologías de generación. Bien es cierto que los costes de generación son una parte importante del análisis económico, no obstante, se podría complementar el estudio con medidas de eficiencia como la intensidad energética (energía eléctrica producida entre el producto interior bruto del país). Esta medida serviría para determinar cuanta electricidad requiere cada país para generar cada unidad de su riqueza, es decir como de eficiente es su economía en función de su generación eléctrica.

Finalmente, el impacto de la ocupación del terreno es uno de los pocos que no se ve beneficiado por el desarrollo de las renovables y puede llegar a ser un inconveniente para

países de menor extensión o de condiciones geográficas adversas. Podría profundizarse más en este impacto, no sólo en el análisis de la ocupación del terreno en sí, sino también en el coste de oportunidad de dicho terreno ya que puede llegar a ser un recurso escaso en el futuro y podría emplearse en agricultura, ganadería, reforestación, técnicas de compensación de CO₂, etc.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO; «Sustainable Development» s.f. [En línea] Available: <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd>

- [2] IEA; «Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021» 2021. [En línea] Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>

- [3] McKinsey; «Global Energy Perspective 2022» 2022. [En línea] Available: https://www.mckinsey.com/~/_media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf

- [4] McKinsey; «Global Energy Perspective 2021 » 2021. [En línea] Available: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2021>

- [5] European Commission; «National energy and climate plans (NECPs)» 2019. [En línea] Available: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en

- [6] D. Benito Adrados; «COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES EUROPEOS BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA» 2019.

- [7] A. Rebollar Juárez; «COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA» 2019.

- [8] J. Goas Martín; «EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE MIXES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE PAÍSES CON PLANES DE DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA MARINA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA» 2021.

- [9] G. Quintero Bermejo; «ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE POSIBLES ESCENARIOS DE MIX DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN ESPAÑA EN 2030» 2020.

- [10] Eurostat; «Production of electricity and derived heat by type of fuel» 2019. [En línea] Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_PEH__custom_1716302/default/table

- [11] H. Ritchie, M. Roser; «Energy» 2020. [En línea] Available: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [12] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE; «Energy Charts» s.f. [En línea] Available: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=ES&interval=year&year=2017>
- [13] BP; «BP Statistical Review of World Energy» 2019. [En línea] Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- [14] Solar Power Europe; «Global Market Outlook For Solar Power 2021 - 2025» 2020.
- [15] A. Stoppato; «Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation» 2008. [En línea] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544207002137>
- [16] IRENA; «ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030» 2017. [En línea] Available: <https://www.irena.org/publications/2017/oct/electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>
- [17] C. J. Joubert, N. Chokani and R. S. Abhari; «Impact of Large Scale Battery Energy Storage on the 2030 Central European Transmission Grid» s.f. [En línea] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8469789>
- [18] W. Cole, A. Frazier, C. Augustine; «Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update» 2021. [En línea] Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf>
- [19] V. Henze; «Tumbling Costs for Wind, Solar, Batteries Are Squeezing Fossil Fuels» 2018. [En línea] Available: <https://about.bnef.com/blog/tumbling-costs-wind-solar-batteries-squeezing-fossil-fuels/>
- [20] V. Henze; «Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh» 2020. [En línea] Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- [21] A. Colthorpe; «At 300MW / 1,200MWh, the world's largest battery storage system so far is up and running» 2021. [En línea] Available: <https://www.energy-storage.news/at-300mw-1200mwh-the-worlds-largest-battery-storage-system-so-far-is-up-and-running/>
-

- [22] A. Mey, P.Hutchins, V. Linga; «Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends» 2021. [En línea] Available: <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/>
- [23] IRENA; «UTILITY-SCALE BATTERIES. INNOVATION LANDSCAPE BRIEF» 2019. [En línea] Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf
- [24] Iberdrola; «Almacenamiento de energía: la clave de un futuro descarbonizado» s.f. [En línea] Available: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- [25] United Nations; «The Climate Crisis – A Race We Can Win» 2020. [En línea] Available: <https://www.un.org/en/un75/climate-crisis-race-we-can-win>
- [26] United Nations for Climate Change; «The Paris Agreement» 2015. [En línea] Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [27] El Economista; «Alemania reactiva plantas de carbón ante el riesgo de falta de suministro energético» 2022. [En línea] Available: <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11660185/03/22/Alemania-reactiva-plantas-de-carbon-ante-el-riesgo-de-falta-de-suministro-energetico.html>
- [28] Naciones Unidas; «Objetivos de desarrollo sostenible» s.f. [En línea] Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [29] ISO; «Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework » 1997. [En línea] Available: https://www.researchgate.net/profile/Petra-Schneider-2/post/LCA_or_MFA_which_is_suitable/attachment/59d63b9279197b80779989e7/AS%3A411394932527104%401475095603341/download/ISO_LCA_14040.pdf
- [30] European Commission; «European Platform on Life Cycle Assessment (LCA)» 2003. [En línea] Available: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>
- [31] SimaPro; «LCA software for informed change-makers» s.f. [En línea] Available: <https://simapro.com/>
- [32] Ecoinvent; «Database» s.f. [En línea] Available: <https://ecoinvent.org/>
- [33] Kate Abnett; «EU proposes rules to label some gas and nuclear investments as green» 2022. [En línea] Available: <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/eu-proposes-rules-label-some-gas-nuclear-investments-green-2022-02-02/>
-

- [34] Hydropower Europe; «Hydropower in Europe» 2022. [En línea] Available: <https://hydropower-europe.eu/about-hydropower-europe/hydropower-energy/>
- [35] Bioenergy Europe; «Understanding Europe's leading renewable energy source» s.f. [En línea] Available: <https://bioenergyeurope.org/about-bioenergy.html>
- [36] Covanta; «Renewable Waste-to-Energy» s.f. [En línea] Available: <https://www.covanta.com/what-we-do/waste-to-energy>
- [37] Solar Energy Technologies Office; «Solar Photovoltaic Technology Basics» s.f. [En línea] Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>
- [38] Pré, various authors; «SimaPro Database Manual Methods Library» 2020. [En línea] Available: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>
- [39] F.Anwar; «Causes of Ozone Layer Depletion and Its Effects on Human: Review» 2016. [En línea] Available: https://www.scirp.org/html/11-4700425_63065.htm?pagespeed=noscript
- [40] LCA NZ; «Impact Category. Photochemical oxidation Potential» s.f. [En línea] Available: https://lcanz.org.nz/wp/wp-content/uploads/2019/06/photochemical_oxidation_lcanz.pdf
- [41] I. Dincer, Y. Bicer; «Acidification Potential» 2018. [En línea] Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/acidification-potential>
- [42] Iagua; «Eutrofización: Causas, consecuencias y soluciones» 2018. [En línea] Available: <https://www.iagua.es/noticias/sewervac-iberica/eutrofizacion-causas-consecuencias-y-soluciones>
- [43] National Academy of Sciences; «Assessment of Ecotoxicity» 2014. [En línea] Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253975/>
- [44] E. Santoyo-Castelazo, A. Azapagic; «Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects» 2014. [En línea] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005381>
- [45] J. Lovering, M. Swain, et al.; «Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape» 2021. [En línea] Available: https://www.researchgate.net/publication/350358598_Land-use_intensity_of_electricity_production_and_tomorrow%27s_energy_landscape?enrichId=rgreq-6b6d75b1f325bb9a716ab86a9278dd9b-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM1MDM1ODU5ODtBUzoXMDA1MDIxNTI1MTk2ODAwQDE2MTY2MjcyMTIxMDQ%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

-
- [46] European Commission; «Cost of Energy (LCOE): Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments» 2020. [En línea] Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/76c57f2f-174c-11eb-b57e-01aa75ed71a1/language-en>
- [47] A. De Vita, I. Kielichowska, P. Mandatowa; «Technology pathways in decarbonisation scenarios» 2018. [En línea] Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf
- [48] P. Capros; «EU Reference Scenario 2016» 2016. [En línea] Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf
- [49] F. Coll; «Curva de experiencia» 2021. [En línea] Available: <https://economipedia.com/definiciones/curva-de-experiencia.html>
- [50] IEA; «Power generation technology costs and assumptions in the WEO-2021 Stated Policies and Net Zero Emissions by 2050 scenarios» 2021. [En línea] Available: <https://www.iea.org/weo/>
- [51] IEA; «Frequently Asked Questions on Energy Security» 2022. [En línea] Available: <https://www.iea.org/articles/frequently-asked-questions-on-energy-security>
- [52] J. Sánchez; «Índice Herfindahl-Hirschman (IHH)» 2016. [En línea] Available: <https://economipedia.com/definiciones/indice-herfindahl-hirschman.html>
- [53] European Social Survey; «Public Perceptions on Climate Change and Energy in Europe and Russia: Evidence from Round 8 of the European Social Survey» 2018. [En línea] Available: https://www.europeansocialsurvey.org/docs/findings/ESS8_pawcer_climate_change.pdf
- [54] S. Teske, E. Dominish, C. Briggs, et al.; «Outlook on employment effects of a Global Energy Transition» 2018. [En línea] Available: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-africa-stateless/2019/04/6cd35f47-jt-global-employment-report.pdf>
- [55] G. Marcelo, E. Cherubini, S. Roberto; «How Multi - Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation» 2018. [En línea] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617325350>
- [56] T.L. Saaty; «The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments» 1984. [En línea] Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12
- [57] K. D. Goepel; «AHP Priority Calculator» 2022. [En línea] Available: <https://bpmmsg.com/ahp/ahp-calc.php?lang=en>
-

- [58] D. Clark; «Number of full-time employees in the EU 2002-2020» 2022. [En línea] Available: <https://www.statista.com/statistics/1197123/full-time-workers-in-the-eu/#:~:text=There%20are%20almost%20156.9%20million,time%20workers%20in%20the%20EU.>
- [59] European Comission; «BATTERY STORAGE TO DRIVE THE POWER SYSTEM TRANSITION» s.f. [En línea] Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/report-_battery_storage_to_drive_the_power_system_transition.pdf

ANEXO I: MODELOS MIXES ENERGÉTICOS 2019 Y 2030

GWh 2019	Alemania	Bélgica	Bulgaria	Dinamarca	España	Grecia	Holanda	Hungría	Italia
Antracita	54,986	-	12	-	12,147	-	15,145	-	18,757
Antracita - Cogeneración	10,447	-	364	3,310	-	-	2,570	-	73
Biogás	44,415	4,310	1,777	636	904	378	895	318	17,194
Biomasa	5,806	931	44	5,317	4,668	24	4,919	1,906	2,369
Eólica marina [1-3 MW]	3,601	3,862	-	3,578	31	-	896	-	-
Eólica terrestre [< 1 MW]	17,256	139	218	6,531	19,719	2,314	3,044	13	5,667
Eólica terrestre [+ 3 MW]	10,367	604	277	1,577	95	1,019	1,925	27	1,730
Eólica terrestre [1-3 MW]	94,670	5,120	822	4,464	35,823	3,934	5,643	689	12,805
Gas Natural CC	20,198	13,819	-	-	82,194	17,596	29,963	2,712	48,478
Gas Natural - Convencional	12,475	3,221	38	-	2,632	5,367	15,093	1,730	13,016
Gas natural - CC [400 MW Cogen.]	1,117	2,546	125	95	-	-	15,193	341	51,106
Gas natural - Convencional [100 MW Cogen.]	67,364	5,928	1,983	2,008	-	-	12,585	3,932	31,500
Geotérmica	197	-	-	-	-	-	-	18	6,075
Hidráulica Bombeo	5,933	953	644	-	2,986	77	-	-	2,342
Hidráulica Reserva No Alpina	3,158	-	-	-	8,122	-	-	-	29,319
Hidráulica RoR	16,580	228	2,739	17	15,766	3,973	74	219	16,492
Lignito	103,089	-	16,057	-	712	7,337	-	4,025	10
Lignito Cogeneración	2,928	-	770	-	-	4,787	-	11	-
Nuclear BWR	16,000	-	-	-	11,643	-	-	-	-
Nuclear PWR	59,071	43,524	16,555	-	46,706	-	3,910	16,288	-
Petróleo	3,772	71	341	51	12,883	5,507	-	61	1,926
Petróleo Cogeneración	1,004	-	30	191	-	62	1,411	9	8,227
Residuos	-	1,291	10	789	985	290	1,846	248	2,429
Solar térmica parabólica	-	-	-	-	5,558	-	-	-	-
Solar térmica torre	-	-	-	-	125	-	-	-	-
Solar [3kW multi SI]	19,118	2,124	799	534	3,123	2,456	2,918	819	4,828
Solar [3kW single SI]	15,350	1,062	643	429	2,507	1,973	2,346	678	3,877
Solar [570 kW]	11,924	1,062	-	-	3,790	-	72	-	14,984
Totales 2019 [GWh]	600,827	90,795	44,248	29,526	273,118	57,093	120,447	34,043	293,203

Tabla 22. Mixes energéticos modelados para 2019

GWh 2030	Alemania	Bélgica	Bulgaria	Dinamarca	España	Grecia	Holanda	Hungría	Italia
Antracita	33,417	-	8	-	-	-	-	-	-
Antracita - Cogeneración	6,349	-	245	-	-	-	-	-	-
Biogás	37,144	2,792	1,587	670	1,204	1,479	895	454	12,481
Biomasa	4,856	603	40	5,599	10,031	96	4,919	2,720	1,719
Eólica marina [1-3 MW]	81,500	9,710	-	23,213	23	-	49,000	-	-
Eólica terrestre [< 1 MW]	20,107	350	339	8,078	42,352	5,480	4,735	13	7,041
Eólica terrestre [+ 3 MW]	12,080	1,519	431	1,950	204	2,413	2,994	27	2,150
Eólica terrestre [1-3 MW]	110,313	12,871	1,279	5,521	76,941	9,316	8,777	689	15,909
Gas Natural CC	22,401	34,031	-	-	48,271	14,026	12,901	1,808	64,637
Gas Natural - Convencional	13,836	7,933	26	-	1,546	4,278	6,498	1,153	17,355
Gas natural - CC [400 MW Cogen.]	1,239	6,271	84	-	-	-	6,542	227	68,141
Gas natural - Convencional [100 MW Cogen.]	74,713	14,600	1,334	-	-	-	5,419	2,621	42,000
Geotérmica	197	-	-	-	-	-	-	103	7,000
Hidráulica Bombeo	4,853	1,295	896	-	3,150	126	-	-	2,481
Hidráulica Reserva No Alpina	2,583	-	-	-	8,568	-	-	-	31,053
Hidráulica RoR	13,563	310	3,811	17	16,633	6,470	74	219	17,466
Lignito	62,651	-	10,808	-	-	-	-	-	-
Lignito Cogeneración	1,780	-	518	-	-	-	-	-	-
Nuclear BWR	-	-	-	-	4,979	-	-	-	-
Nuclear PWR	-	-	16,555	-	19,973	-	3,910	19,546	-
Petróleo	2,673	71	230	-	6,053	819	-	41	2,568
Petróleo Cogeneración	711	-	20	-	-	9	1,411	6	10,970
Residuos	-	2,582	115	-	355	290	1,846	354	2,429
Solar térmica parabólica	-	-	-	-	22,659	-	-	-	-
Solar térmica torre	-	-	-	-	511	-	-	-	-
Solar [3kW multi SI]	37,089	2,398	799	3,471	12,652	2,456	1,672	819	7,052
Solar [3kW single SI]	29,779	1,336	643	2,786	12,652	1,973	1,344	678	5,662
Solar [570 kW]	23,132	5,997	3,210	-	45,187	7,387	15,485	5,082	21,886
Totales 2019 [GWh]	596,968	104,668	42,978	51,306	333,944	56,617	128,419	36,559	340,000

Tabla 23. Mixes energéticos modelados para 2030

ANEXO II: IMPACTOS AMBIENTALES

Categoría de Impacto	Agotamiento	Agotamiento	Calentamiento	Destrucción	Toxicidad	Ecotoxicidad -			Oxidación	Acidificación	Eutrofización
	Abiótico	Abiótico (comb. Fósiles)	Global (GWPI00a)	de la capa de Ozono (ODP)	Humana	Agua Dulce	Agua Marina	Terrestre	Fotoquímica		
Antracita	2.20E-07	9.80E+00	1.01E+00	4.25E-09	6.32E-01	5.40E-01	2.74E+03	1.04E-03	3.07E-04	9.11E-03	2.25E-03
Antracita - Cogeneración	2.62E-07	1.09E+01	1.19E+00	4.69E-09	6.53E-01	5.29E-01	2.82E+03	1.12E-03	3.09E-04	8.42E-03	1.98E-03
Biogás	5.88E-07	1.01E+00	2.29E-01	3.13E-09	5.97E-02	5.20E-02	1.36E+02	2.09E-04	2.19E-04	1.34E-03	3.03E-04
Biomasa	2.06E-07	7.25E-01	6.13E-02	1.80E-08	7.05E-02	2.05E-02	2.70E+01	5.22E-04	1.08E-04	1.54E-03	5.09E-04
Eólica marina [1-3 MW]	9.91E-07	1.55E-01	1.44E-02	7.10E-10	7.13E-02	4.61E-02	4.43E+01	8.03E-05	3.83E-06	6.32E-05	3.00E-05
Eólica terrestre [< 1 MW]	8.94E-07	1.60E-01	1.43E-02	6.84E-10	7.45E-02	7.87E-02	5.42E+01	8.41E-05	4.14E-06	6.28E-05	3.22E-05
Eólica terrestre [+ 3 MW]	8.08E-06	3.55E-01	3.31E-02	2.06E-09	2.60E-01	5.73E-01	3.03E+02	1.59E-04	1.06E-05	1.78E-04	1.31E-04
Eólica terrestre [1-3 MW]	7.06E-07	1.55E-01	1.25E-02	8.96E-10	4.02E-02	5.72E-02	4.23E+01	5.54E-05	3.64E-06	5.51E-05	2.93E-05
Gas Natural CC	1.21E-07	7.61E+00	4.28E-01	1.93E-08	1.09E-02	8.95E-03	1.54E+01	5.15E-05	3.05E-05	1.67E-04	5.02E-05
Gas Natural - Convencional	6.40E-07	1.06E+01	5.97E-01	3.10E-08	2.81E-02	2.29E-02	3.46E+01	7.39E-05	4.77E-05	3.18E-04	9.23E-05
Gas natural - CC [400 MW Cogen.]	2.81E-07	8.81E+00	5.52E-01	3.85E-08	6.43E-02	3.05E-02	7.36E+01	1.01E-04	6.76E-05	8.15E-04	1.09E-04
Gas natural - Convencional [100 MW Cogen.]	9.58E-07	1.06E+01	6.53E-01	1.80E-08	9.66E-02	6.16E-02	1.34E+02	1.46E-04	6.67E-05	8.20E-04	1.46E-04
Geotérmica	1.62E-07	7.07E-01	6.64E-02	2.22E-09	5.22E-02	4.90E-02	1.23E+02	4.01E-04	1.57E-05	2.85E-04	1.31E-04
Hidráulica Bombeo	5.39E-07	1.03E+01	8.32E-01	4.24E-08	2.54E-01	2.45E-01	8.77E+02	5.99E-04	1.46E-04	3.57E-03	1.31E-03
Hidráulica Reserva No Alpina	3.13E-08	4.69E-02	5.06E-02	3.32E-10	8.06E-03	3.65E-03	5.66E+00	1.42E-05	2.10E-06	2.01E-05	7.04E-06
Hidráulica RoR	2.49E-08	3.60E-02	4.01E-03	2.63E-10	4.45E-03	3.37E-03	4.62E+00	8.40E-06	7.58E-07	1.54E-05	5.36E-06
Lignito	3.66E-07	1.13E+01	1.29E+00	3.52E-09	1.16E+00	1.78E+00	4.77E+03	2.49E-03	2.97E-04	8.28E-03	9.82E-03
Lignito Cogeneración	3.73E-07	1.14E+01	1.31E+00	3.41E-09	1.06E+00	1.59E+00	4.39E+03	2.38E-03	2.90E-04	8.01E-03	8.58E-03
Nuclear BWR	1.99E-07	8.86E-02	7.43E-03	7.44E-10	6.24E-02	2.01E-02	3.71E+01	8.87E-05	2.08E-06	4.55E-05	4.02E-05
Nuclear PWR	1.93E-07	7.74E-02	6.28E-03	5.63E-10	5.82E-02	1.87E-02	3.33E+01	8.12E-05	1.85E-06	4.00E-05	3.65E-05
Petróleo	2.52E-07	1.12E+01	9.12E-01	1.44E-07	1.85E-01	4.03E-02	1.27E+02	6.17E-04	2.86E-04	7.57E-03	5.02E-04
Petróleo Cogeneración	2.70E-07	1.06E+01	8.64E-01	1.34E-07	1.89E-01	4.40E-02	1.24E+02	6.17E-04	2.70E-04	7.55E-03	4.85E-04
Residuos	1.10E-08	3.54E-02	4.58E-03	3.67E-10	3.02E-02	1.98E-02	4.60E+01	2.49E-05	8.16E-07	2.80E-05	4.78E-05
Solar [3kW multi SI]	8.75E-06	8.53E-01	7.52E-02	8.23E-09	2.31E-01	3.04E-01	3.22E+02	1.75E-04	2.12E-05	3.83E-04	2.04E-04
Solar [3kW single SI]	8.62E-06	9.82E-01	8.72E-02	8.17E-09	2.33E-01	3.06E-01	3.35E+02	1.97E-04	2.28E-05	4.30E-04	2.25E-04
Solar [570 kW]	4.54E-06	8.59E-01	7.67E-02	8.19E-09	1.29E-01	1.55E-01	2.29E+02	1.68E-04	1.98E-05	3.72E-04	1.67E-04

Tabla 24. Impactos ambientales por tecnología de generación

País	Periodo	Agotamiento	Agotamiento	Acidificación	Eutrofización	Calentamiento		Toxicidad	Ecotoxicidad -	Destrucción	Oxidación	Ecotoxicidad -
		Abiótico	Abiótico (comb. fósiles)			Agua Dulce	Global (GWPI00a)					
ALEMANIA	2019	4.24E-06	5.40E+00	9.12E-04	2.09E-03	5.81E-01	4.97E-01	3.25E-01	9.65E+02	2.01E-08	5.30E-05	3.37E-03
ALEMANIA	2030	5.07E-06	4.33E+00	7.20E-04	1.35E-03	4.95E-01	3.75E-01	2.79E-01	6.90E+02	2.19E-08	4.50E-05	3.18E-03
BÉLGICA	2019	3.77E-06	2.55E+00	3.03E-04	1.14E-04	2.56E-01	1.77E-01	1.51E-01	1.58E+02	2.36E-08	2.68E-05	2.98E-03
BÉLGICA	2030	4.09E-06	5.15E+00	4.14E-04	1.23E-04	2.66E-01	3.36E-01	1.38E-01	1.62E+02	4.83E-08	3.36E-05	2.93E-03
BULGARIA	2019	3.71E-06	6.39E+00	3.78E-03	4.32E-03	9.25E-01	6.15E-01	5.90E-01	1.97E+03	1.10E-08	1.51E-04	5.13E-03
BULGARIA	2030	4.01E-06	4.66E+00	2.75E-03	3.11E-03	7.42E-01	4.50E-01	4.70E-01	1.46E+03	8.75E-09	1.12E-04	4.49E-03
DINAMARC ^A	2019	4.09E-06	2.33E+00	8.24E-04	3.79E-04	3.15E-01	1.97E-01	1.86E-01	3.59E+02	8.35E-09	4.46E-05	3.16E-03
DINAMARC ^A	2030	4.93E-06	3.41E-01	3.01E-04	1.43E-04	3.01E-01	3.66E-02	1.78E-01	1.87E+02	3.71E-09	2.01E-05	3.00E-03
ESPAÑA	2019	3.58E-06	4.34E+00	1.17E-03	2.85E-04	2.82E-01	3.00E-01	1.69E-01	3.05E+02	3.17E-08	5.11E-05	3.18E-03
ESPAÑA	2030	4.40E-06	2.02E+00	3.95E-04	1.38E-04	2.86E-01	1.39E-01	1.60E-01	1.89E+02	1.69E-08	2.24E-05	2.97E-03
GRECIA	2019	3.85E-06	9.66E+00	3.27E-03	3.59E-03	8.50E-01	6.95E-01	5.29E-01	1.82E+03	9.44E-08	1.42E-04	3.85E-03
GRECIA	2030	4.50E-06	3.87E+00	6.15E-04	1.51E-04	2.90E-01	2.72E-01	1.56E-01	1.94E+02	6.75E-08	4.10E-05	2.86E-03
HOLANDA	2019	3.83E-06	7.33E+00	7.26E-04	4.13E-04	3.00E-01	4.82E-01	1.64E-01	3.28E+02	4.83E-08	4.02E-05	3.09E-03
HOLANDA	2030	4.56E-06	2.77E+00	3.34E-04	1.33E-04	2.84E-01	1.68E-01	1.67E-01	1.84E+02	2.93E-08	2.12E-05	2.95E-03
HUNGRÍA	2019	3.78E-06	5.09E+00	1.88E-03	1.95E-03	5.68E-01	4.58E-01	3.57E-01	1.06E+03	3.40E-08	7.74E-05	3.49E-03
HUNGRÍA	2030	4.26E-06	4.48E+00	1.67E-03	1.69E-03	5.35E-01	4.03E-01	3.35E-01	9.54E+02	3.02E-08	6.91E-05	3.34E-03
ITALIA	2019	3.76E-06	5.96E+00	1.30E-03	2.93E-04	2.77E-01	4.37E-01	1.55E-01	2.85E+02	6.28E-08	7.35E-05	3.07E-03
ITALIA	2030	3.86E-06	5.89E+00	8.98E-04	1.51E-04	2.59E-01	4.07E-01	1.38E-01	1.65E+02	7.11E-08	5.76E-05	2.99E-03

Tabla 25. Impactos ambientales por país y periodo