



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

Especialidad Eléctrica

**COMPARATIVA DE LA
SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES
ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES
EUROPEOS BAJO LA PERSPECTIVA
DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

Autor: Diego Benito Adrados

Directores: Ana María Santos Montes y Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio 2019

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES
DE LA UNIÓN EUROPEA BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico4º GITI.... 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.

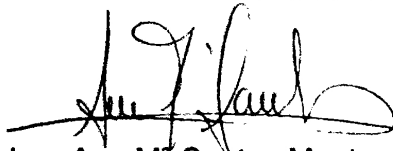


Fdo.: Diego Benito Adrados

Fecha: 16/07/19

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Ana Mª Santos Montes

Fecha: 16/07/19

EL CO-DIRECTOR DEL
PROYECTO



Fdo.: Carlos Martín Sastre

Fecha: 16/07/2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Diego Benito Adrados DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: "Comparativa de la sostenibilidad de los mixes energéticos de distintos países de la Unión Europea bajo la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida", que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4ª. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5ª. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 16 de Julio de 2019

ACEPTA



Fdo: Diego Benito Adrados

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Autor: Benito Adrados, Diego

Directores: Martín Sastre, Carlos; Santos Montes, Ana María

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El cambio climático es uno de los problemas que más preocupan a nivel global tanto a los gobiernos como a la opinión pública, y uno de los que más debate genera. Una gran parte de la comunidad científica defiende que el calentamiento global es provocado por causas endógenas, es decir, que es provocado por la actividad humana. Sostienen que, desde el inicio de la revolución industrial, y especialmente desde principios del siglo XX, el aumento de la propia actividad industrial y el uso masivo de combustibles fósiles ha provocado que las emisiones de gases de efecto invernadero se incrementen de forma exponencial, lo que a su vez conlleva un aumento de la temperatura media del planeta.

Por estos motivos, desde hace unas décadas, tanto gobiernos como distintas entidades supranacionales han firmado algunos tratados cuyo objetivo es atajar las causas que producen el cambio climático. Entre los más importantes destacan la Conferencia de Estocolmo, el Protocolo de Kioto o la cumbre del Clima en París, celebrada en 2015. En estos tratados se establecen, entre otras medidas, ciertos objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que los países deben acatar.

En este proyecto se va a analizar la actual situación energética de distintos países de la Unión Europea, se analizarán posibles escenarios de generación en los años 2030 y 2050, y se comparará la sostenibilidad de sus mixes energéticos utilizando la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Se podrá ver de esta manera las medidas que deberá implementar cada estado para adaptarse a los términos marcados por la UE y de qué manera estas medidas pueden afectar al medio ambiente.

El ACV es una herramienta muy útil a la hora de valorar los impactos medioambientales que causa un producto o un proceso durante toda su vida útil, *from cradle-to-grave* (de la cuna a la tumba). Esta herramienta se ha utilizado mucho durante los últimos tiempos para estudiar los impactos de las distintas partes que conforman los sistemas eléctricos, es decir, centrales de generación, líneas eléctricas, subestaciones, etc. Sobra decir que la mayor parte del impacto ambiental de un sistema eléctrico corresponde a las centrales donde se produce la energía, por lo que la mayoría de los trabajos se centran en éstas. Comparando los impactos ambientales que producen ciertas formas de generación con respecto a otras, es posible averiguar cuál es el mix energético más sostenible posible.

Para realizar el ACV se ha utilizado la aplicación Simapro, que es el programa informático de análisis de ciclo de vida más utilizado a nivel mundial. Algunos de los motivos por los que se ha optado por esta herramienta son que tiene acceso a la base de datos de Ecoinvent (la más utilizada en ACVs), que se actualiza constantemente y no queda obsoleto y que los resultados que ofrece son sencillos y fáciles de analizar.

Dentro del software se han analizado 11 categorías de impacto ambiental que son las que ofrece el método CML-IA baseline V3.02, que es el que se ha utilizado en el presente proyecto.

En este proyecto se han estudiado cinco países distintos de la Unión Europea. Estos países tienen unos mixes energéticos muy diferentes entre sí, de manera que permiten hacerse una idea general de cómo es la generación eléctrica en suelo europeo. Los países escogidos son:

Dinamarca

Se trata de un país noreuropeo, de unos seis millones de habitantes y con uno de los Índices de Desarrollo Humano más elevados del mundo. Se ha estudiado en este proyecto como ejemplo de país que ha apostado fuertemente por las energías renovables, y es que aproximadamente un 60% de la energía eléctrica generada en 2017 en el país procede de fuentes renovables, principalmente eólica y biomasa. El resto de la generación lo completan los combustibles fósiles, principalmente el carbón, aunque también el gas natural.

En cuanto a los planes a futuro, Dinamarca seguirá apostando fuertemente por las energías limpias y por descarbonizar el mix. Por eso, en junio de 2018, todos los partidos del parlamento danés se comprometieron a que en 2030 el 100% de la generación eléctrica en el país proceda de fuentes renovables y a conseguir un 100% de energía limpia en 2050.

Alemania

Se trata del país con más población de la UE y una de las mayores economías del mundo. Su potente sector industrial y su gran población lo convierten en el mayor consumidor de energía en Europa. El país ha hecho fuertes inversiones en energías renovables y ha llegado a cubrir un 36% de su generación sólo con este tipo de energías. En la otra cara de la moneda, también es un país que depende mucho del carbón. El resto de su mix lo completan la nuclear y las centrales de gas.

Los planes futuros de Alemania pasan por descarbonizar y por dismantelar las nucleares, y aumentar las renovables, principalmente la energía eólica y la fotovoltaica.

España

Se estudiará en este proyecto como ejemplo de país con un mix energético muy diversificado. No hay ninguna tecnología predominante, y se puede encontrar energía nuclear, eólica, ciclos combinados, hidráulica, cogeneración y, en menor medida, solar fotovoltaica, térmica, residuos renovables, etc.

Los objetivos a futuro son aumentar la cuota de renovables, eólica y solar fotovoltaica, esta última con un gran potencial de crecimiento en el país, y por eliminar las centrales térmicas de carbón a corto plazo

Francia

El segundo mayor consumidor de energía eléctrica de Europa se estudiará como ejemplo de país con una tecnología que predomina claramente sobre el resto, que es la nuclear. Aproximadamente tres cuartas partes de la generación provienen de esta fuente, y el resto del mix lo completan la hidráulica, el gas, la eólica, la solar y el carbón.

Se ha planteado reducir la importancia de la nuclear al 50% para el año 2035 y apostar fuertemente por las renovables con más potencial, como la eólica y la fotovoltaica.

Polonia

Al igual que Francia, este país también tiene una tecnología muy predominante, el carbón, que es muy contaminante. Esto se debe a que este recurso se encuentra de manera abundante en el país y, por tanto, es muy barata. El resto del mix lo completan la eólica, la biomasa y el gas natural.

Polonia tiene como objetivo descarbonizar su mix, pero no de manera drástica, e ir introduciendo poco a poco energías renovables que tengan potencial en el país, como la eólica o la biomasa.

ACV

Lo primero que se ha hecho en Simapro ha sido comparar los impactos ambientales que provocan los distintos tipos de tecnologías de generación y se han extraído las siguientes conclusiones:

- De entre todos los combustibles fósiles el más perjudicial es el lignito, que tiene el mayor impacto en la eutrofización y los diferentes tipos de ecotoxicidad, y un impacto similar a los combustibles fósiles en el resto de los campos.
- Los derivados del petróleo tienen también un impacto medioambiental muy considerable, sobre todo en la destrucción de la capa de ozono, pero también en la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y en la acidificación.
- La energía por bombeo tiene unos impactos mucho más graves de los que podría parecer a priori.
- La energía nuclear apenas tiene ningún efecto sobre el medio ambiente, sólo en la destrucción de la capa de ozono. La mayor parte de los impactos ambientales que se producen en la generación nuclear no corresponden a la fase de operación, sino mayoritariamente a la fase de extracción y enriquecimiento del uranio [1].
- El agotamiento abiótico constituye un caso muy particular entre los impactos ambientales, ya que es el único en el que las fuentes de energía limpias afectan más que los combustibles fósiles o la nuclear. Esto se debe principalmente a la extracción de los materiales necesarios para elaborar los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores.

Después se ha procedido a comparar los mixes energéticos actuales de los distintos países entre sí, utilizando la unidad funcional, que en este caso es el kWh en la red de baja tensión. Se han extraído las siguientes conclusiones:

- Como podía preverse desde un primer momento el mix que provoca más impactos ambientales en términos relativos es el polaco, que es el que más depende de los combustibles fósiles y en el que las energías renovables tienen menos trascendencia.
- La generación francesa parece la más respetuosa con el medio ambiente, y sólo tiene una relevancia mayor que los otros en la destrucción de la capa de ozono, que es donde la energía nuclear tiene más impacto.
- En el caso de España, su mix es bastante equilibrado y no destaca especialmente en ninguna categoría, sólo un poco en la destrucción de la capa de ozono, probablemente porque es el segundo país después de Francia en el que la nuclear dentro del mix tiene más peso y debido también a la gran importancia de las centrales de gas natural.
- Dinamarca también se presenta como un país bastante equilibrado que no destaca en ninguna categoría. Sin embargo, al ser el país con mayor cuota de renovables

dentro de los estudiados, se podría esperar que sus impactos fuesen los más pequeños con diferencia, pero no es así en absoluto. Esto se debe a que quitando las renovables, el resto de la generación del país corresponde prácticamente sólo a los combustibles fósiles, sobre todo al carbón, por lo que su mix no es tan limpio como en un principio cabría esperar.

- Por último, Alemania tiene el segundo mix que más impacto genera en general, sólo por detrás de Polonia. En este caso, la nada desdeñable cuota de renovables del país compensa la importancia del carbón y del lignito y se consigue un mix relativamente equilibrado.

Se ha hecho un ACV para cada país comparando el escenario actual con posibles escenarios futuros para el año 2030 y 2050. Para todos los países los resultados futuros mejoraban mucho los actuales, excepto en aquellos campos en los que las energías renovables tienen un impacto mayor que las convencionales, como en el agotamiento abiótico o algunos tipos de ecotoxicidades.

El impacto medioambiental en el que más se va a poner el foco es el calentamiento global, que se mide en las emisiones de CO₂ equivalentes. En los escenarios futuros se consiguen las siguientes reducciones de emisiones con respecto al actual.

Tabla 1: Variación de las emisiones de CO₂ en los escenarios futuros con respecto al actual

	Actual	2030	2050
Dinamarca	100,00%	25,89%	-
Alemania	100,00%	90,96%	38,24%
España	100,00%	50,39%	20,74%
Francia	100,00%	133,78%	135,58%
Polonia	100,00%	87,75%	63,59%

Hay que mencionar que no hay ningún escenario para el año 2050 en Dinamarca porque como se ha dicho antes el país espera que el 100% de su energía venga de fuentes renovables para el año 2030. Por otro lado, en el proyecto hay dos posibles escenarios para el año 2030 en España, que aparecen recogidos en el Plan Nacional de Energía y Clima, pero en la tabla se ha decidido poner sólo el escenario tendencial.

Como se puede comprobar casi todos los países mejoran sensiblemente sus resultados con el paso del tiempo. Dinamarca sería la que mejoraría más sus resultados en un periodo de tiempo más corto, debido a que tiene los planes más ambiciosos de introducir renovables. Alemania reduciría muy poco sus emisiones en un primer momento, debido probablemente a que en el periodo 2018-2030 está previsto que se cierren todos los reactores nucleares del país, generación libre de emisiones de GEI. España conseguiría reducir sus emisiones en casi un 80% para 2050, una cifra muy ambiciosa. Francia es el único país que aumentaría sus emisiones con el paso del tiempo, ya que su transición energética pasa por cambiar la generación nuclear, que está mayormente libre de emisiones de GEI por energías renovables, que emiten muy poco durante su ciclo de vida. El aumento de la generación total contribuiría a hacer que las emisiones subiesen considerablemente. Por último, aunque Polonia conseguiría reducir considerablemente sus emisiones en ese periodo de tiempo, lo haría de manera mucho más modesta que el resto de los países (excepto Francia), porque su transición energética sería mucho más lenta y con menos alcance que el resto.

También se ha realizado en el presente informe un breve análisis económico en el que se analiza cómo pueden afectar las transiciones energéticas a la economía. Se ha concluido que no va a afectar en gran medida porque los precios de las energías renovables van a ir haciéndose progresivamente más competitivos y porque los costes de los combustibles fósiles van a ir creciendo, debido principalmente al aumento de los costes de emisión de CO₂ marcados por la UE y a la reducción de ayudas a este tipo de generación.

Conclusiones finales

Algunos de los resultados obtenidos son bastante lógicos y se podían predecir de antemano, y otros son muy sorprendentes. Las principales conclusiones obtenidas de este ACV son:

- De entre todos los combustibles fósiles el más perjudicial es el lignito.
- El gas natural sería el único combustible fósil que conseguiría permanecer en los mixes, debido a que contamina menos que el resto, tiene un buen rendimiento y puede funcionar de apoyo cuando las renovables no generan lo suficiente.
- La energía nuclear parece a priori la mejor entre las no renovables, y casi también entre las renovables. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el ACV no presta atención al riesgo de accidente o al tratamiento de los residuos radiactivo, que son graves inconvenientes a tener en cuenta.
- De entre las renovables la eólica parece ser la que menos inconvenientes tiene.
- La solar fotovoltaica tiene un impacto muy importante en el agotamiento abiótico.
- Francia sería el único país que no recortaría sus emisiones. Esto se debe a que sus planes pasan por sustituir la nuclear, que no emite GEI, por renovables. El aumento de la demanda haría que aumentara a su vez la generación de GEI.
- Dinamarca tiene los planes más ambiciosos y, por tanto, tendría los mejores resultados en un corto periodo de tiempo.
- Alemania y España cosecharían resultados muy parecidos en cuanto a reducción de emisiones.
- Polonia conseguiría también reducir sus emisiones, aunque a una escala bastante menor que el resto de los países, excepto Francia.

PALABRAS CLAVE

- Análisis de ciclo de vida
- Mix energético
- Generación eléctrica
- Impacto ambiental
- Calentamiento global
- Sostenibilidad
- Tecnología de generación

COMPARISON OF THE SUSTAINABILITY OF THE ENERGY MIXES OF DIFFERENT COUNTRIES OF THE EUROPEAN UNION FROM THE PERSPECTIVE OF LIFE CYCLE ASSESSMENT

Author: Benito Adrados, Diego

Directors: Martín Sastre, Carlos; Santos Montes, Ana María

Collaborating organisation: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

Climate change is one of the most worrying problems at a global level, both for governments and public opinion, and one of the most debated. A large part of the scientific community defends that global warming is a result of human activity. They maintain that, since the beginning of the industrial revolution, and especially since the beginning of the 20th century, the increase in industrial activity itself and the massive use of fossil fuels has led to an exponential increase in greenhouse gas emissions, which in turn leads to an increase in the average temperature of the planet.

For these reasons, for a few decades now, governments and various supranational entities have signed treaties aimed at tackling the causes of climate change. Among the most important are the Stockholm Conference, the Kyoto Protocol and the Climate Summit in Paris, held in 2015. These treaties establish, among other measures, certain targets for reducing greenhouse gas emissions that countries must comply with.

This project will analyse the current energy situation in different European Union countries and compare the sustainability of their energy mixes using the Life Cycle Assessment (LCA) tool. It will be possible to see in this way the measures that each state will have to implement in order to adapt to the terms established by the EU and how these measures can affect the environment.

LCA is a very useful tool when assessing the environmental impacts caused by a product or process during its entire useful life, from cradle to grave. This tool has been widely used in recent times to study the impacts of the different parts that make up electrical systems, i.e. generation plants, power lines, substations, etc. On top of that, most of the environmental impact of an electrical system corresponds to the power plants where the energy is produced, so most of the work is focused on these. By comparing the environmental impacts produced by certain forms of generation with respect to others, it is possible to find out which is the most sustainable energy mix possible.

Simapro, the most widely used life cycle analysis software in the world, has been used as the LCA software. Some of the reasons why this program has been chosen are that it has access to the Ecoinvent database (the most used in LCAs), which is constantly updated and is not obsolete and that the results it offers are simple and easy to analyze.

Within the software, 11 categories of environmental impact have been analysed, which are those offered by the CML-IA baseline V3.02 method, the one used in the present project.

Five different countries of the European Union have been studied in this project. These countries have very different energy mixes and because they give a general idea of what electricity generation on European soil is like. The countries chosen are:

Denmark

It is a northern European country with a population of some six million and one of the highest Human Development Indexes in the world. This project has been studied as an example of a country that is strongly committed to renewable energy and is that approximately 60% of the electricity generated in 2017 in the country comes from renewable sources, mainly wind and biomass. The rest of the generation is completed by fossil fuels, mainly coal, but also natural gas.

In the near future, Denmark will continue to bet heavily on clean energy and decarbonize the mix. For this reason, in June 2018, all parties in the Danish parliament promised that by 2030 100% of electricity generation in the country will come from renewable sources and that 100% clean energy will be achieved by 2050.

Germany

It is the most populous country in the EU and one of the largest economies in the world. Its powerful industrial sector and large population make it Europe's largest energy consumer. The country has invested heavily in renewable energies and has managed to cover 36% of its generation with this type of energy alone. On the other side of the coin, it is also a country heavily dependent on coal. The rest of its mix is completed by nuclear and gas plants.

Germany's future plans include decarbonizing and dismantling nuclear power plants, and increasing renewables, mainly wind and photovoltaic energy.

Spain

This country will be studied as an example of a country with a very diversified energy mix. There is no predominant technology, and you can find nuclear energy, wind, combined cycles, hydro, cogeneration and, to a lesser extent, solar photovoltaic, thermal, renewable waste, etc.

The future objectives are to increase the share of renewables, wind and solar photovoltaic, the latter with great potential for growth in the country, and to eliminate coal-fired power plants in the short term.

France

The second largest consumer of electrical energy in Europe will be studied as an example of a country with a technology that clearly predominates over the rest, which is nuclear. Approximately three quarters of the generation comes from this source, and the rest of the mix is completed by hydropower, gas, wind, solar and coal.

It has been proposed to reduce the importance of nuclear power to 50% by 2035 and to bet strongly on renewables with more potential, such as wind and photovoltaic.

Poland

Like France, this country also has a very predominant technology, coal, which is very polluting. This is because this resource is abundant in the country and therefore very cheap. The rest of the mix is completed by wind, biomass and natural gas.

Poland aims to decarbonize its mix, but not drastically, and gradually introduce renewable energies that have potential in the country, such as wind or biomass.

LCA

The first thing that has been done in Simapro has been to compare the environmental impacts caused by the different types of generation technologies and the following conclusions have been drawn:

- Of all fossil fuels the most damaging is lignite, which has the greatest impact on eutrophication and different types of ecotoxicity, and a similar impact to fossil fuels in the rest of the fields.
- Oil derivatives also have a very considerable environmental impact, mainly in the destruction of the ozone layer, but also in the generation of GHGs and in acidification.
- Pumping energy has much more serious impacts than it might seem a priori.
- Nuclear energy has hardly any effect on the environment, only on the destruction of the ozone layer. Most of the environmental impacts that occur in nuclear generation do not correspond to the operation phase, but mostly to the uranium extraction and enrichment phase.
- Abiotic depletion is a very particular case among environmental impacts, as it is the only one where clean energy sources affect more than fossil fuels or nuclear. This is mainly due to the extraction of materials needed to produce photovoltaic panels and wind turbines.

Then a comparison has been made between the current energy mixes of the different countries with each other, assuming that they all generated the same thing. The following conclusions have been drawn:

- As could have been predicted from the outset, the mix that causes the greatest environmental impact in relative terms is the Polish, which is the most dependent on fossil fuels and in which renewable energies have the least importance.
- The French generation seems to be the most environmentally friendly and is only more relevant than the others in the destruction of the ozone layer, which is where nuclear energy has the greatest impact.
- In the case of Spain, its mix is quite balanced and does not stand out especially in any category, only a little in the destruction of the ozone layer, probably because it is the second country after France in which the nuclear within the mix has more weight and also due to the great importance of natural gas plants.
- Denmark also presents itself as a fairly balanced country that does not stand out in any category. However, being the country with the highest share of renewables among those studied, one would expect its impacts to be by far the smallest, but this is not the case at all. This is because removing renewables, the rest of the generation of the country corresponds practically only to fossil fuels, especially coal, so its mix is not as clean as it might seem at first.
- Finally, Germany has the second highest impact mix overall, only behind Poland. In this case, the country's significant share of renewables compensates for the importance of coal and lignite and a relatively balanced mix is achieved.

An LCA has been made for each country comparing the current scenario with possible future scenarios for 2030 and 2050. For all countries the future results greatly improved the current ones, except in those fields in which renewable energies have a greater impact than conventional ones, such as in abiotic depletion or some types of ecotoxicity.

The environmental impact on which the focus is most likely to be placed is global warming, which is measured in CO₂ equivalent emissions. If future scenarios are compared with current mixes, the following results are obtained:

Tabla 2: Variation of the CO2 emissions in future scenarios

	Current scenario	2030	2050
Denmark	100,00%	25,89%	-
Germany	100,00%	90,96%	38,24%
Spain	100,00%	50,39%	20,74%
France	100,00%	133,78%	135,58%
Poland	100,00%	87,75%	63,59%

It should be mentioned that there is no scenario for 2050 in Denmark because, as has been said before, the country expects 100% of its energy to come from renewable sources by 2030. On the other hand, in the project there are two possible scenarios for the year 2030 in Spain, which are included in the National Energy and Climate Plan, but in the table, it has been decided to put only the trend scenario.

As can be seen, almost all countries improve their results significantly over time. Denmark would be the one that would improve its performance more in a shorter period of time, because it has the most ambitious plans to introduce renewables. Germany would reduce its emissions very little in the first place, probably due to the fact that in the period 2018-2030 it is foreseen that all the country's nuclear reactors, which generate no GHG emissions, will be closed down. Spain would manage to reduce its emissions by almost 80% by 2050, a very ambitious figure. France is the only country that would increase its emissions over time, as its energy transition involves switching from nuclear generation, which is largely free of GHG emissions, to renewable energies, which emit very little during their life cycle. The increase in total generation would contribute to a significant increase in emissions. Finally, although Poland would manage to reduce its emissions considerably in this period of time, it would do so in a much more modest way than the rest of the countries (except France), because its energy transition would be much slower and less far-reaching than the rest.

This report also provides a brief economic analysis of how energy transitions may affect the economy. It has been concluded that it is not going to affect much because renewable energy prices are going to become progressively more competitive and because the costs of fossil fuels are going to increase, mainly due to the increase in CO₂ emission costs set by the EU and the reduction of aid for this type of generation.

Final conclusions

Some of the results obtained are quite logical and could be predicted beforehand, and others are very surprising. The main conclusions obtained from this LCA are:

- Of all the fossil fuels, the most damaging is lignite.
- Natural gas would be the only fossil fuel that would remain in the mixes, because it pollutes less than the rest, has a good performance and can work in support when renewables do not generate enough.
- Nuclear energy seems a priori to be the best among non-renewables, and almost also among renewables. However, it should be borne in mind that LCA does not pay attention to the risk of accident or to the treatment of radioactive waste, which are concerns to be taken into account.
- Of all the renewables, wind power seems to have the fewest drawbacks.
- Photovoltaic solar has a very important impact on abiotic depletion.

- France would be the only country not to cut its emissions. This is because its plans are to replace nuclear, which does not emit GHGs, with renewables. The increase in demand would in turn increase the generation of GHGs.
- Denmark has the most ambitious plans and would therefore have the best results in a short period of time.
- Germany and Spain would reap very similar results in terms of emission reductions.
- Poland would also succeed in reducing its emissions, albeit on a much smaller scale than the rest of the countries except France.

KEYWORDS

- Life cycle assessment.
- Energy mix.
- Electricity generation.
- Environmental impact.
- Global warming.
- Sustainability.
- Technology.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

Especialidad Eléctrica

**COMPARATIVA DE LA
SOSTENIBILIDAD DE LOS MIXES
ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES
EUROPEOS BAJO LA PERSPECTIVA
DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

Autor: Diego Benito Adrados

Directores: Ana María Santos Montes y Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio 2019

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	17
2.	MOTIVACIÓN.....	19
3.	ESTADO DEL ARTE	21
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL ACV	22
3.2.	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS	24
3.2.1.	COMBUSTIBLES FÓSILES.....	24
3.2.2.	FUENTES RENOVABLES.....	25
3.2.3.	ENERGÍA NUCLEAR.....	29
3.2.4.	COSTES POR TECNOLOGÍAS ACTUALES Y FUTUROS.....	30
3.3.	TERRITORIOS	31
3.3.1.	DINAMARCA	31
3.3.2.	ALEMANIA	33
3.3.3.	ESPAÑA.....	35
3.3.4.	FRANCIA	41
3.3.5.	POLONIA.....	45
4.	ACV	49
4.1.	DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL OBJETIVO	49
4.2.	ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL ACV	50
4.2.1.	Descripción del proceso	50
4.2.2.	Principales hipótesis y limitaciones.....	52
4.2.3.	Análisis de inventario de la generación de los países analizados	53
4.3.	INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	67
4.3.1.	Tecnologías de generación.....	67
4.3.2.	Comparativa general de los países.....	73
4.3.3.	Resultados Dinamarca.....	75
4.3.4.	Resultados Alemania	76
4.3.5.	Resultados España.....	78
4.3.6.	Resultados Francia	80
4.3.7.	Resultados Polonia	82
4.3.8.	Análisis económico	84
5.	CONCLUSIONES	87
6.	REFERENCIAS.....	89
	Bibliografía	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Correlación entre CO2 y temperatura media global [3].....	17
Figura 2: Cobertura de la demanda eléctrica Islas Canarias. Fuente: REE [11].....	25
Figura 3: Mapa de potencial de la energía termosolar [13].....	26
Figura 4: Potencia de aerogeneradores en función del tamaño [16].	27
Figura 5: Generación eléctrica en Dinamarca 2017. Fuente: Agencia Danesa de la Energía [22]. Elaboración propia.	31
Figura 6: Evolución de la potencia instalada en Dinamarca 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia.	32
Figura 7: Parques eólicos marinos en Dinamarca 2017	32
Figura 8: Generación eléctrica en Alemania 2018. Fuente: Agora Energiewinde [25]. Elaboración propia	33
Figura 9: Potencia instalada en Alemania 2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia	34
Figura 10: Evolución de la potencia instalada en Alemania 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia	35
Figura 11: Generación eléctrica en España 2018. Fuente: REE [11]. Elaboración propia	36
Figura 12: Evolución de la potencia instalada en España 1990-2015 [10].....	36
Figura 13: Reactores nucleares en España. Fuente: CSN [30].....	38
Figura 14: Potencia eólica instalada en España por comunidades 2017. Fuente: REE [34].....	38
Figura 15: Potencia fotovoltaica instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34].....	39
Figura 16: Potencia termosolar instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34]	40
Figura 17: Potencia hidráulica instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34]	40
Figura 18: Generación eléctrica Francia 2018. Fuente: RTE [36]. Elaboración propia.....	41
Figura 19: Producción hidráulica Francia 2016-2018. Fuente: RTE [36]	42
Figura 20: Evolución de la potencia instalada en Francia 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia.....	43
Figura 21: Reactores nucleares en Francia 2011. Fuente: RFI [39]	44
Figura 22: Distribución de la energía hidráulica en Francia. Fuente: RTE [36]	44
Figura 23: Centrales de gas y ciclo combinado en Francia 2018. Fuente: RTE [36]	45
Figura 24: Distribución de la energía fotovoltaica en Francia. Fuente: RTE [36]	45
Figura 25: Generación eléctrica en Polonia 2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia	46

Figura 26: Evolución de la potencia instalada en Polonia 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia.....	47
Figura 27: Ejemplo de los procesos principales que incorpora el modelado de la electricidad en baja tensión para un país	51
Figura 28: Producción eléctrica en Alemania 2005-2050. Fuente: Energiewinde [25].....	55
Figura 29: Comparativa tipos de tecnologías de generación (1).....	68
Figura 30: Comparativa tipos de tecnologías de generación (2).....	69
Figura 31: Comparativa ACV centrales nucleares tipo PWR y BWR.....	71
Figura 32: Comparativa ACV tipos de eólica	72
Figura 33: Comparativa mix países	73
Figura 34: Comparativa Dinamarca escenario actual y 2030.....	75
Figura 35: Comparativa Alemania escenario actual, 2030 y 2050	77
Figura 36: Comparativa España escenario actual,2030 y 2050.....	79
Figura 37: Comparativa Francia escenario actual, 2030 y 2050.....	81
Figura 38: Comparativa Polonia escenario actual, 2030 y 2050	83
Figura 39: Evolución del precio de generación por tipo de tecnología. Fuente: IEA [51]	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variación de las emisiones de CO ₂ en los escenarios futuros con respecto al actual.....	5
Tabla 2: Variation of the CO ₂ emissions in future scenarios	10
Tabla 3: Coste en €/kW de los distintos tipos de tecnologías de generación en 2014. Fuente: IEA [20]	30
Tabla 4: Generación eléctrica Dinamarca 2017. Fuente: ADE [22]	53
Tabla 5: Generación eléctrica Dinamarca 2030. Elaboración propia	54
Tabla 6: Generación eléctrica Alemania 2018. Fuente: Agora Energiewinde [33]	55
Tabla 7: Generación eléctrica Alemania 2030 y 2050. Fuente: Energiewinde [25]	56
Tabla 8: Generación eléctrica Alemania 2018. Fuente: REE [11]	57
Tabla 9: Generación eléctrica España 2030 tendencia. Fuente: PNIEC.	58
Tabla 10: Generación eléctrica España 2030 objetivo. Fuente: PNIEC	58
Tabla 11: Generación eléctrica España 2050.	59
Tabla 12: Generación eléctrica Francia 2018. Fuente: RTE [47]	60
Tabla 13: Generación eléctrica Francia 2030.	61
Tabla 14: Generación eléctrica Francia 2050.	62
Tabla 15: Generación eléctrica Polonia 2016. Fuente: Comisión Europea [4].....	63
Tabla 16: Escenario generación eléctrica Polonia 2030.....	64
Tabla 17: Escenario generación eléctrica Polonia 2050.....	65
Tabla 18: Porcentajes de generación en el mix de alta tensión de todos los países	66
Tabla 19: Impactos ambientales por cada kWh generado de cada tecnología	70
Tabla 20: Comparativa ACV centrales nucleares tipo PWR y BWR	72
Tabla 21: Impactos por kWh de la energía eólica	73
Tabla 22: Comparativa mix de países.....	74
Tabla 23: Impactos ambientales mixes de Dinamarca.....	75
Tabla 24: Emisiones de CO ₂ eq. de la generación de Dinamarca	76
Tabla 25: Impactos ambientales mixes de Alemania por kWh	77
Tabla 26: Emisiones de CO ₂ eq. de la generación de Alemania	78
Tabla 27: Impactos ambientales mixes de España por kWh.....	79
Tabla 28: Emisiones de CO ₂ eq. de la generación de España	80
Tabla 29: Impactos ambientales mixes de Francia	81
Tabla 30: Emisiones de CO ₂ eq. de la generación de Francia	82
Tabla 31: Impactos ambientales mixes de Polonia	83
Tabla 32: Emisiones de CO ₂ eq. de la generación de Polonia.....	84

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los problemas que más preocupan a nivel global tanto a los gobiernos como a la opinión pública, y uno de los que más debate genera. Según la Asociación Española de Meteorología *se trata de una variación en el estado del sistema climático que perdura durante periodos de tiempo suficientemente largos para suponer que se ha alcanzado un nuevo equilibrio* [2]. Parece claro que en estos momentos nos encontramos en esta situación.

Los efectos del cambio climático son muchos y muy variados, pero todos ellos tienen consecuencias desastrosas para el medio ambiente: extinción de especies, elevación del nivel del mar, deforestación y desertificación, etc. Muchos expertos afirman que los daños producidos son irreversibles. Sin embargo, se está a tiempo de tomar medidas para, si no es posible ya reparar el daño hecho, por lo menos, minimizar los efectos que pueda tener aún sobre nuestro planeta.

Para intentar resolver este problema la primera pregunta a la que habría que dar respuesta sería por qué se produce el cambio climático, qué causas hay detrás de esta situación. Una gran parte de la comunidad científica defiende que el calentamiento global es provocado por causas endógenas, es decir, que es provocado por la actividad humana. Sostienen que, desde el inicio de la revolución industrial, y especialmente desde principios del siglo XX, el aumento de la propia actividad industrial y el uso masivo de combustibles fósiles ha hecho que las emisiones de gases de efecto invernadero se incrementen de forma exponencial, lo que a su vez conlleva un aumento de la temperatura media del planeta. De todos estos gases, entre los que podríamos encontrar el vapor de agua, el ozono y el metano, el **dióxido de carbono** es el que más preocupa a día de hoy. Como se puede observar en la Figura 1, parece claro que existe una correlación bastante marcada entre los niveles de CO₂ en la atmósfera y la temperatura media del planeta. Es por esto por lo que reducir las emisiones de CO₂ parece ser una de las claves para combatir el cambio climático, ya que así se estaría atajando una de las principales causas que lo producen.

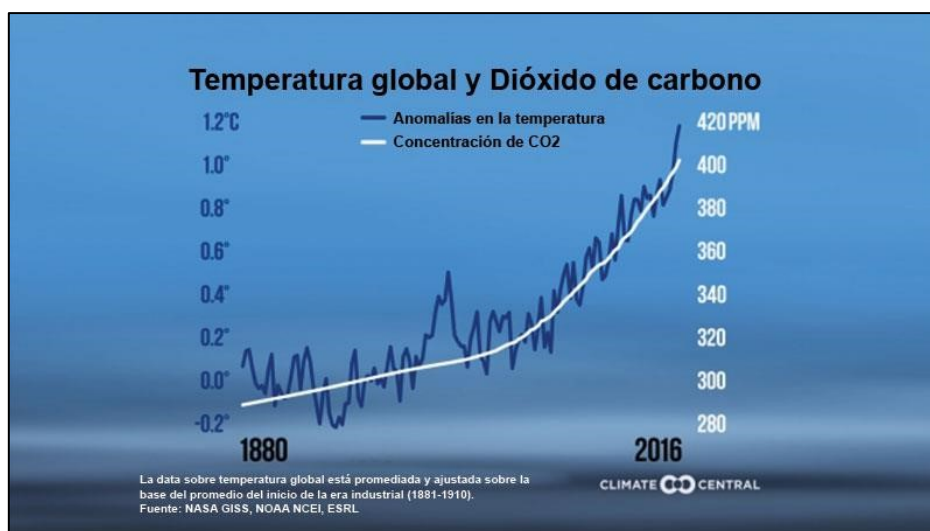


Figura 1: Correlación entre CO₂ y temperatura media global [3]

Por estos motivos, desde hace unas décadas, tanto gobiernos como distintas entidades supranacionales han firmado algunos tratados cuyo objetivo es atajar las causas que producen el cambio climático. Entre los más importantes destacan la Conferencia de Estocolmo, el **Protocolo de Kioto** o la cumbre del Clima en París, celebrada en 2015. En

estos tratados se establecen, entre otras medidas, ciertas metas de **reducción de emisiones de gases de efecto invernadero** que los países deben acatar.

Uno de los sectores que más se ve afectado por este tipo de tratados es el de la **energía**, y es que, según la Comisión Europea, este sector es el responsable de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero que produce el ser humano [4]. Esto es debido a que la generación eléctrica hoy en día depende en gran medida de las **centrales térmicas**, ya sean de carbón, de gas o de ciclo combinado, en las que se quema un combustible para obtener vapor de agua sobrecalentado que haga girar una turbina y genere electricidad. Este tipo de centrales son focos enormes de emisión de gases de efecto invernadero, y de otras sustancias que, aunque no contribuyan al calentamiento global, son nocivas y peligrosas para la salud.

A pesar de que en las últimas décadas se viene produciendo un incremento del peso de las energías renovables en la generación eléctrica, especialmente en el Viejo Continente, estos cambios son demasiado lentos. Para agilizar las reformas, la Unión Europea, a la vanguardia de la lucha contra el cambio climático, también ha establecido unos objetivos muy ambiciosos de emisiones y generación renovable para los próximos años que deben cumplir todos los países. Estos objetivos son:

- Para el año 2030:
 - 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990.
 - Al menos 27% de cuota de energías renovables.
 - Aumento de la eficiencia energética en un 27-30%.
 - 15% de interconexión eléctrica (es decir, el 15% de la electricidad generada en la UE debe poder transportarse a otros Estados miembros).
- Para el año 2050:
 - 80-95% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990. La [Hoja de Ruta de la Energía para 2050](#) muestra el camino para alcanzar esa meta.

En este proyecto se va a analizar la actual situación energética de distintos países de la Unión Europea y se comparará la sostenibilidad de sus mixes energéticos utilizando la técnica **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**. Se podrá ver de esta manera las medidas que deberá implementar cada estado para adaptarse a los términos marcados por la UE y de qué manera estas medidas pueden afectar al medio ambiente.

2. MOTIVACIÓN

La transición energética que se va a realizar en los próximos años en gran parte de Europa y del mundo, es uno de los acontecimientos que más pueden marcar el devenir del planeta y de la humanidad en el próximo siglo. Si se toman buenas decisiones y se reducen en gran medida las emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que se puedan mitigar gran parte de los efectos del cambio climático. Es, sin ninguna duda, uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI.

Por otro lado, caminar hacia modelos de mixes energéticos con mayor penetración de renovables puede ser interesante desde el punto de vista económico para ciertos países del Viejo Continente, ya que podrían reducir su dependencia energética al dejar de consumir combustibles fósiles y uranio.

3. ESTADO DEL ARTE

El análisis de ciclo de vida es una herramienta muy útil a la hora de valorar los impactos medioambientales que causa un producto o un proceso durante toda su vida útil, *from cradle-to-grave*. Esta herramienta se ha utilizado mucho durante los últimos tiempos para estudiar los impactos de las distintas partes que conforman los sistemas eléctricos, es decir, centrales de generación, líneas eléctricas, subestaciones, etc. Sobra decir que la mayor parte del impacto ambiental de un sistema eléctrico corresponde a las centrales donde se produce la energía, por lo que la mayoría de los trabajos se centran en éstas. Comparando los impactos ambientales que producen ciertas formas de generación con respecto a otras, es posible averiguar cuál es el mix energético más sostenible posible. En algunas ocasiones los resultados obtenidos son sorprendentes. En un estudio realizado por científicos de la Universidad de Utrecht se analizaba el impacto ambiental de tres centrales térmicas, una del año 2000, una de reciente construcción y otra con mecanismos de captura, transporte y almacenamiento de CO₂. Aunque esta última era la que menos cantidad de dióxido de carbono emitía, en todos los demás parámetros era manifiestamente peor que la que la central térmica moderna y en algunos que la antigua [5].

También se han encontrado artículos muy interesantes que utilizan la técnica ACV para valorar los impactos medioambientales que producían las energías renovables [6] [7]. Algunos de los resultados son sorprendentes, y es que las energías renovables no son tan limpias como en un principio pudiera parecer. Durante las etapas de construcción de aerogeneradores, placas solares, etc. se producen unos daños que a menudo son despreciados, pero que merece la pena analizar. Además, hay que tener en cuenta otro tipo de inconvenientes causados por este tipo de energías que no se pueden cuantificar, pero no por ello dejan de ser importantes. Un ejemplo podría ser el impacto paisajístico que producen los grandes parques eólicos.

Uno de los estudios más interesantes que se ha encontrado es el realizado por investigadores españoles de la Universidad Rey Juan Carlos en el que se utiliza el ACV para medir el impacto que tiene la generación eléctrica en España [8]. En este trabajo se analizan dos escenarios diferentes: uno de ellos es el BaU (Business as Usual), en el que la transformación del mix sigue la tendencia actual, y otro en el que se pone un objetivo de reducción de emisiones de CO₂ del 80% para el año 2050 con respecto a los niveles de 1990. Las diferencias finales de impactos ambientales y de penetración de renovables en los dos casos son muy notables. En este proyecto se va a seguir el mismo procedimiento y se van a elaborar varios escenarios para considerar todas las opciones que existen.

En cuanto a cómo se han conseguido los datos necesarios para realizar los ACVs, la mayoría de los datos de generación se han conseguido de informes realizados por los operadores del sistema de cada país, por los ministerios de energía o por la Comisión Europea. Por poner algunos ejemplos, para Francia se ha obtenido la información de *Réseau de Transport d'Électricité* y para Dinamarca de *Energistyrelsen*.

Una vez analizados estos artículos y muchos otros se ha llegado a la conclusión de que existe una abundante investigación sobre los impactos ambientales de la generación eléctrica y de transiciones energéticas. Sin embargo, no se ha encontrado ningún trabajo que compare los mixes energéticos de distintos países y que analice a qué se deben las diferencias entre ellos. Además, tampoco se ha encontrado ningún trabajo que analice si las transiciones energéticas que se estudian en los ACVs son posibles desde un punto de

vista económico y tecnológico o no. Y es que algunas de las transformaciones requeridas para conseguir una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero podrían suponer un coste desmesurado que la mayoría de los países no podría afrontar.

Este proyecto pretende aportar ejemplos de países reales que van a tener que aplicar ciertas medidas para realizar la transición energética, pero sin dejar de lado los aspectos económicos y técnicos que podrían de cierta manera limitar el alcance y la profundidad de las medidas.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ACV

El ACV es una “herramienta de gestión ambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo” [9] “*from cradle-to-grave*” (de la cuna a la tumba).

Aporta una visión más completa de todo el proceso, y tiene en cuenta, no sólo los impactos que puede tener un proceso durante su operación, sino también durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

En todas las etapas del proceso se analizan las entradas, como por ejemplo energías o materias primas, y las salidas, como emisiones o residuos.

Normativa

Existen dos normas ISO (*International Organization for Standardization*) que regulan el Análisis de Ciclo de Vida, que son la ISO 14040:2006 y la ISO 14044:2006.

La norma ISO 14040:2006 describe los principios y el marco de referencia para el ACV, incluyendo:

- La definición del objetivo y el alcance del ACV.
- La fase de análisis del inventario de ciclo de vida.
- La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida.
- La fase de interpretación del ciclo de vida.
- El informe y la revisión crítica del ACV.
- Las limitaciones del ACV.
- La relación entre las fases del ACV, y
- Las condiciones de utilización de juicios de valor y de elementos opcionales.

Fases del Análisis de Ciclo de Vida

La norma ISO 14040:2006 establece cuatro fases en el ACV:

- a. La fase definición del objetivo y del alcance

El alcance de un ACV depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y la amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular. En esta etapa se marcarán los límites del estudio que se va a realizar y se establecerán los objetivos principales y el público al que va dirigido.

- b. La fase del análisis del inventario

Es un inventario de los datos de análisis de entrada y de salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.

En el presente proyecto los datos que más relevancia tienen son los datos de generación de cada país, qué porcentaje de generación corresponde a cada tecnología. También puede ser importante otra información como las pérdidas en la red.

c. La fase de evaluación del impacto ambiental

El objetivo de esta fase es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema o de un producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. Se clasifican los impactos según distintas categorías de impacto ambiental, como pueden ser aporte del producto al calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, ecotoxicidad, eutrofización, etc.

d. La fase de interpretación

Es la fase final del procedimiento del ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del Inventario de Ciclo de Vida o de la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y el alcance definidos.

Algunos impactos van a ser analizados con más profundidad que otros, sobre todo porque unos están en el punto de mira de todas las políticas medioambientales mientras que otros no son apenas mencionados en dichas políticas.

Límites del ACV

Los límites del presente ACV son los siguientes:

- Límites geográficos.
- Límites temporales.

Herramienta informática utilizada

Como software para realizar el ACV se ha utilizado Simapro, que es el programa informático de análisis de ciclo de vida más utilizado a nivel mundial. Fue desarrollado por la empresa holandesa PréConsultant. La elección de este software para la realización del ACV se debe a múltiples motivos:

- Su principal característica es que compara y analiza complejos productos descomponiéndolos en todos sus materiales y procesos.
- Tiene acceso a la base de datos de Ecoinvent, que es la base de datos más utilizada para la elaboración de ACVs.
- Aunque modelar los escenarios y realizar los análisis tiene una dificultad notable, los resultados que se ofrecen son sencillos y fáciles de comparar y pueden ser comprendidos por un público no especializado.
- El programa es actualizado con cierta frecuencia y nunca queda obsoleto.
- Se utiliza en más de 80 países, por lo que cuenta con un reconocimiento a escala global.

Base de datos

Como ha sido indicado en el apartado anterior, la base de datos más utilizada para la elaboración de ACVs y la que se ha utilizado en este proyecto es Ecoinvent, en concreto la versión 3.

Esta base de datos contiene un Inventario del Ciclo de Vida, resultado de un intenso trabajo conjunto de muchos institutos suizos para actualizar e integrar diferentes bases de datos en una sola.

Las características que hacen que Ecoinvent sea la base de datos más utilizado actualmente en el mercado son las siguientes:

- Cubre una gran variedad de datos.
- Al igual que Simapro, se actualiza constantemente.
- Está muy bien documentada.
- Especificación constante de datos inciertos.

3.2. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS

En este apartado se van a presentar de manera breve y concisa las principales tecnologías de generación de energía eléctrica que existen en la actualidad y que van a aparecer de manera constante a lo largo de este informe. No se van a incluir aquellas tecnologías que aún no están consolidadas o que no tienen apenas relevancia en los países que se van a estudiar, como la mareomotriz, geotérmica o undimotriz. Estas formas de aprovechamiento de energía sin duda pueden tener cabida en un futuro y no hay duda de que algunas tienen muchísimo potencial, pero de momento no tienen demasiado peso en los mixes europeos.

Las centrales eléctricas son las instalaciones donde se realiza la conversión energética desde una fuente de energía primaria a energía eléctrica. Según el diccionario de la Real Academia de Ingeniería, una fuente de energía primaria es toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. Se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Combustibles fósiles: se trata de restos orgánicos fosilizados hace millones de años que pueden transformar mediante combustión la energía química que poseen en energía calorífica. Los principales son el petróleo, el gas natural y los distintos tipos de carbón (turba, lignito, hulla, antracita).
- Fuentes renovables: se trata de recursos que están presentes en la naturaleza de forma abundante y se pueden emplear directamente. El sol, el viento, las corrientes de agua o la geotermia son ejemplos de fuentes renovables.
- Combustible nuclear: se trata de aprovechar la energía calorífica que se desprende en la fisión de átomos pesados como el uranio o el plutonio. También se puede aprovechar la energía de la fusión de átomos ligeros, pero esta forma no está todavía demasiado consolidada.
- Energía electroquímica: se basa en la energía química que pueden acumular ciertos compuestos que se combinan en reacciones de oxidación/reducción (REDOX) intercambiando electrones [10].

3.2.1. COMBUSTIBLES FÓSILES

Los combustibles fósiles son muy utilizados hoy en día para generar energía eléctrica, a pesar de ser muy contaminantes y nocivos para el medio ambiente. Su uso está bastante consolidado y constituyen una fuente de energía fiable. Poco a poco se va reduciendo la importancia de estas fuentes en los mixes energéticos, pero todavía quedan en Europa países que dependen mucho de ellos.

Carbón

En las centrales térmicas clásicas, se quema carbón en la caldera produciendo energía calorífica que es transferida a un líquido que se aprovecha en un ciclo termodinámico de Rankine para generar energía eléctrica. Hay varias clases de carbón, que se diferencian básicamente en la composición química y en el poder calorífico. La turba, el lignito, la hulla y la antracita son las más importantes.

Se trata de la forma de generar energía a gran escala que más emisiones de gases de efecto invernadero genera y actualmente está en el punto de mira de todas las políticas medioambientales en la actualidad. Además de los gases de efecto invernadero, producen gran cantidad de escorias y cenizas volátiles, que son los residuos sólidos de la combustión. No hay que olvidar tampoco que la construcción de las grandes centrales térmicas y el transporte de la materia prima también genera un impacto ambiental que va a ser estudiado en el ACV.

Gas natural

El gas natural se puede aprovechar en centrales de gas convencionales, o en centrales de ciclo combinado, que está formadas por una turbina de gas (ciclo Brayton), cuyos humos de escape transfieren su calor residual al fluido de un ciclo de Rankine en una caldera de recuperación. Estas centrales tienen un rendimiento bastante más alto que otro tipo de centrales. Además, son centrales que pueden actuar como base y también dar las puntas de demanda, porque tiene muy bajos tiempo de reacción.

En cuanto a los impactos ambientales, el gas natural emite menos gases de efecto invernadero que el carbón o el petróleo. Durante el proceso de extracción del gas natural, se liberan gases que pueden contaminar las aguas subterráneas y los mares.

Petróleo

Normalmente se utilizan destilaciones de éste como combustible. En los países de Europa no se utiliza demasiado para generar electricidad, solamente en sistemas pequeños como islas o sistemas auxiliares. Por ejemplo, en la siguiente imagen se muestra la cobertura de la demanda de las islas Canarias en el año 2018:

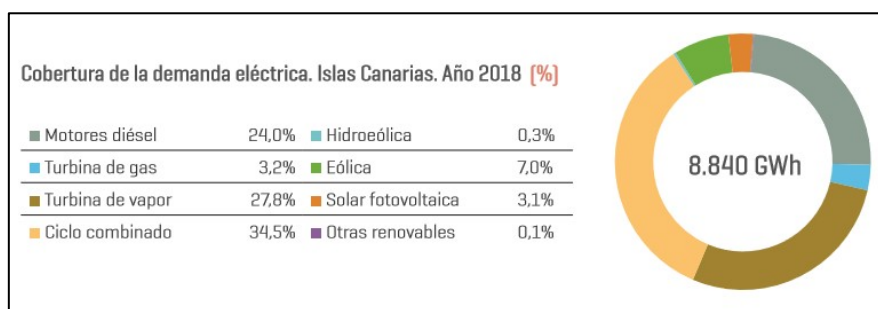


Figura 2: Cobertura de la demanda eléctrica Islas Canarias. Fuente: REE [11]

Se puede observar en la figura 2 que casi una cuarta parte de la generación corresponde a motores diésel. Esta importancia en el mix no es para nada común en sistemas que no estén aislados.

3.2.2. FUENTES RENOVABLES

Entre las principales fuentes renovables se pueden encontrar:

Radiación solar

Se trata del conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Hay dos formas distintas de aprovechar la radiación solar para la generación de energía eléctrica, a partir de centrales termosolares o a partir de paneles fotovoltaicos.

Termosolar

En estas centrales se transforma la radiación solar en energía térmica con la que se calienta un fluido, generalmente agua. Dicho fluido se hace pasar luego por un ciclo termodinámico de Rankine en el que la energía calorífica se transforma en energía mecánica y ésta, mediante un alternador, en energía eléctrica.

Existen muchos tipos de centrales termosolares, pero los dos más importantes son la de canales parabólicos y la de receptor central [12].

Se trata de una tecnología a la que todavía le queda mucho por madurar y por perfeccionarse para ser competitiva, ya que actualmente tiene unos costes de operación y mantenimiento muy elevados. Además, solo es viable en zonas en las que haya suficiente espacio para la construcción de este tipo de centrales y en zonas donde la radiación solar recibida sea bastante elevada, como se muestra en la figura 3.

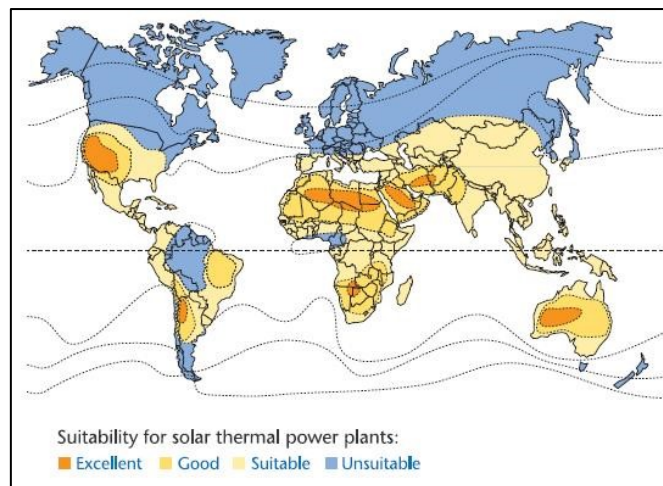


Figura 3: Mapa de potencial de la energía termosolar [13].

Fotovoltaica

En este caso no se necesitaría ningún alternador para obtener energía eléctrica. Se basan en el uso de paneles de diodos fotosensibles, que absorben la radiación solar y la convierten en electricidad [14]. Ésta se transforma de continua a alterna mediante inversores.

Esta manera de aprovechar la radiación solar se ha extendido mucho más que la termosolar, principalmente por su versatilidad y porque los costes que implica son bastante más reducidos. Además, cuenta con muchísima aceptación por la opinión pública porque permite la generación de instalaciones domésticas para cubrir su propio consumo, parcial o totalmente.

Como punto negativo, se podría resaltar la escasa concentración energética de la radiación solar, que obliga a grandes superficies de captación. Además, aunque durante su operación se trate de una energía totalmente limpia, la extracción de los materiales que se

usan para la fabricación de los paneles fotovoltaicos (vidrio, silicio, aluminio, cobre, telurio de cadmio, etc.) sí que genera impactos que no son para nada desdeñables [15].

Viento

Esta fuente de energía primaria está presente y puede ser aprovechada en todo el mundo. Actualmente se trata de la fuente de energía renovable más importante a nivel mundial y se espera que todavía tenga más margen de mejora.

Se basa en aprovechar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica mediante unos grandes dispositivos denominados aerogeneradores. Éstos normalmente se colocan en zonas donde el viento sopla de manera constante e intensa, y alineados perpendicularmente a la dirección dominante del viento. También se pueden situar mar adentro, donde las condiciones de viento son mucho más favorables para la generación de energía eléctrica que en tierra, y se pueden poner aerogeneradores de más potencia. Estos parques eólicos marinos están teniendo un gran desarrollo sobre todo en los países del norte de Europa, que aprovechan la gran plataforma continental del mar Báltico y del mar del Norte para su construcción.

Con el paso de los años, esta tecnología ha ido madurando cada vez más y se han ido fabricando aerogeneradores más grandes y de más potencia. Evidentemente, el impacto ambiental que pueda tener un aerogenerador pequeño, de unos 100KW, no es el mismo que el que pueda tener uno de diez veces más potencia. Se resalta la importancia de esto porque a la hora de realizar el ACV será fundamental tener en cuenta qué parte de la energía eólica es generada por aerogeneradores pequeños y qué parte por los más grandes.

Por otro lado, hay que comentar que normalmente los aerogeneradores de más de 2MW son los que se ponen en los parques marinos y no suele ser normal encontrar aerogeneradores terrestres que superen dicha potencia.

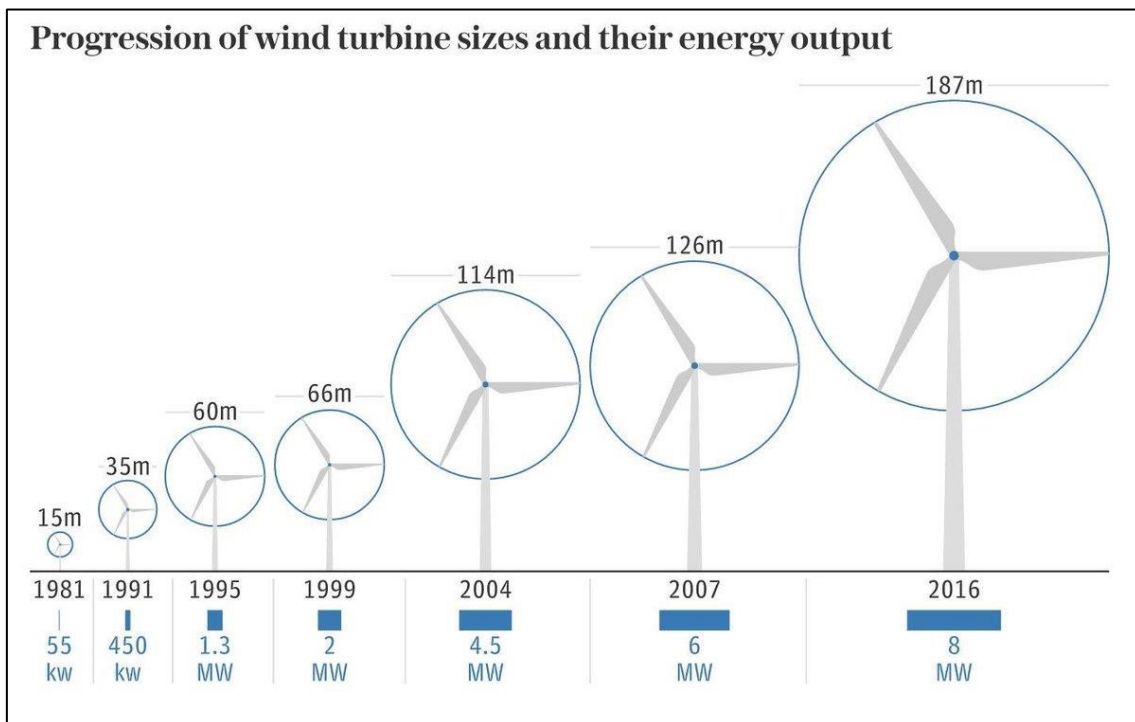


Figura 4: Potencia de aerogeneradores en función del tamaño [16].

Los impactos ambientales de los parques eólicos son mínimos, y prácticamente la totalidad de los mismos se producen durante la etapa de construcción de los aerogeneradores. Se podría destacar que se hace necesario balizar los parques para evitar los impactos de las aves contra los aerogeneradores.

Hidráulica

Es una forma de energía que ha sido aprovechada por el hombre desde hace mucho tiempo. Ya los romanos y los griegos utilizaban ruedas hidráulicas para moler trigo, y fue en el año 1882 cuando se inauguró la primera central hidroeléctrica de la historia [17].

Actualmente existen tres formas de aprovechar la energía del agua:

Centrales de acumulación

En un embalse se almacenan grandes cantidades de agua, que se conducen a la turbina, a la que ceden su energía potencial que se transformará en energía eléctrica. Esta es la forma más convencional de aprovechar la energía hidráulica.

Este tipo de centrales destacan por su versatilidad, ya que simplemente aumentando o disminuyendo el flujo de agua que entra, se puede regular la potencia regulada, y se puede almacenar la fuente de energía primaria el tiempo que sea necesario. Además, son centrales de respuesta inmediata a cualquier variación de la demanda.

En cuanto al impacto ambiental, la construcción de los embalses puede causar alteraciones en el ecosistema de la zona y alteraciones climáticas locales, y es la única fase del ciclo de vida en el que se causan impactos ambientales serios.

Centrales de agua fluyente

Se trata de pequeñas centrales que se colocan en el cauce de los ríos y que aprovechan la energía cinética de la corriente de agua para generar energía eléctrica. Se instalan generalmente en los tramos altos de los ríos, principalmente en alta montaña. Tienen un régimen de explotación distinto al de las centrales de acumulación.

Son centrales cuyo impacto ambiental es bastante más bajo que las centrales de acumulación, ya que para la construcción no es necesario desviar el cauce del río y las obras que hay que hacer son más modestas. Tienen la desventaja de que la generación es muy intermitente y se reduce mucho en años de sequía.

Centrales de bombeo

El agua se bombea desde un embalse a otro que se encuentra en una cota superior, desde el que se puede devolver otra vez al de abajo. Normalmente se aprovechan los tramos horarios de poco consumo para turbinar agua al embalse superior y las puntas de demanda para devolver el agua y generar energía. Este es el único medio para almacenar energía a gran escala que existe en la actualidad.

Biomasa

Se transforma mediante un proceso de combustión la energía química almacenada en los vegetales, que la consiguen almacenando la radiación solar mediante la fotosíntesis, en energía calorífica que se convierte en electricidad mediante un ciclo de Rankine. Se puede utilizar por ejemplo la madera, los excrementos de animales, las cáscaras de frutos secos, los restos de poda y desechos de actividades agrícolas.

Aunque la biomasa emite CO₂ cuando se la somete a un proceso de combustión, esta cantidad de CO₂ fue captada por las plantas durante su etapa de crecimiento. Por esto se puede considerar que la generación de electricidad mediante el empleo de biomasa es libre de emisiones, ya que durante todo el ciclo de vida de la materia prima el balance es cero.

Como punto negativo, los precios de la generación con biomasa todavía no son competitivos frente a los de los combustibles fósiles. Además, un consumo excesivo de biomasa puede llevar a la deforestación de grandes zonas de alto valor ecológico.

Biogás

Los biogases están compuestos por metano y dióxido de carbono, en mayor o menor medida. Las principales fuentes de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales. Se trata de la única energía renovable que puede utilizarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica o como carburante.

3.2.3. ENERGÍA NUCLEAR

En las centrales nucleares se aprovecha la energía que se libera en las reacciones de fisión de átomos pesados, principalmente uranio enriquecido, para generar energía eléctrica. El esquema básico de una central nuclear es muy parecido al de una central térmica clásica. Las reacciones de fisión tienen lugar en el reactor, y dicho calor se traslada a un fluido que luego se aprovecha en un ciclo termodinámico de Rankine para generar energía eléctrica.

Existen varios tipos de centrales nucleares, pero los dos más importantes son:

- *Pressure Water Reactor* (PWR): debido a las condiciones de muy alta presión, el agua no llega al punto de ebullición y se mantiene en estado líquido durante todo el circuito refrigerante [18]. Son las más comunes.
- *Boiling Water Reactor* (BWR): en este caso, el agua sí alcanza condiciones de ebullición. Este tipo de centrales se han desarrollado sobre todo en EEUU, Alemania y Suecia [19].

La generación nuclear es capaz de generar grandes cantidades de energía de manera continua. En cuanto al precio, aunque los costes iniciales son elevadísimos, la larga vida útil de las centrales hace que al final la energía sea bastante barata. Otro punto positivo es que no se producen emisiones de gases de efecto invernadero durante este proceso.

Como punto negativo, durante las reacciones de fisión que se producen en los reactores nucleares se liberan isótopos radiactivos realmente peligrosos, y que hay que confinar para que no afecten a la población.

Además, los accidentes nucleares ocurridos en Chernóbil en 1986 y en Fukushima en 2011 han hecho que esta tecnología cuente con muchos detractores dentro de la opinión pública, por lo que muchos países no se han atrevido a apostar por esta energía y muchos que ya la tenían han optado por cerrar las centrales nucleares antes de que lleguen al final de su vida útil.

Como se ha mencionado anteriormente, durante la operación de las centrales nucleares no se emiten gases de efecto invernadero y se producen muy pocos daños medioambientales. Se podría mencionar que estas centrales se ubican normalmente al lado de los cauces de los ríos debido a la gran cantidad de agua que se necesita en los circuitos de refrigeración. Esta agua es devuelta después al río, normalmente a una

temperatura superior a la normal, lo que puede suponer un daño severo para la fauna y flora del entorno. El resto de los impactos ambientales que causa la energía nuclear están asociados a la construcción de las centrales, el transporte del combustible y, sobre todo, a la fase de extracción y enriquecimiento del uranio, que varios autores han demostrado que es la fase en la que más daños se producen [1].

3.2.4. COSTES POR TECNOLOGÍAS ACTUALES Y FUTUROS

Los costes por tipo de tecnología varían mucho y se pueden distinguir en costes de inversión inicial y costes de operación y mantenimiento. En la siguiente tabla se muestran los datos oficiales de costes de generación en Europa por tipo de tecnología que recoge la Agencia Internacional de la Energía en su informe WEIO2014 [20].

Tabla 3: Coste en €/kW de los distintos tipos de tecnologías de generación en 2014. Fuente: IEA [20]

Tecnología	Costes de inversión (€ 2012 por kW)	Costes de O&M anual (€ 2012 por kW)
<i>Carbón</i>	1300	34
<i>Ciclo combinado</i>	1400	35
<i>Nuclear</i>	5200	76
<i>Hidráulica convencional</i>	1800	41
<i>Hidráulica de agua fluyente</i>	3150	55
<i>Fotovoltaica gran escala</i>	1950	20
<i>Fotovoltaica pequeña escala</i>	2500	26
<i>Termosolar</i>	5650	226
<i>Eólica</i>	1400	36

De la tabla 3 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los costes de los combustibles fósiles (carbón y ciclos) son extremadamente competitivos.
- La nuclear tiene unos costes de inversión y de operación y mantenimiento muy altos, debido a las grandes medidas de seguridad que requieren y a que son necesarios muchos operarios para el correcto funcionamiento de las mismas.
- La hidráulica convencional tiene unos costes relativamente bajos y la de agua fluyente bastante mayores.
- La energía solar fotovoltaica tiene los costes de operación y mantenimiento más competitivos de entre los comparados.
- La energía termosolar es la que tiene de lejos los costes más elevados. Esto se debe a que se tienen que usar materiales muy caros que puedan soportar los cambios de temperatura a lo largo del día y porque necesitan un mantenimiento constante.
- Para ser una energía renovable, la energía eólica tiene unos costes muy competitivos.

Hay que tener en cuenta que los datos anteriores se referían a costes por kilovatio instalado, y no por kilovatio hora generado. Si se hiciese por energía generada saldrían muy beneficiadas aquellas tecnologías que pueden funcionar de manera constante, como

la nuclear, el cabrón o los ciclos, y perjudicadas aquellas cuya generación fuese muy intermitente, como las solares, la eólica o la minihidráulica.

3.3. TERRITORIOS

En este apartado, se realiza una breve presentación de los mixes energéticos de los países que se van a estudiar. Se han escogido países con mixes energéticos muy diferentes entre sí. Algunos muy diversificados y otros con una tecnología muy predominante, algunos con una cuota de renovables muy baja y otros en los que supera el 50%, algunos con mucha dependencia exterior y otros que no.

Para cada uno de los países se analizará la generación en el último año disponible, cómo ha evolucionado la potencia instalada en el país desde el año 1990 y se presentarán los planes que existen para adecuar estos mixes a las nuevas directrices de la Unión Europea.

3.3.1. DINAMARCA

Dinamarca se estudia en este proyecto como país que ha apostado fuertemente por las energías renovables y que ha hecho un gran esfuerzo para garantizar que la generación de energía eléctrica sea limpia y sostenible.

Se trata de un país pequeño, de apenas 43.000 km² y que cuenta con una población de 5.785.766 habitantes [21]. Cuenta con una economía muy desarrollada y es uno de los países con mayor Índice de Desarrollo Humano del mundo.

La generación eléctrica en Dinamarca en el año 2017 se distribuyó de la siguiente manera:

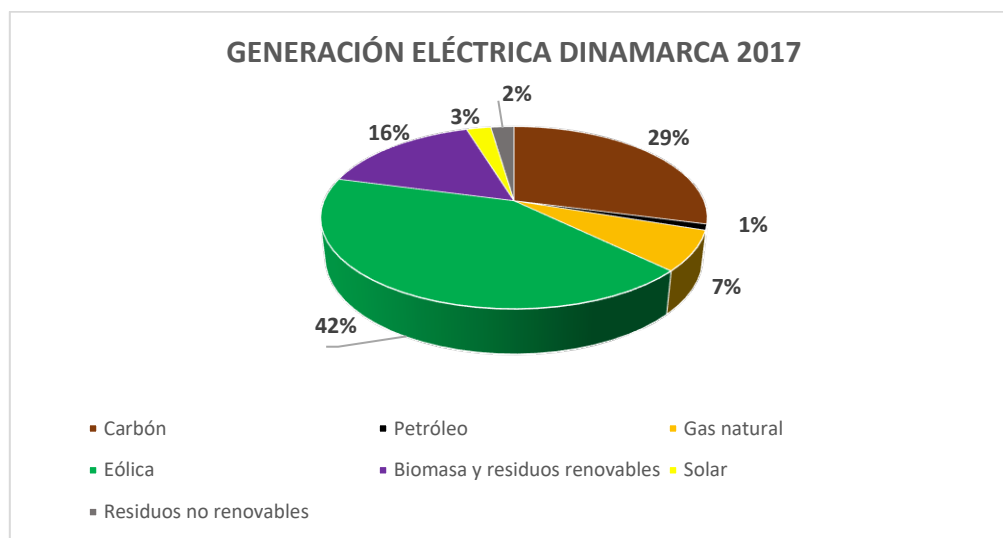


Figura 5: Generación eléctrica en Dinamarca 2017. Fuente: Agencia Danesa de la Energía [22]. Elaboración propia.

En la figura 5 se puede observar que la penetración de las energías renovables en este país es espectacular. Sólo la energía eólica acapara más de un 40% de la generación total, y la suma de esta más las demás energías renovables, que son la biomasa y la solar, llega al 60%. Estos porcentajes de renovables en un país que apenas tiene energía hidráulica son únicos en el mundo.

En la otra cara de la moneda, el 37% del total de generación del país corresponde a combustibles fósiles, un 30% a las centrales térmicas de carbón y un 7% a las centrales de gas. Esto hace que al final las emisiones de gases de efecto invernadero sean considerables.

Dinamarca, al contrario que muchos países de la Unión Europea, no posee ningún reactor nuclear ni tiene planes de construir uno en los próximos años.

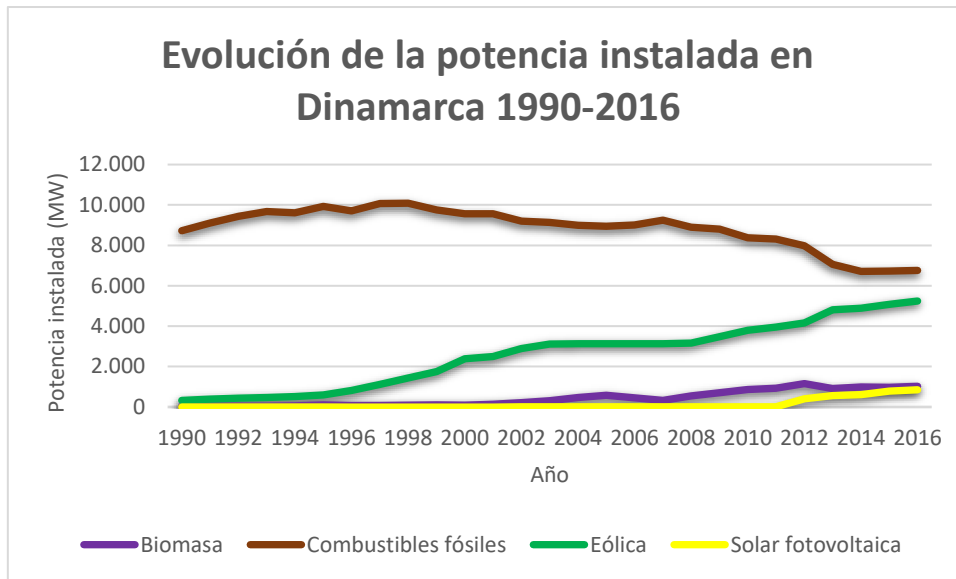


Figura 6: Evolución de la potencia instalada en Dinamarca 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia.

Para hacer un buen análisis de la situación no hay que prestar atención sólo a los datos de generación, sino también a la potencia instalada en el país y a la evolución de dicha potencia en los últimos años. Observando la evolución de la potencia instalada total durante los últimos 26 años se puede apreciar que a principios de los años 90 la práctica totalidad de la potencia venía de centrales térmicas convencionales (carbón, gas, etc.), y es a partir de entonces cuando empieza a desarrollarse la eólica, y un poco más tarde, la biomasa y la solar.

La energía eólica en Dinamarca está dividida en terrestre y marina, representando cada una un 76 y 24% de la potencia instalada respectivamente. La gran plataforma continental del Mar Báltico propicia la construcción de parques eólicos marinos. Además, en el mar el viento sopla con más fuerza y la dirección es más constante, por lo que se pueden poner turbinas más grandes.



Figura 7: Parques eólicos marinos en Dinamarca 2017

Por otro lado, como en Dinamarca se empezaron a instalar aerogeneradores desde los años 90, cuando la tecnología no estaba demasiado desarrollada, muchos aerogeneradores

son de poca potencia, de menos de 1MW. Esto puede parecer un dato muy poco significativo, pero luego será fundamental a la hora de realizar el ACV.

El incremento de la energía solar fotovoltaica ha sido bastante más moderado. Esto se debe sobre todo a que el país no destaca especialmente por los niveles de radiación solar recibida. Sin embargo, sí que se espera que en los próximos años la cantidad de megavatios de fotovoltaica aumente de forma lenta, pero constante.

3.3.2. ALEMANIA

En este proyecto no se podía dejar de lado un país de la importancia de Alemania, y es que este país cuenta con uno de los mixes más diversificados de toda la Unión Europea, y es uno de los grandes consumidores de energía del mundo.

Se trata de la cuarta potencia económica a nivel mundial, sólo por detrás de EEUU, China y Japón. Cuenta con una población de 82.695.000 habitantes [24].

El sector industrial de Alemania es uno de los más importantes del mundo y representa aproximadamente el 30% del PIB del país. Entre sus industrias más importantes podemos destacar el sector de la automoción, con empresas como Volkswagen y BMW, el sector de la ingeniería mecánica, electrónica y eléctrica, y el sector farmacéutico.

La gran población de Alemania y su potente sector industrial son dos de los factores que contribuyen a hacer de este país el mayor consumidor de energía de toda la Unión Europea. Es por este motivo, por el que el mix eléctrico alemán es el que más potencia instalada tiene. [23].

La generación eléctrica alemana durante el año 2018 se distribuyó de la siguiente manera:

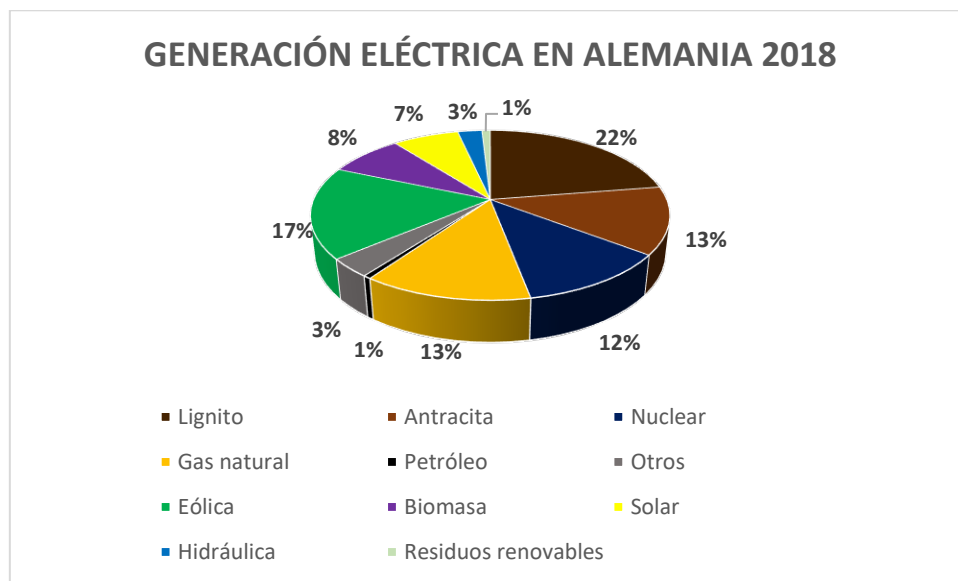


Figura 8: Generación eléctrica en Alemania 2018. Fuente: Agora Energiewinde [25]. Elaboración propia

Si miramos cómo se distribuye la generación se puede observar que los combustibles fósiles, tanto la antracita como el lignito, son las que más peso tienen dentro del mix con bastante diferencia sobre el gas natural y la nuclear.

En cuanto a las renovables, la eólica sería la que tendría el papel más destacado con aproximadamente un 12% del total. Dentro de esta, la eólica terrestre tendría bastante más importancia que la eólica marina, aunque en los últimos tiempos se está invirtiendo mucho más en esta última. La biomasa, la solar fotovoltaica, la hidráulica y los residuos

renovables completarían el resto de las energías limpias, y en total estas acapararían un 29% del total de la generación del país.

El resto de la generación vendría dado por el petróleo, los residuos no renovables y la turbinación por bombeo. Estos dos últimos estarían incluido en la categoría “Otros” que se muestra en la gráfica.

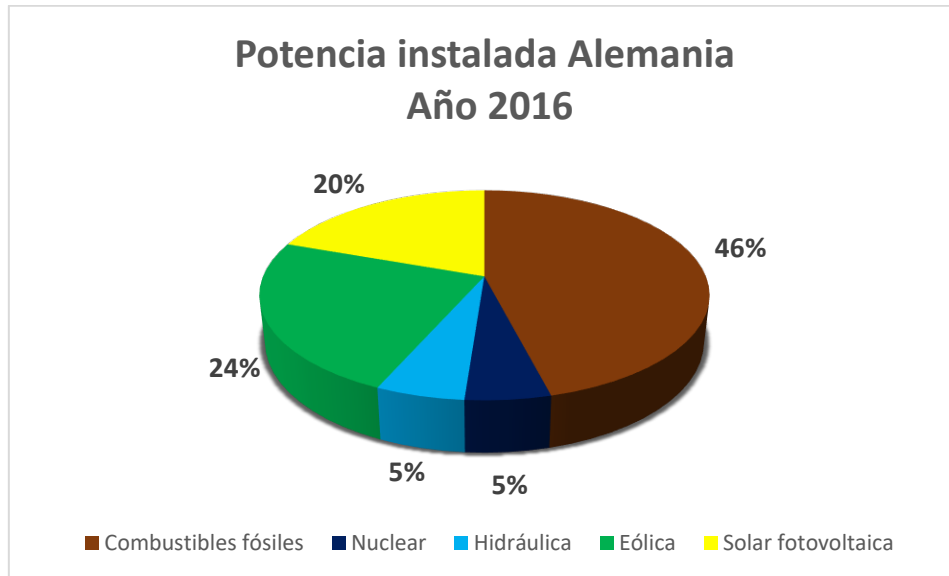


Figura 9: Potencia instalada en Alemania 2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 9, la mayor parte de la potencia, casi la mitad, corresponde a los combustibles fósiles, es decir, correspondería a las centrales térmicas de carbón, de lignito y de gas. Por otro lado, se puede apreciar que prácticamente la mitad de la potencia total instalada en el país corresponde a energías renovables, principalmente eólica y solar fotovoltaica, y en menor medida, hidrúlica.

Resulta curioso comprobar que, aunque la energía eólica acapara casi una cuarta parte del total de la potencia, sólo genera alrededor del 12%. El caso de la solar fotovoltaica es todavía más extremo. En el caso contrario, las centrales nucleares cuentan con muy poca potencia instalada, pero son la cuarta tecnología en cuanto a generación. Estas diferencias entre potencia instalada y cuota de generación se deben a los distintos factores de carga de cada tecnología, entendido éste como el cociente entre la energía generada en un año y la que se podría haber generado con la central operando a su potencia nominal durante las 8.760 horas del año [27]. En el caso de las energías renovables este factor sería bastante bajo, sobre todo con la solar fotovoltaica, y en el caso de las nucleares muy alto, ya que los reactores nucleares necesitan estar en constante funcionamiento dando casi su potencia nominal.

La importancia de las fuentes de energía renovable en Alemania se debe a que la intención del gobierno es caminar hacia modelos energéticos más sostenibles para reducir emisiones y no contribuir al cambio climático, y para reducir la dependencia del petróleo y el gas. Para tener una visión más completa del mix eléctrico alemán es necesario conocer cuáles han sido los cambios más importantes que se han producido en los últimos años.

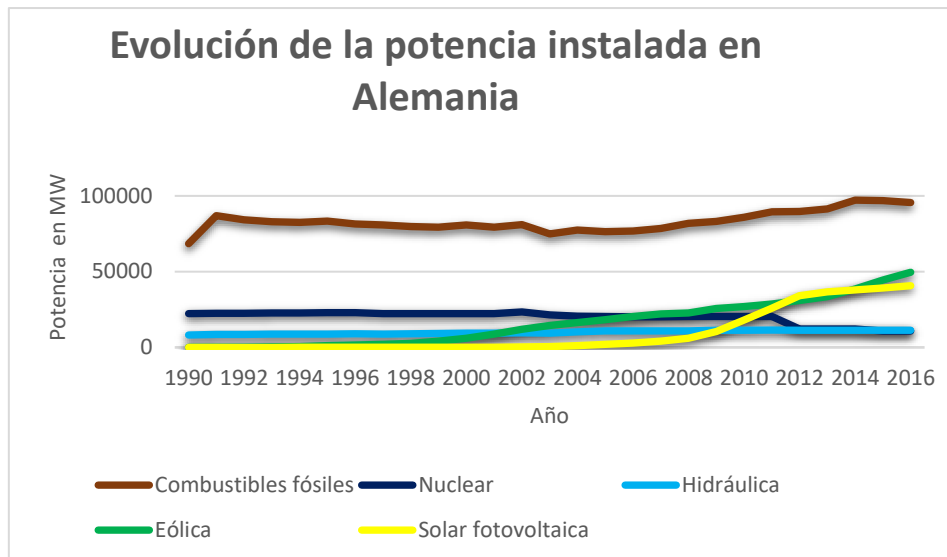


Figura 10: Evolución de la potencia instalada en Alemania 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia

La evolución de cada una de las tecnologías ha sido muy distinta. Se puede apreciar que la energía eólica empezó su desarrollo a mediados de la década de los 90 (1998) y que la solar fotovoltaica experimentó un boom en el año 2008, llegando a ser incluso durante un tiempo la segunda tecnología con más peso dentro del mix. Por otra parte, en la gráfica se puede observar que la potencia nuclear instalada tuvo un notable descenso en el año 2011, y es que en ese año el ejecutivo alemán decidió cerrar de manera inmediata 7 de sus centrales nucleares (aquellas construidas antes de 1980) y estableció como fecha límite para el cierre de las demás el 2022 [28]. Estas decisiones estuvieron muy influidas por el accidente de la central nuclear japonesa de Fukushima de marzo de 2011, una de las mayores catástrofes medioambientales de la historia.

3.3.3. ESPAÑA

España aparece en este proyecto como ejemplo de país con un mix energético muy diversificado. Y es que prácticamente se pueden encontrar todas las tecnologías de generación importantes actualmente.

Como país tiene una extensión de aproximadamente medio millón de km² y cuenta con una población de 47 millones de personas. Se trata de la decimotercera potencia económica a nivel mundial y la cuarta de la Unión Europea.

El consumo de energía eléctrica en España en el año 2018 fue de 268.808GWh [11], lo que sitúa al país como cuarto consumidor de la UE, sólo por detrás de Alemania, Francia e Italia [26]. El sistema eléctrico se puede dividir en tres sistemas:

- **Sistema peninsular:** correspondería, como su propio nombre indica, a la parte española de la Península Ibérica. Se trata del sistema más grande (94,3% del consumo total de energía eléctrica [11]) y además está interconectado con los sistemas que lo rodean, que son Francia, Portugal, Marruecos y Andorra.
- **Sistemas no peninsulares:**
 - **Sistema Balear:** corresponde a las islas Baleares, que se encuentran al este de la península. Al tratarse de un sistema aislado la operación del sistema es bastante más complicada. Está unido al sistema peninsular a través de un enlace que en el 2018 cubrió el 20,4% del consumo total de energía eléctrica en las islas [11].

- **Sistema canario:** corresponde a las islas Canarias, que se encuentran junto a la costa occidental de Marruecos. La diferencia con el sistema balear es que en este caso no existe un enlace con la península, ya que la distancia es mucho mayor.

El mix energético total es bastante variado, y en él se pueden encontrar gran cantidad de tecnologías de generación.

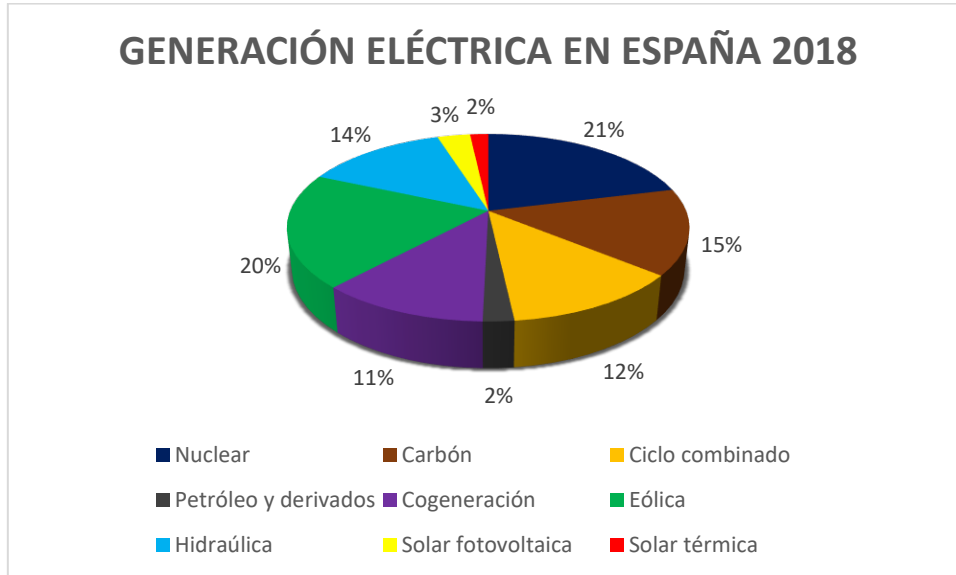


Figura 11: Generación eléctrica en España 2018. Fuente: REE [11]. Elaboración propia

Como se puede ver en la figura 11, la práctica totalidad de la energía consumida en España se cubre con seis energías. La que más peso tendría es la nuclear, que acapara más del 20% de la cobertura. Le siguen, en este orden, la eólica con un 19%, el carbón con un 13,5%, la hidráulica con un 13,2%, la cogeneración con un 11,2% y el ciclo combinado con un 10,2%. Luego vienen la solar fotovoltaica y la térmica, los residuos renovables y no renovables, el bombeo y las importaciones.

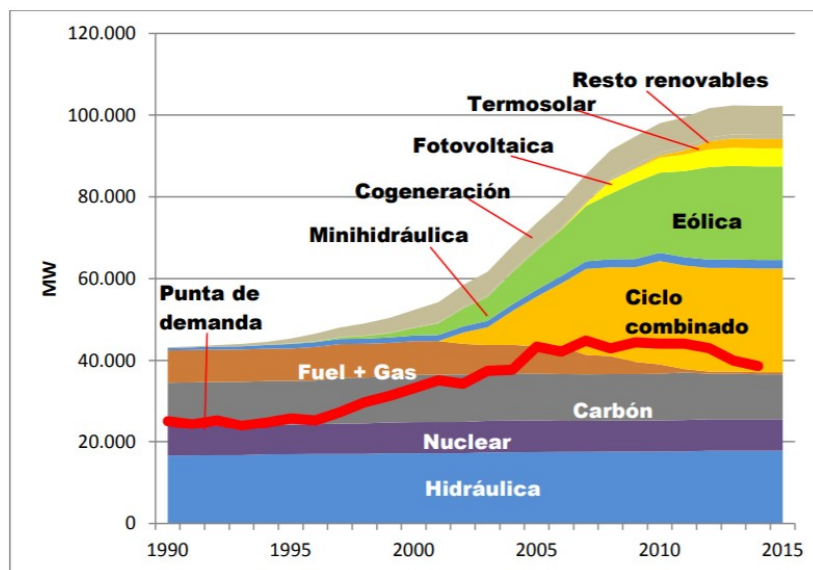


Figura 12: Evolución de la potencia instalada en España 1990-2015 [10].

En la figura 12, que muestra la variación de la potencia instalada durante los años 1990-2015, se puede observar que desde los años 90 prácticamente se ha doblado la potencia instalada en España. Las tecnologías que más han crecido son la eólica, el ciclo combinado y las solares. Por otro lado, la nuclear, el carbón y la hidráulica apenas han sufrido variaciones, y las centrales de fuel y gas han desaparecido completamente en la península, no así en las islas.

También se puede comprobar que la potencia instalada total es más de dos veces la punta de demanda, por lo que se podría pensar que el sistema está sobredimensionado.

Las dos últimas gráficas ponen de manifiesto que no existe una correlación directa entre potencia total instalada y generación final. Para explicar este hecho es necesario comprender el concepto de factor de carga, que es el cociente entre las horas que está funcionando una determinada tecnología y las horas totales del año. Este factor de carga varía en función de la fuente, siendo generalmente bajo en las renovables debido a la variabilidad de la fuente de energía. El ciclo combinado es un caso curioso, y es que, aunque en principio tiene un rendimiento bastante alto y la fuente de energía está asegurada, apenas llega a cubrir el 10% de la demanda siendo la tecnología con más potencia instalada. Esto se debe a que en España se usa básicamente para cubrir a la eólica cuando esta no proporciona suficiente energía.

La energía nuclear tuvo su comienzo en España en el año 1968, cuando entró en funcionamiento la central nuclear de Zorita. En los años posteriores se seguirían construyendo centrales por todo el territorio nacional, y en estos momentos, están en funcionamiento siete reactores nucleares agrupados en cinco centrales, que son:

- **Almaraz**, situada en la provincia de Cáceres, cuenta con dos reactores de tipo PWR. Potencia: 2093,90MW [29].
- **Ascó**, situada en la provincia de Tarragona, cuenta con dos reactores de tipo PWR. Potencia: 2059,71MW.
- **Cofrentes**, situada en la provincia de Valencia, cuenta con un reactor de tipo BWR. Potencia: 1092MW.
- **Trillo**, situada en la provincia de Guadalajara, cuenta con un reactor de tipo PWR. Potencia: 1066MW.
- **Vandellós**, situada en la provincia de Tarragona, cuenta con un reactor de tipo PWR. Potencia: 1087MW.



Figura 13: Reactores nucleares en España. Fuente: CSN [30]

Todas estas centrales tienen ya más de 30 años y en principio ya hay fecha de cierre para todas ellas. En un acuerdo entre las empresas energéticas más importantes se establece que entre 2027 y 2035 se vayan cerrando las centrales [31].

La energía eólica ha tenido un desarrollo muy notable en el país. España es el segundo país de Europa con más potencia instalada [32], y el quinto del mundo [33]. Se trata de la segunda energía con más potencia instalada, sólo por detrás de los ciclos combinados.

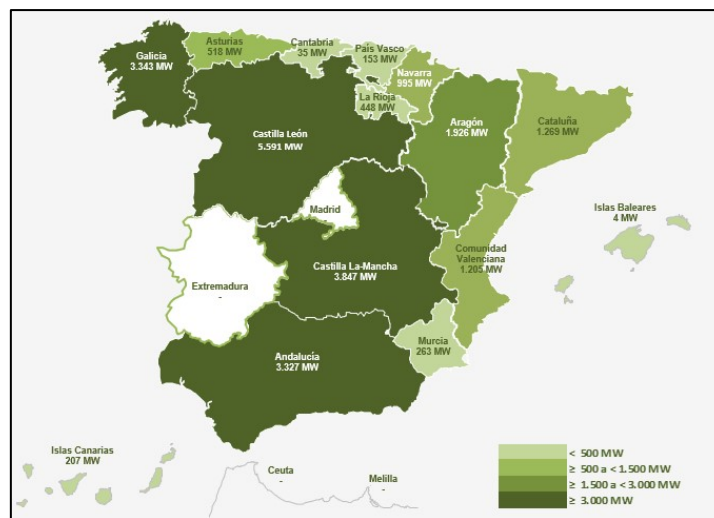


Figura 14: Potencia eólica instalada en España por comunidades 2017. Fuente: REE [34]

Como se puede ver en la figura 14, la potencia eólica instalada está distribuida de manera bastante homogénea por toda la geografía nacional. Cabe mencionar que prácticamente la totalidad de la eólica en España es terrestre, ya que las costas del país no son muy apropiadas para la construcción de parques eólicos marinos.

Observando la figura 12 se puede apreciar que la instalación de nuevos parques eólicos se estancó en el año 2012 y prácticamente no ha subido desde entonces. Esto se debe a las dificultades económicas que sufrió el país durante la crisis. Las inversiones en energías limpias prácticamente se paralizaron durante esos años.

Una de las fuentes de energía que más potencial tiene en España es la solar, y es que dentro de Europa, España es uno de los países con más horas de sol al año y que recibe una mayor radiación media solar recibida. La generación solar en España se divide entre las plantas fotovoltaicas y las centrales termosolares.

La energía solar fotovoltaica sufrió un importante desarrollo sobre todo en el año 2008, cuando se instalaron de golpe más de 2500MW [34]. Desde el año 2012 apenas se construyen nuevas instalaciones, básicamente por los mismos motivos que la eólica, y la aportación de la fotovoltaica a la generación total se ha estancado en un 2-3%.

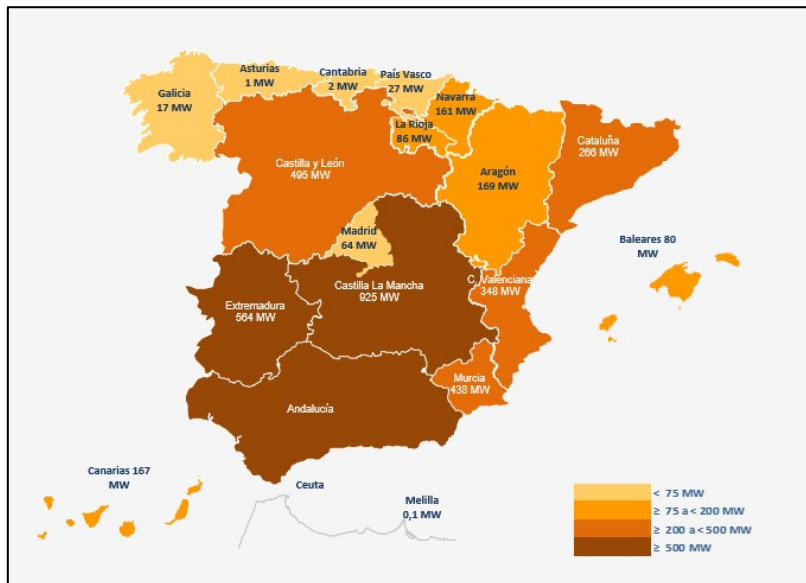


Figura 15: Potencia fotovoltaica instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34]

Si vemos como se distribuyen las instalaciones por toda la geografía nacional se puede comprobar que los territorios que cuentan con más potencia son los del sur, que es donde más potencial tiene esta tecnología, ya que la radiación media diaria es bastante mayor que, por ejemplo, en la cornisa cantábrica.

La energía solar térmica constituye un caso curioso de este país, ya que es el que cuenta con más potencia instalada a nivel mundial, por delante de países como EEUU o Sudáfrica [35]. Esta tecnología no ha encontrado su sitio en otros países, principalmente por los altos costes de mantenimiento y de instalación que tiene, y porque sería inviable situar estas centrales en territorios donde la radiación solar recibida fuese muy baja.

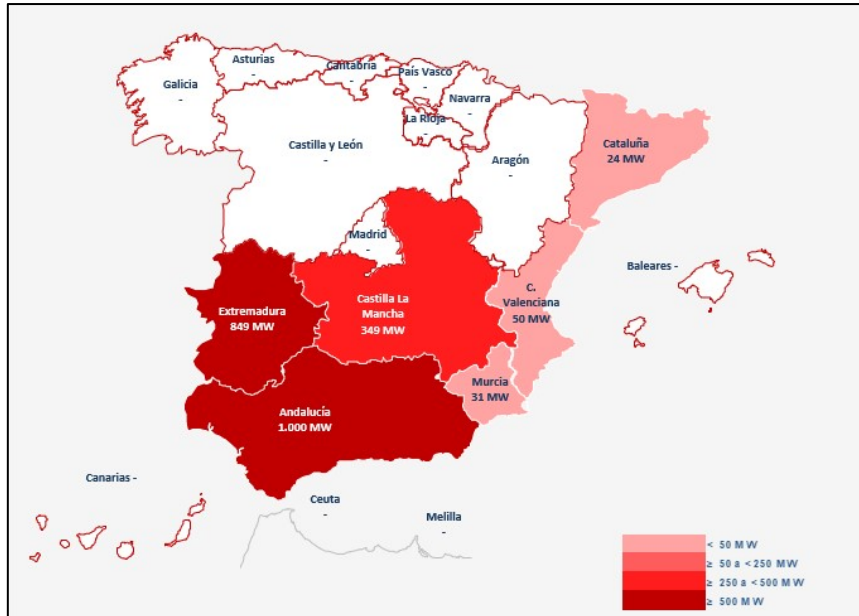


Figura 16: Potencia termosolar instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34]

Al igual que la fotovoltaica, la mayor parte de las centrales termosolares se encuentran en las provincias del sur, donde hay más horas de sol y más radiación media diaria.

Las energía hidráulica constituye otra de las principales fuentes de generación dentro del mix español, y se trata de la tercera en potencia instalada.

La aportación de esta energía es muy variable, pudiendo llegar en años húmedos a más de 40.000GWh y en años secos a menos de la mitad de esa cifra. Por ejemplo, en el año 2017 la participación de la hidráulica al total de generación fue del 7,0%, casi la mitad que la de 2016, que fue del 13,7% [11].

Del total de la potencia hidráulica instalada en España aproximadamente unos 2.000MW son de centrales de menos de 10MW, lo que se conoce como minihidráulica.

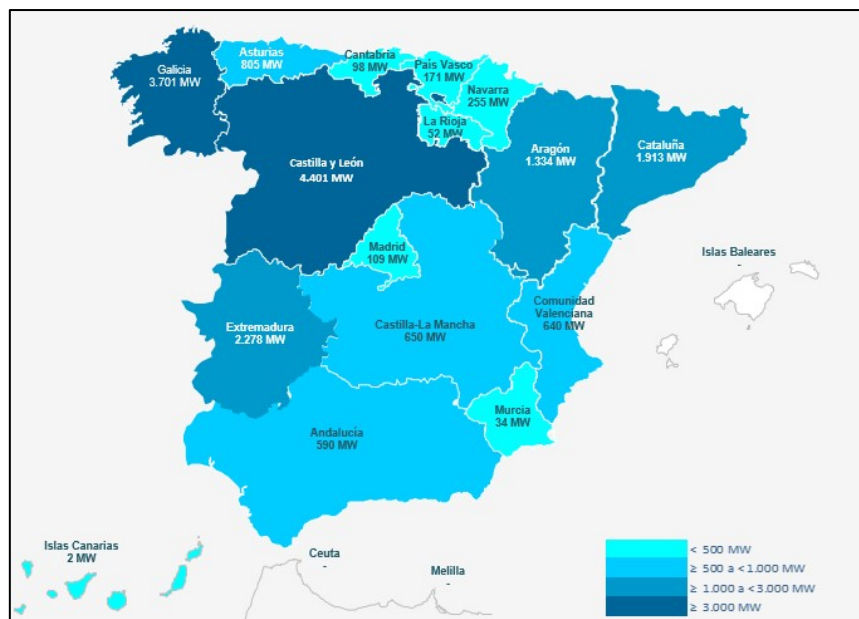


Figura 17: Potencia hidráulica instalada en España por comunidades. Fuente: REE [34]

La comunidad que cuenta con más potencia hidráulica instalada es Castilla y León, ya que cuenta con toda la cuenca del Ebro, que es la segunda más importante del país, sólo por detrás de la del Norte, que incluye la cornisa cantábrica y Galicia.

3.3.4. FRANCIA

Francia constituye un caso particular a nivel eléctrico, y por eso se ha decidido estudiar en el presente informe.

Tiene una superficie total de 675.000 km² y una población de 67 millones de habitantes. Ocupa el décimo puesto en la lista de países con el PIB más alto del mundo y tiene un sector industrial bastante potente. Estos factores convierten a Francia en uno de los mayores consumidores de energía eléctrica del mundo.

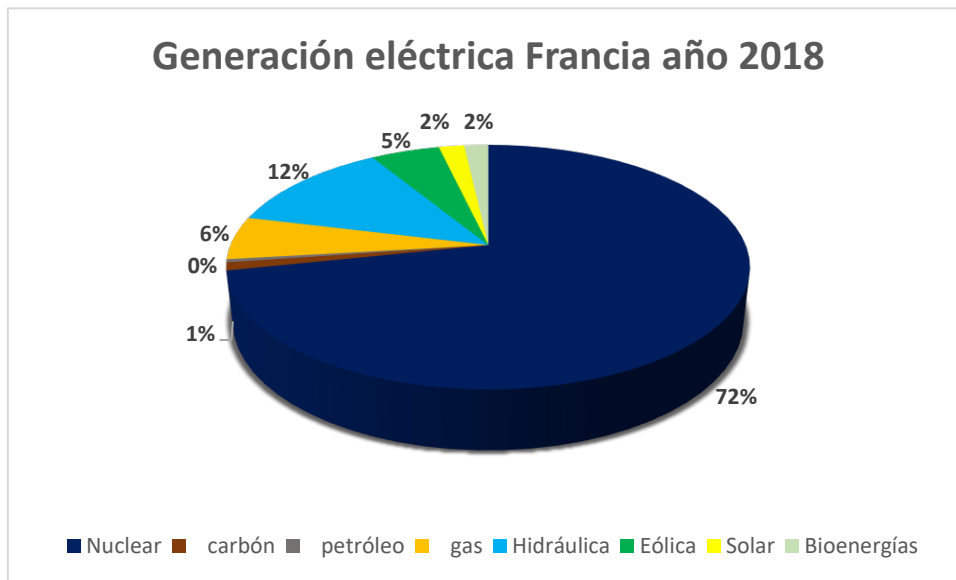


Figura 18: Generación eléctrica Francia 2018. Fuente: RTE [36]. Elaboración propia

Su mix energético constituye un caso muy particular a nivel europeo, y es que casi tres cuartas partes de su generación eléctrica total provienen de la energía nuclear. Se trata del país que más depende de este tipo de energía a nivel mundial y el segundo que más reactores posee (58), sólo por detrás de EEUU [37]. Las causas de esta situación hay que buscarlas hace más de 40 años, y es que después de la primera crisis del petróleo en 1974 el gobierno francés decidió impulsar un plan de fomento de la energía nuclear para dejar de depender de las importaciones del exterior [38].

La segunda fuerza dentro del mix sería la hidráulica, con un 12% de participación sobre el total. Aunque no se ha conseguido encontrar la energía hidráulica separada entre la convencional y la de agua fluyente, en este informe sobre energías renovables de Réseau de Transport d'Électricité (RTE) se muestra la gráfica que se enseña a continuación:

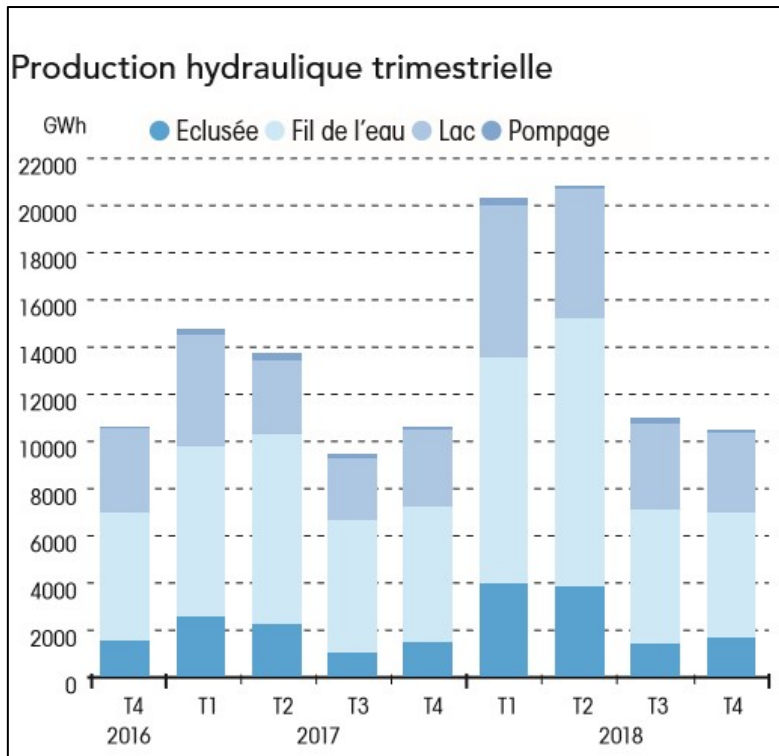


Figura 19: Producción hidráulica Francia 2016-2018. Fuente: RTE [36]

A partir de la información que se muestra en la figura 19, se puede deducir que aproximadamente la mitad de la generación hidráulica corresponde a centrales de agua fluyente (*fil de l'eau*) y el resto a las convencionales (*eclusée, lac*).

Después vendrían las centrales de gas, que se dividen en centrales de gas convencionales y en centrales de ciclo combinado. El resto de renovables serían, en este orden, eólica, solar fotovoltaica y bioenergías, dentro de la cual se incluyen la biomasa, el biogás y los residuos renovables y no renovables.

Una de las principales ventajas que tiene el mix tecnológico francés es que el conjunto de nuclear y renovables acaparan más del 90% de la generación total del país, por lo que las emisiones de gases de efecto invernadero son notablemente bajas.

La evolución de la potencia instalada desde 1990 a 2016 es:

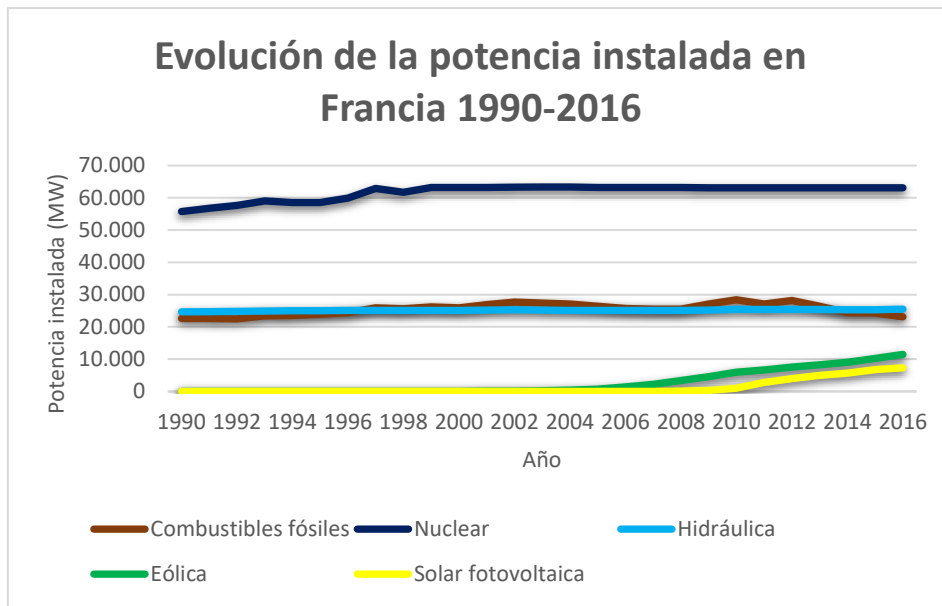


Figura 20: Evolución de la potencia instalada en Francia 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia

Al observar figura 20 se puede comprobar que el mix energético francés se mantuvo prácticamente invariable desde 1990 hasta el año 2005, cuando las renovables empezaron a hacer su aparición en el parque energético francés, en detrimento de las centrales térmicas que funcionan con combustibles fósiles.

La potencia nuclear instalada se ha mantenido prácticamente invariable desde finales de los años 90 y no hay planes para aumentarla en los próximos años, aunque actualmente hay una central en etapa de construcción [37]. La no incorporación de nuevas centrales y el cierre de aquellas que lleguen al final de su vida útil va a hacer que el número de megavatios de nuclear vaya disminuyendo progresivamente.



Figura 21: Reactores nucleares en Francia 2011. Fuente: RFI [39]

Por otro lado, todos los reactores nucleares que hay actualmente en operación son de tipo PWR [37], lo que luego será importante a la hora de meter los datos en Simapro.

La energía hidráulica se ha mantenido también prácticamente invariable en los últimos años. En la siguiente figura se muestra cómo se distribuye la potencia instalada por todo el territorio:

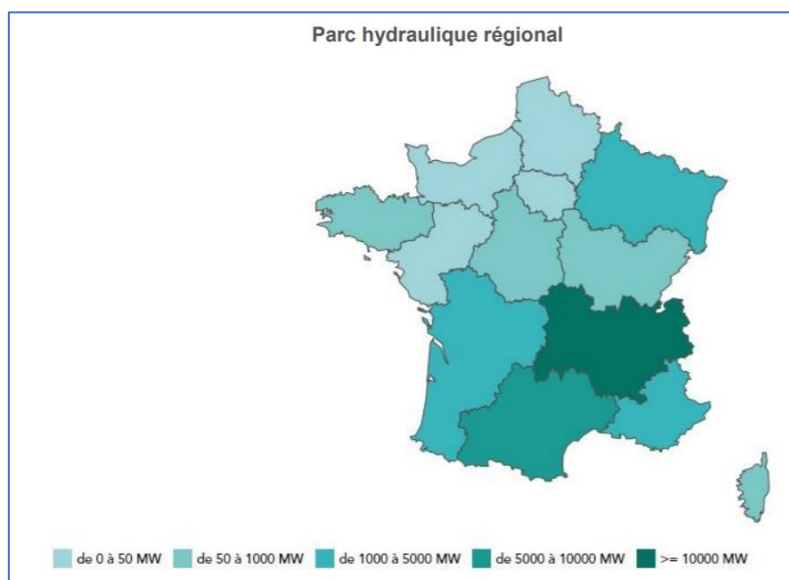


Figura 22: Distribución de la energía hidráulica en Francia. Fuente: RTE [36]

Las centrales se sitúan en la zona de los Alpes franceses, de donde bajan los grandes ríos de la cordillera europea.

En cuanto a los combustibles fósiles, el que más se utiliza es el gas, que se explota en centrales convencionales y de ciclo combinado, aunque estas últimas son mayoritarias, tal y como se muestra en la siguiente figura.

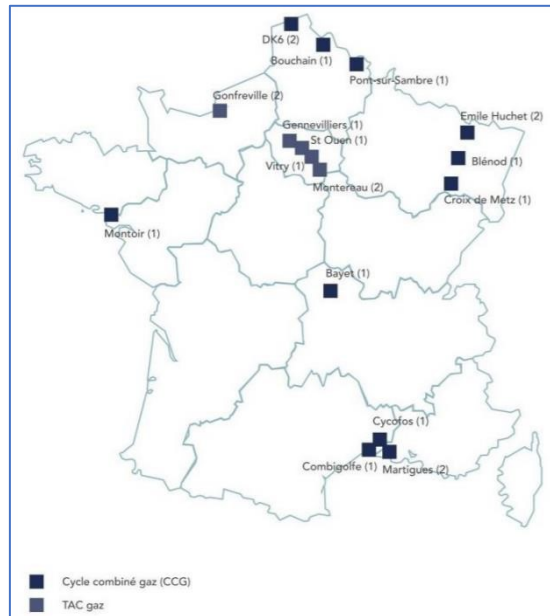


Figura 23: Centrales de gas y ciclo combinado en Francia 2018. Fuente: RTE [36]

Las energías renovables, sobre todo la eólica y la solar, son las que más están creciendo en los últimos años. La energía solar está acumulada en aquellas provincias que disponen de más horas de luz y que reciben más radiación solar, las regiones del sur. En cuanto a la energía eólica, sólo se podría destacar que la gran mayoría de la que hay actualmente es terrestre, pero hay proyectos en marcha para la construcción de parques eólicos marinos.

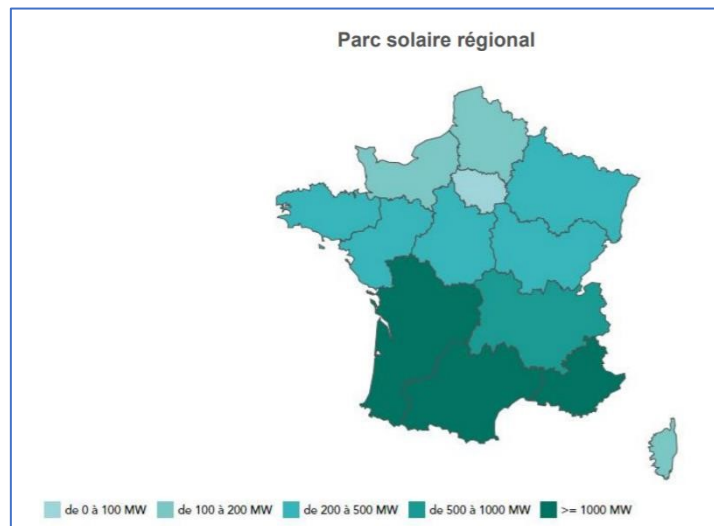


Figura 24: Distribución de la energía fotovoltaica en Francia. Fuente: RTE [36]

3.3.5. POLONIA

Polonia entra en este estudio como un país muy dependiente de los combustibles fósiles, principalmente el carbón. Sin duda será interesante estudiar qué cambios se pueden introducir en el mix energético polaco para adecuarse a las nuevas normativas de la Unión Europea.

Se trata de un país situado en el centro del continente europeo y que cuenta con una superficie de 312.696 km². Tiene una población de 38,5 millones de personas, por lo que es el sexto país más poblado de la Unión Europea [40]. Es también la sexta economía de la Unión, y cuenta con una industria relativamente próspera.

En la siguiente gráfica se muestra la generación eléctrica de Polonia en el año 2016:

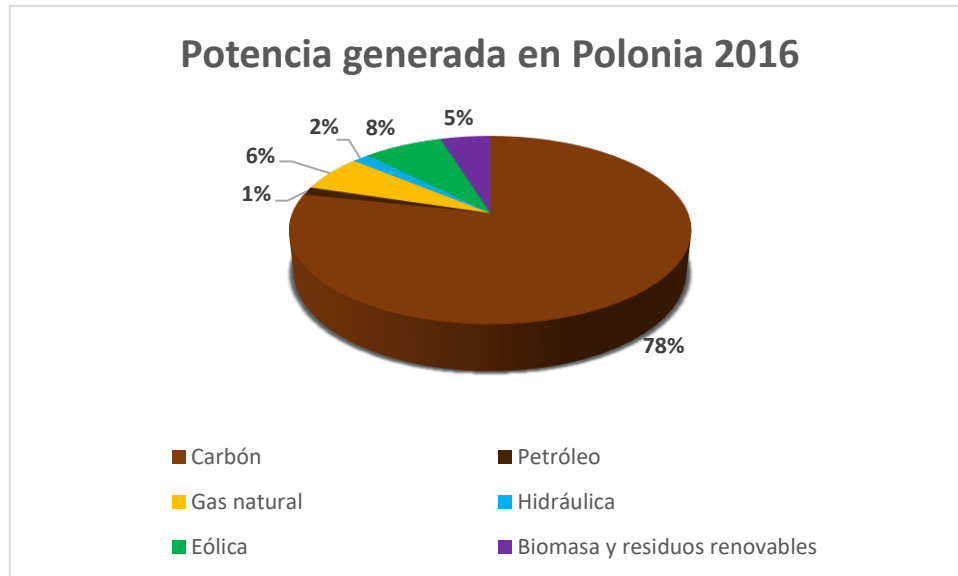


Figura 25: Generación eléctrica en Polonia 2016. Fuente: Comisión Europea [26]. Elaboración propia

Como se puede observar más de tres cuartas partes de la generación eléctrica total corresponden a los combustibles fósiles, principalmente antracita y lignito. Esta participación tan importante del carbón en el mix es una anomalía en la Unión Europea. El motivo principal de esta situación es que se trata de una fuente de energía que está presente de manera abundante en el país. De hecho, la transición energética que tiene que afrontar el país, que pasa por descarbonizar la generación, puede destruir hasta 110.00 empleos relacionados con la minería y con las centrales térmicas [41].

No se ha conseguido encontrar qué parte de la generación en 2016 por combustibles fósiles corresponde a la antracita y qué parte al lignito, pero se sabe que en el año 2015 el 48,4% de la generación total procedía de la antracita y un 32,1% del lignito [42]. Se va a considerar que en el año 2016 la proporción siguió siendo la misma.

El resto de la generación está cubierto por energía eólica, principalmente terrestre pero también marina, las centrales de gas, la biomasa y los residuos renovables, y de manera más residual, la hidráulica y los derivados del petróleo.

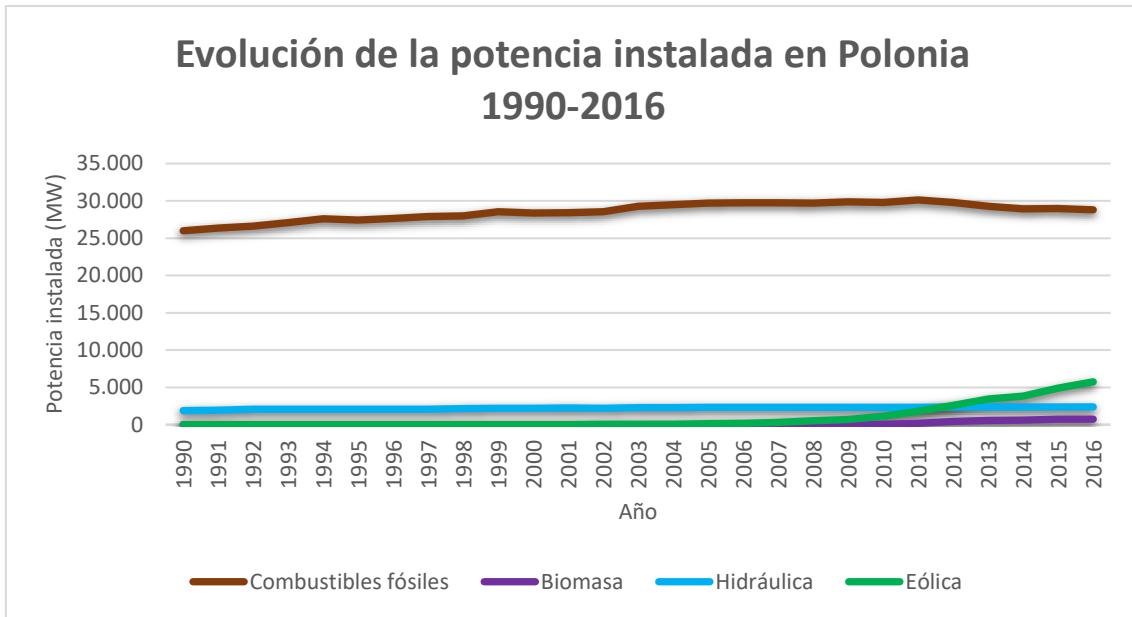


Figura 26: Evolución de la potencia instalada en Polonia 1990-2016. Fuente: Comisión Europea [23]. Elaboración propia

Si se observa la evolución de la potencia instalada en los últimos 25 años se puede apreciar que desde 1990 a 2008 apenas se produjeron cambios significativos, y es a partir de ese momento cuando la eólica empieza a experimentar un incremento considerable, convirtiéndose en pocos años en la segunda tecnología del mix. La biomasa también creció los últimos años, aunque de manera mucho más modesta.

4. ACV

En este apartado se va a definir el objetivo y el alcance del ACV, se va a hacer el análisis del inventario, es decir, se van a presentar los datos que han sido necesarios para realizar el análisis y se va a describir el modelado realizado en Simapro. Finalmente, se hará el análisis de los resultados finales y se extraerán conclusiones en función de estos.

4.1. DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL OBJETIVO

El ACV llevado a cabo en este proyecto pretende comparar el escenario de generación actual de cada país con los posibles escenarios de los años 2030 y 2050 y evaluar cómo cambian los impactos con el paso del tiempo. Para extraer dichas conclusiones, también se van a realizar análisis comparando las tecnologías de generación que existen en la actualidad.

La unidad funcional que se va a utilizar en este ACV es el kilovatio hora que llega a la mayoría de los consumidores, es decir, residencial, sectores o la baja industria. En definitiva, un kilovatio hora en la red de baja tensión.

El método que se ha utilizado para elaborar este análisis es el CML-IA baseline V3.02, que analiza 11 categorías diferentes de impacto ambiental, que son:

- Agotamiento abiótico.
- Agotamiento abiótico (de combustibles fósiles).
- Calentamiento global.
- Destrucción de la capa de ozono.
- Toxicidad humana.
- Ecotoxicidad del agua dulce.
- Ecotoxicidad del agua marina.
- Ecotoxicidad terrestre.
- Oxidación fotoquímica
- Acidificación.
- Eutrofización.

La base de datos que se va a utilizar es la de la versión 3 de Ecoinvent.

Este proyecto tiene por objetivo principal analizar el impacto ambiental que tienen los mixes energéticos de distintos países pertenecientes a la Unión Europea, en concreto, Dinamarca, Alemania, España, Francia y Polonia, y estudiar cómo debe ser la transición energética que tienen que afrontar estos países para adecuarse a los objetivos medioambientales de reducción de emisiones y de cuota de renovables marcados por la Unión Europea. Los escenarios futuros se diseñarán partiendo de los planes nacionales que han hecho estos países para la renovación de su parque de generación. En caso de no existir dichos planes, los escenarios se elaborarán siguiendo unas líneas de tendencia que resulten lógicas.

Una vez realizado el ACV y evaluados los impactos ambientales, se procederá a analizar los costes que supondría la transición energética de cada país. Esta etapa es sin duda fundamental, ya que hay transformaciones que podrían ser interesantes sobre el papel y si sólo se decide en función del impacto ambiental, pero que pueden ser inviables en términos económicos. Por eso se considera importante ver cómo se pueden abaratar los costes de una transición que al final paga el contribuyente.

Los impactos ambientales más conocidos son generalmente el calentamiento global o la destrucción de la capa de ozono. Sin embargo, existen ciertos impactos que, aunque sean desconocidos por la mayoría de la opinión pública, son muy importantes. Por eso en este estudio también se quiere poner el foco en ciertos impactos medioambientales menos conocidos, pero que pueden ser devastadores, como puede ser el caso de la acidificación o la ecotoxicidad.

Los límites que se han puesto a este proyecto son los siguientes:

- Límites geográficos

En este proyecto se han estudiado únicamente cinco países pertenecientes a la Unión Europea: Alemania, Dinamarca, España, Francia y Polonia. Se van a excluir las importaciones de energía eléctrica de cada país, es decir, sólo se va a tener en cuenta lo generado en el propio territorio. Son países con mixes energéticos muy distintos entre sí y que dan una buena imagen general de lo que es la generación eléctrica en territorio europeo.

- Límites temporales

Se han modelado los escenarios de generación de los años 2018, 2030 y 2050. Los datos del primero son reales y se han sacado de fuentes fiables, mientras que el segundo y el tercero se ha sacado de planes a futuro.

4.2. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL ACV

Origen de la energía

En el presente proyecto sólo se va a tener en cuenta la generación de cada país excluyendo por completo las importaciones de energía eléctrica. Los límites geográficos se marcan en lo que genera cada país por separado.

Fuentes de datos

Los datos de generación de energía eléctrica necesarios para realizar este proyecto se han sacado de distintas fuentes, principalmente:

- Para Dinamarca: Agencia Danesa de la Energía [22].
- Para Alemania: Agora Energiewinde [33].
- Para España: Red Eléctrica de España (REE) [43].
- Para Francia: Red de Transporte de Electricidad (RTE) [44].
- Para Polonia: Comisión Europea [23].

También se han consultado con frecuencia organizaciones como International Energy Agency, para consultar precios de generación y escenarios futuros, Nuklear Forum, para todo lo referente a la energía nuclear, Wind Europe, para lo referente a la eólica, y otras fuentes que aparecen con frecuencia a lo largo del informe.

4.2.1. Descripción del proceso

Los procesos utilizados en Simapro para elaborar el presente informe se muestran en la figura 27:

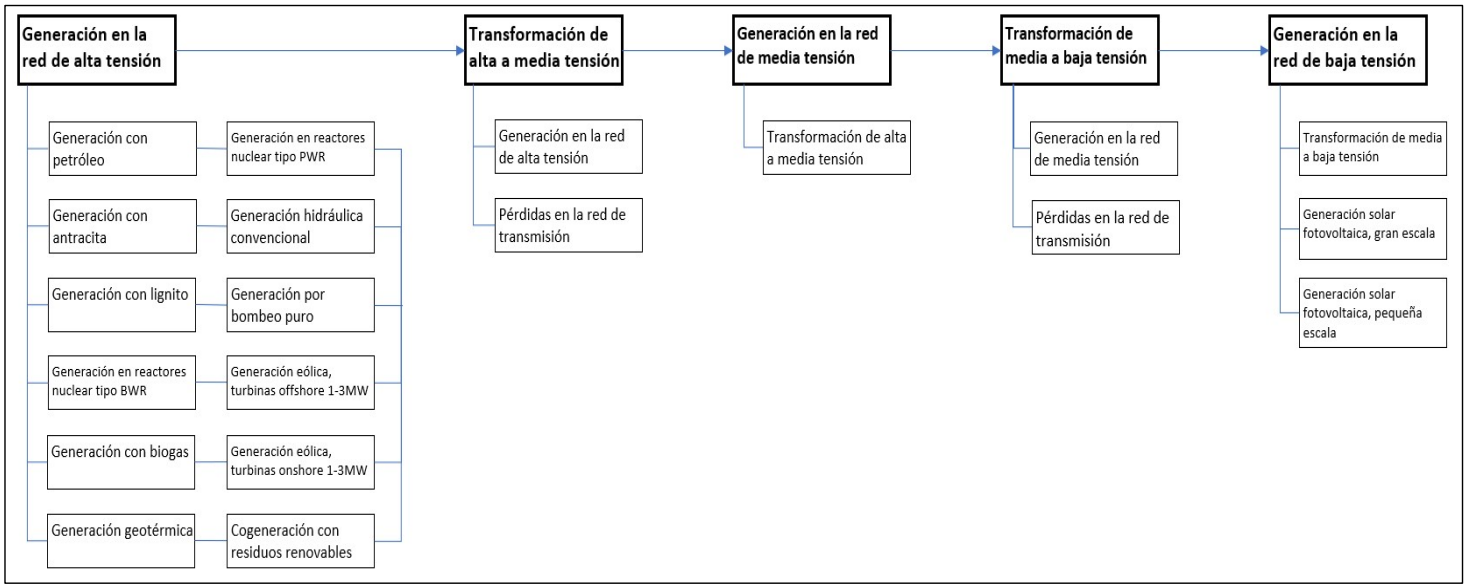


Figura 27: Ejemplo de los procesos principales que incorpora el modelado de la electricidad en baja tensión para un país

Como se muestra en la figura 27, casi todos los procesos de generación se encuentran en el proceso de Ecoinvent asociados a la alta generación. En este proceso es donde se introducen los porcentajes de generación que corresponden a cada tipo de tecnología.

En los dos procesos de transformación es donde se ponen las pérdidas en la red que, en nuestro caso, se han considerado iguales a las que venían por defecto para cada país.

En la red de baja tensión es donde se introduce la generación fotovoltaica de cada país, que aparece dividida en las categorías que se muestran en la figura 27. Debido a la dificultad para encontrar los datos relativos a como se divide la generación fotovoltaica de cada país, se han mantenido las proporciones que venían por defecto para cada país, que eran las relativas a los datos de 2015.

En total habría que hacer todos los procesos que se muestran en la figura 27 un total de 15 veces, una para cada país y para cada año.

4.2.2. Principales hipótesis y limitaciones

Los datos de generación hay que introducirlos en Simapro para hacer el ACV, pero esto no siempre es sencillo porque hay categorías que no aparecen en la base de datos de Ecoinvent y se encuentran además otras dificultades con las que es difícil lidiar. En este apartado se van a detallar las decisiones que se han ido tomando a la hora de modelar los escenarios en Simapro.

4.2.2.1. Fotovoltaica

Los datos de generación se van a introducir en el proceso que modela la red de alta tensión. En este proceso, no se encuentra la energía solar fotovoltaica, ya que está en el de baja tensión. Por lo tanto, al introducir los porcentajes de generación de cada país en el programa, habrá que corregir la cifra para no tener en cuenta la energía solar. Por ejemplo, si en un país la solar fotovoltaica supone un 5% de la generación eléctrica, el resto de los valores habrá que multiplicarlos por:

$$\text{Factor de corrección solar} = \frac{1}{1 - \%solar}$$

Después en el apartado de baja tensión hay que poner que a la solar le correspondería un 5% y a todo lo demás un 95%. De esta forma es como si todo se hubiese medido en un mismo proceso.

4.2.2.2. Solar térmica

Una de las mayores dificultades que se han producido, es que la energía solar térmica no está en la base de datos de Ecoinvent. Lo que se ha hecho es sumar a los datos de generación fotovoltaica la generación termosolar. Aunque los métodos de obtención de la energía eléctrica son muy distintos, como se ha explicado en el apartado 3.2.2.1., como la fuente de energía es la misma se ha realizado una aproximación por la cual los dos tipos de energía solar van a estar dentro de la misma categoría. Además, el peso de la generación termosolar sólo es significativo en el mix eléctrico español, en los demás países es inexistente o casi.

4.2.2.3. Biomasa

No hay una categoría específica para la biomasa en el software, por lo que se ha decidido que la categoría que más se ajusta a la biomasa es “Heat and power co-generation, wood chips”, que es la que se utiliza normalmente en los procesos de Ecoinvent.

4.2.2.4. Eólica

La eólica aparece dividida según si es terrestre o marina y según también el tamaño de los aerogeneradores. Se ha conseguido encontrar los datos de generación eólica divididos en marina y terrestre para todos los países. Sin embargo, no se ha conseguido encontrar la generación dividida por tamaño de turbina, excepto en un país, Dinamarca. Se ha asumido que toda la generación eólica terrestre corresponde a aerogeneradores con una potencia unitaria de entre 1 y 3MW, siendo los más comunes los de 2 MW [45], sobre todo si la instalación de dichas turbinas se produjo ya entrado el siglo XX, cuando ya la mayor parte de los aerogeneradores fabricados entraban dentro de dicho margen (véase Figura 4).

4.2.2.5. Residuos renovables

Prácticamente todos los países analizados en este informe generan parte de su energía a partir de residuos renovables. Este porcentaje de generación (que suele ser generalmente pequeño) se va a introducir en el mismo proceso que la biomasa, en “*Heat and power co-generation, wood chips*”, ya que no se ha encontrado ninguno que se ajuste mejor a este tipo de energía.

4.2.3. Análisis de inventario de la generación de los países analizados

4.2.3.1. Dinamarca

El escenario de generación en el año 2017 de Dinamarca es el siguiente:

Tabla 4: Generación eléctrica Dinamarca 2017. Fuente: ADE [22]

MIX ENERGÉTICO DINAMARCA 2017	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	30,52
Carbón	29,04%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	1,06%
Gas natural	7,10%
Nuclear	0,00%
Renovables	60,49%
Hidráulica	0,06%
de la cual bombeo	0,00%
Eólica	41,88%
de la cual marina	12,64%
Biomasa y residuos renovables	16,11%
Solar	2,44%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	2,31%
Otros	0,00%

En cuanto a los planes de futuro, el gobierno danés ha mostrado su compromiso para lograr llevar a cabo la transición energética lo antes posible. Por eso, en junio de 2018, todos los partidos del parlamento danés se comprometieron a que en 2030 el 100% de la generación eléctrica en el país proceda de fuentes renovables y a que conseguir un 100% de energía renovable en 2050 [46]. Para ello han acordado llevar a cabo las siguientes medidas:

- Instalación de 2400MW de energía eólica marina.
- Desconectar todo el carbón para el año 2030.
- Inversiones para impulsar la producción de biogás.
- Inversiones para impulsar la implementación de medidas de ahorro y eficiencia en el sector de la industria y el transporte.
- Rebajas fiscales para la electricidad.

Teniendo en cuenta estas medidas, y siguiendo las líneas generales que se marcan en el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima de Dinamarca , se ha elaborado el siguiente escenario que se acerca a lo que podría ser el mix danés en un futuro.

Tabla 5: Generación eléctrica Dinamarca 2030. Elaboración propia

MIX ENERGÉTICO DINAMARCA 2030	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	42,20
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	0,00%
Nuclear	0,00%
Renovables	100,00%
Hidráulica	0,50%
de la cual bombeo	0,00%
Eólica	65,00%
de la cual marina	26,00%
Biomasa y residuos renovables	24,50%
Solar	10,00%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

Se ha asumido que la energía eólica marina tiene más potencial de mejora que la terrestre, y por eso en 2030 se ha puesto que será un 40% de la eólica total, mientras que ahora es tan solo el 24%. Por otro lado, como Dinamarca es uno de los países más septentrionales de Europa y, por tanto, con menos radiación solar recibida, también se ha asumido que la solar fotovoltaica va a tener menos importancia que otras energías limpias como la biomasa o los residuos renovables.

En cuanto a la demanda eléctrica total, en el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima se espera que la demanda para el año 2030 sea de 42,20 TWh [47].

Como se espera que ya para el año 2030 toda la generación eléctrica sea renovable, se ha considerado que no tiene sentido elaborar un escenario de generación para el año 2050.

4.2.3.2. Alemania

El escenario de generación en el año 2018 de Alemania es el siguiente:

Tabla 6: Generación eléctrica Alemania 2018. Fuente: Agora Energiewinde [33]

MIX ENERGÉTICO ALEMANIA 2018	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	648,4
Carbón	35,30%
del cual lignito	22,50%
Petróleo y derivados	0,60%
Gas natural	12,80%
Nuclear	11,70%
Cogeneración	8,86%
Renovables	36,10%
Hidráulica	2,60%
de la cual bombeo	0,59%
Eólica	17,50%
de la cual marina	1,75%
Biomasa y residuos renovables	3,54%
Solar	7,10%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

La *Energiewinde* (Transición energética) presenta los objetivos que se ha marcado el país para descarbonizar su mix y para aumentar progresivamente la cuota de renovables. La meta para el año 2030 es de un 50% de renovables en la generación y un mínimo de un 80% para el año 2050. La energía eólica es la que va a tener más importancia en esta transición, ya que es la que más potencial puede tener en el país, aunque también se apostará por el resto de renovables.

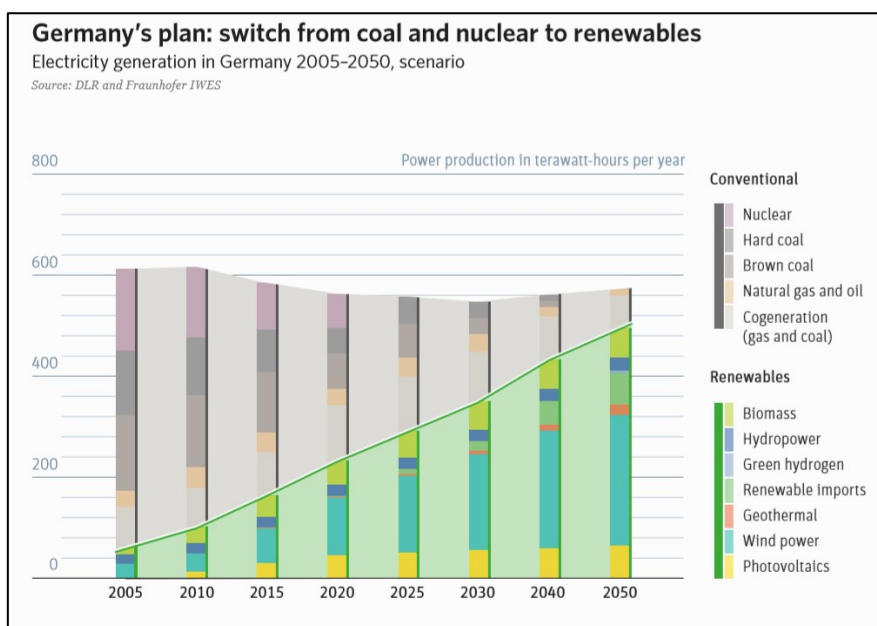


Figura 28: Producción eléctrica en Alemania 2005-2050. Fuente: Energiewinde [25]

Como se puede apreciar en la figura 28, está previsto que el peso de las energías renovables en el mix energético alemán aumente de manera exponencial durante los próximos años en detrimento de la nuclear y los combustibles fósiles. Como se puede apreciar y como se ha explicado previamente, para el año 2025 todos los reactores nucleares se habrán cerrado. Las centrales que funcionan con antracita y con lignito verán reducida su importancia en el mix progresivamente hasta que desaparezcan definitivamente en la década de los 40. Como energías contaminantes sólo quedaría la cogeneración a partir de gas y carbón y, en menor medida, el gas natural y el petróleo. Estas energías permanecerán probablemente para garantizar el suministro y para estar preparados contra la volatilidad de las energías renovables.

Otro aspecto destacable que se puede apreciar en la gráfica es que se espera que para el año 2050 un pequeño porcentaje de la generación provenga del hidrógeno. El hidrógeno se puede utilizar para almacenar energía a gran escala, de manera similar al bombeo hidráulico. Se puede producir mediante electrolisis, aprovechando momentos de baja demanda o de exceso de generación renovable, y después ceder su energía mediante combustión a un ciclo termodinámico cuando sea necesario, con la ventaja de que el producto que se libera no es dióxido de carbono, sino agua. Quedan retos tecnológicos por superar, principalmente en aspectos relacionados con la seguridad de su almacenamiento y transporte, para que el hidrógeno se convierta en un vector energético consolidado, capaz incluso de sustituir a los combustibles fósiles en el sector de la automoción.

Los escenarios para esos años quedarían así:

Tabla 7: Generación eléctrica Alemania 2030 y 2050. Fuente: Energiewinde [25]

MIX ENERGÉTICO ALEMANIA 2030	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	688,39
Carbón	11,64%
del cual lignito	5,74%
Petróleo y derivados	0,50%
Gas natural	7,03%
Nuclear	0,00%
Cogeneración	18,05%
Renovables	62,96%
Hidráulica	4,81%
de la cual bombeo	0,00%
Eólica	35,93%
de la cual marina	1,75%
Biomasa y residuos renovables	10,37%
Solar	10,37%
Geotérmica	1,48%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%
MIX ENERGÉTICO ALEMANIA 2050	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	760,60
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,00%

Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	4,71%
Nuclear	0,00%
Cogeneración	11,76%
Renovables	83,53%
Hidráulica	4,71%
de la cual bombeo	0,00%
Eólica	50,59%
de la cual marina	15,18%
Biomasa y residuos renovables	11,76%
Solar	11,76%
Geotérmica	4,71%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

4.2.3.3. España

El escenario de generación en el año 2018 de España es el siguiente:

Tabla 8: Generación eléctrica Alemania 2018. Fuente: REE [11]

MIX ENERGÉTICO ESPAÑA 2018	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	256,3
Carbón	14,28%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	2,04%
Gas natural	11,92%
Nuclear	20,38%
RENOVABLES	36,10%
Hidráulica	13,8%
de la cual bombeo	0,79%
Eólica	19,05%
de la cual marina	0,00%
Biomasa y residuos renovables	8,90%
Solar	3,02%
de la cual termosolar	1,68%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	2,30%
Otros	1,20%

En España sólo uno de los siete reactores nucleares que hay es de tipo BWR, y como todos los reactores son de aproximadamente la misma potencia se pondrá en Simapro 1/7 del total al proceso BWR y el resto al PWR.

Los planes de futuro del mix energético español están recogidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, y pasan por aumentar el peso de las renovables progresivamente. En este plan, se han elaborado dos escenarios distintos de lo que va a

ser la generación eléctrica en España en el año 2030, uno tendencial y uno más ambicioso, que se muestran en la siguiente figura:

Tabla 9: Generación eléctrica España 2030 tendencia. Fuente: PNIIEC.

MIX ENERGÉTICO ESPAÑA 2030 tendencia	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	271,52
Carbón	8,00%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	9,00%
Nuclear	19,00%
RENOVABLES	64,00%
Hidráulica	12,00%
de la cual bombeo	0,80%
Eólica	32,00%
de la cual marina	0,00%
Biomasa y residuos renovables	6,00%
Solar	14,00%
de la cual termosolar	2,00%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

Tabla 10: Generación eléctrica España 2030 objetivo. Fuente: PNIIEC

MIX ENERGÉTICO ESPAÑA 2030 objetivo	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	310,68
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	11,00%
Nuclear	7,00%
Cogeneración	5,00%
RENOVABLES	78,00%
Hidráulica	10,00%
de la cual bombeo	0,70%
Eólica	35,00%
de la cual marina	0,00%
Biomasa y residuos renovables	4,00%
Solar	29,00%
de la cual termosolar	8,00%
Geotérmica	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

Las diferencias entre los dos escenarios son bastante notables, pero ambos coinciden en algunos puntos muy importantes, en concreto:

- Aumentar en gran medida el peso de la eólica, que pasaría del 20% actual a un 32-25%.
- Aumentar el peso de la fotovoltaica.
- Reducir la importancia del carbón y los ciclos.

Entre las principales diferencias se encuentran:

- El carbón quedaría completamente fuera en el escenario objetivo, mientras que en el tendencial permanecería, aunque reducido en gran medida.
- En el escenario tendencial se espera que la nuclear se mantenga prácticamente igual que en la actualidad, mientras que en el objetivo se espera cerrar varios reactores y que el peso de la nuclear quede reducido a menos de la mitad del actual.
- En el escenario objetivo se espera instalar termosolar con almacenamiento, que puede generar durante las horas nocturnas.
- En el escenario objetivo la cantidad de energía eléctrica generada es aproximadamente un 15% mayor que en el tendencial. En este escenario se espera que España cambie su situación actual y se convierta en un exportador de energía eléctrica.

El PNIEC sólo incluye escenarios hasta el año 2030, y no se ha conseguido encontrar ningún otro plan o estrategia que elabore un escenario para dicho año. Por tanto, se ha elaborado otro escenario que pretende hacer una aproximación a lo que puede ser el escenario de generación eléctrica.

Tabla 11: Generación eléctrica España 2050.

MIX ENERGÉTICO ESPAÑA 2050	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	296,97
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	5,00%
Nuclear	0,00%
Cogeneración	6,00%
RENOVABLES	89,00%
Hidráulica	10,00%
de la cual bombeo	0,70%
Eólica	40,00%
de la cual marina	0,00%
Biomasa y residuos renovables	3,00%
Solar	36,00%
de la cual termosolar	6,00%
Geotérmica	0,00%
Residuos no renovables	0,00%
Otros	0,00%

Este escenario se ha elaborado teniendo en cuenta ciertos puntos básicos:

- Las centrales nucleares y las centrales térmicas de carbón habrán cesado su actividad de forma permanente para ese año.
- Los ciclos combinados seguirán funcionando, aunque de manera más residual, debido a su flexibilidad de operación. Servirán para cubrir las puntas de demanda y de apoyo cuando la generación renovable sea baja.
- La energía hidráulica permanecerá prácticamente igual, ya que no se puede instalar mucha más potencia.
- La eólica seguirá como ahora siendo la energía renovable más importante, y toda ella será terrestre.
- La generación fotovoltaica sufrirá un incremento espectacular, debido al gran potencial que tiene en España.
- La termosolar con almacenamiento también tendrá un peso importante dentro del mix, aunque muy lejos de la eólica y la fotovoltaica.
- En cuanto a la demanda, se ha supuesto que en el periodo 2030-2050 esta va a crecer con la misma tendencia que en el periodo 2018-2030, suponiendo la demanda del 2030 como la del escenario tendencial.

4.2.3.4. Francia

El escenario de generación en el año 2018 de Francia es el siguiente:

Tabla 12: Generación eléctrica Francia 2018. Fuente: RTE [48]

MIX ENERGÉTICO FRANCIA 2018	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	548,6
Carbón	1,06%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,40%
Gas natural	5,72%
Nuclear	71,67%
RENOVABLES	20,77%
Hidráulica	12,45%
de la cual bombeo	0,95%
Eólica	5,07%
de la cual marina	0,00%
Biomasa y residuos renovables	1,39%
Solar	1,86%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,38%
Otros	0,00%

Las intenciones del ejecutivo francés con respecto a la energía quedaron reflejadas en la Ley de Transición Energética aprobado en agosto de 2015 [49], cuyos principales objetivos son:

- Reducir en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 y en un 75% para el 2050 (respecto a los niveles de 1990).
- Reducir en un 50% el consumo energético final para el año 2050 respecto a 2012.
- Aumentar hasta el 32 % el peso de las energías renovables respecto al consumo final de energía en 2030 y al 40% de la producción de electricidad.
- Diversificar la producción de electricidad y bajar al 50% el peso de la energía nuclear en el horizonte 2035.
- Construcción de parque eólicos marinos

Con acuerdo a estos puntos generales, se ha elaborado el siguiente escenario para el año 2030:

Tabla 13: Generación eléctrica Francia 2030.

MIX ENERGÉTICO FRANCIA 2030	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	570 TWh
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,0%
Petróleo y derivados	0,01%
Gas natural	8,21%
Nuclear	57,98%
RENOVABLES	32,79%
Hidráulica	10,00%
de la cual bombeo	0,70%
Eólica	11,79%
de la cual marina	1,18%
Biomasa y residuos renovables	4,00%
Solar	7,00%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	1,00%

Para la introducción de datos en Simapro se considerará que la energía hidráulica se distribuye entre centrales de acumulación y de agua fluyente de la misma manera que en el escenario actual. Por otro lado, se considerará que un 10% de la energía eólica total corresponde a la eólica marina.

En cuanto a la demanda eléctrica total, se ha modelado un incremento anual del 0,5%.

En cuanto al año 2050, como no se ha conseguido encontrar ningún plan o estrategia que modele como va a ser la generación eléctrica en ese año, se ha considerado que los cambios en el mix durante el periodo 2030-2050 van a seguir con la misma tendencia que en el periodo 2018-2030. Por lo tanto, el escenario para el año 2050 sería el siguiente:

Tabla 14: Generación eléctrica Francia 2050.

MIX ENERGÉTICO FRANCIA 2050	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	643,53 TWh
Carbón	0,00%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	5,47%
Nuclear	35,17%
RENOVABLES	58,36%
Hidráulica	10,00%
de la cual bombeo	0,70%
Eólica	23,01%
de la cual marina	4,60%
Biomasa y residuos renovables	9,09%
Solar	15,57%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	1,00%
Otros	0,00%

En este caso las proporciones de la hidráulica se mantienen igual, y la eólica marina subiría al 20%. En cuanto a la demanda eléctrica total, se ha modelado un incremento anual del 0,5%.

4.2.3.5. Polonia

El escenario de generación en el año 2016 de Polonia es el siguiente:

Tabla 15: Generación eléctrica Polonia 2016. Fuente: Comisión Europea [4].

MIX ENERGÉTICO POLONIA 2016	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	166,63
Carbón	78,21%
del cual lignito	31,19%
Petróleo y derivados	1,38%
Gas natural	6,27%
Nuclear	0,00%
RENOVABLES	13,98%
Hidráulica	1,57%
de la cual bombeo	0,29%
Eólica	7,55%
Biomasa y residuos renovables	4,77%
Solar	0,07%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	0,13%
Otros	0,04%

Los planes de futuro del sistema eléctrico polaco pasan por ir reduciendo la participación del carbón en el mix y aumentar la cuota de renovables, dando prioridad a la eólica. Los principales cambios que se van a producir son:

- Polonia incorporará a su mix dos centrales nucleares de tipo PWR para el año 2035, y se espera que la primera de ellas esté operativa para el año 2024 [50]. Con esto se conseguirá reducir en buena medida las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación eléctrica en el país.
- Según el Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030 se pretende que importancia del carbón en la producción eléctrica baja como mínimo al 60% para 2030 [51].
- Se prevé la construcción de parques eólicos marinos con 1 GW de capacidad para el 2025 [51].

Como no se ha conseguido encontrar ningún plan o estrategia concreta para cambiar el mix energético polaco en los próximos años, se ha elaborado uno que se ajusta bastante a los puntos expuestos en los apartados anteriores.

Tabla 16: Escenario generación eléctrica Polonia 2030.

MIX ENERGÉTICO POLONIA 2030	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	191,50
Carbón	55,00%
del cual lignito	11,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	8,00%
Nuclear	11,40%
RENOVABLES	24,60%
Hidráulica	1,60%
de la cual bombeo	0,30%
Eólica	12,00%
de la cual marina	
Biomasa y residuos renovables	6,00%
Solar	5,00%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	1,00%
Otros	0,00%

Se ha supuesto que la reducción de peso del carbón supondrá que para el 2030 se habrá reducido en 23 puntos, y que un cuarto de la generación vendrá de fuentes de energía limpia. La aparición de la energía nuclear supondrá que un poco más de un 10% provenga de esta fuente, lo que permitirá reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en gran medida. En cuanto a las energías renovables, la que más peso puede llegar a tener es la eólica, seguida de la biomasa y la solar. Aunque pueda parecer que la cuota de renovables es bastante baja, si se cumplen estas expectativas el peso de las energías limpias prácticamente se duplicaría en menos de 15 años, lo que sería sin duda alguna un éxito total.

En cuanto al año 2050, como tampoco se ha conseguido encontrar ningún plan o estrategia que modele como va a ser la generación eléctrica en ese año, se ha considerado que los cambios en el mix durante el periodo 2030-2050 van a seguir con la misma tendencia que en el periodo 2016-2030. Por lo tanto, el escenario para el año 2050 sería el siguiente:

Tabla 17: Escenario generación eléctrica Polonia 2050.

MIX ENERGÉTICO POLONIA 2050	
Generación total de electricidad, por tec. - TWh	233,70
Carbón	21,85%
del cual lignito	0,00%
Petróleo y derivados	0,00%
Gas natural	13,22%
Nuclear	22,80%
RENOVABLES	40,14%
Hidráulica	1,70%
de la cual bombeo	0,30%
Eólica	18,35%
de la cual marina	3,67%
Biomasa y residuos renovables	7,75%
Solar	12,04%
Geotérmica	0,00%
Energías del océano	0,00%
Residuos no renovables	2,00%
Otros	0,00%

Se va a considerar que el único tipo de carbón que se va a utilizar para generar energía eléctrica es la antracita, y que se va a abandonar por completo el lignito para el año 2050, que tiene menos poder calorífico y es mucho más contaminante. También se ha considerado que el 20% de la generación eólica vendrá de parques eólicos marinos, ya que se espera que Polonia aproveche su salida al mar Báltico y que empiece la construcción de dichos parques.

En cuanto a la demanda eléctrica total, se ha modelado un incremento anual del 0,5% entre el periodo 2016-2050.

Los datos finales de generación que habría que meter en el proceso de alta tensión son los que se muestran en la tabla 16.

Tabla 18: Porcentajes de generación en el mix de alta tensión de todos los países

Proceso Simapro generación en alta tensión		DINAMARCA		ALEMANIA			ESPAÑA				FRANCIA			POLONIA		
		2017	2030	2018	2030	2050	2018	2030 tend.	2030 obj.	2050	2018	2030	2050	2016	2030	2050
HIDRÁULICA	Convencional	0,00%	0,00%	0,35%	0,68%	0,67%	11,60%	10,40%	10,58%	12,63%	5,86%	5,00%	5,51%	0,00%	0,00%	0,00%
	Fluyente	0,06%	0,56%	1,81%	3,47%	3,45%	2,10%	2,31%	2,79%	2,00%	5,86%	5,00%	5,51%	1,29%	1,37%	1,59%
	Bombeo	0,00%	0,00%	0,64%	1,22%	1,21%	0,83%	0,92%	1,10%	7,81%	0,97%	0,75%	0,83%	0,29%	0,32%	0,34%
NUCLEAR	PWR	0,00%	0,00%	1,50%	0,00%	0,00%	18,33%	18,58%	6,53%	0,00%	73,03%	62,35%	42,56%	0,00%	12,00%	25,92%
	BWR	0,00%	0,00%	11,09%	0,00%	0,00%	3,05%	3,10%	3,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CARBÓN	Antracita (Hard coal)	29,77%	0,00%	13,78%	6,61%	0,00%	14,99%	9,79%	0,00%	0,00%	1,08%	0,00%	0,00%	47,07%	46,32%	25,23%
	Lignito	0,00%	0,00%	24,22%	6,61%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	31,30%	11,58%	0,00%
PETRÓLEO Y DERIVADOS	Petróleo	1,08%	0,00%	0,65%	0,00%	1,07%	2,14%	0,00%	0,00%	0,00%	0,41%	0,00%	0,00%	1,38%	0,00%	0,00%
GAS NATURAL	Planta convencional	7,27%	0,00%	14,70%	7,85%	4,27%	12,51%	10,75%	15,27%	7,81%	5,83%	8,83%	6,48%	6,27%	8,42%	15,03%
	Planta <10MW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
EÓLICA	Terrestre <1MW	13,97%	7,22%	0,00%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Terrestre 1-3MW	16,00%	36,11%	15,61%	33,38%	41,47%	17,99%	36,87%	48,45%	62,50%	5,16%	12,68%	24,52%	7,56%	11,37%	16,69%
	Terrestre >3MW	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Marina 1-3MW	12,96%	28,89%	3,23%	6,87%	17,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,72%	0,00%	1,26%	4,17%
BIOENERGÍAS	Biomasa (wood chips)	16,59%	23,92%	2,00%	11,57%	13,33%	1,82%	3,36%	8,40%	5,00%	0,97%	4,30%	10,76%	4,78%	6,32%	8,81%
	Biogas	2,30%	3,31%	1,82%	0,00%	0,00%	1,00%	2,00%	2,50%	2,25%	0,84%	1,08%	1,18%	0,00%	0,00%	0,00%
GEOTÉRMICA	Geotérmica	0,00%	0,00%	0,00%	1,48%	4,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
COGENERACIÓN	Tratamiento de gas/otros	0,00%	0,00%	9,54%	20,25%	13,33%	11,64%	1,92%	1,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,13%	1,05%	2,27%

4.3. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.3.1. Tecnologías de generación

Antes de empezar a realizar los análisis de cada país, se ha creído necesario estudiar que impactos ambientales tiene cada tipo de tecnología de generación, por lo que se ha elaborado un ACV en el que se han introducido las fuentes de generación más importantes. Los resultados obtenidos son los siguientes:

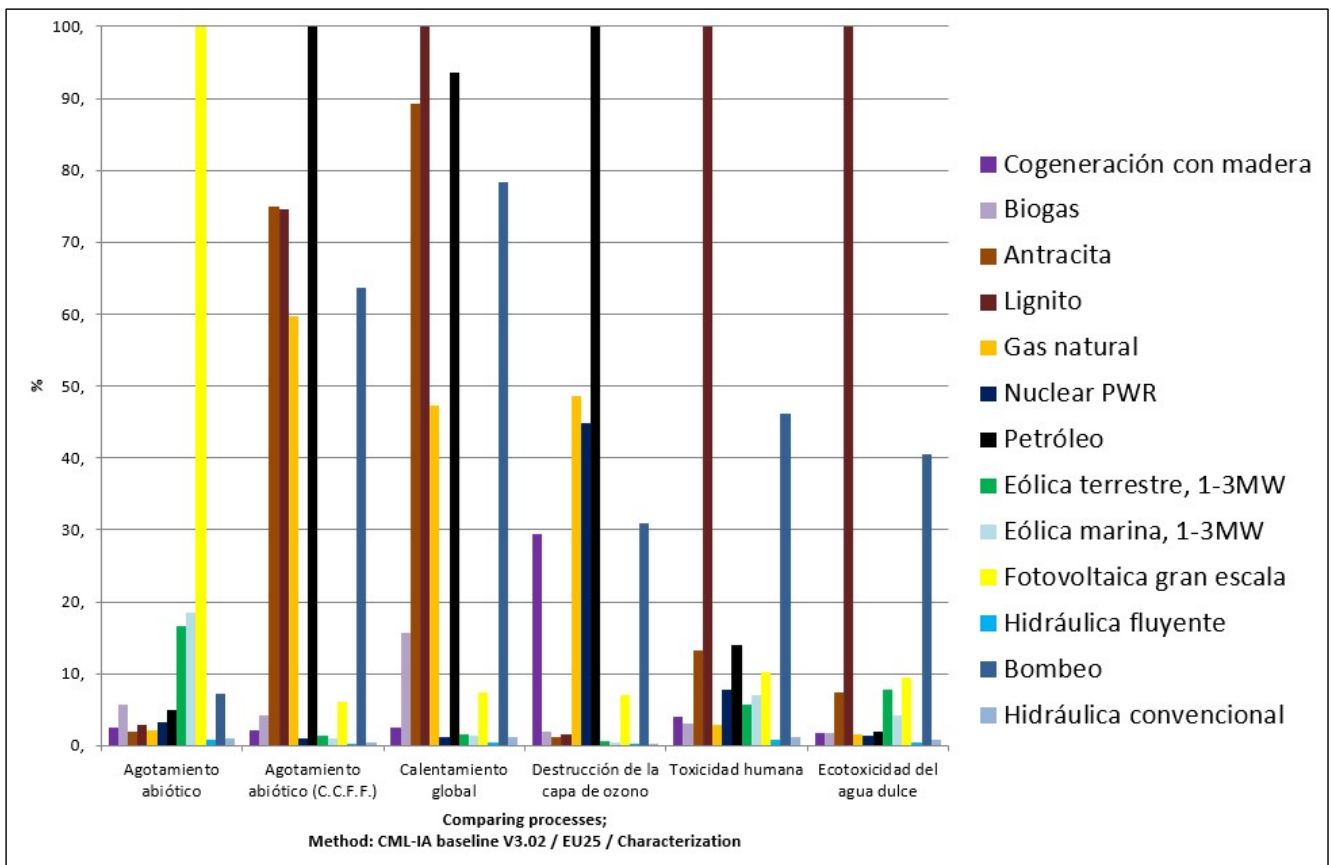


Figura 29: Comparativa tipos de tecnologías de generación (1)

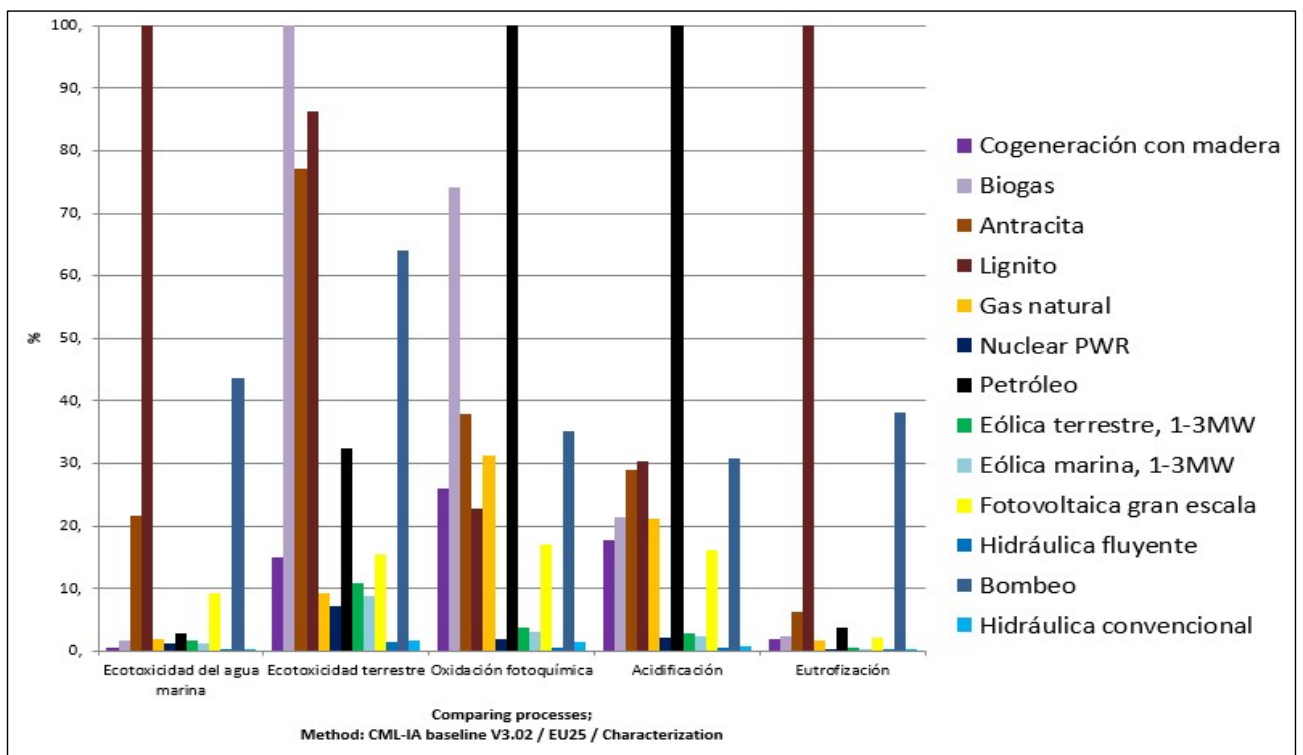


Figura 30: Comparativa tipos de tecnologías de generación (2)

Tabla 19: Impactos ambientales por cada kWh generado de cada tecnología

	Agotamiento abiótico	Agotamiento abiótico (C.F.)	Calentamiento global	Destrucción de la capa de ozono	Toxicidad humana	Ecotoxicidad del agua dulce	Ecotoxicidad del agua marina	Ecotoxicidad terrestre	Oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
COGENERACIÓN CON MADERA	6,72E-08	3,48E-01	3,01E-02	6,08E-08	3,64E-02	2,65E-02	1,88E+01	2,42E-04	5,11E-05	7,31E-04	1,87E-04
BIOGAS	1,47E-07	7,03E-01	1,93E-01	3,99E-09	2,79E-02	2,60E-02	6,64E+01	1,63E-03	1,46E-04	8,80E-04	2,20E-04
ANTRACITA	5,00E-08	1,28E+01	1,10E+00	2,44E-09	1,19E-01	1,15E-01	8,02E+02	1,25E-03	7,47E-05	1,19E-03	5,94E-04
LIGNITO	7,25E-08	1,28E+01	1,23E+00	3,27E-09	8,96E-01	1,55E+00	3,69E+03	1,40E-03	4,49E-05	1,24E-03	9,44E-03
GAS NATURAL	5,58E-08	1,02E+01	5,81E-01	1,00E-07	2,57E-02	2,33E-02	7,36E+01	1,49E-04	6,17E-05	8,71E-04	1,61E-04
NUCLEAR PWR	8,34E-08	1,58E-01	1,34E-02	9,25E-08	6,94E-02	2,04E-02	4,57E+01	1,19E-04	3,89E-06	8,54E-05	2,45E-05
PETRÓLEO	1,29E-07	1,71E+01	1,15E+00	2,07E-07	1,25E-01	3,06E-02	1,04E+02	5,27E-04	1,97E-04	4,09E-03	3,56E-04
EÓLICA TERRESTRE, 1-3MW	4,31E-07	2,35E-01	1,84E-02	1,34E-09	5,16E-02	1,21E-01	6,66E+01	1,77E-04	7,52E-06	1,13E-04	4,85E-05
EÓLICA MARINA, 1- 3MW	4,80E-07	1,86E-01	1,66E-02	9,29E-10	6,22E-02	6,53E-02	4,58E+01	1,45E-04	6,24E-06	9,73E-05	3,92E-05
FOTOVOLTAICA GRAN ESCALA	2,59E-06	1,05E+00	9,04E-02	1,47E-08	9,12E-02	1,48E-01	3,43E+02	2,53E-04	3,35E-05	6,63E-04	2,03E-04
HIDRÁULICA FLUYENTE	1,89E-08	4,21E-02	4,39E-03	3,34E-10	6,64E-03	7,43E-03	5,84E+00	2,38E-05	1,20E-06	2,01E-05	6,46E-06
BOMBEO HIDRÁULICA CONVENCIONAL	1,87E-07	1,09E+01	9,60E-01	6,40E-08	4,14E-01	6,26E-01	1,61E+03	1,04E-03	6,93E-05	1,27E-03	3,61E-03
	2,44E-08	5,79E-02	1,34E-02	4,54E-10	9,83E-03	1,19E-02	8,38E+00	2,76E-05	3,15E-06	2,83E-05	7,89E-06

En las figuras 29 y 30 y en la tabla 18 se observan los resultados de la simulación, que coinciden en mayor parte con lo que se podía esperar a priori, y es que se demuestra que los combustibles fósiles son por lo general muchísimos más perjudiciales para el medio ambiente que las energías limpias. Además de este hecho se puede comprobar:

- Que de entre todos los combustibles fósiles el más perjudicial es el lignito, que tiene el mayor impacto en la eutrofización y los diferentes tipos de ecotoxicidad.
- Que los derivados del petróleo tienen también un impacto medioambiental muy considerable, sobre todo en la destrucción de la capa de ozono, pero también en la generación de GEI y en la acidificación.
- Que la energía por bombeo tiene unos impactos mucho más graves de los que podría parecer a priori.
- Que la energía nuclear apenas tiene ningún efecto sobre el medio ambiente, sólo en la destrucción de la capa de ozono. La mayor parte de los impactos ambientales que se producen en la generación nuclear no corresponden a la fase de operación, sino mayoritariamente a la fase de extracción y enriquecimiento del uranio [1].
- Que el agotamiento abiótico constituye un caso muy particular entre los impactos ambientales, ya que es el único en la que las fuentes de energía renovables afectan más que los combustibles fósiles o la nuclear, especialmente la fotovoltaica. Este impacto se produce mayoritariamente durante la extracción de los materiales que se usan para la fabricación de los paneles fotovoltaicos (vidrio, silicio, aluminio, cobre, telurio de cadmio, etc.) [15].

Muchas de las energías de generación aparecen en Simapro divididas en subcategorías que merece la pena analizar. Por ejemplo, en la gráfica que se muestra a continuación se pueden observar el análisis que se ha hecho de los dos tipos de centrales nucleares más importantes, las de agua a presión (PWR) y las de agua a ebullición (BWR).

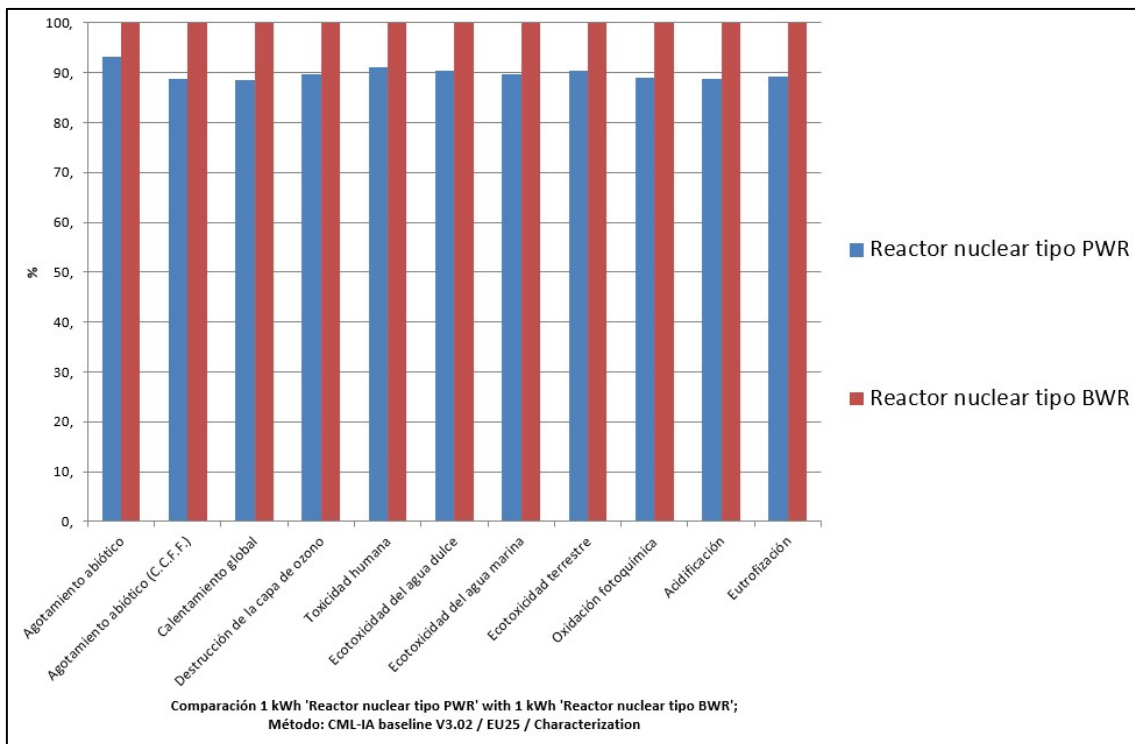


Figura 31: Comparativa ACV centrales nucleares tipo PWR y BWR

Tabla 20: Comparativa ACV centrales nucleares tipo PWR y BWR

Categoría	Unidad	Reactor nuclear tipo PWR	Reactor nuclear tipo BWR
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	8,34E-08	8,95E-08
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	1,58E-01	1,78E-01
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,34E-02	1,52E-02
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	9,25E-08	1,03E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	6,94E-02	7,61E-02
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DB eq	2,04E-02	2,25E-02
Ecotoxicidad del agua marina	kg 1,4-DB eq	4,57E+01	5,09E+01
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	1,19E-04	1,32E-04
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	3,89E-06	4,38E-06
Acidificación	kg SO2 eq	8,54E-05	9,61E-05
Eutrofización	kg PO4--- eq	2,45E-05	2,75E-05

En el análisis se demuestra que las centrales PWR tienen un impacto ambiental menor que las de BWR en todas las categorías, aunque tampoco hay una diferencia excesiva entre las dos.

La eólica también tiene subdivisiones, en este caso por el tamaño de las turbinas y por si son terrestres (onshore) o marina (offshore). En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos:

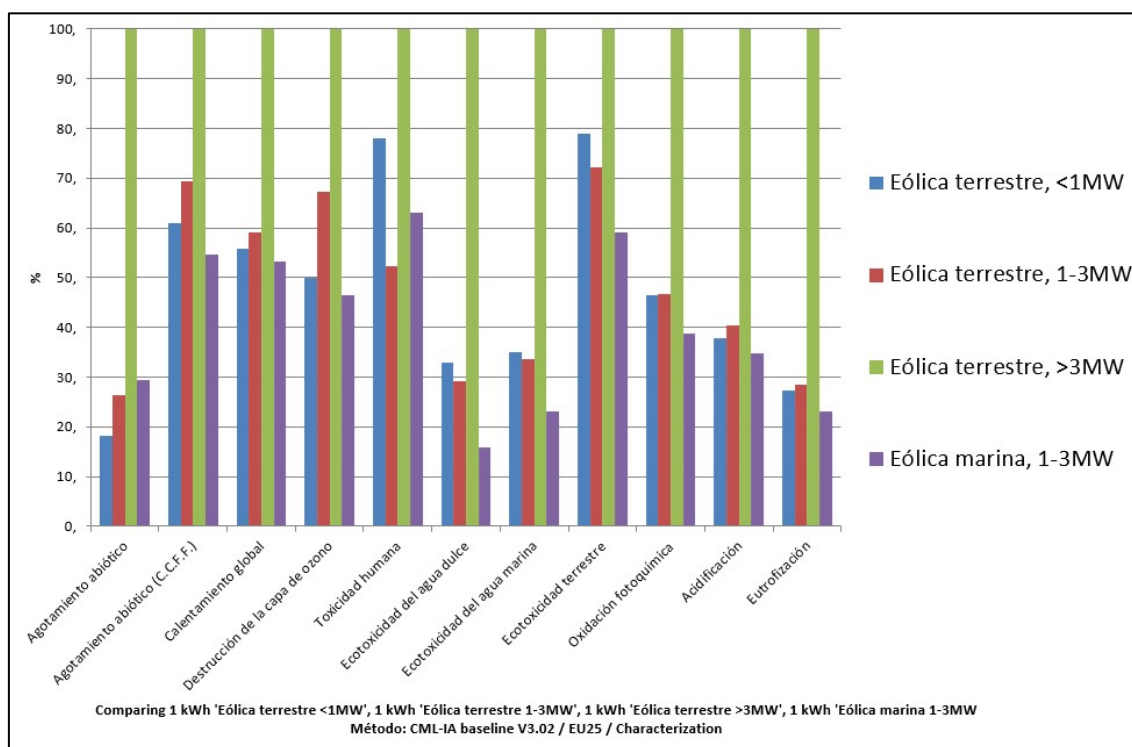


Figura 32: Comparativa ACV tipos de eólica

Tabla 21: Impactos por kWh de la energía eólica

Categoría	Unidad	Eólica terrestre <1MW	Eólica terrestre, 1-3MW	Eólica terrestre, >3MW	Eólica Marina, 1-3MW
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	2,97E-07	4,31E-07	1,63E-06	4,80E-07
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	2,07E-01	2,35E-01	3,39E-01	1,86E-01
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,73E-02	1,84E-02	3,11E-02	1,66E-02
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,00E-09	1,34E-09	2,00E-09	9,29E-10
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	7,69E-02	5,16E-02	9,85E-02	6,22E-02
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DB eq	1,36E-01	1,21E-01	4,14E-01	6,53E-02
Ecotoxicidad del agua marina	kg 1,4-DB eq	6,96E+01	6,66E+01	1,99E+02	4,58E+01
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	1,93E-04	1,77E-04	2,45E-04	1,45E-04
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	7,48E-06	7,52E-06	1,61E-05	6,24E-06
Acidificación	kg SO2 eq	1,06E-04	1,13E-04	2,80E-04	9,73E-05
Eutrofización	kg PO4--- eq	4,63E-05	4,85E-05	1,70E-04	3,92E-05

La categoría con mayor peso en todos los impactos ambientales son las turbinas eólicas terrestres de más de 3MW. Hay que mencionar que estas turbinas tan grandes no suelen ser poner en parques eólicos terrestres y se suelen reservar para los marinos, donde la instalación es mucho más sencilla y donde se puede aprovechar la mayor potencia de los aerogeneradores.

Por otro lado, los aerogeneradores marinos presentan los impactos más reducidos de entre todas las eólicas.

4.3.2. Comparativa general de los países

Se muestra a continuación la comparativa de todos los países en el último año del que se tienen registro, que es 2016 para Polonia, 2017 para Dinamarca y 2018 para Alemania, España y Francia. La unidad funcional sigue siendo el kWh en la red de baja tensión.

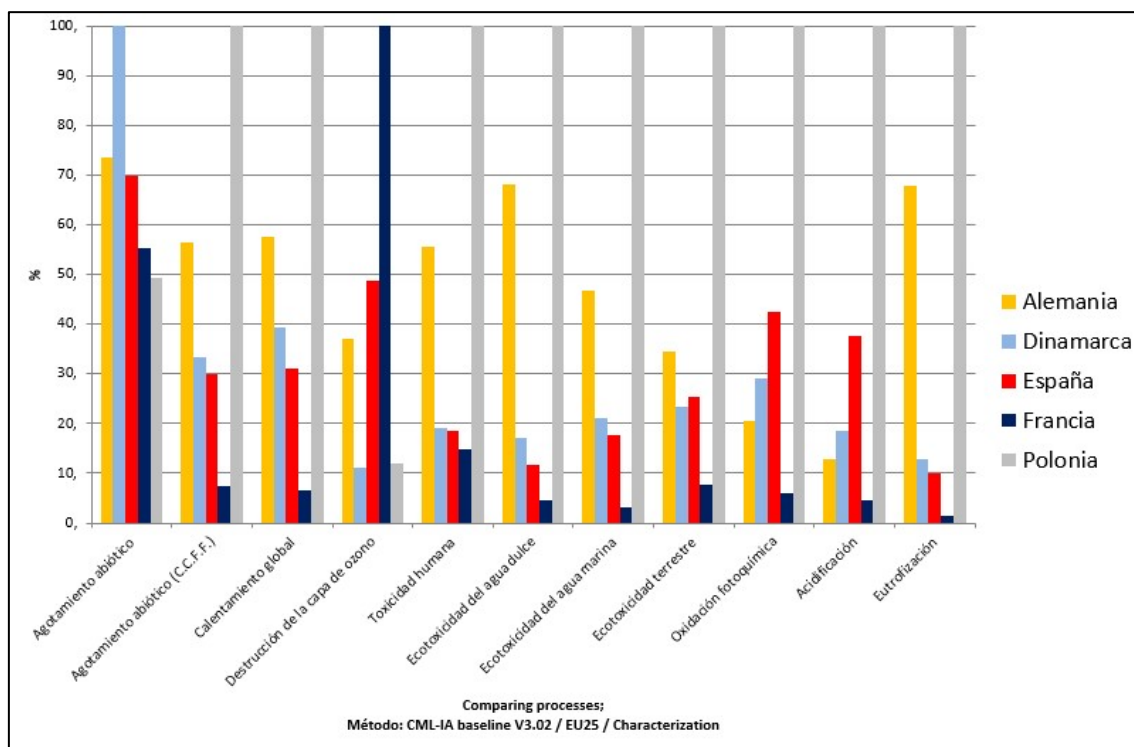


Figura 33: Comparativa mix países

Tabla 22: Comparativa mix de países

Categoría	Unidad	Alemania	Dinamarca	España	Francia	Polonia
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	8,99E-07	8,72E-07	7,69E-07	7,41E-07	6,94E-07
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	6,49E+00	3,95E+00	6,63E+00	9,54E-01	1,26E+01
Calentamiento global	kg CO2 eq	5,61E-01	3,92E-01	4,80E-01	7,32E-02	1,07E+00
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	3,20E-08	1,03E-08	6,87E-08	8,88E-08	1,13E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2,91E-01	1,24E-01	1,31E-01	1,05E-01	5,45E-01
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DB eq	5,90E-01	2,82E-01	2,42E-01	2,04E-01	8,47E-01
Ecotoxicidad del agua marina	kg 1,4-DB eq	1,12E+03	5,52E+02	5,03E+02	1,54E+02	2,51E+03
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3,65E-03	3,46E-03	3,35E-03	3,14E-03	5,32E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	5,20E-05	7,15E-05	1,17E-04	1,84E-05	2,56E-04
Acidificación	kg SO2 eq	8,57E-04	1,20E-03	2,85E-03	3,67E-04	6,54E-03
Eutrofización	kg PO4--- eq	2,44E-03	5,23E-04	4,69E-04	1,14E-04	3,96E-03

Como podía preverse desde un primer momento el mix que provoca más impactos ambientales en términos relativos es el polaco, que es el que más depende de los combustibles fósiles y en el que las energías renovables tienen menos trascendencia. En el único campo en el que no tiene apenas relevancia es en la destrucción de la capa de ozono. Esto se debe a que, como se observa en las figuras 29 y 30, ni la generación por carbón ni por lignito tiene mucha importancia en este campo.

Francia parece ser que ha conseguido tener el mix más respetuoso con el medio ambiente, al menos según los resultados de este análisis. Su impacto en la mayoría de los campos con respecto a los demás países es ínfimo, y sólo aumenta un poco en el agotamiento abiótico, en la ecotoxicidad terrestre, y en mucha mayor medida en la destrucción de la capa de ozono. Esto se debe a que la energía nuclear, que es la que predomina claramente en el país, no emite gases de efecto invernadero y no genera problemas medioambientales graves, salvo los residuos radiactivos que hay que almacenar y guardar. Con respecto a lo de la destrucción de la capa de ozono, en las figuras 29 y 30 se mostraba que la nuclear tenía un impacto muy grande en este campo, y es por eso por lo que es la categoría en la que más destaca.

En cuanto al caso de España, su mix es bastante equilibrado y no destaca especialmente en ninguna categoría, sólo un poco en la destrucción de la capa de ozono, probablemente porque es el segundo país después de Francia en el que la nuclear dentro del mix y debido también a la gran importancia de las centrales de gas natural.

Dinamarca también se presenta como un país bastante equilibrado que no destaca en ninguna categoría. Sin embargo, al ser el país con mayor cuota de renovables dentro de los estudiados, se podría esperar que sus impactos fuesen los más pequeños con diferencia, pero no es para nada así. Esto se debe a que quitando las renovables, el resto de la generación del país corresponde prácticamente sólo a los combustibles fósiles, sobre todo al carbón, por lo que su mix no es tan limpio como en un principio podría parecer.

Por último, Alemania tiene el segundo mix que más impacto genera en general, sólo por detrás de Polonia. En este caso, la nada desdeñable cuota de renovables del país compensa la importancia del carbón y del lignito y se consigue un mix relativamente equilibrado.

4.3.3. Resultados Dinamarca

Se recuerda que Dinamarca es un país que ha apostado fuertemente por las renovables y que tiene la mayor cuota de generación con renovables de los países analizados en este informe. Además, se espera que la descarbonización del mix sea una realidad en el año 2030. El ACV mostrará cómo afectará esta transición energética a los impactos medioambientales.

A continuación, se muestra la comparativa entre el escenario actual de generación de Dinamarca y el escenario futuro a 2030.

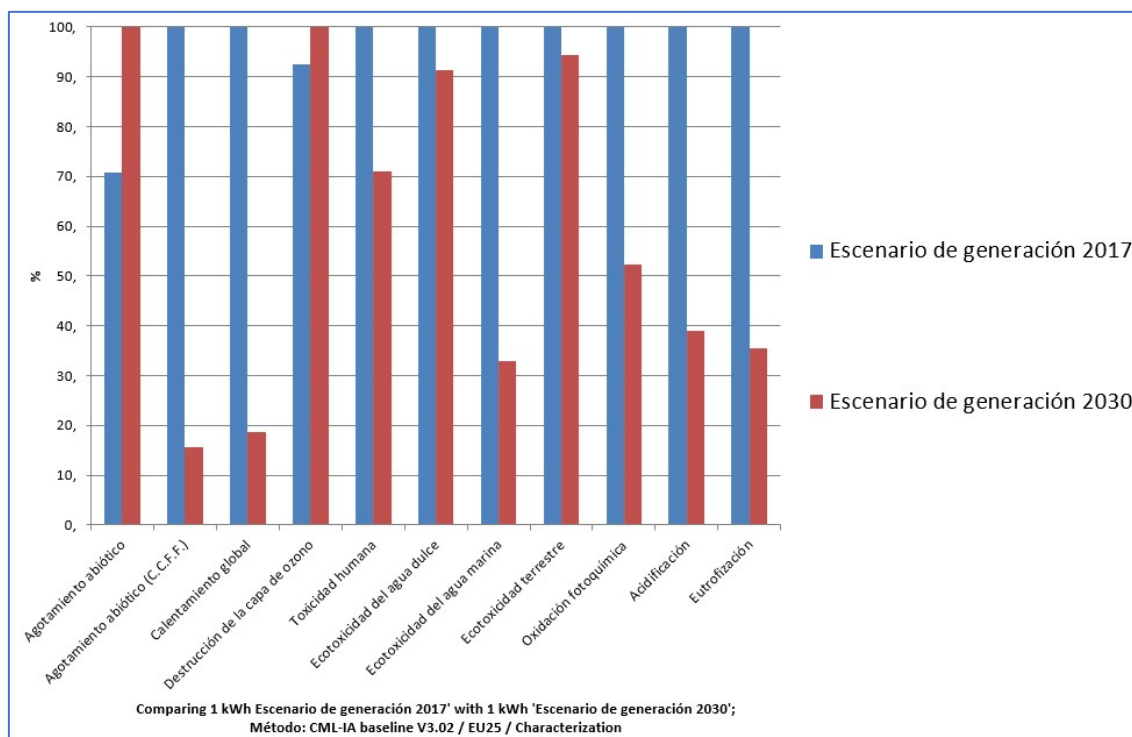


Figura 34: Comparativa Dinamarca escenario actual y 2030

Tabla 23: Impactos ambientales mixes de Dinamarca

Categorías	Unidad	2017	2030
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	8,72E-07	1,23E-06
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	3,95E+00	6,18E-01
Calentamiento global	kg CO2 eq	3,92E-01	7,34E-02
Destrucción de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	1,03E-08	1,11E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1,24E-01	8,79E-02
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	2,82E-01	2,58E-01
Ecotoxicidad de agua de mar	kg 1,4-DB eq	5,52E+02	1,82E+02
Eccotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3,46E-03	3,26E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	7,15E-05	3,74E-05
Acidificación	kg SO2 eq	1,20E-03	4,67E-04
Eutrofización	kg PO4--- eq	5,23E-04	1,86E-04

En algunos casos, los resultados mostrados en la figura 35 son en algunos casos esperados y en otros sorprendentes.

A partir de la gráfica se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los resultados mejoran de manera general en casi todos los impactos analizados.
- Los únicos dos impactos que empeoran son el agotamiento abiótico y la destrucción de la capa de ozono. El primero debido a que, como se muestra en las figuras 29 y 30, las tecnologías que más impacto tienen en esta área son las renovables, especialmente la solar fotovoltaica. El segundo, porque las tecnologías que más impacto tienen son el petróleo y la nuclear, que no tienen peso en el mix danés, y el resto de las energías están muy igualadas.

Si se presta atención sólo a los kilogramos de CO2 emitidos, que es el indicador más importante a tener en cuenta, en el escenario futuro se consigue la siguiente reducción de emisiones con respecto al actual.

Tabla 24: Emisiones de CO2 eq. de la generación de Dinamarca

	2018	2030
<i>Generación total</i>	30,52E+9 kWh	42,20E+9 kWh
<i>kg CO2 eq</i>	1,20E+10	3,10E+09
<i>Porcentaje</i>	100,00%	25,89%

La reducción que se consigue con un 100% de renovables es espectacular, y supera el 75%. Lo poco que queda de emisiones de CO2 se corresponde a la construcción de las plantas, a la obtención de los materiales, al transporte de los mismos, etc. Este residuo de emisiones se podría reducir electrificando los transportes o simplificando los procesos, pero todo eso escapa del alcance del presente proyecto.

4.3.4. Resultados Alemania

Alemania es un país que a través de un gran esfuerzo nacional había conseguido introducir una cuota de renovables muy elevado y que, por otro lado, también depende en gran medida de las centrales de carbón. El ACV de este país permitirá arrojar luz sobre cómo puede afectar la descarbonización de la generación alemana al medio ambiente.

A continuación, se muestra la comparativa entre el escenario actual de generación de Alemania y los escenarios futuros.

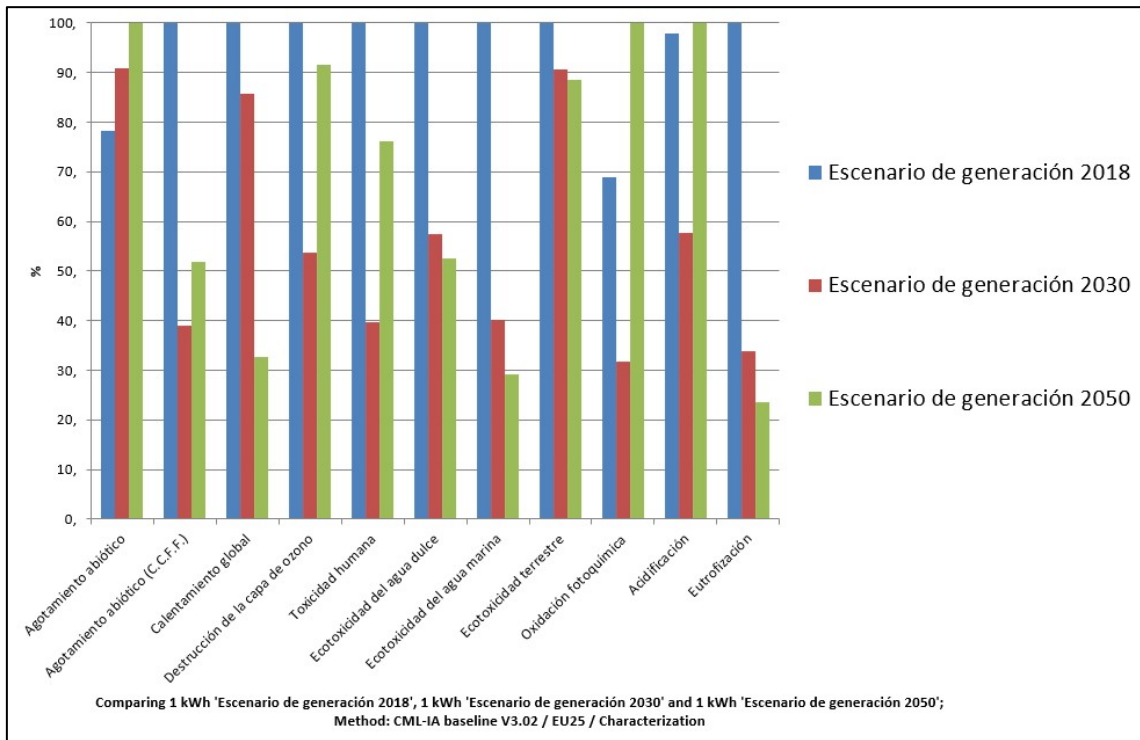


Figura 35: Comparativa Alemania escenario actual, 2030 y 2050

Tabla 25: Impactos ambientales mixes de Alemania por kWh

Categorías	Unidad	2018	2030	2050
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	9,02E-07	1,05E-06	1,15E-06
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	7,41E+00	2,90E+00	3,84E+00
Calentamiento global	kg CO2 eq	6,79E-01	5,82E-01	2,21E-01
Destrucción de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	3,55E-08	1,91E-08	3,25E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	3,57E-01	1,42E-01	2,72E-01
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	6,08E-01	3,50E-01	3,19E-01
Ecotoxicidad de agua de mar	kg 1,4-DB eq	1,16E+03	4,66E+02	3,38E+02
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3,57E-03	3,23E-03	3,16E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	7,47E-05	3,43E-05	1,09E-04
Acidificación	kg SO2 eq	1,06E-03	6,26E-04	1,08E-03
Eutrofización	kg PO4--- eq	2,56E-03	8,67E-04	6,06E-04

Queda claro en la figura que, de nuevo, el mix energético de 2050 que es el que cuenta con más cuota de renovables tiene de media menos impacto ambiental que los otros dos. A partir de la figura 35 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En los campos calentamiento global, eutrofización y todos los de ecotoxicidad las mejoras de los mixes de 2030 y 2050 con respecto al actual son notables. Los resultados son acordes a los mostrados en la figura 29, donde se podía comprobar que las fuentes de generación que más impacto tenían en dichas categorías eran los combustibles fósiles, concretamente el lignito.
- Por el contrario, en otros campos como el agotamiento abiótico, la acidificación y la oxidación, los escenarios futuros empeoran los resultados obtenidos por el actual. Si se observan con detenimiento las figuras 29 y 30, se comprobará que en esas áreas los impactos ambientales de los combustibles

fósiles son muy parecidos a los de las energías renovables, e incluso en el caso del agotamiento abiótico, el impacto de la energía fotovoltaica supera con creces a todas las demás. Los derivados del petróleo sí que tendrían un impacto mucho en los campos de la acidificación y la oxidación, pero su importancia es tan pequeña dentro del mix que no marca la diferencia.

- Parece que el mix de 2050 no consigue grandes mejoras con respecto al de 2030. La principal diferencia entre los dos es que lo que en 2030 se generaba con gas natural, antracita y lignito (aproximadamente un 19%), en 2050 se cubre con un aumento de la eólica principalmente. El resto de renovables permanecen sin modificaciones significativas. Es por este motivo por el que en los campos en que los combustibles fósiles tenían un impacto grande (calentamiento global, ecotoxicidad, eutrofización, etc.) mejoran sus resultados significativamente, y el resto permanece prácticamente sin cambios, o ligeramente peor.

Si se presta atención sólo a los kilogramos de CO₂ eq. emitidos, que es el indicador más importante a tener en cuenta, en los escenarios futuros se consiguen las siguientes reducciones de emisiones con respecto al actual.

Tabla 26: Emisiones de CO₂ eq. de la generación de Alemania

	2018	2030	2050
<i>Generación total</i>	648,40E+09 kWh	688,39E+09 kWh	760,60E+09 kWh
<i>kg CO₂ eq</i>	4,40E+11	4,00E+11	1,68E+11
<i>Porcentaje</i>	100,00%	90,96%	38,24%

La reducción de emisiones parece bastante insignificante en el año 2030. Probablemente se deba a que en este periodo está previsto prescindir de toda la generación nuclear, libre de emisiones de CO₂. El aumento de la demanda haría que el total de las emisiones al final no se redujese demasiado. En cuanto al año 2050, en este caso sí se consigue una reducción muy significativa de las emisiones, principalmente porque se prevé que se elimine toda la generación con carbón y lignito y que sólo quede el gas natural, y en una proporción pequeña.

4.3.5. Resultados España

España posee un mix energético bastante diversificado en el que se pueden encontrar prácticamente todas las tecnologías de generación. La cuota de renovables es del 40% y en el mix también hay carbón y energía nuclear, por lo que merece la pena analizar un mix tan variado.

A continuación, se muestra la comparativa entre el escenario actual de generación de España y los escenarios futuros.

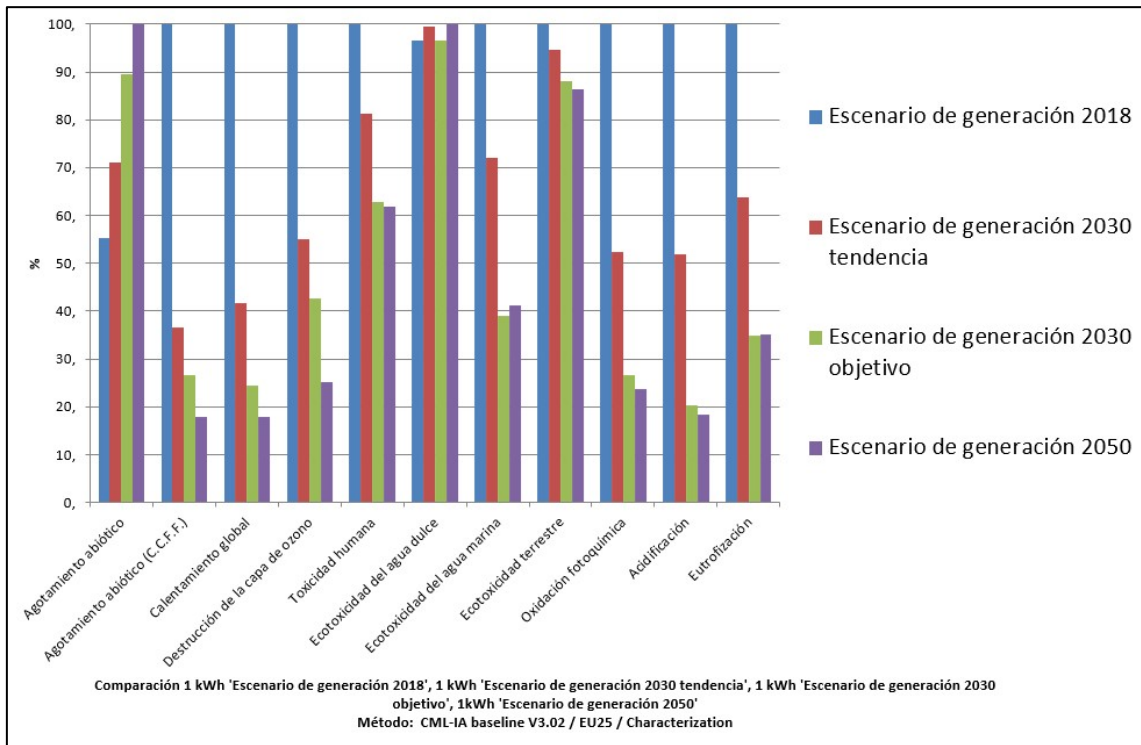


Figura 36: Comparativa España escenario actual, 2030 y 2050

Tabla 27: Impactos ambientales mixtes de España por kWh

Categorías	Unidad	2018	2030 obj.	2030 tend.	2050
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	7,69E-07	9,90E-07	1,24E-06	1,39E-06
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	6,63E+00	2,43E+00	1,77E+00	1,19E+00
Calentamiento global	kg CO2 eq	4,80E-01	2,00E-01	1,17E-01	8,59E-02
Destrucción de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	6,87E-08	3,78E-08	2,94E-08	1,72E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1,31E-01	1,06E-01	8,22E-02	8,10E-02
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	2,42E-01	2,50E-01	2,42E-01	2,51E-01
Ecotoxicidad de agua de mar	kg 1,4-DB eq	5,03E+02	3,62E+02	1,96E+02	2,07E+02
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3,35E-03	3,17E-03	2,95E-03	2,90E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	1,17E-04	6,13E-05	3,12E-05	2,79E-05
Acidificación	kg SO2 eq	2,85E-03	1,48E-03	5,81E-04	5,27E-04
Eutrofización	kg PO4--- eq	4,69E-04	2,99E-04	1,63E-04	1,64E-04

Como se podría esperar, el mix que más impacto tiene en general es el actual, que es el que tiene una cuota de renovables más baja. A partir de la figura 36 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En campos de la toxicidad y en el agotamiento abiótico, los cuatro mixes tienen un impacto muy parecido. Esto se debe a que en estos campos los daños que producen las energías renovables son muy parecidos a los de los combustibles fósiles (que se usan en España) y los de la nuclear. De hecho, en el agotamiento abiótico la solar fotovoltaica es la que tiene un mayor impacto, y es por ese motivo por el que en ese apartado el peor mix es el de 2050.

- Comparando los dos escenarios de 2030, se observa que el tendencial tiene un mayor impacto que el objetivo, salvo en los campos que se han expuesto anteriormente, y ambos reducen en gran medida los impactos con respecto al de 2018.
- Si se compara el escenario objetivo de 2030 con el de 2050 se observará que no hay grandes diferencias entre ellos. Esto parece bastante lógico, ya que la diferencia entre los dos es que en el de 2030 todavía hay un poco de nuclear y los ciclos suponen un 10% del total, mientras que en el 2050 desaparece la nuclear y los ciclos bajan al 5% y estos porcentajes pasan a las renovables. Como la energía nuclear no tenía grandes impactos y los ciclos tampoco destacaban por ser muy perjudiciales, los dos escenarios son prácticamente iguales entre sí.
- Aunque en el escenario elaborado para el año 2050 más del 90% de la generación provenga de energías renovables, las emisiones de CO₂ no son para nada despreciables. Esto se debe a que, además de que todavía los combustibles fósiles forman parte del mix, a que el ACV tiene en cuenta el ciclo de vida completo de todas las energías, por lo que el transporte de materias primas y las fases de construcción de las instalaciones supondrán un porcentaje de emisiones que no tiene que ver con la operación. Por otro lado, no se sabe cómo pueden cambiar con el paso del tiempo otros factores que se salen del alcance de este proyecto, como es el transporte. La electrificación de los vehículos que transportan las materias primas podría hacer que los impactos ambientales que se muestran en la figura se redujesen en gran medida, pero ese tipo de factores no se han tenido en cuenta en este proyecto.

El campo que más interesa es el calentamiento global (kg de dióxido de carbono emitidos), porque, como se ha explicado anteriormente, es el impacto al que más atención prestan las políticas medioambientales actuales. Como parece lógico, el mix en el que menos emisiones hay es el de 2050, cosa lógica si se tiene en cuenta que es el que mayor cuota de renovables tiene y en el que los combustibles fósiles son casi inexistentes. Si se miran sólo las emisiones de dióxido de carbono, en los escenarios futuros se consiguen las siguientes reducciones de emisiones con respecto al actual.

Tabla 28: Emisiones de CO₂ eq. de la generación de España

	2018	2030 obj.	2030 tend.	2050
<i>Generación total</i>	256,25E+09 kWh	310,68E+09 kWh	271,52E+09 kWh	296,97E+09 kWh
<i>kg CO₂ eq</i>	1,23E+11	6,20E+10	3,19E+10	2,55E+10
<i>Porcentaje</i>	100,00%	50,39%	25,90%	20,74%

Como se puede comprobar, el mix de 2050 consigue casi un 80% de reducción de emisiones con respecto al del año 2018. En cuanto al de 2030, el escenario objetivo consigue una reducción bastante más drástica que el tendencial, que tampoco es desdeñable, ya que reduciría en tan sólo doce años casi la mitad de las emisiones.

4.3.6. Resultados Francia

Como se había mencionado con anterioridad, Francia constituye un caso muy particular a nivel europeo, ya que en su mix energético hay una tecnología que es claramente predominante, que es la nuclear. Además, como se ha dicho en el apartado 9.1., este tipo de energía tiene unos impactos ambientales muy reducidos, incluso en comparación con

las renovables. Sin embargo, Francia quiere reducir su dependencia nuclear y apostar por las fuentes renovables.

A continuación, se muestra la comparativa entre el escenario actual de generación de Francia y los escenarios futuros.

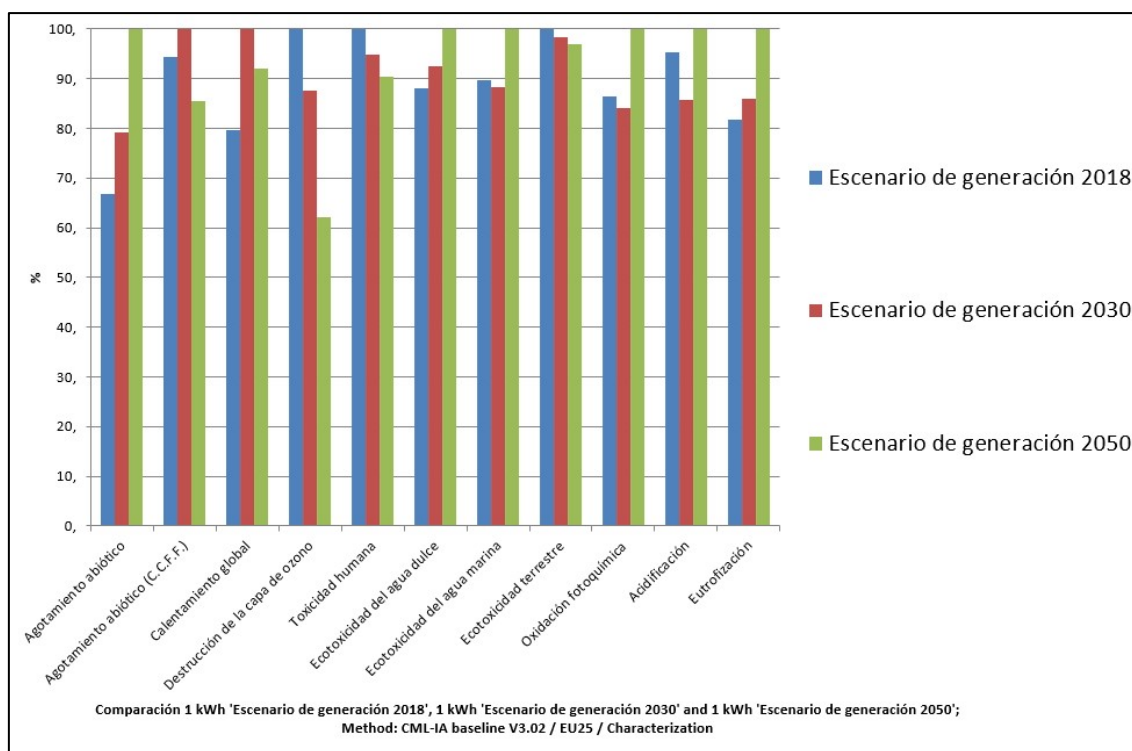


Figura 37: Comparativa Francia escenario actual, 2030 y 2050

Tabla 29: Impactos ambientales mixes de Francia

Categorías	Unidad	2018	2030	2050
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	7,41E-07	8,78E-07	1,11E-06
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	9,54E-01	1,01E+00	8,66E-01
Calentamiento global	kg CO2 eq	7,32E-02	9,19E-02	8,46E-02
Destrucción de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	8,88E-08	7,78E-08	5,53E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1,05E-01	9,98E-02	9,50E-02
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	2,04E-01	2,14E-01	2,32E-01
Ecotoxicidad de agua de mar	kg 1,4-DB eq	1,54E+02	1,52E+02	1,72E+02
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	3,14E-03	3,09E-03	3,04E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	1,84E-05	1,79E-05	2,13E-05
Acidificación	kg SO2 eq	3,67E-04	3,31E-04	3,86E-04
Eutrofización	kg PO4--- eq	1,14E-04	1,20E-04	1,39E-04

Rompiendo con la dinámica que se venía viendo en los demás países, en el caso francés los mixes de generación futuros no mejoran prácticamente nada el escenario actual de generación. A partir de la figura 37 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En los campos donde las energías renovables tienen un mayor impacto ambiental (agotamiento abiótico oxidación, acidificación, etc.) los resultados obtenidos empeoran un poco el estado actual.

- El único campo que mejora de manera notoria con los cambios introducidos es la destrucción de la capa de ozono, que, como se había explicado en el apartado 9.1., es el único en el que la energía nuclear tenía un impacto significativo.
- Los demás campos se mantienen prácticamente invariables y no presentan diferencias significativas.

Si se presta atención sólo a los kilogramos de CO2 emitidos, que es el indicador más importante a tener en cuenta, en los escenarios futuros se consiguen las siguientes reducciones de emisiones con respecto al actual.

Tabla 30: Emisiones de CO2 eq. de la generación de Francia

	2018	2030	2050
<i>Generación total</i>	548,60E+09 kWh	584,26E+09 kWh	643,53E+09 kWh
<i>kg CO2 eq</i>	4,01E+10	5,37E+10	5,44E+10
<i>Porcentaje</i>	100,00%	133,78%	135,58%

Los resultados obtenidos muestran que las emisiones de dióxido de carbono aumentarían si se producen cambios en el mix francés que sustituyan la nuclear por las renovables. Hay que recordar que la operación de las centrales nucleares no produce gases de efecto invernadero, y que las únicas emisiones asociadas a la energía nuclear se encuentran en el proceso de construcción de la central, transporte de combustible, etc. Sin embargo, aunque estos resultados podrían inducir a pensar que no merece la pena introducir más renovables, hay que recordar que Francia partía de unas emisiones de CO2 asociadas a la generación eléctrica muy bajas, y que, aunque se produjesen estos cambios y aumentasen las emisiones, su mix seguiría siendo comparativamente mucho mejor que el de otros países.

4.3.7. Resultados Polonia

En el caso de Polonia la tecnología predominante es el carbón, y entre las centrales térmicas de antracita y de lignito cubre tres cuartas partes de la generación del país. Como se ha comprobado en el apartado 9.2. su mix energético es claramente el más contaminante de entre todos los países analizados en este proyecto.

A continuación, se muestra la comparativa entre el escenario actual de generación de Polonia y los escenarios futuros.

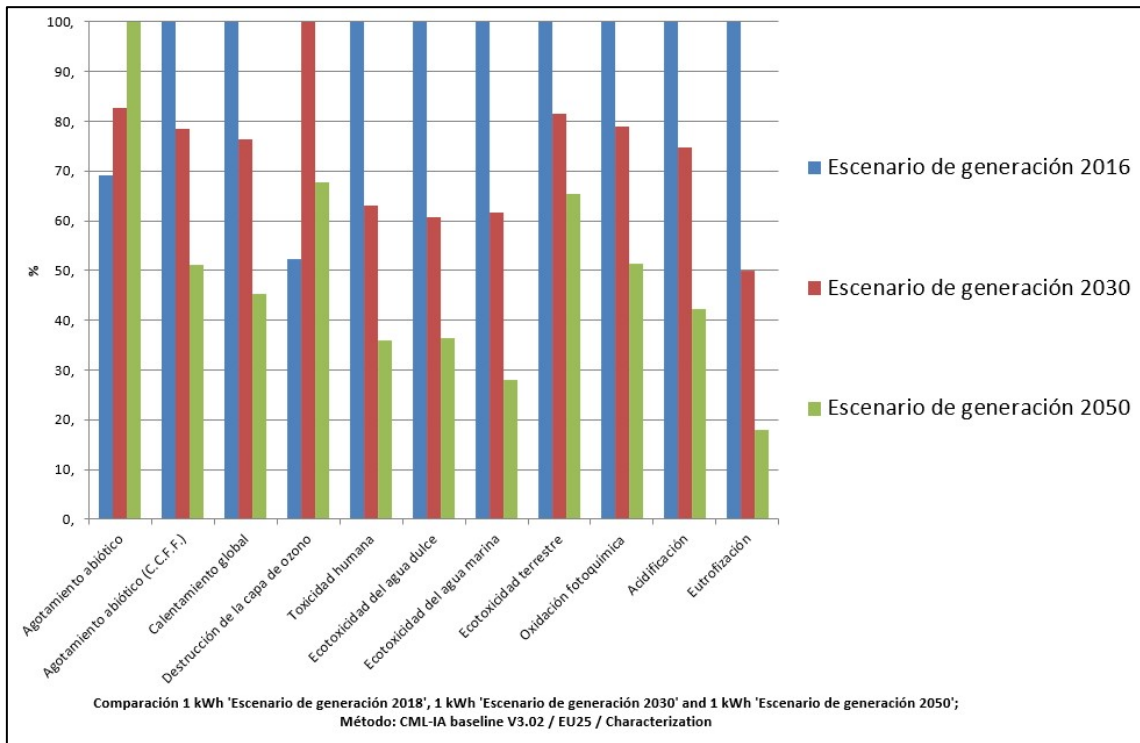


Figura 38: Comparativa Polonia escenario actual, 2030 y 2050

Tabla 31: Impactos ambientales mixes de Polonia

Categorías	Unidad	2016	2030	2050
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	6,94E-07	8,30E-07	1,00E-06
Agotamiento abiótico (C.C.F.F.)	MJ	1,26E+01	9,94E+00	6,46E+00
Calentamiento global	kg CO2 eq	1,07E+00	8,18E-01	4,86E-01
Destrucción de la capa de ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	1,13E-08	2,16E-08	1,46E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	5,45E-01	3,43E-01	1,96E-01
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	8,47E-01	5,15E-01	3,09E-01
Ecotoxicidad de agua de mar	kg 1,4-DB eq	2,51E+03	1,55E+03	7,01E+02
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	5,32E-03	4,34E-03	3,49E-03
Oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	2,56E-04	2,03E-04	1,32E-04
Acidificación	kg SO2 eq	6,54E-03	4,89E-03	2,77E-03
Eutrofización	kg PO4--- eq	3,96E-03	1,98E-03	7,11E-04

Los resultados son bastante claros y siguen la línea de los demás países, excluyendo a Francia. Los escenarios futuros mejoran de manera ostensible los resultados actuales en prácticamente todos los aspectos. A partir de la figura 38 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se mejoran prácticamente todos los campos analizados, sobre todo aquellos en los que los combustibles fósiles tenían más importancia, como son el calentamiento global, las ecotoxicidades, la eutrofización, etc.
- En el campo agotamiento abiótico los escenarios futuros empeoran los resultados actuales. Esto se debe mayoritariamente a la implantación de plantas fotovoltaicas, que es la tecnología de generación que más impacto ambiental tiene en este campo.

- La destrucción de la capa de ozono es el otro campo en el que se consiguen peores resultados en los escenarios futuros que en el actual. Esto se debe a la inauguración de una central nuclear en 2024 y de otra a partir de 2030. Se recuerda que este campo era el único en el que la tecnología nuclear tenía un impacto significativo.

Si se presta atención sólo a los kilogramos de CO2 emitidos, que es el indicador más importante a tener en cuenta, en los escenarios futuros se consiguen las siguientes reducciones de emisiones con respecto al actual.

Tabla 32: Emisiones de CO2 eq. de la generación de Polonia

	2016	2030	2050
Generación total	166,63E+09 kWh	191,50E+09 kWh	233,70E+09 kWh
kg CO2 eq	1,79E+11	1,57E+11	1,14E+11
Porcentaje	100,00%	87,75%	63,59%

Las reducciones que se conseguirían con los escenarios futuros de 2030 y 2050 son del 12,25% y del 36,41% respecto a las cifras del año 2016. Estas cifras parecen pequeñas en comparación con los otros países analizados. Las cifras son más modestas porque los planes de transición energética de Polonia son más moderados y menos ambiciosos que el del resto de los países. Como se ha explicado anteriormente, Polonia no quiere reducir drásticamente su dependencia del carbón, ya que es un recurso natural muy abundante en el país y la generación eléctrica con este combustible es bastante barata.

4.3.8. Análisis económico

En cuanto al impacto económico que pueden tener las transiciones energéticas se compararán los resultados obtenido con la siguiente figura que presenta la Agencia Internacional de la Energía:

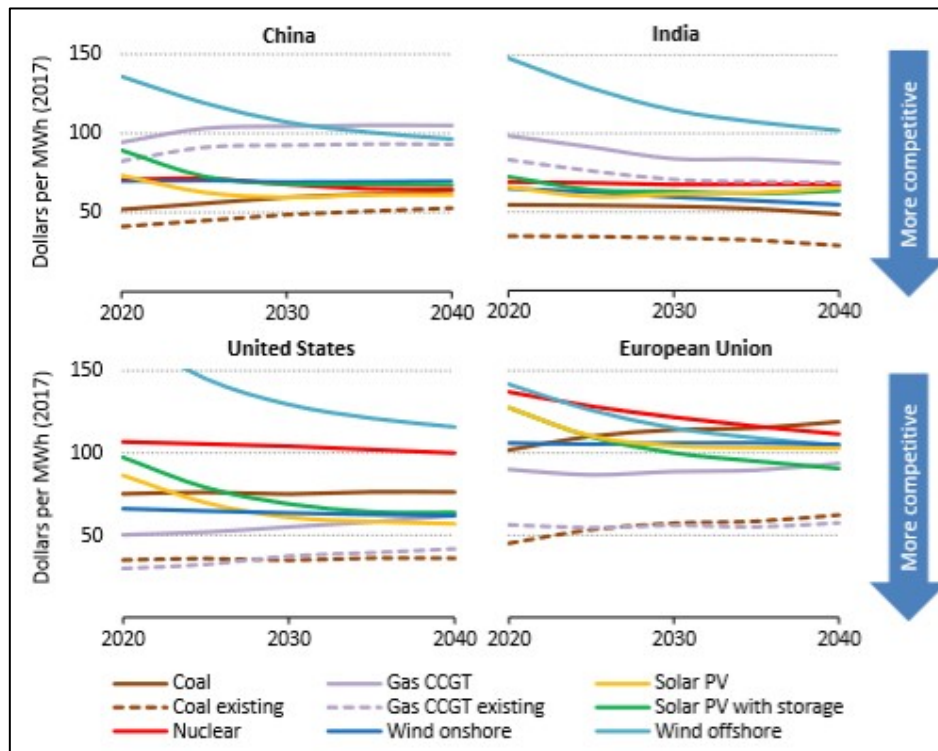


Figura 39: Evolución del precio de generación por tipo de tecnología. Fuente: IEA [52]

Observando cómo van a evolucionar los precios de la energía en el periodo 2020-2040 y teniendo en cuenta las transformaciones de los mixes se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los precios de las energías se van a ir agrupando con el paso del tiempo y no va a haber grandes diferencias entre ellas.
- Se espera que se vayan incrementando los costes de generación con combustibles fósiles, probablemente porque las políticas europeas van a ir en la dirección de aumentar las tasas de emisiones de CO₂ y aumentar impuestos a estas centrales. Por eso, las centrales térmicas de carbón, que hoy en día parece que son una gran idea para abaratar los costes, especialmente en países productores de carbón, en un futuro no van a salir tan baratas, lo que es sin duda una gran oportunidad para países como Alemania o Polonia de ir abandonándolo.
- Los precios de las energías renovables irán siendo cada vez más reducidos y podrán competir en igualdad de condiciones con las energías convencionales.
- La eólica terrestre no verá reducidos sus costes prácticamente nada. Esto se debe probablemente a que se trata de una tecnología muy consolidada en la que no cabe esperar grandes mejoras o innovaciones.
- La solar fotovoltaica con almacenamiento (baterías) será la renovable más barata, y además aportará una alternativa al bombeo, que es actualmente la única forma de almacenamiento de energía a gran escala que existe.

Por estos motivos, la transición energética que busca descarbonizar la generación eléctrica en Europa no va a afectar en gran medida al bolsillo de los ciudadanos.

5. CONCLUSIONES

La comparativa entre las distintas fuentes de generación ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- De entre todos los combustibles fósiles, el más perjudicial con diferencia es el lignito, por lo que los países que dependan mucho de él (Alemania y Polonia), deberán ir abandonando este con más rapidez que la antracita o el gas.
- Los derivados del petróleo también tienen un impacto muy negativo en campos como la destrucción de la capa de ozono o el calentamiento global.
- La tecnología nuclear es la que menos impactos negativos tiene de entre las no renovables. Sin embargo, en este análisis no se evalúan otros impactos como el riesgo de accidente, la mala opinión pública o el almacenamiento de residuos radiactivos que hacen que esta forma de generar energía no se tan idílica como en un principio podría parecer.
- El agotamiento abiótico constituye un caso muy particular en los impactos, ya que es el único en el que tienen más peso las energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica.
- Dentro de las energías renovables, las más respetuosas con el medio ambiente son las eólicas, siendo preferible la eólica marina en aquellos territorios en los que esta sea viable.
- La energía solar tiene un gran impacto en la categoría de agotamiento abiótico, que se debe a la extracción de materiales necesarios para la fabricación de los paneles fotovoltaicos.

En cuanto a la transición energética que van a emprender los países analizados en este informe se puede concluir:

- Como se ha mencionado anteriormente, aquellos países que dependen demasiado del lignito demasiado deberían abandonarlo, ya que es el combustible fósil más nocivo.
- El único combustible fósil que tiene expectativas de seguir existiendo en un futuro es el gas natural, debido a que es el menos nocivo de todos y a que puede funcionar de apoyo en los sistemas eléctricos cuando las renovables no estén generando suficiente energía.
- Aunque la energía nuclear tengo muy buenos índices de impacto ambiental en general se va a ir abandonando progresivamente y sustituyendo por renovables. Esto puede hacer que las emisiones de gases de efecto invernadero suban de forma notable, como se ha comprobado en el caso de Francia.
- La energía renovable por la que más se va a apostar en general es la eólica, y es que la tecnología es ya bastante madura y tiene unos impactos ambientales muy reducidos, incluso si las comparamos con otras renovables.
- Todos los países excepto Francia van a reducir de manera considerable sus emisiones de CO₂. Para cumplir con los objetivos marcados por la Unión Europea para 2050 deberán aplicar cambios similares en otros sectores como la industria y los transportes.

En cuanto al impacto económico que pueden tener las transiciones energéticas se puede concluir que:

- Los precios de las energías se van a ir agrupando con el paso del tiempo y no va a haber grandes diferencias entre ellas.

- Se espera que se vayan incrementando los costes de generación con combustibles fósiles.
- Los precios de las energías renovables irán siendo cada vez más reducidos y podrán competir en igualdad de condiciones con las energías convencionales.

6. REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] V. M. Fthenakis y K. Hyung Chul, «Greenhouse-Gas emissions from solar electric and nuclear power: A life cycle study,» *Energy Policy*, pp. 2249-2257, 2006.
- [2] J. P. Susana Pacheco, «Vocabulario climática para comunicadores y divulgación general,» 2013.
- [3] Climate Central, «Climate Central,» Climate Central, 20 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.climatecentral.org/gallery/graphics/co2-and-rising-global-temperatures>. [Último acceso: 14 Julio 2019].
- [4] Comisión Europea, «Hoja de Ruta de la Energía para 2050,» Bruselas, 2011.
- [5] T. v. K. A. F. T. Joris Koornneef *, «Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, pp. 448-467, 2008.
- [6] G. B. Losada, «Análisis de ciclo de vida de una central termosolar,» Leganés, 2011.
- [7] Varun, I. Bhat y R. Prakash, «LCA of renewable energy for electricity generation systems - A review,» *Renewable and Sustainable Energy Review*, nº 13, pp. 1067-1073, 2009.
- [8] D. García-Gusano, D. Garraín y J. Dufour, «Prospective life cycle assessment of Spanish electricity production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 75, pp. 21-34, 2017.
- [9] Escuela de Organización Industrial, «Análisis de Ciclo de Vida,» 2016.
- [10] J. D. Pampín, «Centrales eléctricas,» 2018.
- [11] Red Eléctrica de España, «Avance del Informe del sistema eléctrico español 2018,» Red Eléctrica de España, Alcobendas, 2018.
- [12] Protermo Solar, «Protermo Solar,» Protermo Solar, [En línea]. Available: <https://www.protermosolar.com/la-energia-termsolar/que-es-tipos-de-plantas-beneficios/>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [13] Kitwe On Line, «Kitwe On Line,» Kitwe On Line, [En línea]. Available: <https://kitweonline.com/business-in-kitwe/services-and-resources/renewable-energy-sources>. [Último acceso: 2 Julio 2019].
- [14] Fuentes de Energía Renovables, «Fuentes de Energía Renovables,» [En línea]. Available: <https://www.fuentesdeenergiarenovables.com/blog/que-es-una-central-fotovoltaica/>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [15] @Natural, «Paneles fotovoltaicos: ¿Cuáles de sus materiales son renovables?,» *ABC*, 17 Mayo 2017.

- [16] T. puiu, «ZME Science,» 27 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.zmescience.com/ecology/renewable-energy-ecology/world-largest-wind-turbine-09423432/>. [Último acceso: 4 Julio 2019].
- [17] M. Lara, «Joel,» 28 Julio 2010. [En línea]. Available: <https://michaeljoel1.blogspot.com/2010/07/primera-central-electrica-1882.html>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [18] Consejo de Seguridad Nuclear, «El funcionamiento de las centrales nucleares,» Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, 2012.
- [19] Energía Nuclear, «Energía Nuclear,» 14 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/reactor-nuclear/tipos>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [20] International Energy Agency, «International Energy Agency,» International Energy Agency, 2018. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/statistics/prices/>. [Último acceso: 14 Julio 2019].
- [21] Ministerio de Asuntos Económicos y de Asuntos de Interior, «Ministerio de Asuntos Económicos y de Asuntos de Interior,» [En línea]. Available: <http://www.noegletal.dk/>. [Último acceso: 16 Marzo 2019].
- [22] Energistyrelsen, «Energistyrelsen,» [En línea]. Available: ens.dk. [Último acceso: 27 Junio 2019].
- [23] Comisión Europea, «EU Energy in figures,» Publications Office of the European Union, 2018, Luxemburgo, 2018.
- [24] Banco Mundial, «Banco Mundial,» Grupo Banco Mundial, [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/pais/alemania?view=chart>. [Último acceso: 2 Marzo 2019].
- [25] Energy Transition, «Infographics Energiewinde,» 2017.
- [26] European Commission, «EU energy in figures,» Luxemburgo, 2018.
- [27] J. D. Pampín, «Centrales eléctricas,» Madrid, 2018.
- [28] A. B. F., «Alemania cierra 7 centrales nucleares en 2011 y su PIB crece un 3%,» *Energías Renovables*, 11 Enero 2012.
- [29] Ministerio de Transición Ecológica, «Energía nuclear,» Ministerio de Transición Ecológica, [En línea]. Available: <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>. [Último acceso: 10 Junio 2019].
- [30] CSN, «Consejo de Seguridad Nuclear,» [En línea]. Available: <https://www.csn.es/home>. [Último acceso: 23 Mayo 2019].
- [31] LM Agencias, «De Almaraz a Trillo: el cierre de las nucleares en España ya tiene fecha,» *Libre Mercado*, 22 Marzo 2019.

- [32] Wind Europe, «Wind energy in Europe in 2018: trends and statistics,» Bruselas, 2019.
- [33] Energy transition, «Energiewinde infographics,» 2018.
- [34] REE, «Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2017,» Red Eléctrica de España, Alcobendas, 2018.
- [35] Statista, «Statista,» [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/641251/potencia-termica-solar-instalada-por-paises/>. [Último acceso: 10 Junio 2019].
- [36] RTE, «Panorama de l'électricité renouvelable en 2018,» 2018.
- [37] Foro Nuclear, «Nuklear Forum,» 20 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.nuklearforum.ch/de/en/nuclearplanet>. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [38] Energía Nuclear, «Energía Nuclear,» [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/situacion/energia-nuclear-francia.html>. [Último acceso: 16 Marzo 2019].
- [39] «RFI English,» 6 Diciembre 2011. [En línea]. Available: <http://en.rfi.fr/france/20111205-greenpeace-activists-break-nuclear-plant-near-paris>. [Último acceso: 24 Junio 2019].
- [40] Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Polonia>. [Último acceso: 11 Junio 2019].
- [41] M. Planelles, «Una cumbre contra el cambio climático en la patria europea del carbón,» *El País*, 18 Diciembre 2018.
- [42] Eurocoal, «Eurocoal,» European Association for Coal and Lignite, [En línea]. Available: <https://euracoal.eu/info/country-profiles/poland/>. [Último acceso: 8 Julio 2019].
- [43] REE, «Red Eléctrica de España,» REE, [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es>. [Último acceso: 11 Abril 2019].
- [44] RTE, «Réseau de transport d'électricité,» RTE, [En línea]. Available: <https://www.rte-france.com/>. [Último acceso: 21 Mayo 2019].
- [45] Agencia Andaluza de la Energía, «Agencia Andaluza de la Energía,» [En línea]. Available: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/energias-renovables/ciudadania/energia-eolica>. [Último acceso: 16 Julio 2019].
- [46] Energías Renovables, «Dinamarca quiere que toda su electricidad sea 100% renovable en 2030,» *Energías Renovables*, 2018 Julio 5.
- [47] Ministerio de Energía Danesa, «Denmark's Draft Integrated National Energy and Climate,» 2019.
- [48] RTE, «Bilan Électrique 2018,» RTE, 2019.
- [49] J.-F. Collin, «La ley de transición energética francesa para el crecimiento verde y la Programación Plurianual de Energía 2016-2023,» Real Instituto Elcano, Madrid, 2015.

[50] «Polonia apuesta por la energía nuclear y tendrá operativas dos centrales en 2035,» *La Información*, 1 Febrero 2014.

[51] Ministerstwo Energii, «National Energy and Climate Plan for the years 2021-2030: objectives and targets, policies and measures,» 2019.

[52] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2018,» IEA Publications, 2019.