



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL
Y ECONÓMICA DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS
PAÍSES CON PLANES DE DESARROLLO EN ENERGÍA
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA BAJO LA PERSPECTIVA DEL
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

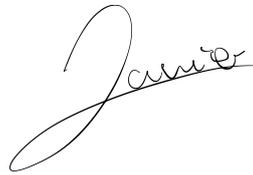
Autor: Javier Urdániz Viejo

Directores: Yolanda González Arechavala & Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL Y ECONOMICA DE LOS MIXES
ENERGÉTICOS DE DISTINTOS PAÍSES CON PLANES DE DESARROLLO EN ENERGÍA
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA BAJO LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021 - 2022 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.

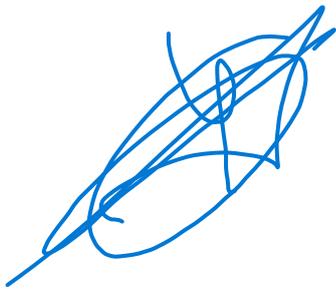


Fdo.: Javier Urdániz Viejo

Fecha: 19/07/2022

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: Yolanda González Arechavala, Carlos Martín Sastre

Fecha: 19/7/22



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARATIVA DE LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL
Y ECONÓMICA DE LOS MIXES ENERGÉTICOS DE DISTINTOS
PAÍSES CON PLANES DE DESARROLLO EN ENERGÍA
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA BAJO LA PERSPECTIVA DEL
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Autor: Javier Urdániz Viejo

Directores: Yolanda González Arechavala & Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio 2022

Resumen del proyecto

Los desarrollos tecnológicos han llevado a una elevada dependencia del sector energético, cada día, la electrificación de la demanda es mayor debido a calefacciones eléctricas, la robotización del sector industrial, la movilidad eléctrica... En términos nacionales, en España la demanda eléctrica entre los años 2014 y 2019 ascendió en casi 15 GWh [1]. Independientemente de los niveles de demanda, el suministro debe garantizarse por lo que, pese a que ocasionalmente la demanda se satisface con un mix predominante en energías renovables, lo habitual es que sean tecnologías convencionales.

En paralelo a este crecimiento en la demanda eléctrica, la preocupación por el cambio climático, en particular el calentamiento global, ha pasado a ser una de las principales preocupaciones de organismos, tanto nacionales como internacionales (la comisión europea), y de la población en general. En los últimos años, la temperatura media del planeta ha aumentado notablemente llegando a los 5°C en el Ártico, provocando un importante deshielo de los polos, con las consecuencias que eso supone, como el crecimiento del nivel del mar y los problemas para la fauna.

En el presente trabajo, se va a realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los mixes energéticos de distintos países en la actualidad (2019) y en el año 2030, según lo propuesto en los PNIEC para poder comparar en base a varios impactos, las mejoras o retrocesos obtenidos con los cambios propuestos.

Para la realización de todos los cálculos se ha utilizado el programa Simapro v9.1.0.11. Este software, desarrollado por la empresa Pré Consultants, es líder en el mundo que permite realizar el análisis de ciclo de vida de un producto de una manera sistemática y sencilla gracias a que contiene las bases de datos más importantes y completas de los diferentes sectores, además, permite al usuario crear sus propias bases de datos. En este caso se ha empleado la versión 3 de la base de datos Ecoinvent.

Los países que se van a estudiar son: *Italia, Republica Checa, Austria, Grecia, Portugal, México, Chile, Sudáfrica, Egipto*. Son varias las razones por las que se han escogido estos países. En primer lugar, todos ellos han apostado fuertemente por un desarrollo fotovoltaico o eólico. Observando los mixes propuestos para el año 2030 estas tecnologías son predominantes frente a otras. Además, algunos de estos países han dado alguna pista de su mix energético en el año 2050 y se puede observar cómo se ratifica la decisión de apostar fuertemente por estas dos tecnologías, por ejemplo, Italia espera para el 2050 una producción fotovoltaica que cubra el 60% de la demanda, similar a la Republica Checa. Por otro lado, los países latino americanos escogidos son dos de los que mayor potencial fotovoltaico presentan en todo el mundo [2].

Análisis de Ciclo de Vida

Los principales objetivos que se establecen para este ACV son:

- Cuantificación de los impactos ambientales por kWh en baja tensión de cada tecnología de generación eléctrica y comparación de los resultados.

- Cuantificación de los impactos ambientales por kWh en baja tensión de cada mix de generación eléctrica de los países en los distintos escenarios considerados y comparación de los resultados.
- Cálculo del coste nivelado de la electricidad para cada tecnología y comparación de los resultados.
- Cálculo del coste nivelado promedio de la electricidad para cada mix de generación de los distintos escenarios y comparación de los resultados
- Realización de un análisis multicriterio de los distintos escenarios y selección del mix de generación óptimo.

Para cumplir y llegar a estos objetivos, se van a plantear tres escenarios para cada país. El primero de ellos será del mix de generación del año 2019. Se ha escogido este año debido a que, en el año 2020, debido a la pandemia sufrida la demanda fue inferior a lo habitual, no siendo una imagen real del mix de generación.

Una vez planteado el escenario “actual”, se plantearán dos escenarios para el año 2030 en función de la capacidad y generación. Estos datos se tomarán del *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima* que la Unión Europea exige a los países miembros. En dicho documento se establece un plan a 10 años para el periodo 2021 – 2030 para cumplir los objetivos marcados, entre los que destacan, entre otros, la descarbonización del sector eléctrico y la reducción en un 30% las emisiones de CO₂. Para aquellos países no europeos, la información sobre los datos de 2030 se tomará de documentos publicados por organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (IEA) o IRENA (International Renewable Energy Agency). En caso de que algún país del estudio no proponga dos posibles escenarios, se tomará el único escenario presente y se asumirá como escenario de referencia.

En cuanto a las categorías de impacto que se van a estudiar, se pueden clasificar en dos grupos: impactos medioambientales e impacto económico.

Las categorías de impactos medioambientales estudiadas son las recogidas en el método de evaluación de impactos CML-IA baseline V3.06/EU25 y son: agotamiento abiótico, agotamiento abiótico de combustibles fósiles, calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad de agua marina, ecotoxicidad terrestre, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización. En cuanto al estudio económico la metodología empleada es el LCOE (Levelized Cost of Energy), que es el típico empleado en estos análisis.

Por últimos el ACV requiere determinar una unidad funcional en la que basar todo el estudio, en este caso es un kWh en baja tensión.

Interpretación de los resultados y conclusiones

A la hora de realizar el análisis medioambiental, primero se han estudiado los impactos de cada una de las tecnologías llegando a las siguientes conclusiones:

- El impacto presentado por las tecnologías convencionales es muy superior al impacto presentado por las tecnologías renovables en todas las categorías estudiadas a excepción del agotamiento abiótico.
- La tecnología con más impacto en la mayoría de las categorías es la generación con lignito, aunque la generación con antracita se encuentra próxima en cuanto a impactos. Entre las categorías donde mayor impacto presentan son: la toxicidad humana, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad del agua marina y eutrofización. Además, como se puede observar en la figura 1 el carbón es la que mayor impacto presenta en cuanto al calentamiento global (a excepción de la hidráulica de bombeo cuyo caso se explicará más adelante).

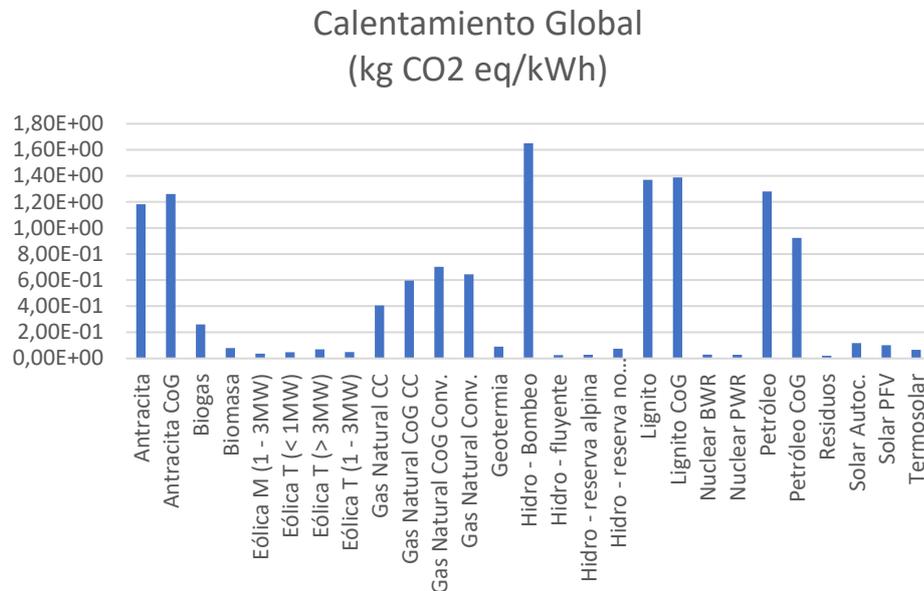


Figura 1: Calentamiento global por tecnología en la generación de 1 kWh en baja tensión

- El petróleo, tras el carbón es la tecnología de generación que presenta los mayores impactos en todas las categorías de impacto, especialmente en la destrucción de la capa de ozono, ecotoxicidad terrestre y oxidación fotoquímica.
- Por último, en lo referente a las tecnologías con combustibles fósiles, el gas natural se postula como la mejor opción entre estas tecnologías debido a una reducción muy importante de los impactos. Sin embargo, estas tecnologías presentan un impacto notorio en la destrucción de la capa de ozono, calentamiento global y agotamiento abiótico de combustibles fósiles.

- La tecnología nuclear, pese a tener una gran cantidad de oposición por parte de la población, se puede observar cómo presenta unos resultados bastante favorables en cuanto a las tecnologías de impacto, especialmente en la eutrofización y el calentamiento global, en comparación con otras tecnologías estudiadas. Sin embargo, esta tecnología presenta un impacto notable en la ecotoxicidad terrestre.
- En lo referente a las tecnologías renovables, la tecnología hidráulica de bombeo es la que mayor impacto presenta. Esto se debe a que no se ha estudiado la fuente de generación que aporta la energía durante la fase de bombeo, en muchas centrales de este tipo se instaló el bombeo fotovoltaico para, entre otras razones, no tener que consumir energía de la red eléctrica. Así pues, esta tecnología presenta unos impactos muy dispares a las otras tecnologías hidráulicas debido a que durante el bombeo se supone que el aporte de energía proviene del resto de tecnologías del mix que la conforman. Por otro lado, las centrales hidráulicas de agua fluyente presentan de los menores impactos en casi todas las categorías. Muy de cerca se encuentran las centrales de reserva alpina y no alpina con unos impactos muy bajos en casi todas las categorías de impacto.
- En cuanto a la tecnología eólica, los resultados obtenidos son muy positivos, especialmente en el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono. Cabe destacar cómo la tecnología eólica de grandes potencias presenta un impacto muy elevado en la categoría de impacto abiótico, debido al tamaño de las turbinas y la cantidad de material que requieren.
- Para la tecnología solar fotovoltaica se observa un caso similar a la eólica, ya que, el impacto es muy bajo en todas las categorías de impacto a excepción del agotamiento abiótico. En el caso de la tecnología solar fotovoltaica estos elevados resultados se deben a la necesidad de silicio para la fabricación de paneles. Por otro lado, la tecnología termosolar presenta impactos inferiores a la tecnología fotovoltaica postulándose como una solución más respetuosa con el medio ambiente.
- Por último, la generación con residuos es la tecnología que menor impacto presenta en todas las categorías de impacto, presentando unos resultados mejores que la tecnología hidráulica. Para el resto de las tecnologías, los impactos son muy parecidos y se sitúan entre la generación fósil y la generación hidráulica.

Una vez analizadas las conclusiones referentes a los impactos medio ambientales de cada una de las tecnologías, se muestran en las figuras 2 y 3 los impactos de cada uno de los escenarios estudiados en la categoría de impacto de potencial de calentamiento global:

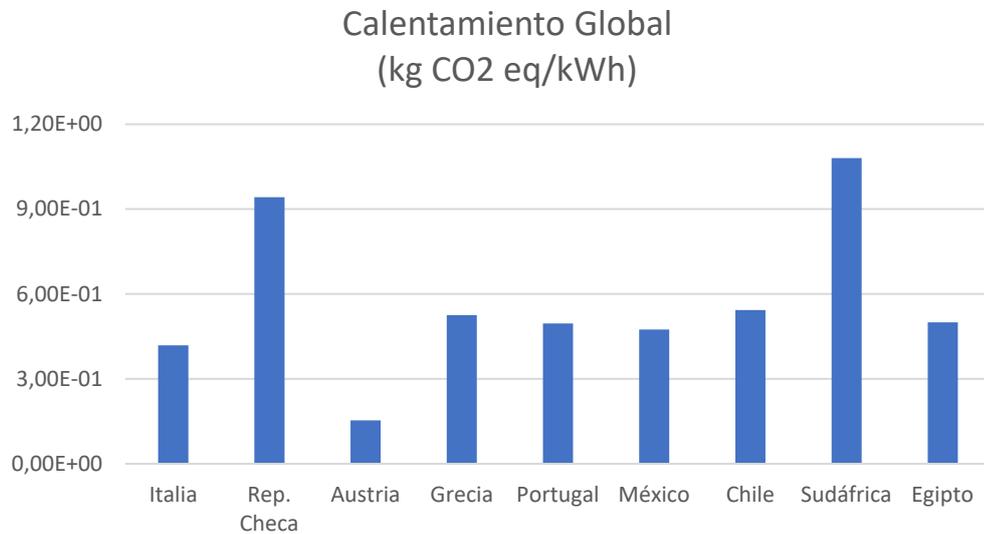


Figura 2: Calentamiento global por mix energético en 2019

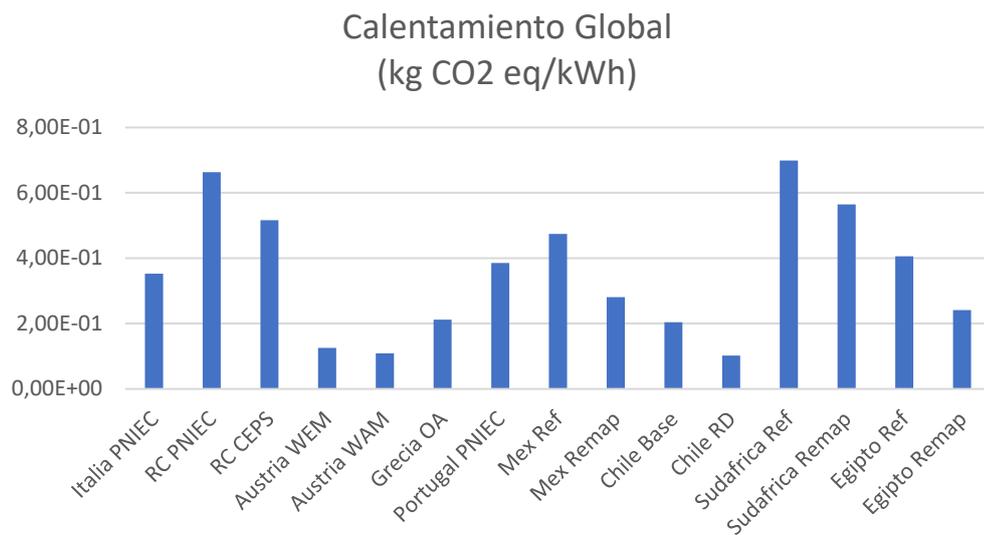


Figura 3: Comparativa de calentamiento global según el escenario en 2030

Las conclusiones extraídas de este análisis son las siguientes:

- Debido a la fuerte dependencia de los combustibles fósiles, la República Checa y Sudáfrica son los países que peores resultados arrojan en el año 2019 para la mayoría de las categorías de impacto, entre ellas el calentamiento global. Esto se debe a la gran presencia del carbón y otras tecnologías fósiles en el mix.
- Grecia, México y Egipto son los países que mayor desarrollo fotovoltaico presentan, es por ello que sus resultados en lo correspondiente al agotamiento abiótico son los peores. No obstante, no presentan malos resultados en el resto de las categorías de impacto.

- Italia y Chile presentan unos resultados medios para casi las categorías analizadas a excepción de la destrucción de la capa de ozono en el caso de Italia debido a la notable presencia del gas natural en su mix. Chile por su lado presenta unos resultados medios, sin destacar en ninguna categoría.
- Por último, Austria es el país con mejor situación actual. Debido a la enorme presencia de tecnología hidráulica en su mix. Este país, presenta los mejores resultados en todas las categorías de impacto ya que, una mínima parte de esta generación se realiza con tecnología hidráulica de bombeo.
- En definitiva, se observa una clara iniciativa por parte de los países por reducir los impactos medioambientales por medio de la introducción al mix de tecnologías menos contaminantes como la solar fotovoltaica y la eólica. No obstante, será necesario esperar hasta el año 2030 para ver si se consigue el objetivo de reducir la temperatura 2°C acordados en el Acuerdo de París.

Tras tratar todos los impactos medioambientales, a continuación, se muestran las conclusiones alcanzadas en lo referente al análisis económico. En la figura 4 se puede observar el coste nivelado para cada una de las tecnologías estudiadas para el año 2019

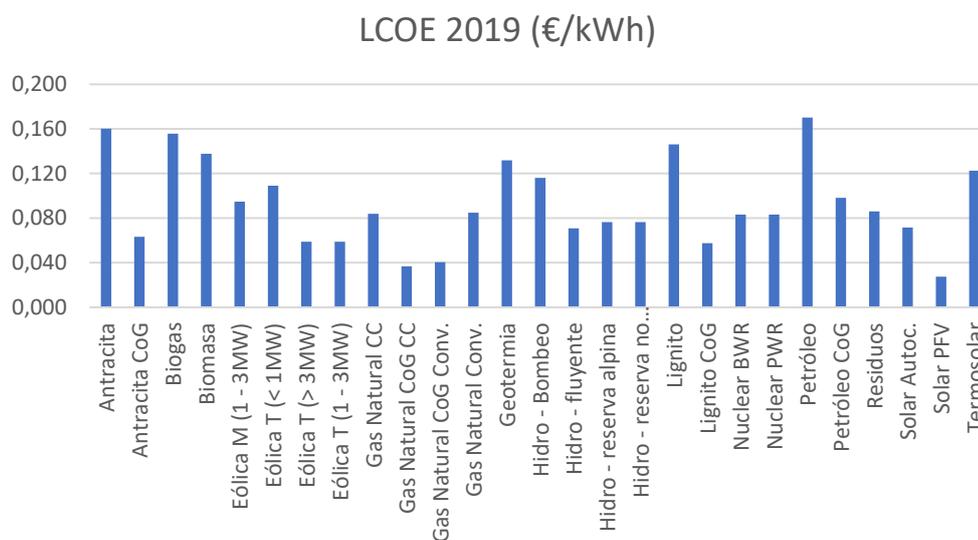


Figura 4: LCOE por tecnología en 2019

Las conclusiones alcanzadas son las siguientes:

- Al contrario de lo ocurrido en el estudio medioambiental, en este caso se observa más similitudes entre tecnologías fósiles y tecnologías renovables.
- Se puede observar cómo el petróleo es la tecnología de generación con mayor coste debido a los bajos factores de capacidad y los elevados costes, tanto fijos como variables.

- La antracita es la segunda tecnología que mayores costes presenta seguida muy de cerca por el biogás, siendo esta última la tecnología de generación renovable más cara debido a los elevados costes de combustible y de mantenimiento.
- Las tecnologías termosolar, hidráulica de bombeo, geotérmica y la biomasa presentan unos costes también elevados lo que les dificulta tener una mayor participación en el mix de generación.
- Las tecnologías eólicas, solar y de gas natural son las que mejores costes presentan y por lo tanto las que mayor participación tienen, siempre y cuando exista recurso (en el caso de las renovables).

En el caso de los mixes de los países, como es de esperar, aquellos con mayor dependencia de tecnologías fósiles son los que mayores costes presentarán, como puede observarse en la figura 5:

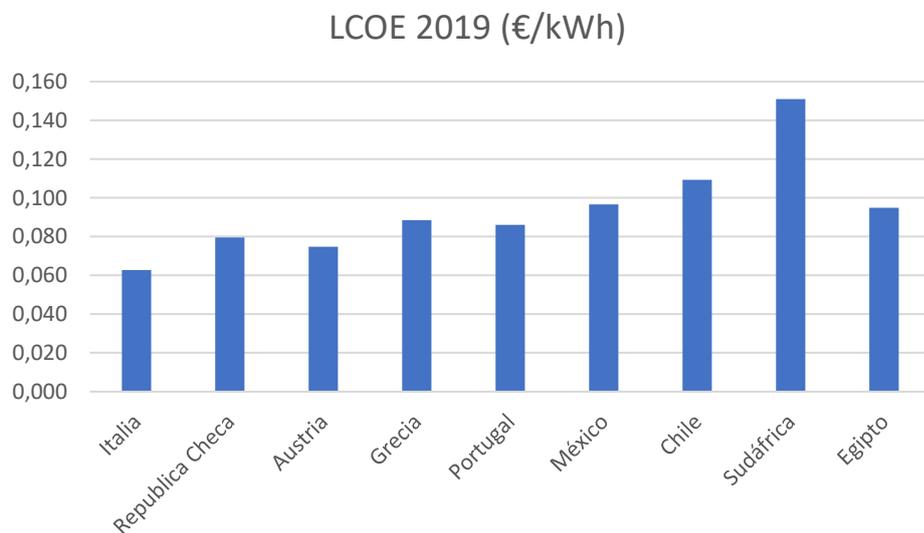


Figura 5: LCOE 2019 por país

- Sudáfrica y Chile son los países con mayor coste nivelado de la energía, seguidos de los otros dos países no europeos, México y Egipto.
- En cuanto a los países europeos el coste es muy similar en todos ellos, no obstante, el de Grecia y Portugal es ligeramente superior al resto.

Hasta la actualidad, el mayor problema que presentan las tecnologías renovables es que son relativamente nuevas y no llevan tantos años de operación como las tecnologías de generación fósil, no obstante, se esperan fuertes reducciones de los costes debido a un mayor desarrollo tecnológico de estas tecnologías. Como se observa en la figura 6, los costes nivelados de la energía en el año 2030 son:

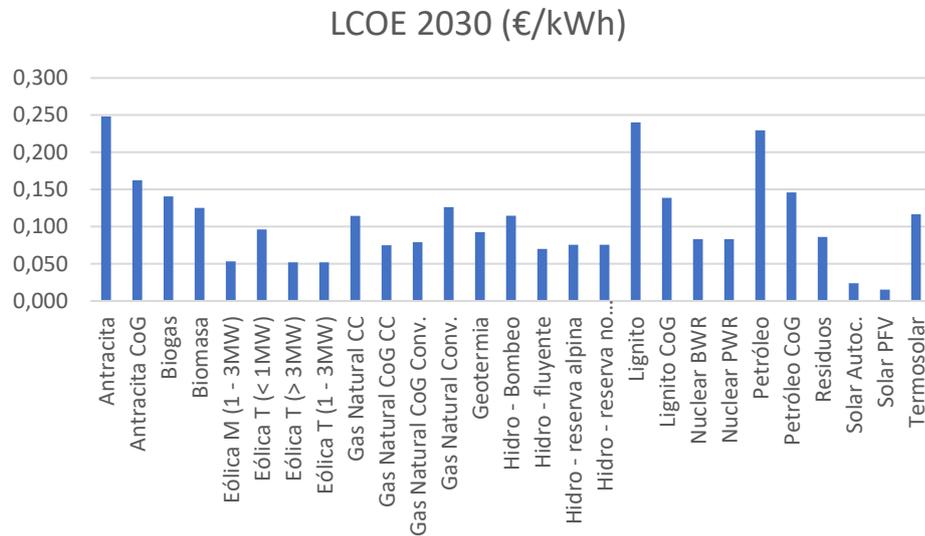


Figura 6: LCOE por tecnología en 2030

- Pese a la reducción de costes, las tecnologías fósiles están muy perjudicadas por los costes de derecho de emisiones de CO₂, siendo esta la razón principal de porque siguen presentando unos costes cada vez menos competitivos, a excepción del gas natural.
- Cabe destacar como, las tecnologías termosolar, geotérmica y biomasa reducen mucho su coste llegando a ser competitivas con el gas natural (que mantiene su posición de líder en lo que a las tecnologías convencionales se refiere).
- El biogás, pese a reducir mucho sus costes, no termina de ser competitivo en el mercado. Por otro lado, la tecnología nuclear mantiene sus costes siendo una tecnología no solo buena en términos medioambientales, sino también en términos económicos.
- Por último, las tecnologías eólica y solar se mantienen como la mejor solución para abaratar el coste de la energía. Cabe destacar cómo la energía solar de autoconsumo reduce mucho sus costes al lograrse economías de escala en el año 2030.

Por último, una vez analizados los costes estimados en el año 2030, en la figura 7 se muestra los costes estimados de cada país en este año:

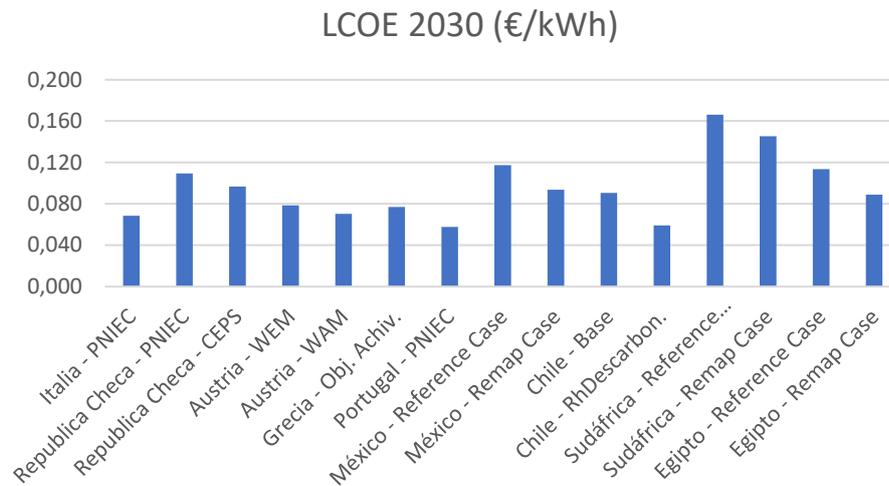


Figura 7: LCOE por escenario en 2030

Una vez más, aquellos países que hayan conseguido disminuir al máximo su dependencia fósil son los que mejores resultados presentan:

- Sudáfrica, es el país que mayor coste por kWh arroja debido a su dependencia del carbón.
- De nuevo, los países no europeos tienen a presentar un mix más caro por kWh en sus escenarios en comparación con los países europeos. No obstante, en el caso de la República Checa, tanto en el PNIEC como en el mix propuesto por el operador de mercado se obtienen unos resultados muy negativos en comparación con el resto de los países europeos.
- Italia, Austria en sus dos escenarios y Portugal son los países europeos con menores costes presentan en el año 2030 debido a una fuerte integración solar en todos ellos, no obstante, Chile en el escenario “Ruta hacia la descarbonización” es el país que mejor resultados presenta debido a la integración de tecnologías renovables.

Por último, en el presente estudio se ha realizado un análisis multicriterio de los mixes en los años 2019 y 2030. La importancia de cada uno de los impactos estudiados, de acuerdo a realizar la ponderación es la siguiente:

1. Calentamiento Global
2. LCOE
3. Destrucción de la capa de Ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad de agua marina, Ecotoxicidad terrestre y Acidificación.
4. Agotamiento abiótico, Agotamiento abiótico de combustibles fósiles, Oxidación fotoquímica y Eutrofización.

Así pues, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Austria presenta los menores impactos medioambientales desde una perspectiva de ciclo de vida, tanto en el año 2019 como en el año 2030 (en cualquiera de sus dos escenarios). Cabe destacar que este país tiene una elevada presencia de tecnología hidráulica que compagina en el año 2030 con una integración solar fotovoltaica y eólica.
- Sudáfrica es el caso contrario de lo ocurrido con Austria, ya que presenta los peores resultados en ambos años y para todos sus escenarios. El gran problema que presenta Sudáfrica es que, pese a conseguir una notable integración de energías renovables en su mix en el año 2030, la demanda eléctrica aumenta en la misma proporción prácticamente por lo que no le es posible disminuir de una manera importante la dependencia de combustibles fósiles. En el caso de la República Checa, presenta el peor mix europeo en el año 2030 pese a tener unos buenos resultados en la actualidad.
- El resto de los países presentan unos resultados positivos en ambos años y similares entre ellos, pese a que algunos empeoran con respecto la situación actual como Portugal o Italia y otros mejoran como México y Egipto en sus escenarios REmap, aunque en cualquier caso las diferencias de acuerdo con el criterio seguido en este análisis no son muy notables.

Abstract

Technological developments have led to a high dependence on the energy sector, with the electrification of demand increasing every day due to electric heating, the robotisation of the industrial sector, electric mobility... In national terms, in Spain, electricity demand between 2014 and 2019 rose by almost 15 GWh [1]. Regardless of demand levels, supply must be guaranteed so, although demand is occasionally met with a predominantly renewable energy mix, it is usually conventional technologies.

In parallel to this growth in electricity demand, concern about climate change, in particular global warming, has become one of the main concerns of both national and international organisations (the European Commission), and of the general public. In recent years, the average temperature of the planet has risen considerably, reaching 5°C in the Arctic, causing a significant melting of the poles, with the consequences that this entails, such as the rise in sea level and problems for fauna.

In this work, a Life Cycle Analysis (LCA) of the energy mixes of different countries at present (2019) and in the year 2030, as proposed in the PNIECs, will be carried out in order to compare, on the basis of various impacts, the improvements or setbacks obtained with the proposed changes.

This software, developed by the company Pré Consultants, is a world leader that allows the life cycle analysis of a product to be carried out in a systematic and simple way thanks to the fact that it contains the most important and complete databases of the different sectors, as well as allowing the user to create their own databases. In this case, version 3 of the Ecoinvent database has been used.

The countries to be studied are: Italy, Czech Republic, Austria, Greece, Portugal, Mexico, Chile, South Africa, Egypt. There are several reasons why these countries have been chosen. Firstly, all of them have made a strong commitment to photovoltaic or wind power development. Looking at the mixes proposed for the year 2030, these technologies are predominant over others. Furthermore, some of these countries have given some clues as to their energy mix in 2050 and it can be seen how they have ratified their decision to make a strong commitment to these two technologies, for example, Italy expects photovoltaic production to cover 60% of demand by 2050, similar to that of the Czech Republic. On the other hand, the Latin American countries chosen are two of the countries with the greatest photovoltaic potential in the world [2].

Life Cycle Assessment

The main objectives set out for this LCA are:

- Quantification of the environmental impacts per kWh at low voltage of each electricity generation technology and comparison of the results.
- Quantification of the environmental impacts per kWh at low voltage of each country's electricity generation mix in the different scenarios considered and comparison of the results.
- Calculation of the levelized cost of electricity for each technology and comparison of the results.

- Calculation of the average levelized cost of electricity for each generation mix of the different scenarios and comparison of the results.
- Carrying out a multi-criteria analysis of the different scenarios and selection of the optimal generation mix.

In order to meet and reach these targets, three scenarios will be proposed for each country. The first of these will be the generation mix for 2019. This year has been chosen because, in 2020, due to the pandemic, demand was lower than usual, not being a true picture of the generation mix.

Once the "current" scenario has been considered, two scenarios will be considered for the year 2030 based on capacity and generation. These data will be taken from the Integrated National Energy and Climate Plan that the European Union requires of member countries. This document establishes a 10-year plan for the period 2021 - 2030 to meet the objectives set, which include, among others, the decarbonisation of the electricity sector and a 30% reduction in CO₂ emissions. For non-European countries, the information on 2030 data will be taken from documents published by international organisations such as the International Energy Agency (IEA) or IRENA (International Renewable Energy Agency). In the event that a country in the study does not propose two possible scenarios, the only scenario present will be taken and assumed as the reference scenario.

The impact categories to be studied can be classified into two groups: environmental impacts and economic impacts.

The environmental impact categories studied are those included in the CML-IA baseline V3.06/EU25 impact assessment method and are: abiotic depletion, abiotic depletion of fossil fuels, global warming, ozone layer depletion, human toxicity, freshwater ecotoxicity, seawater ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification and eutrophication. As for the economic study, the methodology used is the LCOE (Levelized Cost of Energy), which is the typical one used in these analyses.

Finally, the LCA requires the determination of a functional unit on which to base the entire study, in this case a kWh at low voltage.

Interpretation of the results and conclusions

When carrying out the environmental analysis, the impacts of each of the technologies were first studied and the following conclusions were reached:

- The impact presented by conventional technologies is much higher than the impact presented by renewable technologies in all the categories studied with the exception of abiotic depletion.
- The technology with the greatest impact in most categories is lignite-fired generation, although anthracite-fired generation is close in terms of impact. Among the categories with the highest impact are: human toxicity, freshwater ecotoxicity, seawater ecotoxicity and eutrophication. Furthermore, as can be seen in Figure 1, coal has the greatest impact in terms of global warming (with the exception of pumped hydro, the case of which will be explained later).

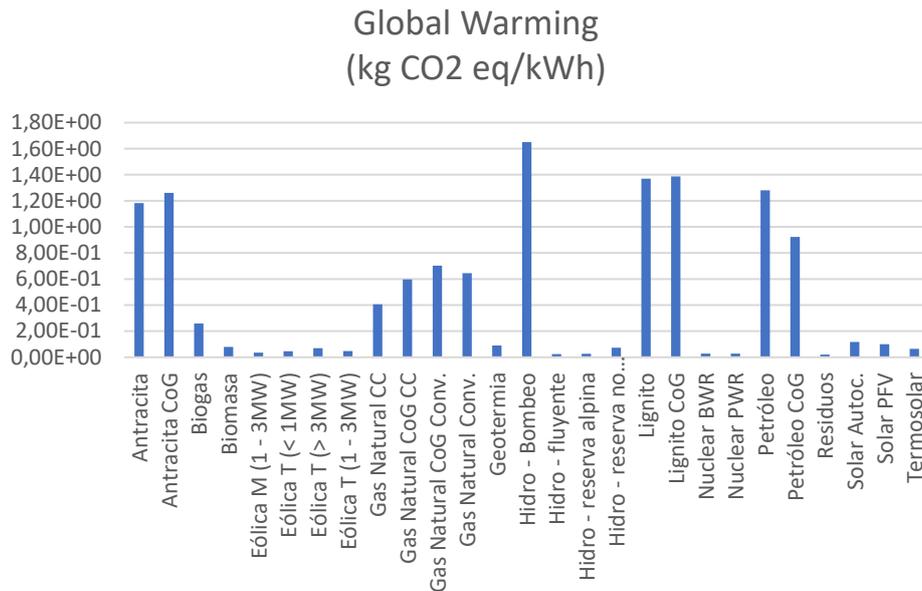


Figure 1: Global heating by technology in 1 kWh generation at low voltage

The conclusions from this analysis are:

- Oil, after coal, is the generation technology with the highest impacts in all impact categories, especially ozone depletion, terrestrial ecotoxicity and photochemical oxidation.
- Finally, as far as fossil fuel technologies are concerned, natural gas emerges as the best option among these technologies due to a very significant reduction in impacts. However, these technologies have a notorious impact on the destruction of the ozone layer, global warming and abiotic depletion of fossil fuels.
- Nuclear technology, despite a great deal of public opposition, shows quite favourable results in terms of impact technologies, especially on eutrophication and global warming, compared to the other technologies studied. However, this technology has a notable impact on terrestrial ecotoxicity. It should be noted that only the accident-free life cycle of these plants was studied during the course of this work, so that in the event of a nuclear accident the impacts would be extremely significant.
- As far as renewable technologies are concerned, pumped hydro technology has the greatest impact. This is due to the fact that the source of generation that provides the energy during the pumping phase has not been studied; in many plants of this type, photovoltaic pumping was installed in order, among other reasons, not to have to consume energy from the electricity grid. Thus, this technology has very different impacts to other hydro technologies because during pumping it is assumed that the energy supply comes from the rest of the technologies in the mix that make it up. On the other hand, flowing water power plants have the lowest impacts in almost

all categories. Close behind are alpine and non-alpine reservoir power plants with very low impacts in almost all impact categories.

- For wind power technology, the results are very positive, especially for global warming and ozone layer depletion. It is worth noting that large wind power technology has a very high impact in the abiotic impact category, due to the size of the turbines and the amount of material required.
- For solar photovoltaic technology, a similar case to wind is observed, as the impact is very low in all impact categories except for abiotic depletion. In the case of solar photovoltaic technology, these high results are due to the need for silicon for the manufacture of panels. On the other hand, solar thermal technology has lower impacts than photovoltaic technology, making it a more environmentally friendly solution.
- Finally, waste-to-energy is the technology with the lowest impact in all impact categories, performing better than hydro technology. For the rest of the technologies, the impacts are very similar and lie between fossil and hydro generation.

Once the conclusions regarding the environmental impacts of each of the technologies have been analysed, figures 2 and 3 show the impacts of each of the scenarios studied in the global warming potential impact category:

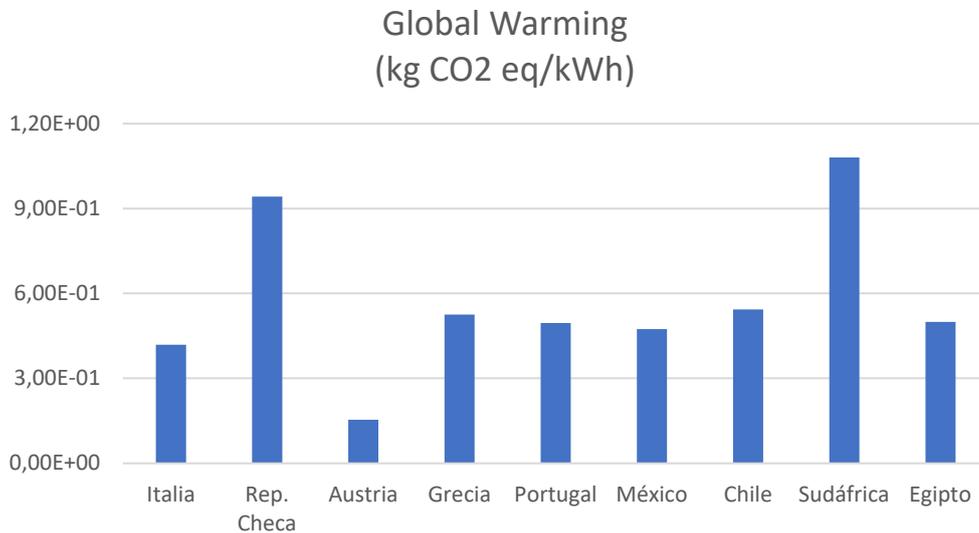


Figure 2: Global warming by energy mix in 2019

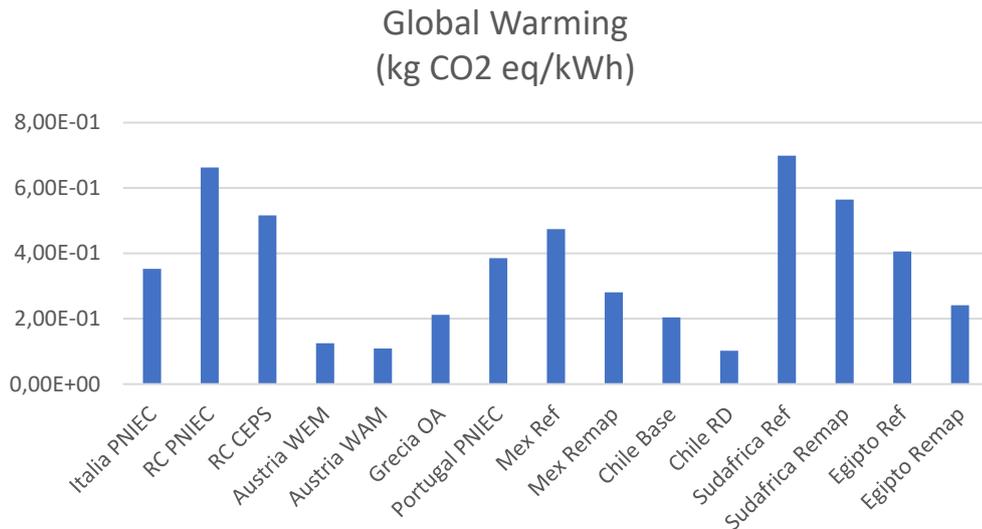


Figure 3: Comparison of global warming by 2030 scenario

The conclusions reached are the following:

- Due to heavy dependence on fossil fuels, the Czech Republic and South Africa are the worst performers in 2019 for most impact categories, including global warming. This is due to the large presence of coal and other fossil technologies in the mix.
- Greece, Mexico and Egypt are the countries with the highest PV development, which is why their results for abiotic depletion are the worst. However, they do not perform poorly in the other impact categories.
- Italy and Chile show average results for almost all the categories analysed, with the exception of ozone layer depletion in the case of Italy due to the significant presence of natural gas in its mix. Chile, on the other hand, presents average results, without standing out in any category.
- Finally, Austria is the country with the best current situation. This is due to the enormous presence of hydro technology in its mix. This country presents the best results in all impact categories, as a minimal part of this generation is carried out with pumped hydro technology.
- In short, there is a clear initiative on the part of the countries to reduce environmental impacts by introducing less polluting technologies such as solar photovoltaic and wind power into the mix. However, it will be necessary to wait until 2030 to see if the 2°C temperature reduction target agreed in the Paris Agreement will be achieved.

After addressing all the environmental impacts, the conclusions reached regarding the economic analysis are shown below:

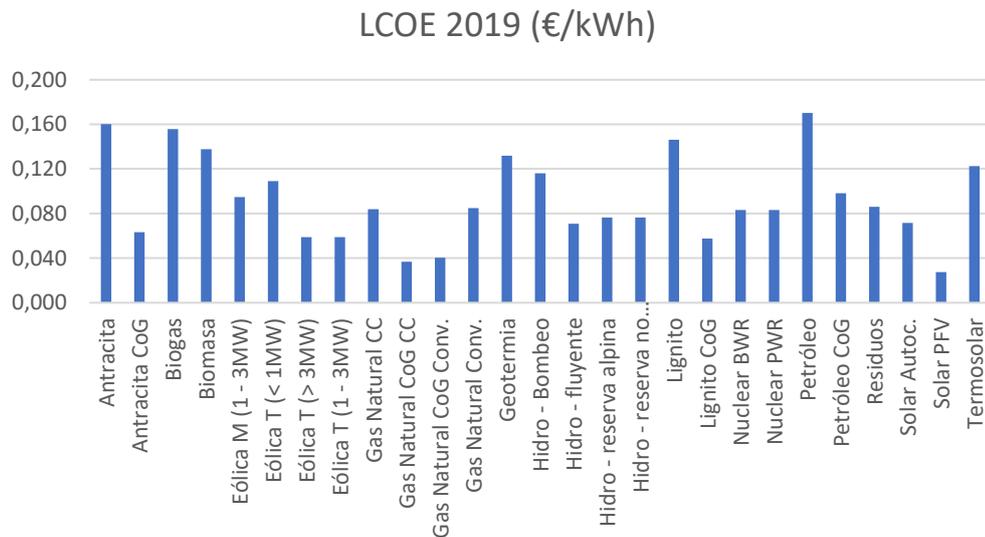


Figure 4: LCOE by technology in 2019

- Contrary to what happened in the environmental study, in this case more similarities can be observed between fossil and renewable technologies.
- It can be seen that oil is the generation technology with the highest cost due to low-capacity factors and high costs, both fixed and variable.
- Anthracite is the second most expensive technology followed closely by biogas, the latter being the most expensive renewable generation technology due to high fuel and maintenance costs.
- Solar thermal, pumped hydro, geothermal and biomass technologies also have high costs, which makes it difficult for them to have a greater share in the generation mix.
- Wind, solar and natural gas technologies are the most cost-effective and therefore have the highest share, provided there is a resource (in the case of renewables).

In the case of countries' mixes, as is to be expected, those with the greatest dependence on fossil fuel technologies will have the highest costs, as shown in figure 5:

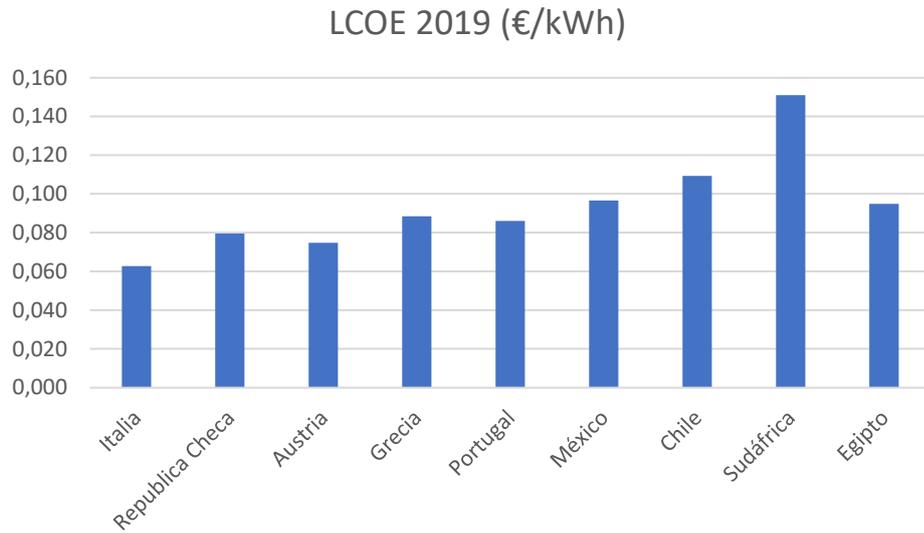


Figure 5: LCOE 2019 by country

The conclusions reached are the following:

- South Africa and Chile are the countries with the highest levelised cost of energy, followed by the other two non-European countries, Mexico and Egypt.
- As for the European countries, the cost is very similar in all of them, however, Greece and Portugal are slightly higher than the rest.

At present, the biggest problem with renewable technologies is that they are relatively new and have not been in operation for as many years as fossil generation technologies, however, strong cost reductions are expected due to further technological development of these technologies. As shown in Figure 6, the levelised costs of energy in the year 2030 are:

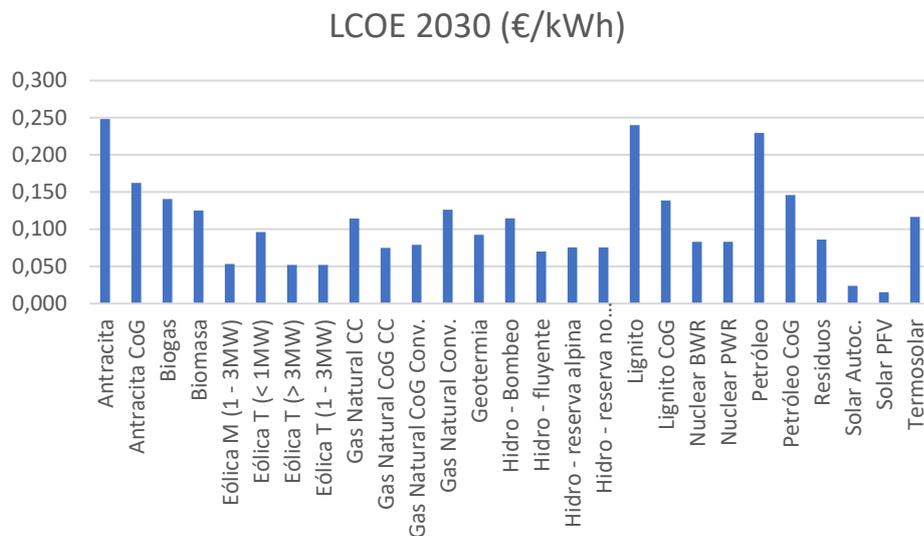


Figure 6: LCOE by technology in 2030

- Despite the reduction in costs, fossil fuel technologies are very much affected by CO2 emissions, which is the main reason why they continue to present increasingly uncompetitive costs, with the exception of natural gas.
- It is worth noting that thermosolar, geothermal and biomass technologies are reducing their costs considerably, becoming competitive with natural gas (which maintains its leading position in terms of conventional technologies).
- Biogas, despite a significant reduction in costs, is not yet competitive in the market. On the other hand, nuclear technology maintains its costs, being a good technology not only in environmental terms, but also in economic terms.
- Finally, wind and solar technologies remain the best solution for lowering the cost of energy. It is worth noting how self-consumption solar energy greatly reduces its costs by achieving economies of scale in the year 2030.

Finally, once the estimated costs in the year 2030 have been analysed, in the figure 7 the estimated costs for each country in this year are shown.

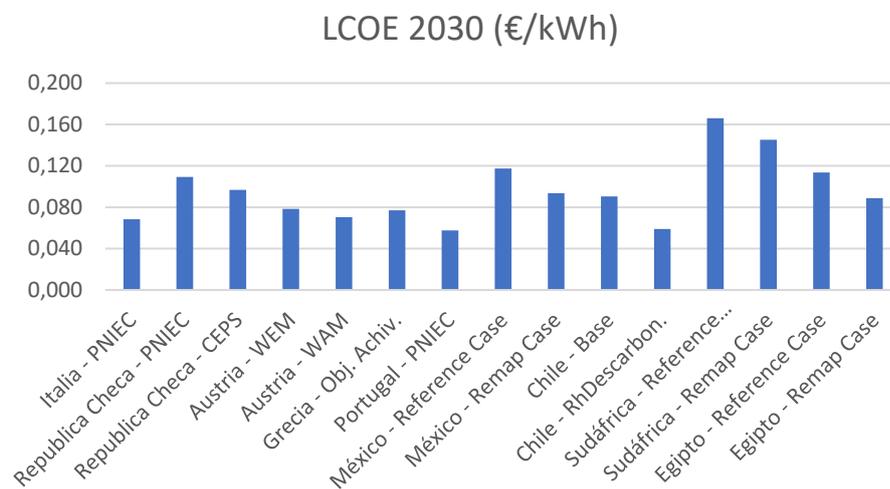


Figure 7: LCOE per scenario in 2030

Once again, those countries that have managed to reduce their dependence on fossil fuels as much as possible are the best performers:

- South Africa, is the country with the highest cost per kWh due to its dependence on coal.
- Again, non-European countries tend to have a more expensive mix per kWh in their scenarios compared to European countries. However, in the case of the Czech Republic, both in the PNIEC and in the mix proposed by the market operator, very negative results are obtained in comparison with the rest of the European countries.
- Italy, Austria in its two scenarios and Portugal are the European countries with the lowest costs in 2030 due to a strong solar integration in all of them, however, Chile in the scenario "Route to decarbonisation" is the country with the best results due to the integration of renewable technologies.

Finally, a multi-criteria analysis of the mixes in 2019 and 2030 has been carried out in this study. The importance of each of the impacts studied, according to the weighting carried out, is as follows:

1. Global Warming
2. LCOE
3. Ozone Layer Destruction, Human Toxicity, Freshwater Ecotoxicity, Seawater Ecotoxicity, Terrestrial Ecotoxicity and Acidification.
4. Abiotic Depletion, Abiotic Depletion of Fossil Fuels, Photochemical Oxidation and Eutrophication.

Thus, the conclusions drawn are as follows:

- Austria presents the best results, both in the year 2019 and in the year 2030 (in either of its two scenarios). It should be noted that this country has a high presence of hydro technology, which it combines in 2030 with solar photovoltaic and wind integration.
- South Africa is the opposite of Austria, with the worst results in both years and for all scenarios. The major problem for South Africa is that, despite achieving a significant integration of renewable energies in its mix in 2030, electricity demand increases in practically the same proportion, which means that it is not possible to significantly reduce its dependence on fossil fuels. In the case of the Czech Republic, it has the worst European mix in 2030, despite its current good results.
- The rest of the countries present positive results in both years and are similar between them, although some worsen with respect to the current situation, such as Portugal or Italy, and others improve, such as Mexico and Egypt in their REmap scenarios, although in any case the differences according to the criteria followed in this analysis are not very notable.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores, Yolanda González Arechavala, Carlos Martín Sastre y Ana María Santos Montes. Por estar siempre disponibles y dispuestos a ayudarme para que el resultado de este proyecto sea el mejor posible.

También me gustaría agradecer a mi familia y a mi novia por apoyarme durante toda la carrera y el máster.

Por último, quiero agradecer a mis compañeros su apoyo durante las dificultades de estos dos años.

Contenido

Resumen del proyecto	iv
Abstract	xiv
Agradecimientos	xxiii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
2. Estado del Arte	4
3. Motivación	6
4. Análisis de Ciclo de Vida	7
4.1. Introducción al Análisis de Ciclo de Vida	7
4.2. Fases del ACV	8
4.2.1. Objetivo y alcance del estudio	9
4.2.2. Análisis de inventario	9
4.2.3. Evaluación del impacto	9
5. Objetivo y Alcance del ACV	11
5.1. Limitaciones aplicadas	12
5.2. Unidad funcional y Software utilizado	13
5.3. Ámbito geográfico de estudio	13
5.4. Tecnologías de estudio	15
5.4.1. Generación no renovable	15
5.4.2. Generación renovable	18
5.5. Categorías de impacto	21
5.5.1. Categorías de impacto medioambientales	21
5.5.2. Categorías de impacto económicas	24
6. Inventario del ACV	25
6.1. Etapas involucradas en el ACV	25
6.2. Hipótesis en las que se ha basado la investigación	26
6.3. Italia	27
6.4. Republica Checa	29
6.5. Austria	31
6.6. Grecia	33
6.7. Portugal	35
6.8. México	37
6.9. Chile	39
6.10. Sudáfrica	41

6.11.	Egipto	43
7.	Evaluación de impactos ambientales	45
7.1.	Impacto por tecnología	45
7.2.	Impacto por país.....	49
7.2.1.	Impactos año 2019	50
7.2.2.	Impactos escenarios 2030.....	52
7.3.	Impacto mundial	63
8.	Evaluación económica.....	69
8.1.	LCOE por tecnología 2019	70
8.2.	LCOE por país 2019.....	75
8.3.	LCOE por tecnología 2030	76
8.4.	LCOE por país 2030.....	82
9.	Análisis multicriterio e Interpretación de los resultados	84
9.1.	Importancia de cada categoría de impacto.....	84
9.2.	Calificaciones de los mixes en el año 2019	88
9.3.	Calificaciones de los mixes en el año 2030	90
10.	Conclusiones	92
10.1.	Recomendaciones y Limitaciones	100
11.	Objetivos de desarrollo Sostenible	101
	Bibliografía	103
	Anexo 1.....	109
	Anexo 2.....	116
	Anexo 3.....	122
	Anexo 4.....	128

Índice de Tablas

Tabla 1: IDH por país [29].....	14
Tabla 2: Mix energético Italia 2019.....	27
Tabla 3: Mix energético Italia 2030.....	28
Tabla 4: Mix energético Republica Checa 2019.....	29
Tabla 5: Mix energético Republica Checa 2030 (PNIEC).....	30
Tabla 6: Mix energético Republica Checa 2030 (CEPS).....	30
Tabla 7: Mix energético Austria 2019.....	31
Tabla 8: Mix energético Austria 2030 (WEM).....	32
Tabla 9: Mix energético Austria 2030 (WAM).....	32
Tabla 10: Mix energético Grecia 2019.....	33
Tabla 11: Mix energético Grecia 2030.....	34
Tabla 12: Mix energético Portugal 2019.....	35
Tabla 13: Mix energético Portugal 2030.....	36
Tabla 14: Mix energético México 2019.....	37
Tabla 15: Mix energético México 2030 - Reference Case.....	37
Tabla 16: Mix energético México 2030 – Remap.....	38
Tabla 17: Mix energético Chile 2019.....	39
Tabla 18: Mix energético Chile 2030 – Escenario Base.....	39
Tabla 19: Mix energético Chile 2030 - Ruta hacia la descarbonización.....	40
Tabla 20: Mix energético Sudáfrica 2019.....	41
Tabla 21: Mix energético Sudáfrica 2030 - Reference Case.....	41
Tabla 22: Mix energético Sudáfrica 2030 - REmap Case.....	42
Tabla 23: Mix energético Egipto 2019.....	43
Tabla 24: Mix energético Egipto 2030 - Reference Case.....	43
Tabla 25: Mix energético Egipto 2030 - REmap Case.....	44
Tabla 26: Impactos ambientales por tecnología para 1kWh en baja tensión.....	46
Tabla 27: Impactos medioambientales de los diferentes países en el año 2019 para 1kWh en baja tensión (1/2).....	50
Tabla 28: Impactos medioambientales de los diferentes países en el año 2019 para 1kWh en baja tensión (2/2).....	50
Tabla 29: Impactos medioambientales escenarios Italia.....	52
Tabla 30: Comparativa impactos medioambientales escenarios Italia.....	52
Tabla 31: Impactos medioambientales escenarios Republica Checa.....	53
Tabla 32: Comparativa impactos medioambientales escenarios Republica Checa.....	53
Tabla 33: Impactos medioambientales escenarios Austria.....	54
Tabla 34: Comparativa impactos medioambientales escenarios Austria.....	54
Tabla 35: Impactos medioambientales escenarios Grecia.....	55
Tabla 36: Comparativa impactos medioambientales escenarios Grecia.....	55
Tabla 37: Impactos medioambientales escenarios Portugal.....	56
Tabla 38: Comparativa impactos medioambientales escenarios Portugal.....	56
Tabla 39: Impactos medioambientales escenarios México.....	57
Tabla 40: Comparativa impactos medioambientales escenarios México.....	57
Tabla 41: Impactos medioambientales escenarios Chile.....	58
Tabla 42: Comparativa impactos medioambientales escenarios Chile.....	58
Tabla 43: Impactos medioambientales escenarios Sudáfrica.....	59
Tabla 44: Comparativa impactos medioambientales escenarios Sudáfrica.....	59

Tabla 45: Impactos medioambientales escenarios Egipto.....	60
Tabla 46: Comparativa impactos medioambientales escenarios Egipto	60
Tabla 47: Comparativa impactos medioambientales para la generación 1kWh en baja tensión en 2030 (1/2).....	61
Tabla 48: Comparativa impactos medioambientales para la generación 1kWh en baja tensión en 2030 (2/2).....	61
Gráfico 49: Comparativa de calentamiento global según el escenario.....	62
Tabla 50: Demanda por país.....	63
Tabla 51: Agotamiento abiótico por escenario 2030	64
Tabla 52: Agotamiento abiótico (comb. fósiles) & calentamiento global por escenario 2030...	64
Tabla 53: Destrucción capa de Ozono por escenario 2030.....	65
Tabla 54 Toxicidad humana, Ecotoxicidad agua dulce y agua marina por escenario 2030	65
Tabla 55: Ecotoxicidad terrestre & Eutrofización por esenario 2030	66
Tabla 56: Oxidación fotoquímica & Acidificación por escenario 2030.....	67
Tabla 57: Parámetros LCi [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]	71
Tabla 58: Costes variables por tecnología [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]	72
Tabla 59: LCOE 2019 por país.....	75
Tabla 60: Tasa de aprendizaje por tecnología [72] [73].....	77
Tabla 61: Capacidad mundial instalada en 2019 vs 2030 [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80].....	78
Tabla 62: LCOE por tecnología en 2030	79
Tabla 63: Comparativa LCOE de cada tecnología en 2019 - 2030.....	80
Tabla 64: LCOE escenarios 2030.....	82
Tabla 65: Comparativa LCOE de los países.....	83
Tabla 66: Calificación según importancia - análisis multicriterio	85
Tabla 67: Matriz comparación de las categorías de impacto.....	86
Tabla 68: Matriz de comparación normalizada de las categorías de impacto.....	86
Tabla 69: Peso de las categorías de impacto	87
Tabla 70: Resultados análisis multicriterio caso base	88
Tabla 71: Resultados análisis multicriterio escenarios 2030(1/2)	90
Tabla 72: Resultados análisis multicriterio escenarios 2030 (2/2).....	90
Tabla 73: Comparativa medioambiental mixes 2019 vs 2030	128

Índice de Figuras

Figura 1: Principales cumbres climáticas. Fuente: Iberdrola [3]	2
Figura 2: Fases del ACV. Fuente: Draw.io [26]	9
Figura 3: Ámbito geográfico de estudio. Fuente Mapchart [28].....	14
Figura 4: Ciclo Rankine con recalentamiento. Fuente: UNEFM [30].....	16
Figura 5: Ciclo combinado. Fuente: Explicación [31]	16
Figura 6: Ciclo central nuclear BWR. Fuente: Acelerando la Ciencia [32].....	18
Figura 7: Ciclo central nuclear PWR. Fuente: Energía Nuclear [33]	18
Figura 8: Calentamiento global por tecnología en la generación de 1 kWh en baja tensión en 2019.....	48
Figura 9: Potencial de Calentamiento global por mix energético en 2019.....	51
Figura 10: Calentamiento global por escenario 2030	68
Figura 11: LCOE por tecnología en 2019	73
Figura 12: LCOE 2019 por país.....	76
Figura 13: LCOE por tecnología en 2030	80
Figura 14: LCOE por escenario en 2030	83
Figura 15: Objetivos de Desarrollo Sostenible [82].....	101
Figura 16: Impacto sobre el aotamiento abiótico por tecnología.....	109
Figura 17: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por tecnología	110
Figura 18: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por tecnología	110
Figura 19: Impacto sobre la Destrucción de la capa de ozono por tecnología	111
Figura 20: Impacto de Toxicidad humana por tecnología.....	111
Figura 21: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua dulce por tecnología.....	112
Figura 22: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por tecnología	112
Figura 23: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por tecnología.....	113
Figura 24: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por tecnología	114
Figura 25: Impacto sobre la acidificación por tecnología	114
Figura 26: Impacto sobre la eutrofización por tecnología	115
Figura 27: Impacto sobre el agotamiento abiótico por mix en 2019.....	116
Figura 28: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por mix en 2019 .	116
Figura 29: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por mix en 2019	117
Figura 30: Impacto sobre la destrucción de la capa de ozono por mix en 2019.....	117
Figura 31: Impacto sobre la toxicidad humana por mix en 2019.....	118
Figura 32: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua dulce por mix en 2019.....	118
Figura 33: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por mix en 2019	119
Figura 34: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por mix en 2019.....	119
Figura 35: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por mix en 2019.....	120
Figura 36: Impacto sobre la acidificación por mix en 2019.....	120
Figura 37: Impacto sobre la eutrofización por mix en 2019	121
Figura 38: Impacto sobre el agotamiento abiótico por escenario en 2030	122
Figura 39: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por escenario en 2030.....	122
Figura 40: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por escenario en 2030.....	123
Figura 41: Impacto sobre la destrucción de la capa de ozono por escenario en 2030.....	123
Figura 42: Impacto sobre la toxicidad humana por escenario en 2030.....	124
Figura 43: Impacto sobre a ecotoxicidad de agua dulce por escenario en 2030.....	124
Figura 44: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por escenario en 2030	125

Figura 45: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por escenario en 2030	125
Figura 46: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por escenario en 2030.....	126
Figura 47: Impacto sobre la acidificación por escenario en 2030.....	126
Figura 48: Impacto sobre la eutrofización por escenario en 2030.....	127

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: LCOE anualizado.....	24
Ecuación 2: LCOE	24
Ecuación 3: $LCOE_i$	69
Ecuación 4: $LCOE_o$	69
Ecuación 5: Factor de amortización	70
Ecuación 6: Aggregation factor	70
Ecuación 7: Cálculo LCOE 2030	77
Ecuación 8: Tasa de Aprendizaje.....	77
Ecuación 9: Calificación mix [17].....	87
Ecuación 10: Impacto normalizado	87

1. Introducción

Los desarrollos tecnológicos han llevado a una elevada dependencia del sector energético, cada día, la electrificación de la demanda es mayor debido a calefacciones eléctricas, la robotización del sector industrial, la movilidad eléctrica... En términos nacionales, en España la demanda eléctrica entre los años 2014 y 2019 ascendió en casi 15 GWh [1]. Independientemente de los niveles de demanda, el suministro debe garantizarse por lo que, pese a que ocasionalmente la demanda se satisface con un mix predominante en energías renovables, lo habitual es que sean tecnologías convencionales.

En paralelo a este crecimiento en la demanda eléctrica, la preocupación por el cambio climático, en particular el calentamiento global, ha pasado a ser una de las principales preocupaciones de organismos, tanto nacionales como internacionales (la comisión europea), y de la población en general. En los últimos años, la temperatura media del planeta ha aumentado notablemente llegando a los 5°C en el Ártico, provocando un importante deshielo de los polos, con las consecuencias que eso supone, como el crecimiento del nivel del mar y los problemas para la fauna.

Por estas razones, Naciones Unidas en su desarrollo de Objetivos de Desarrollo Sostenible incluyó unos puntos relacionados con el medio ambiente. Por su parte la Unión Europea, obligó a todos los países pertenecientes a desarrollar los Planes Nacionales Integrados de Energía y Clima para cumplir sus objetivos propuestos para el año 2030, entre los que destacan una reducción de los gases de efecto invernadero en un 55% con respecto de 1990 y la integración de, al menos, un 32% de energías renovables en el mix de generación eléctrico. Así pues, desde 2019 se está viviendo en Europa unos años de transición energética para reducir la generación fósil e impulsar la generación renovable.

En el presente trabajo, se va a realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los mixes energéticos de distintos países en los años 2019 y 2030 para poder comparar en base a varios impactos, no únicamente el calentamiento global, las mejoras o retrocesos obtenidos con los cambios propuestos. La razón por la que se ha decidido realizar un ACV y no otro tipo de estudio, como puede ser de emisiones finales, se debe al alcance que se quiere tener. Como se explicará más adelante, el ACV tiene en cuenta todas las fases de un producto, desde la fabricación, hasta el desmantelamiento, es por ello que la precisión de los valores obtenidos para los distintos impactos estudiados es mucho mayor en comparación con otros estudios. En definitiva, se pretende, contribuir a la investigación sobre la sostenibilidad de los sistemas energéticos sirviendo como estudio complementario a otros realizados por compañeros de la Universidad Pontificia Comillas.

1.1. Antecedentes

En primer lugar, es necesario conocer los distintos tratados realizados en torno al cambio climático, ya que, pese a que es un tema en auge estos últimos años, desde 1992 se llevan realizando cumbres climáticas para afrontar distintos retos como la financiación de la mitigación y la adaptación al cambio climático o transferencia tecnológica [3].

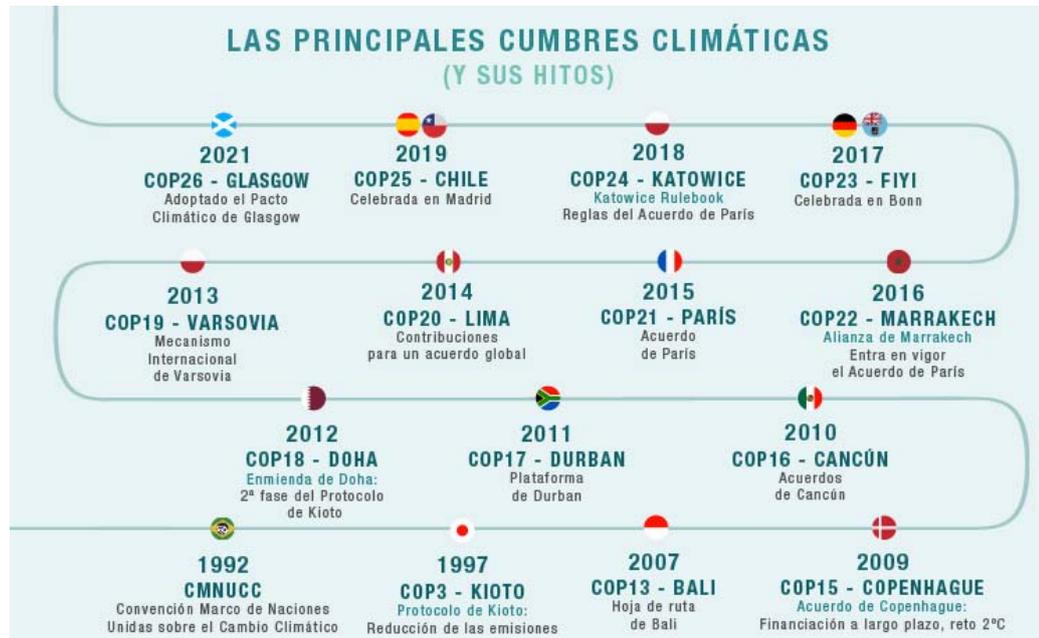


Figura 1: Principales cumbres climáticas. Fuente: Iberdrola [3]

Como puede observarse en la imagen, desde 2009 se ha realizado anualmente una cumbre climática, siendo la última en 2021 en Glasgow.

Entre todas las cumbres climáticas, es necesario realizar hincapié en tres: COP3 – Kioto (1997) y COP21 – París (2015) debido a su gran importancia y COP 26 – Glasgow (2021) debido a que ha sido la última realizada tras la pandemia mundial.

En primer lugar, la cumbre climática realizada en Kioto (Japón), o más popularmente conocida como el **Protocolo de Kioto**, es el primer compromiso global para reducir las emisiones que causan el calentamiento global y sienta las bases para un futuro acuerdo internacional sobre el cambio climático ya que, se puso en funcionamiento Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), creada en 1992 en Brasil [4].

Por otro lado, la cumbre climática de París (Francia), o más popularmente conocida como el **Acuerdo de París**. En este acuerdo, se establecieron todas las bases necesarias para realizar una estrategia mundial contra el cambio climático a partir de 2020. Entre todos los puntos tratados, los principales fueron:

- **Objetivo principal:** Reducción de la temperatura global por debajo de 2°C en comparación con los niveles preindustriales.

- Actualización periódica de las acciones tomadas y resultados, de los países firmantes, de manera que se llegue al objetivo principal.
- Se reconoce la necesidad de acelerar la transferencia tecnológica a países en vías de desarrollo.

Desde esta cumbre climática se han ido realizando cumbres anuales en diferentes países para ratificar las bases del acuerdo de París. Las de mayor relevancia son la COP 22, ya que entró en vigor en la **Alianza de Marrakech** y la COP24, donde se establecieron las reglas del acuerdo de París, en la **Katowice Rulebook**.

Debido a la pandemia COVID-19, en el año 2020 no se realizó la cumbre climática, sin embargo, en el año 2021 se volvieron a celebrar, en este caso en Glasgow. En la COP26, se adoptó el *pacto climático de Glasgow* en el que se afianzaron los cimientos de la implementación de las medidas del **Acuerdo de París** [5]. En esta cumbre los principales acuerdos fueron los siguientes:

- Reconocimiento de la emergencia climática y la importancia de los objetivos del **Acuerdo de París**.
- Intensificación de las medidas contra el cambio climático instando a los países a presentar planes más ambiciosos el año 2022-2023, en lugar de en 2025.
- Eliminación del carbón como fuente de generación y eliminación gradual de otras tecnologías convencionales.

2. Estado del Arte

En este punto se detallarán las referencias de proyectos y recursos que se utilizarán a modo de guía o ejemplo para la elaboración del trabajo ya que, tratan temáticas similares.

Además de estos trabajos, existen otros estudios de análisis de ciclo de vida. “*Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*” [6], se trata de un análisis de las distintas tecnologías de generación en tres puntos del ciclo de vida: aprovisionamiento, operación e infraestructura. Este estudio focalizó sus esfuerzos en la determinación de tres tipos de gases: gases de efecto invernadero, SO₂ y NO_x, durante las etapas previamente mencionadas, y los impactos medioambientales que acarreaban. Este estudio consiguió demostrar que el análisis de los gases de efecto invernadero no son los únicos que se deben de tener en consideración para determinar el rendimiento medioambiental de una tecnología.

En sintonía a este estudio, “*Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization*” [7], analiza las energías: solar térmica, solar fotovoltaica, eólica, hidráulica y geotérmica mediante el análisis de ciclo de vida, presentando una metodología para la armonización de los resultados, permitiendo una comparación más fiable de las tecnologías de generación. Además, en el presente estudio se pueden obtener unas conclusiones muy interesantes como que de acuerdo con los impactos medioambientales las energías geotérmicas y solar resultan ser más perjudiciales que la eólica e hidráulica.

El año 2021, las Naciones Unidas publicó un análisis de ciclo de vida sobre las distintas tecnologías de generación: “*Life Cycle assessment of Electrical Generation Options*” [8]. En dicho informe, se analizan las principales tecnologías de generación de manera aislada centrándose, sobre todo, en el cambio climático, debido al objetivo europeo de disminuir la temperatura global. En dicho análisis se ofrecen los resultados de las distintas tecnologías para distintas categorías de impacto como, el uso del agua, la ocupación del terreno, la toxicidad humana... pero, gran parte del informe se centra en las emisiones de efecto invernadero de las diferentes tecnologías.

En línea con este documento, se encuentra “*The Life Cycle Assessment of Various Energy Technologies*” [9], donde se analizan las diferentes tecnologías de generación, tanto convencionales como renovables en las distintas etapas, construcción, operación y desmantelamiento. De nuevo, este estudio se encuentra fuertemente enfocado a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Dada la elevada utilidad de este tipo de estudios, países como España también los ha realizado. En el año 2015, el ministerio de ciencia y tecnología, junto con la asociación de productores de energías renovables realizaron el siguiente estudio: “*IMPACTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica*” [10]. Como el nombre bien indica, se realizó el estudio de los impactos ambientales de ocho tecnologías distintas, convencionales y renovables. Las categorías de impacto empleadas en este estudio van más allá a las extraídas por SimaPro, ya que se incluyeron algunas como, generación de residuos industriales, niebla de invierno...

Además de todos estos estudios mencionados, existen una gran cantidad de informes que realizan un análisis de ciclo de vida de mixe energéticos de países. En concreto, de los países de estudio del presente trabajo se han encontrado: *“Life Cycle of the Italian Electricity Scenarios”* [11], *“Life cycle assessment of Italian electricity production and comparison with the European context”* [12], *“Life Cycle Performance of Various Energy Sources in the Czech Republic”* [13], *“Assessing climate change impacts of Greek energy mix based on LCA”* [14], *“Life-cycle assessment of electricity in Portugal”* [15], *“Life cycle assessment of electricity generation in Mexico”* [16]. No se ha encontrado ningún trabajo relacionado con el mix energético de Austria. Lo mismo ocurre con Chile, con Sudáfrica y Egipto, no se ha encontrado trabajos específicos que estudien las tecnologías de generación de estos países.

Por último, este tipo de trabajo se ha realizado previamente como Trabajo Final de Grado (TFG) o Trabajo Final de Máster (TFM) por alumnos de la Universidad Pontificia Comillas, analizando países distintos a los propuestos en este proyecto. Estos son:

- *“Análisis de ciclo de vida de posibles escenarios de mix de generación eléctrica en España en 2030”*, Guillermo Quintero Bermejo [17].
- *“Evaluación de la sostenibilidad de mixes de generación eléctrica de países con planes de desarrollo de energía eólica marina mediante el análisis de ciclo de vida”*, Jorge Goas Martín [18].
- *“Comparativa de la sostenibilidad de los mixes energéticos de distintos países bajo la perspectiva del análisis de ciclo de vida”*, Antonio Andrés Rebollar Juárez [19].

A diferencia de todos los estudios previos realizados hasta la fecha donde solo se estudian los impactos de un país, o que únicamente comparan países europeos con similares niveles de desarrollo. El presente trabajo se centrará en comparar países europeos con latinoamericanos y africanos con fuerte desarrollo en las tecnologías eólica y solar. De esta manera, se podrán observar las diferencias en los sistemas energéticos derivados de los distintos niveles de desarrollo de cada uno de los países.

Para medir el nivel de desarrollo de los distintos países se ha empleado el *Índice de Desarrollo Humano*, un indicador realizado por Naciones Unidas que se centra en la esperanza de vida, la educación y el ingreso per cápita para establecer el ranking [20].

3. Motivación

Durante la última década las energías renovables han incrementado su presencia en los mixes energético, sin embargo, debido al precio del gas y a la madurez que han ido adquiriendo, su presencia en los últimos años se ha incrementado notablemente. La proximidad del año 2030 y la necesidad por cumplir los objetivos, es otra de las razones que ha influido en esta transición energética presente en todo el mundo prácticamente.

Tal y como se firmó en el Acuerdo de Paris, se busca que el incremento de la temperatura global promedio por debajo de los 2°C con respecto a los niveles pre-industriales. Es por ello que, las energías renovables, al tener un impacto nulo en la generación resultan claves para lograr este objetivo.

Estas dos razones son la principal motivación para realizar este estudio ya que, aunque pueda parecer lógico que un parque eólico o una instalación fotovoltaica tiene un menor impacto ambiental durante su ciclo de vida, dependerá de la cantidad de recursos necesarios para alcanzar la misma potencia que una central de ciclo combinado. Además, resulta muy interesante conocer el impacto real que suponen cada una de las tecnologías de generación ya que, no se trata únicamente del calentamiento global, sino también de la contaminación de aguas, suelo... y otros impactos que pueden afectar tanto a la flora como a la fauna del ecosistema.

Por otro lado, según los planes energéticos presentados por cada país, dependiendo del país, bien por disponibilidad de recurso, tema político... cada uno instala una potencia diferente de energía eólica y fotovoltaica. Resulta muy interesante realizar una comparativa entre los distintos mixes y concluir, basándose en el aspecto medioambiental, qué mix es el que presenta mayores impactos y cual el que menos, observando las diferencias entre países de distintos continentes con distintos niveles de desarrollo.

De la misma manera que resulta muy interesante analizar los impactos medioambientales de los mixes en el año 2030 y compararlos, otra motivación al realizar este proyecto es comparar la situación actual de los mixes energéticos, observando cuál tiene mayor margen de mejora, cuál es el mejor en términos ambientales actualmente...

Por último, no es necesario analizar únicamente los aspectos medioambientales de las distintas tecnologías ya que, si no son económicamente viables, nunca se llegarán a instalar en gran escala. Es por ello que, el presente trabajo contará con un análisis económico de las distintas tecnologías y mixes energéticos. Este estudio resulta de gran interés ya que, hasta el momento, las tecnologías renovables, así como las nucleares han pujado en el mercado diario a un precio de 0€/MWh de manera que se aseguraban aprovechar el recurso en las horas que se disponía. Sin embargo, estas tecnologías no presentan coste cero por lo que, con el gran desarrollo de los últimos años resulta muy interesante analizar y estimar cuál podrá llegar a ser el coste de los diferentes mixes en las horas con mayor recurso renovable.

4. Análisis de Ciclo de Vida

En el siguiente apartado se va a explicar en qué consiste el Análisis de Ciclo de Vida, los puntos en la vida útil de un producto que abarca esta técnica, así como la normativa que aplica y las fases que la forman. Dando en cada uno de los puntos una breve explicación, de manera que se facilite la comprensión del presente trabajo.

4.1. Introducción al Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida tiene su origen a finales de la década de los años 60 y principios de los 70. No obstante, fue con el desarrollo de los biocombustibles cuando más fuerza cogió esta herramienta. En el comienzo, no se trataban la cantidad de etapas que se incluyen hoy día, no obstante, sí que se puso énfasis en la eficiencia, el consumo de energía, el consumo de materias primas y, en mucho menor medida, la disposición final de los residuos generados [21] [22].

Para explicar en qué consiste el Análisis de Ciclo de Vida, existen numerosas definiciones, entre ellas la de la Norma ISO 14040:

- *“El Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.”*

Además, el horizonte del ACS es toda la vida útil del producto, de manera que comienza desde el diseño y finaliza con el reciclaje o desmantelamiento. Los puntos que abarca esta técnica son [23]:

1. Extracción de materias primas: Abarca todas las actividades necesarias para la extracción de materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, incluyendo el transporte previo a la producción.
2. Proceso y fabricación: Abarca todas las actividades requeridas para transformar las materias primas extraídas en el producto deseado. En este punto, también se tiene en consideración la energía empleada.
3. Distribución y transporte: Abarca las actividades logísticas necesarias para trasladar el producto desde el punto de fabricación hasta el punto de utilización.
4. Uso, reutilización y mantenimiento: Abarca la vida del producto en funcionamiento, teniendo en cuenta posibles mantenimientos (preventivo, correctivo o predictivo) realizados en este tiempo.

5. Reciclaje: Abarca las operaciones de reciclaje, sea de ciclo cerrado (el producto se recicla a través del mismo sistema productivo) o ciclo abierto (el producto entra en un nuevo sistema productivo).
6. Gestión de los residuos: Una vez el producto no es útil para el reciclaje y no se le pueden dar más usos, este se devuelve al medio ambiente como residuo.

Por último, existen una serie de normas, establecidas por la *International Organization for Standardization (ISO)*, que aplican al ACV. En ellas se busca asegurar la seguridad, calidad y eficiencia del estudio. Estas son:

- ISO 14040:2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. [24]
- ISO 14041:1999. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario. [24]
- ISO 14042:2001. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Evolución de impacto del ciclo de vida. [24]
- ISO 14043:2016. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Interpretación del ciclo de vida. [24]
- ISO 14044:2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. [24]
- ISO 14048:2008. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Formato de documentación y de datos [24]
- ISO 14049:2012. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Ejemplos de aplicación de ISO 14041. [24]

4.2. Fases del ACV

El Análisis de Ciclo de Vida consta de 4 fases, que siguen el siguiente orden:

1. Definición del objetivo y el alcance
2. Análisis de Inventario
3. Evaluación de Impacto
4. Interpretación de los resultados obtenidos

Sin embargo, como se puede observar en la imagen, se trata de un proceso iterativo con una elevada interacción entre las distintas fases. [25]

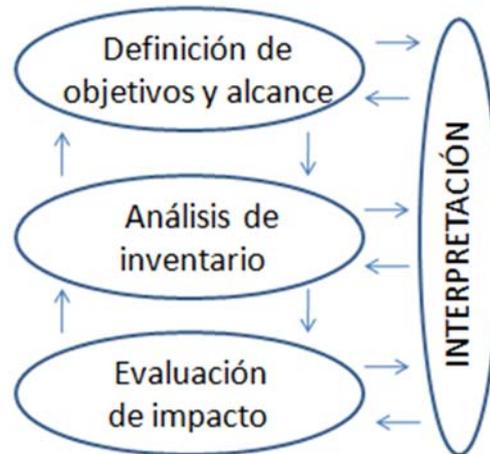


Figura 2: Fases del ACV. Fuente: Draw.io [26]

4.2.1. Objetivo y alcance del estudio

En esta primera fase se define el tema de estudio, explicando la motivación para realizarlo. Además, se definen las limitaciones, como, por ejemplo, la limitación temporal o geográfica

En este punto es importante definir la unidad funcional. Esta unidad permite comparar dos productos utilizados para la misma función. En el caso de este trabajo, se compararán distintas tecnologías de generación eléctrica como pueden ser un ciclo combinado y una instalación solar fotovoltaica.

4.2.2. Análisis de inventario

En esta segunda fase se recogen todos los datos y procedimientos de estudio para cuantificar y analizar todas las cargas ambientales referidas a la unidad funcional, previamente definida.

Las cargas ambientales son las entradas o salidas del sistema que afectan con un impacto ambiental negativo.

Por último, cuando el objeto de estudio sean sistemas con varias etapas, se realiza un diagrama de flujo detallado para evitar repetición de procesos que vayan incluidos dentro de otros.

4.2.3. Evaluación del impacto

En esta fase, de los flujos físicos del sistema se obtiene el impacto en el medio ambiente. Para ello se usan modelos de ciencia ambiental y el conocimiento sobre la materia.

De acuerdo con la normativa ISO, se establecen 5 fases, siendo las 3 primeras obligatorias. Estas son:

1. Selección: Se escogen las categorías de impacto elegida en el alcance, con sus indicadores y modelo asociado.
2. Clasificación: Se clasifican los flujos elementales del inventario, asignándolos a las categorías de impacto a las que contribuyen.
3. Caracterización: Utilizando modelos ambientales, se identifican las categorías de impacto para cuantificar la contribución del flujo elemental al indicador de impacto de la categoría.
4. Normalización: Se expresa la magnitud de cada puntuación caracterizada en relación a un conjunto común de impactos. Normalmente, se toman como referencia los impactos sobre la sociedad a la hora de normalizar los resultados.
5. Agrupación: Se comparan las categorías de impacto, ponderando las puntuaciones normalizadas en función de la importancia de cada indicador de impacto ambiental. Lo obtenido es un calor único como resultado.

5. Objetivo y Alcance del ACV

El fin de este trabajo es valorar los impactos ambientales de los diferentes mixes de generación de varios países. En el estudio se examinará la situación de generación actual y la posible situación de 2030, año en el que se estima que la introducción de las energías renovables al mix de generación sea superior al 60% en numerosos países.

Los países seleccionados para este estudio son países que, según su correspondiente *Plan Nacional de Energía y Clima* se decantan por las energías Eólica On-shore y Solar Fotovoltaica como principales actores en el mix de generación para el año 2030.

Los principales objetivos que se establecen para este ACV son:

- Cuantificación de los impactos ambientales por kWh en baja tensión de cada tecnología de generación eléctrica y comparación de los resultados.
- Cuantificación de los impactos ambientales por kWh en baja tensión de cada mix de generación eléctrica de los países en los distintos escenarios considerados y comparación de los resultados.
- Cálculo del coste nivelado de la electricidad para cada tecnología y comparación de los resultados.
- Cálculo del coste nivelado promedio de la electricidad para cada mix de generación de los distintos escenarios y comparación de los resultados
- Realización de un análisis multicriterio de los distintos escenarios y selección del mix de generación óptimo.

Para cumplir y llegar a estos objetivos, se van a plantear tres escenarios para cada país. El primero de ellos será del mix de generación del año 2019. Se ha escogido este año debido a que, en el año 2020, debido a la pandemia sufrida la demanda fue inferior a lo habitual, no siendo una imagen real del mix de generación.

Una vez planteado el escenario “actual”, se plantearán dos escenarios para el año 2030 en función de la capacidad y generación. Estos datos se tomarán del *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima* que la Unión Europea exige a los países miembros. En dicho documento se establece un plan a 10 años para el periodo 2021 – 2030 para cumplir los objetivos marcados, entre los que destacan, entre otros, la descarbonización del sector eléctrico y la reducción en un 30% las emisiones de CO₂. Para aquellos países no europeos, la información sobre los datos de 2030 se tomará de documentos publicados por organismos internacionales como la Agencia Internacional de la Energía (IEA) o IRENA (International Renewable Energy Agency). En caso de que algún país del estudio no proponga dos posibles escenarios, se tomará el único escenario presente y se asumirá como escenario de referencia.

5.1. Limitaciones aplicadas

Previo a la realización de este estudio, se han determinado una serie de límites que definen de manera correcta el alcance. Estos límites son:

- **Límites geográficos.** El análisis de ciclo de vida se va a centrar en países que no se haya hecho dicho estudio previamente. Se han escogido países de 3 continentes, Europa, América y África, y estos países son:
 - Italia
 - Republica Checa
 - Austria
 - Grecia
 - Portugal
 - México
 - Chile
 - Sudáfrica
 - Egipto

La elección de estos países se debe a poder comparar países potentes a nivel energético de otros continentes y poder compararlos con países del continente europeo. Además, el presente trabajo de fin de máster es complementario a otros trabajos del mismo ámbito, pero con diferentes países.

- **Límites temporales.** El presente estudio analiza los años 2019 y 2030, observando los desarrollos o retrocesos ocurridos entre ese tiempo. La razón por la que se ha escogido esta temporalidad se debe a, la atipicidad del año 2020 debido a la pandemia mundial COVID-19, este hecho supuso que el consumo de demanda fuese notablemente inferior a valores registrados en años anteriores debido a una paralización de la industria durante marzo y abril. Es por ello que el año 2019 resulta mucho más realista al mostrar registros más habituales. Por otro lado, el año 2030 es el año fijado para el que se realizan todos los planes nacionales de energía y clima, marcando objetivos para esa fecha.
- **Límites tecnológicos.** El presente trabajo presenta una limitación tecnológica debido al software SimaPro. Por ejemplo, los paneles fotovoltaicos presentan una eficiencia en torno al 15% - 18% pero se siguen realizando estudios para mejorar dichos resultados [27]. Por otro lado, el almacenamiento, bien por medio de baterías, hidrógeno, volantes de inercia... a día de hoy no son viables económicamente, no obstante, con el crecimiento de las renovables se están realizando numerosos estudios para impulsar su implementación en los sistemas energéticos actuales. Sin embargo, en la documentación empleada para obtener los mixes energéticos en el año 2030 no se menciona nada acerca de estas tecnologías por lo que no se van a tener en consideración.

5.2. Unidad funcional y Software utilizado

Para poder comparar dos tecnologías de generación, es necesario establecer la unidad funcional. En este trabajo se ha decidido que la unidad funcional sea un kWh, de manera que la comparación se basará en el impacto de cada tecnología en la generación de 1 kWh en baja tensión, es decir, energía lista para ser consumida en uso doméstico.

Para la realización de todos los cálculos se ha utilizado el programa Simapro v9.1.0.11. Este software, desarrollado por la empresa Pré Consultants, es líder en el mundo que permite realizar el análisis de ciclo de vida de un producto de una manera sistemática y sencilla gracias a que contiene las bases de datos más importantes y completas de los diferentes sectores, además, permite al usuario crear sus propias bases de datos.

En este trabajo, como es lógico, se ha utilizado una base de datos ya existente. Se ha decidido hacer uso de la base de datos *Ecoinvent 3* ya que es la más utilizada en el mercado, aunque en ciertas ocasiones será necesario actualizar los datos ya que se tratan de valores de años antiguos que no tienen validez a día de hoy. Por último, el método de evaluación de impacto utilizado es el CML-IA Baseline V3.06/EU25¹ ya que facilita la tarea final de interpretación de los resultados.

5.3. Ámbito geográfico de estudio

Como ya se ha comentado anteriormente, se han escogido países de 3 continentes distintos, Europa, América y África. Los países de estudio del presente trabajo son los siguientes:

- Italia
- Republica Checa
- Austria
- Grecia
- Portugal
- México
- Chile
- Sudáfrica
- Egipto

¹ EU25 hace referencia a la normalización, en este caso, se realiza teniendo en cuenta 25 países de la Unión Europea.



Figura 3: Ámbito geográfico de estudio. Fuente Mapchart [28]

Son varias las razones por las que se han escogido estos países. En primer lugar, todos ellos han apostado fuertemente por un desarrollo fotovoltaico o eólico. Observando los mixes propuestos para el año 2030 estas tecnologías son predominantes frente a otras. Además, algunos de estos países han dado alguna pista de su mix energético en el año 2050 y se puede observar cómo se ratifica la decisión de apostar fuertemente por estas dos tecnologías, por ejemplo, Italia espera para el 2050 una producción fotovoltaica que cubra el 60% de la demanda, similar a la República Checa. Por otro lado, los países latinoamericanos escogidos son dos de los que mayor potencial fotovoltaico presentan en todo el mundo [2].

Además, tal y como se comentaba en el estado del arte, se desea estudiar el aspecto energético de estos países con distintos niveles de desarrollo, con el objetivo de poder compararlos. Así pues, según el *Índice de Desarrollo Humano* planteado por Naciones Unidas, la posición de los países de estudio es la siguiente:

País	Ranking IDH
Austria	18
Republica Checa	27
Italia	29
Grecia	32
Portugal	38
Chile	43
México	74
Sudáfrica	114
Egipto	116

Tabla 1: IDH por país [29]

Como se puede observar, en base al IDH todos los países europeos presentan mejores resultados que los latinoamericanos que, a su vez, presentan mejores resultados que los países africanos.

5.4. Tecnologías de estudio

Dependiendo del país las tecnologías de generación predominantes son unas u otras, ya que dependen del recurso, especialmente las renovables. Pese a que, en términos generales, las tecnologías empleadas no son demasiadas, en el software SimaPro se realiza una diferenciación al detalle debido a que los impactos no son los mismos. Un ejemplo claro de esto ocurre con la eólica on-shore, donde se diferencian 3 tipos de generación: Turbinas menores de 1MW, entre 1MW y 3MW y mayores de 3MW. De esta manera se consigue una mayor precisión sobre el impacto medioambiental de las tecnologías.

En total, se han determinado 26 tipos de generación distintos, no obstante, estos se pueden resumir en 10 tecnologías distintas. Igualmente, estas pueden agruparse en dos grandes grupos: Generación no renovable y Generación renovable.

5.4.1. Generación no renovable

Las centrales de generación no renovable son aquellas centrales cuya materia prima se encuentra en la naturaleza de manera limitada. Dentro de este grupo se pueden diferenciar dos tipos distintos de generación, según la materia prima:

- Combustibles fósiles
- Combustible nuclear

Dentro de los combustibles fósiles se observan tres tecnologías distintas: carbón, fuel-oil y gas natural. Por otro lado, las únicas centrales que emplean combustible nuclear son las centrales nucleares. Todas estas tecnologías se explican más al detalle en los siguientes puntos.

I. Combustibles fósiles

Las centrales que emplean combustibles fósiles fueron las primeras que se comenzaron a usar, por lo que, pese a que su tecnología ha ido mejorando con el transcurso del tiempo, son las más contaminantes.

En este tipo de centrales se sigue un ciclo termodinámico para la generación eléctrica, obtenida a base de quemar la materia prima. Los ciclos empleados son Rankine para las centrales de carbón y petróleo y Bryton para las centrales de gas natural. Con el paso de los años y la evolución tecnológica, la eficiencia de estos ciclos ha ido mejorando, gracias al aprovechamiento de los gases de escape para el recalentamiento, quedando el ciclo de la siguiente manera:

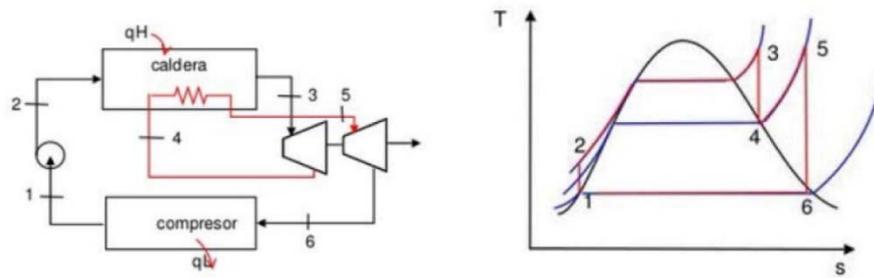


Figura 4: Ciclo Rankine con recalentamiento. Fuente: UNEFM [30]

Por su parte, las centrales de gas natural también han visto incrementada su eficiencia mediante el recalentamiento. En la actualidad, estas centrales emplean los dos ciclos, Rankine y Brayton, de manera que los gases de escape del gas natural (ciclo Brayton) se empleen para calentar vapor (ciclo Rankine). Estas centrales reciben el nombre de ciclo combinado, al emplear ambos.

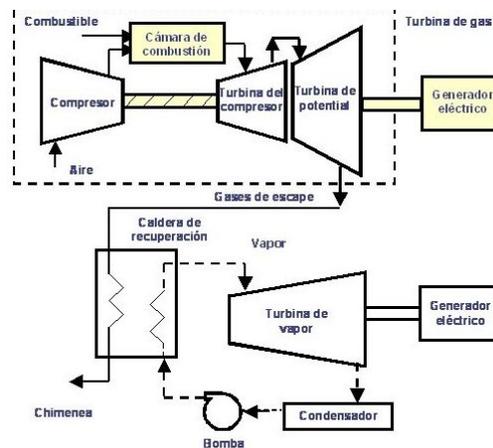


Figura 5: Ciclo combinado. Fuente: Explicación [31]

A continuación, se explica de manera más detallada cada una de las tecnologías de generación:

- Carbón

Las centrales térmicas de carbono son de las primeras centrales de generación eléctrica. La eficiencia de estas centrales se sitúa en torno al 50%. Se diferencian 3 tipos distintos de materia prima, en función de la concentración de carbono:

- **Lignito:** Se forma una vez comprimida la turba. Tiene una concentración de carbono del 30%.
- **Huya:** Se origina tras la compresión del lignito. Tiene una concentración de carbono entre el 50% y 75%.
- **Antracita:** Procede de la transformación de la hulla. Es el menos contaminante de todos y tiene un elevado poder calorífico. Tiene una concentración de carbono del 95%.

Para facilitar la combustión es necesario realizar un trabajo de pulverización del carbón, previo a la combustión. En el presente trabajo se han tratado las siguientes tecnologías:

- Antracita
- Antracita Cogeneración
- Lignito
- Lignito Cogeneración

- Petróleo

Se trata de una tecnología muy contaminante y con un coste superior al carbón, por lo que su uso está decreciendo año tras año. Sin embargo, aún existen algunas plantas den funcionamiento, dependiendo del país. En el presente trabajo se han tratado las siguientes tecnologías:

- Petróleo
- Petróleo Cogeneración

- Gas natural

De todas las tecnologías de generación con combustibles fósiles es la menos contaminante de todas. El gas se transporta por medio de gasoductos hasta los emplazamientos de generación o por medio de barcos en estado líquido. El rendimiento del ciclo Brayton está en torno al 32%, sin embargo, si se emplea junto al ciclo Rankine (Central de ciclo combinado) alcanza una eficiencia de 54%. En el presente trabajo se han tratado las siguientes tecnologías:

- Gas Natural. Ciclo combinado.
- Gas Natural Cogeneración. Ciclo combinado.
- Gas Natural Cogeneración. Central Convencional.
- Gas Natural. Central convencional.

- Residuos

El proceso de generación eléctrica con residuos es muy similar a los vistos anteriormente. En este caso, aquellos residuos que resulta imposible de reciclar o separar son quemados para la producción eléctrica.

II. Combustible nuclear

Las centrales nucleares son centrales termoeléctricas que aprovechan el calor liberado por el uranio (combustible nuclear) para convertir en vapor de alta temperatura un líquido que acciona un grupo turbina alternador produciendo de esta manera energía eléctrica.

Como se ha comentado, el combustible es generalmente dióxido de uranio. Sin embargo, se requiere de un proceso de enriquecimiento previo a su introducción en el reactor. En este trabajo se han tratado dos tipos de tecnologías:

- Reactor BWR (Boiling Water Reactor)
- Reactor PWR (Pressurized Water Reactor)

Cada tipo de reactor presenta unas ventajas frente al otro:

- | <u>Ventajas PWR frente a BWR</u> | <u>Ventajas BWR frente a PWR</u> |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Agua de las turbinas no es radioactiva • La reacción es más sencilla de controlar | <ul style="list-style-type: none"> • El circuito primario trabaja a menos presión • No son necesarios elementos adicionales |

Así pues, a continuación, se muestran dos figuras de los ciclos de manera esquemática:

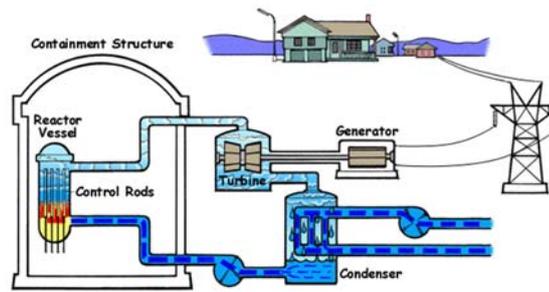


Figura 6: Ciclo central nuclear BWR. Fuente: *Acelerando la Ciencia* [32]

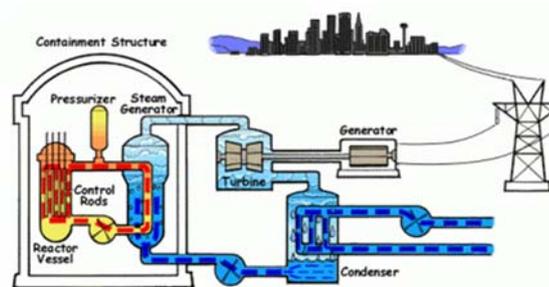


Figura 7: Ciclo central nuclear PWR. Fuente: *Energía Nuclear* [33]

5.4.2. Generación renovable

Las tecnologías de generación renovable son aquellas que emplean como combustible recursos naturales inagotables de manera que no hay posibilidad al desabastecimiento. Entre todos los países analizados se han estudiado 14 tecnologías.

I. Biogás

La generación eléctrica con biogás comienza con el tratamiento de desechos orgánicos, mediante una digestión anaeróbica se produce la descomposición obteniendo los gases necesarios para la producción eléctrica

II. Biomasa

La biomasa es aquella tecnología que emplea recursos biológicos de origen animal o vegetal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación, de los cuales se puede obtener un combustible energético para la producción de energía eléctrica.

III. Eólica

Las turbinas eólicas son aquellas que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica. En la actualidad existen muchos tipos de turbinas distintas (según el eje, número de palas, emplazamiento...), sin embargo, para grandes niveles de generación la tecnología es: turbinas de eje horizontal, con tres palas y generador asíncrono.

En lo referente al emplazamiento, hasta hace unos años, la totalidad de las turbinas se situaban en tierra (on-shore), no obstante, los avances tecnológicos han permitido llevar esta tecnología a emplazamientos marinos (off-shore), donde el viento presenta menos perturbaciones. El principal problema que presentan estas turbinas se debe a los anclajes, debido a las profundidades de ciertos océanos o mares. Es por ello, que, dependiendo de la profundidad, los aerogeneradores se pueden anclar al suelo marino o son flotantes. En SimaPro, las tecnologías que se han empleado para realizar el estudio han sido:

- Eólica Marina (1 - 3MW)
- Eólica Terrestre (< 1MW), (>1MW - <3MW) & (>3MW)

IV. Geotermia

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie terrestre que puede ser aprovechada de manera técnica y económicamente viable por el ser humano. A mayor profundidad, mayor es la temperatura, sin embargo, las temperaturas para la generación eléctrica deben ser superiores a los 100 grados (en ciclos binarios) y 150 grados.

V. Hidráulica

La generación hidráulica, es una de las fuentes renovables más utilizada para la generación eléctrica, representando casi el 20% de la generación mundial. Existen tres tipos de centrales hidráulicas:

- Reserva
- Fluyente
- Bombeo

Las centrales de reserva generan debido a la energía cinética del agua al descender por un canal por gravedad. En primer lugar, se almacena el agua en un pantano o embalse para posteriormente hacerla descender por una tubería hasta la turbina de generación

eléctrica. Por último, una vez el agua ha cedido su energía es restituida al río aguas abajo de la central. El rendimiento conseguido es elevado, llegando al 85%. Debido al gran impacto que supone esta tecnología, gran parte de la población no la considera renovable, además, en SimaPro, se realiza distinción dependiendo si la reserva es alpina o no alpina.

En cuanto a las centrales fluyentes, son aquellas centrales que captan una parte del caudal del río, lo trasladan hasta la central y una vez utilizado, se devuelve al río. El principio de generación es similar a las centrales de reserva, aprovechar la energía cinética proveniente del agua. Este tipo de centrales son las únicas que no presentan la posibilidad de gestionar la generación, es decir, si existe caudal generan y si el caudal es 0, la generación es nula.

Por último, las centrales de bombeo, de nuevo, generan electricidad mediante el aprovechamiento de la energía cinética proveniente del agua. Este tipo de tecnología presenta la peculiaridad de tener dos embalses, de manera que tras la generación el recurso queda almacenado. Esta tecnología requiere de emplazamientos muy específicos y presenta la ventaja de poder gestionar la generación. De este modo, el beneficio de estas centrales se debe a las diferencias diarias en el precio del mercado eléctrico, cuando mayor es el precio generan electricidad y en horas nocturnas, cuando el precio es inferior, se bombea el recurso al embalse superior para poder volver a generar.

VI. Solar Fotovoltaica

La tecnología solar fotovoltaica se basa en la utilización de células fotovoltaicas fabricadas con silicio y materiales cristalinos, que por el efecto fotovoltaico², generan corriente eléctrica cuando sobre ellos incide radiación solar. Existen dos tipos de células, de silicio monocristalino o policristalino.

En los últimos años, la capacidad instalada de esta tecnología ha aumentado exponencialmente, además, gracias al desarrollo tecnológico, se ha podido instalar esta tecnología, no únicamente a gran escala en tierra, sino también en edificios, para autoconsumo, o en lagos y embalses (fotovoltaica flotante). Es por esta razón que algunos países introducían el autoconsumo en el mix energético de generación para el año 2030. Así pues, las tecnologías estudiadas han sido:

- Autoconsumo
- Solar a gran escala

² Se conoce como efecto fotovoltaico al resultado de la producción de una corriente eléctrica producida por el contacto de dos piezas que no están formadas por el mismo material y que a su vez se encuentran expuestas a una radiación electromagnética como por ejemplo puede ser la luz. [83]

VII. Solar Térmica

La energía solar térmica la tecnología que aprovecha el calor solar para la generación eléctrica. El principio básico es concentrar la luz solar en un mismo punto, alcanzándose temperaturas muy elevadas, de manera que se calienta un fluido que, a su vez, calienta vapor para introducirlo en la turbina.

Dependiendo de la temperatura del fluido, los colectores y la tecnología empleada es distinta:

- Baja temperatura (30 – 200°C): Colectores planos sin seguimiento
- Media temperatura (60 – 400°C): Colectores cilindro-parabólicos con seguimiento a un eje
- Alta temperatura (150 – 2000°C): Torre con heliostatos y seguimiento a dos ejes.

En el presente trabajo, la única tecnología solar térmica estudiada ha sido la torre con heliostatos.

5.5. Categorías de impacto

Una vez definidas las bases del estudio, es necesario determinar las categorías que se van a examinar. Dado que este trabajo analiza los impactos medioambientales y económicos cada uno de ellos tendrá unas categorías de impacto diferentes. Además, para poder realizar una comparación útil entre las tecnologías, será necesario referenciar todas ellas a la unidad funcional (kWh en baja tensión). Así pues, en los próximos puntos se realizará una explicación detallada de cada una de las categorías de impacto empleadas.

5.5.1. Categorías de impacto medioambientales

Las categorías de impacto medioambientales son aquellas que van a permitir determinar si una tecnología o mix energético es más o menos perjudicial para el planeta. Para la elección de ellas se ha decidido emplear las recogidas en el método de evaluación de impactos CML-IA Baseline V3.06/EU25 que recoge un total de 11 distintos.

I. Agotamiento abiótico

Esta categoría de impacto mide la cantidad de recursos “sin vida” explotados para, en el caso del presente trabajo, la generación de energía eléctrica. En esta categoría se incluyen todo tipo de minerales, excepto los combustibles fósiles (que se categorizan por separado). La unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de antimonio equivalente (kg Sb eq) [34].

II. Agotamiento abiótico de combustibles fósiles

Esta categoría de impacto mide la cantidad de recursos fósiles explotados para la generación de energía eléctrica. Se trata de la misma categoría que la recién descrita pero que hace referencia a los combustibles fósiles. En este caso, la unidad de medición es el mega julio (MJ).

III. Calentamiento global

Este calentamiento global se debe a los gases de efecto invernadero, que son aquellos gases que se sitúan en la atmosfera y permiten pasar la luz, pero retienen el calor. Esta categoría de impacto mide exactamente esto, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero emitidas a la atmosfera. La unidad para cuantificar dichos efectos es el kilogramo CO₂ equivalente (kg CO₂ eq), tomando como horizonte temporal 100 años, ya que es el valor predeterminado que toma SimaPro. Por último, cabe destacar que entre todas las categorías descritas está será a la que más atención se le preste, dado que todos los planes energéticos realizados por los países se enfocan en reducir la temperatura global por debajo de 2°C en comparación con los niveles preindustriales.

IV. Destrucción de la capa de ozono

La capa de ozono es vital para garantizar la vida en la tierra ya que sirve de filtro para la radiación solar y de escudo para la radiación ultravioleta. La principal razón de la destrucción de la capa de ozono se debe a la emisión de los clorofluorocarbonos o CFCs, empleados en desodorantes, refrigeradores... [35] Por esta razón, la unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de CFC 11 equivalente (kg CFC-11 eq) dado que es el más dañino de todos.

V. Toxicidad humana

Esta categoría refleja el daño potencial de una unidad de producto químico liberado en el medio ambiente. Los principales productos que influyen sobre esta categoría son el arsénico, el dicromato de sodio y el fluoruro de hidrógenos, causados principalmente por la generación eléctrica a partir de fuentes fósiles [36]. La unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de 1,4 dicloro de benceno equivalente (kg 1,4-DB eq).

VI. Ecotoxicidad de agua dulce

Esta categoría de impacto mide la emisión de sustancias como metales pesados que pueden tener impactos negativos sobre el ecosistema, en este caso sobre el agua dulce. La unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de 1,4 dicloro de benceno equivalente (kg 1,4-DB eq) [36].

VII. Ecotoxicidad de agua marina

Esta categoría de impacto mide la emisión de sustancias como metales pesados que pueden tener impactos negativos sobre el ecosistema, en este caso sobre el agua marina. La unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de 1,4 dicloro de benceno equivalente (kg 1,4-DB eq) [36].

VIII. Ecotoxicidad terrestre

Esta categoría de impacto mide la emisión de sustancias como metales pesados que pueden tener impactos negativos sobre el ecosistema, en este caso sobre el suelo terrestre. La unidad de medición de esta categoría de impacto es el kilogramo de 1,4 dicloro de benceno equivalente (kg 1,4-DB eq) [36].

IX. Oxidación fotoquímica

Esta categoría de impacto mide la oxidación fotoquímica debida a las reacciones entre sustancias contaminantes. Estas sustancias son monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO), amonio y COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metánicos) [36]. La unidad de medición de esta categoría es el kilogramo de etileno equivalente (kg C₂H₄ eq).

X. Acidificación

La acidificación es la reducción del pH debido a los efectos acidificantes de las emisiones antropogénicas, además impacta directamente sobre el agua y sobre el terreno. Los gases que producen la acidificación son amoníaco (NH₃), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x) [36]. La unidad de medición de esta categoría es el kilogramo de dióxido de azufre equivalente (kg SO₂ eq).

XI. Eutrofización

Se debe a la acumulación de nutrientes en los medios acuáticos contaminándolos, provocando una reducción de la calidad del agua que afecta a la fauna de estos ecosistemas. Las emisiones de amoníaco, nitratos, óxidos de nitrógeno y fósforo al aire o al agua tienen un impacto en la eutrofización [36]. La unidad de medición de esta categoría es el kilogramo de fosfato equivalente (kg PO₄ eq).

5.5.2. Categorías de impacto económicas

El aspecto económico es una parte fundamental a la hora de configurar un mix energético, ya que, es necesario que las tecnologías resulten económicamente viables para implantarlas a gran escala. Para poder comparar entre ellas, el método empleado generalmente es el LCOE (*Levelized Cost Of Energy*) o coste normalizado de la energía.

El LCOE anualizado ($LCOE_a$) está compuesto por varios sumandos entre los que siempre aparecen, el coste de la inversión anualizado, el coste de combustible anualizado y el coste de la operación y mantenimiento anualizado.

$$LCOE_a = INV \cdot f_a + C_0^F \cdot f_{\Sigma}^F \cdot f_a + C_0^{OM} \cdot f_{\Sigma}^{OM} \cdot f_a$$

Ecuación 1: LCOE anualizado

Donde:

- f_a : Coeficiente de anualización
- f_{Σ}^X : Coeficiente de normalización

Una vez determinado el LCOE anualizado, será necesario calcular el coste total para toda la vida útil de la instalación, descontándolo por el WACC (*Weighted Average Cost of Capital*). Del mismo modo, se calculará la energía total generada durante la vida útil de la instalación. Por último, se realizará la división para calcular los €/MWh de coste.

$$LCOE = \frac{\text{Coste total}}{\text{Generación total (MWh)}}$$

Ecuación 2: LCOE

6. Inventario del ACV

En el presente capítulo se van a presentar todos los datos recogidos en lo referente a la generación eléctrica de cada país de estudio, así como las suposiciones tomadas. Son diversas las fuentes que se han consultado para extraer toda esta información, entre ellas destacan; la Agencia Internacional de Energías Renovables (*IRENA*, por sus siglas en inglés), la Agencia Internacional de la Energía (*IEA*, International Energy Agency), publicaciones de los operadores de red, publicaciones estadísticas y Planes Nacionales de Energía y Clima.

6.1. Etapas involucradas en el ACV

En el análisis de ciclo de vida se tienen en cuenta una gran cantidad de etapas, independientemente de la tecnología de generación. Sin embargo, todas ellas se pueden agrupar en dos grupos:

- Generación eléctrica
- Transformación a kWh en baja tensión

Generación eléctrica

En esta etapa se recogen todas las actividades requeridas para la generación eléctrica. En el caso de las centrales convencionales³ el proceso comienza con la extracción de los combustibles, como pueden ser, carbón, gas natural, uranio... dependiendo de la central de generación. Posteriormente, este combustible es tratado y adecuado para la generación. Además, dependiendo de la tecnología, se requiere que el combustible sea importado por lo que se incluye el impacto del transporte. Por último, las últimas etapas se corresponden con la construcción y operación de la central eléctrica.

En el caso de las centrales renovables el número de etapas es menor. En primer lugar, se extraen los materiales que, a diferencia de las centrales convencionales (usados para la operación) se utilizan para la construcción de la instalación. Por ejemplo, el silicio, necesario para la producción de paneles solares. Por otro lado, en el caso de las energías renovables no es necesario el transporte ya que el recurso se da en el lugar de la generación. Por último, las últimas dos etapas son comunes al resto de centrales y se corresponden con la construcción y operación de la planta.

Transformación a kWh de baja tensión

Dependiendo de la tecnología de generación, la energía eléctrica se produce a alta, media o baja tensión⁴. De manera que, es necesario llevar toda la generación al mismo nivel de tensión para poder evaluar correctamente los impactos previamente definidos. En el caso de este trabajo, como se indica en el punto 5.2 la unidad funcional es el kWh en baja tensión, es por ello que este será el nivel de tensión para todas las tecnologías.

³ Convencional se refiere a toda tecnología que no es renovable.

⁴ Se introduce el concepto de media tensión al estar en SimaPro definido de esta manera. Realmente, solo existen dos niveles de tensión: Alta (>1kV) o baja (<1kV).

Entre todas las tecnologías expuestas, únicamente la Solar Fotovoltaica (tanto a gran escala como distribuida) genera en baja tensión. Así pues, será necesario adecuar toda la energía producida por el resto de las tecnologías a este nivel.

Para realizar dicha adecuación, se han introducido dos etapas adicionales:

1. Transformación de alta a media tensión
2. Transformación de media a baja tensión

De esta manera, el análisis de cada una de las tecnologías y su impacto en cada una de las categorías mencionadas en el punto 5.5 se adecúa a la unidad funcional.

En el caso de la generación con residuos, esta se produce en media tensión. Por lo que, al igual que con las otras tecnologías, será necesario adecuarla a la unidad funcional. Para realizar esto, una vez toda la generación de alta se haya transformado en media (es decir tras el paso 1) se le sumará la generación con residuos para proceder a la transformación de media a baja tensión. Tras este paso, se tendrá el mix energético del país correspondiente en baja tensión.

6.2. Hipótesis en las que se ha basado la investigación

En los Planes Nacionales de Energía y Clima se propone un mix energético para el año 2030, no obstante, el nivel de detalle en la tecnología de generación no es tan elevado como en SimaPro, por ejemplo, en SimaPro hay 3 tipos de eólica terrestre, turbinas inferiores a 1MW, entre 1-3 y >3MW. Ese nivel de detalle no aparece en lo PNIEC, por lo que se ha mantenido la proporción inicial que aparece en SimaPro con el objetivo de aproximarse lo máximo a un escenario real.

6.3. Italia

Siendo el doceavo país más grande de la Unión Europea en superficie [37] y con una demanda de 241 TWh, Italia cuenta con fuertes planes de impulso a las energías renovables para, no solo cumplir con los objetivos marcados por la Unión Europea, sino aprovechar al máximo el recurso disponible. Además, el objetivo es superar el 60% de generación solar para el año 2050 [38].

En la siguiente tabla se muestra la generación, por tecnología del año 2019:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Lignito)	16,96	7,02%	56,31%
Petróleo	0,96	0,40%	
Gas Natural	117,81	48,76%	
Residuos	0,34	0,14%	
Geotérmica	5,69	2,35%	43,69%
Biogas	8,28	3,43%	
Biomasa	5,12	2,12%	
Hidráulica	46,40	19,20%	
Hidráulica (Bombeo)	1,83	0,76%	
Eólica (Onshore)	19,92	8,24%	
Solar FV	18,32	7,58%	
Total	241,63	100%	

Tabla 2: Mix energético Italia 2019

Como puede observarse, Italia cuenta con un mix casi parejo en generación convencional y renovable, alrededor de 56%/44% respectivamente. Sin embargo, cuenta con una muy elevada dependencia del gas natural ya que supone casi el 50% de su generación total. Por otro lado, pese al objetivo de alcanzar más del 60% de energía solar para 2050, actualmente únicamente supone el 7,6%. La tecnología eólica, únicamente abarca el 8,2% de la generación total, así pues, pese a que son las dos tecnologías renovables más rentables, su participación en el mix italiano es muy baja. Por último, es la tecnología hidráulica la que lidera la generación renovable alcanzando el 19,2%. [39]

Una vez analizado el mix energético actual, es necesario estudiar las medidas propuestas por el gobierno italiano para alcanzar los objetivos marcados, en este caso únicamente se propone un escenario futuro. En primer lugar, en el año 2030, la generación con carbón y petróleo será nula de manera que se consiga descarbonizar el sector eléctrico. Además, este vacío de generación que deja el apagón de estas centrales debe ser sustituido por otras tecnologías o por importaciones. En el caso de Italia, no solo para ello, sino también para cubrir el aumento en la demanda esperado se va a triplicar la capacidad instalada de tecnología solar fotovoltaica alcanzando los 52 GW y a duplicar la capacidad instalada de tecnología eólica alcanzando los 19,3 GW de potencia [38]. Además, para el seguimiento de estos incrementos se determinan dos hitos, capacidad instalada en 2025 y capacidad instalada en 2030, en el caso de la tecnología solar fotovoltaica el 30% de toda la nueva potencia se realizará durante el primer hito y el

70% restante entre 2025 y 2030. En el caso de la eólica, la situación es contraria, durante el primer hito se instalará en torno al 70% y el resto durante los últimos años. Para el resto de las tecnologías la variación de la potencia instalada es mucho menor, únicamente cabe destacar que la tecnología hidráulica aumentará en 1 GW la potencia instalada.

Así pues, una vez analizada la nueva potencia instalada en Italia, el mix energético previsto para el 2030 queda de la siguiente manera:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Lignito)	0,00	0,00%	34,63%
Petróleo	0,00	0,00%	
Gas Natural	100,00	34,63%	
Residuos	0,00	0,00%	65,37%
Geotérmica	7,10	2,46%	
Biogas	8,28	2,87%	
Biomasa	7,42	2,57%	
Hidráulica	49,30	17,07%	
Hidráulica (Bombeo)	2,10	0,73%	
Eólica (Onshore)	37,63	13,03%	
Eólica (Offshore)	3,87	1,34%	
Solar FV	73,10	25,31%	
Total	288,80	100%	

Tabla 3: Mix energético Italia 2030

Como se puede observar, la única tecnología convencional que mantiene su presencia es el gas natural, no obstante, con una participación mucho menor a la del 2019 (14 puntos porcentuales inferior). En cuanto a las renovables, se observa cómo la tecnología solar fotovoltaica adquiere una participación notable siendo la segunda tecnología por detrás del gas natural. Por parte de la eólica se observa como aumenta su participación en 21TWh, aunque porcentualmente el cambio no es tan elevado debido al aumento de la demanda. En este caso, se puede ver como la eólica offshore entra en el mix, aunque abarcando poca demanda (1,34%).

6.4. República Checa

Con una superficie de 78.000km², la República Checa ocupa el puesto 23 en el ranking de tamaño de los países de la Unión Europea [37]. Con una demanda de 80 TWh, el sistema eléctrico de la República Checa cuenta con una ventaja debido a la localización en el mapa, ya que el grado de interconexión con países vecinos es crucial y elevado en comparación con otros. Sin embargo, este país presenta un problema para alcanzar los objetivos, debido a que no cuenta con recursos renovables suficientes como para alcanzar los objetivos que indica la UE. Además, como se muestra en la **Tabla 3**, el carbón es la principal tecnología de generación por lo que el impacto de descarbonizar el sector al 100% es muy elevado. No obstante, gracias a su localización estratégica en el mapa y a las políticas de aumentar la interconexión, en un futuro, estas centrales se apagarán siguiendo con las políticas de la Unión Europea.

Así pues, el mix energético del año 2019 fue el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	1,99	2,44%	86,79%
Carbón (Lignito)	33,16	40,68%	
Petróleo	0,05	0,07%	
Gas Natural	6,78	8,32%	
Residuos	0,19	0,23%	
Nuclear	28,58	35,06%	
Biogas	2,53	3,10%	13,21%
Biomasa	2,40	2,94%	
Hidráulica	2,99	3,67%	
Eólica (Onshore)	0,69	0,85%	
Solar FV	2,16	2,65%	
Total	81,53	100%	

Tabla 4: Mix energético República Checa 2019

Como puede observarse, el mix energético de la República Checa es fuertemente dependiente de las tecnologías convencionales. En primer lugar, como ya se anticipaba, el carbón supone el 43% de la generación eléctrica seguido de la tecnología nuclear (35%). En cuanto a las tecnologías renovables, su participación se encuentra en torno al 10%, algo que resulta muy bajo en comparación con otros países. En particular la energía eólica presenta un valor de producción muy bajo. [39] [40]

En lo referente al año 2030, se han estudiado dos escenarios posibles. El primero de ellos es el propuesto en el PNIEC y el segundo de ellos es un caso Baseline elaborado por CEPS, el operador del sistema. Pese a que ambos escenarios son similares, el elaborado por CEPS es algo más agresivo en cuanto a la producción con energías renovables y nivel de interconexión.

Así pues, el mix energético propuesto en el PNIEC es el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	0,00	0,00%	82,76%
Carbón (Lignito)	32,44	39,79%	
Petróleo	0,08	0,10%	
Gas Natural	3,80	4,66%	
Nuclear	31,15	38,21%	
Biogas	1,67	2,05%	15,44%
Biomasa	2,40	2,94%	
Hidráulica	2,10	2,58%	
Eólica (Onshore)	1,80	2,21%	
Solar FV	4,18	5,13%	
Residuos	0,44	0,54%	
Total	80,06	100%	

Tabla 5: Mix energético Republica Checa 2030 (PNIEC)

Pese a que la producción solar fotovoltaica y eólica prácticamente se dupliquen, su presencia en el mix sigue siendo muy baja en comparación con las fuentes no renovables. De nuevo el carbón sigue siendo la tecnología de generación líder ya que prácticamente no varía su generación con respecto a 2019. La energía nuclear aumenta ligeramente su producción, pero en este escenario propuesto por el gobierno no se pueden apreciar grandes cambios con respecto al observado en 2019. Además, con el presente escenario no se conseguirían alcanzar el objetivo de un 32% de energías renovables en el mix marcado por la UE. [41]

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	2,80	3,43%	72,86%
Carbón (Lignito)	24,50	30,05%	
Petróleo	0,00	0,00%	
Gas Natural	2,50	3,07%	
Nuclear	29,60	36,31%	
Biogas	1,30	1,59%	19,17%
Biomasa	2,20	2,70%	
Hidráulica	4,40	5,40%	
Eólica (Onshore)	2,30	2,82%	
Solar FV	5,20	6,38%	
Residuos	0,23	0,28%	
Total	75,03	100%	

Tabla 6: Mix energético Republica Checa 2030 (CEPS)

En este escenario, se observa cómo la generación con carbón disminuye en 10 TWh debido a una menor demanda y a una mayor integración de las energías renovables, sin embargo, su participación sigue siendo muy baja. Además, pese a este incremento, la Republica Checa seguiría lejos de alcanzar el 32% marcado por la Unión Europea. [42]

6.5. Austria

En dimensiones, Austria se encuentra en la posición número 22, justo por delante de la República Checa [37]. Sin embargo, presenta una demanda alrededor de un 30% inferior. Austria, también presenta una localización estratégica para la interconexión con países vecinos, pero, además, cuenta con un gran potencial hidráulico que ha sabido aprovechar mediante la construcción de centrales, como se muestra en la Tabla 6. Esto permite que únicamente con esta tecnología se supere con creces el objetivo de un 32% de generación renovable marcado por la UE.

Así pues, el mix energético del año 2019 fue el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	1,25	2,09%	20,00%
Gas Natural	9,84	16,44%	
Residuos	0,880	1,47%	
Geotérmica	0,00	0,00%	80,00%
Biomasa	2,18	3,64%	
Hidráulica	36,39	60,81%	
Eólica (Onshore)	7,97	13,32%	
Solar FV	1,33	2,22%	
Total	59,84	100%	

Tabla 7: Mix energético Austria 2019

Como puede observarse, en este país la generación renovable predomina frente a la generación convencional. Tal y como se anticipaba, la energía hidráulica abarca el 60% de la demanda total, siendo el gas natural la segunda suponiendo un 16% del total. La generación eólica y solar presentan resultados muy dispares, mientras que la eólica es la tercera tecnología alcanzando un 13% de la demanda, la tecnología solar fotovoltaica únicamente alcanza el 2,2%.

Para el 2030 se presentan dos posibles escenarios en el PNIEC:

- *With Existing Measures (WEM)*
- *With Additional Measures (WAM)*

Como el propio nombre indica, la principal diferencia entre uno y otro es la agresividad en la integración de tecnologías renovables al mix. En primer lugar, el mix de generación que resulta del escenario WEM es el siguiente [43]:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	0,62	0,88%	15,59%
Gas Natural	10,30	14,70%	
Residuos	0,000	0,00%	
Geotérmica	0,00	0,00%	84,41%
Biomasa	5,13	7,32%	
Hidráulica	41,78	59,63%	
Eólica (Onshore)	9,34	13,33%	
Solar FV	2,89	4,12%	
Total	70,06	100%	

Tabla 8: Mix energético Austria 2030 (WEM)

De acuerdo con este escenario, se prevé que la demanda aumente en 10 TWh con respecto el 2019. Este incremento se va a ver cubierto por las tecnologías predominantes en 2019, es decir, hidráulica, gas natural y eólica y un incremento de la generación con biomasa. Esto conlleva que el mix no presente grandes cambios en cuanto a tecnologías predominantes de generación ya que, se mantiene el visto en 2019.

Una vez analizado el escenario WEM, se muestra el mix energético que resulta del escenario WAM [43]:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	0,62	0,69%	12,23%
Gas Natural	10,30	11,54%	
Residuos	0,000	0,00%	
Geotérmica	0,00	0,00%	87,77%
Biomasa	5,56	6,23%	
Hidráulica	44,44	49,79%	
Eólica (Onshore)	16,67	18,68%	
Solar FV	11,67	13,07%	
Total	89,26	100%	

Tabla 9: Mix energético Austria 2030 (WAM)

Como se puede observar, en este caso la demanda aumenta en 30 TWh que se ven cubiertos por tecnologías renovables. Se ve cómo, en este escenario el incremento de la generación solar fotovoltaica es de 10 TWh situándose como la tercera tecnología de generación, por detrás de la hidráulica y la eólica, que también aumentan su producción en torno a 9 – 10 TWh con respecto la situación actual. Además, en este escenario el incremento de generación con biomasa es similar al del escenario WEM, al igual que la generación con gas natural que se mantiene más o menos constante en los tres escenarios estudiados.

6.6. Grecia

Con una superficie de 131.000 km² es el segundo país más grande de los estudiados hasta el momento, sin embargo, la demanda de este país es la menor de todas. Además, debido a la cantidad de islas la conectividad entre la península y todas ellas es un punto clave para Grecia.

El mix de generación del año 2019 es el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Lignito)	8,12	15,51%	66,17%
Petróleo	3,56	6,80%	
Gas Natural	22,96	43,86%	
Biomasa	0,43	0,82%	33,83%
Hidráulica	5,45	10,41%	
Eólica (Onshore)	7,28	13,91%	
Solar FV	4,55	8,69%	
Total	52,35	100%	

Tabla 10: Mix energético Grecia 2019

Grecia es un país fuertemente dependiente de la generación convencional ya que, el 65% es con estas tecnologías, mientras que el 35% es con fuentes renovables. En cuanto a tecnologías de generación, el gas natural es la que más presencia tiene (43,8%) seguida del carbón (15,51%). Por otro lado, la generación renovable principal es la eólica (13,91%), sin embargo, este grupo está más distribuido que el de la generación convencional.

Para el 2030, Grecia propone dos escenarios que son prácticamente iguales, siendo la única diferencia es un aumento de 2MW de generación con biomasa, por lo que únicamente se analizará uno de ellos denominado *Objectives Achievement Scenario*. En dicho escenario se propone que la potencia total de las fuentes de generación renovable aumente de 10 GW a 19 GW. Este incremento se debe realizar principalmente en las tecnologías solar fotovoltaica y eólica que incrementan su potencia instalada en 3,7 GW y 3 GW, respectivamente. Otras tecnologías como la hidráulica o la biomasa también incrementan la potencia instalada, pero en mucha menor medida, 0,5GW y 0,2 GW, respectivamente. Por último, cabe destacar que la energía termosolar se introduce en el mix de generación griego ya que se introducen 0,1GW de esta tecnología. Igualmente ocurre con la geotérmica que se introducen 0,6GW de potencia al mix.

El mix resultante para el año 2030 se muestra en la Tabla 10. Para este año se observa una situación completamente opuesta a la del 2019, donde la generación renovable se sitúa en torno al 65% y la convencional en torno al 35%. Sin embargo, el gas natural sigue siendo la tecnología de generación predominante con un 31,95%. Se puede ver el importante incremento de generación eólica alcanzando los 17 TWh de generación, además, la energía solar fotovoltaica también incrementa su producción llegando a los 11 TWh de generación, en ambos casos se produce más del doble que en el 2019. Por último, cabe destacar que el carbón desaparece del mix de generación.

Así pues, el mix estimado para el año 2030 es el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Lignito)	0,00	0,00%	33,40%
Petróleo	0,83	1,45%	
Gas Natural	18,30	31,95%	
Geotérmica	0,63	1,10%	66,60%
Biomasa	1,58	2,76%	
Hidráulica	6,60	11,52%	
Eólica (Onshore)	17,21	30,05%	
Solar FV	11,82	20,64%	
Termosolar	0,30	0,52%	
Total	57,27	100%	

Tabla 11: Mix energético Grecia 2030

6.7. Portugal

Portugal cuenta con una superficie de 92.100 km², situándose en la posición 20 del ranking por tamaño de países de la Unión Europea [37]. Portugal no tiene una localización geográfica favorable ya que únicamente está interconectada con España, sin embargo, presenta una gran cantidad de recurso eólico y solar.

En la siguiente tabla se muestra el mix energético de Portugal en el año 2019:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	5,14	10,62%	43,49%
Gas Natural	15,91	32,87%	
Biomasa	2,71	5,60%	56,51%
Hidráulica	9,87	20,39%	
Eólica (Onshore)	13,47	27,83%	
Solar FV	0,58	1,19%	
Solar Autoconsumo	0,72	1,49%	
Total	48,40	100%	

Tabla 12: Mix energético Portugal 2019

Como se puede observar, la mayor parte de la generación se realiza por medio de tres tecnologías, gas natural, eólica e hidráulica, siendo la participación de 32,87%, 27,83% y 20,39%, respectivamente. Al igual que hemos visto en otros países anteriormente, Portugal es dependiente del gas natural en gran medida ya que es la tecnología de generación principal. Por otro lado, el carbón representa una parte importante del mix superando los 5 TWh de generación. Por último, Portugal indica en el PNIEC la porción de generación solar fotovoltaica que corresponde al autoconsumo, es por ello por lo que se separan en dos líneas en la Tabla 11. Además, cabe destacar como el autoconsumo es superior a la generación fotovoltaica de gran escala a fecha de realización del informe.

Para el 2030, tal y como se indica en el PNIEC se prevé una gran cantidad de potencia solar y eólica instalada entre el periodo 2020 – 2030. En el caso de la energía solar, en el año 2030 habría 10 GW de potencia instalado, cuatriplicando la potencia. Por otro lado, la potencia eólica se incrementaría en 5 GW alcanzando los 9GW de potencia total instalada, entre onshore y offshore. Por último, cabe destacar que se introduce la tecnología termosolar al mix de generación.

De acuerdo con las medidas propuestas por Portugal en el escenario *With Existing Measures*, la generación renovable cubrirá más del 75% de la demanda, pese al incremento en 20 TWh de la misma. Principalmente la tecnología eólica con 10 TWh más de producción, pero también la solar y la hidráulica son las centrales que cubren la mayor parte de esta demanda. Cabe destacar como la tecnología solar fotovoltaica (a gran escala) aumenta notablemente pasando de una generación inferior a 1 GWh a más de 13 GWh, sin contar el autoconsumo.

Este elevado desarrollo de las tecnologías renovables permite a Portugal reducir la generación con fuentes convencionales. En primer lugar, el carbón se desmantela dado que es la tecnología más contaminante y ha sido sustituida con generación renovable.

Por otro lado, el gas natural disminuye a una producción de menos de la mitad en comparación con la registrada en 2019, teniendo una participación de inferior al 10% en la generación anual.

Así pues, el mix propuesto por el gobierno portugués [44], denominado *With Existing Measures*, en el PNIEC para el año 2030 queda de la siguiente manera:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón (Antracita)	0,00	0,00%	9,43%
Gas Natural	6,34	9,43%	
Biomasa	2,91	4,33%	90,57%
Hidráulica	14,52	21,59%	
Eólica (Onshore)	23,21	34,52%	
Eólica (Offshore)	1,20	1,78%	
Solar FV	14,35	21,34%	
Solar Autoconsumo	4,10	6,10%	
Termosolar	0,61	0,91%	
Total	67,24	100%	

Tabla 13: Mix energético Portugal 2030

6.8. México

Una vez analizados los países europeos de estudio, se va a analizar dos países latinoamericanos, el primero de ellos es México. Cuenta con una superficie de 1.970.000 km² y una demanda de más de 300 TWh, sin embargo, en los últimos años la demanda de México está aumentando mucho debido a la producción industrial [45]. El mix energético que satisface esta demanda es el siguiente: [46]

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	26,30	7,88%	83,29%
Petróleo	34,80	10,43%	
Gas Natural	205,60	61,60%	
Nuclear	11,30	3,39%	
Geotérmica	5,33	1,60%	16,71%
Biomasa	2,76	0,83%	
Hidráulica	23,60	7,07%	
Eólica (Onshore)	16,70	5,00%	
Solar FV	7,37	2,21%	
Total	333,76	100%	

Tabla 14: Mix energético México 2019

Como se puede observar, la mayor parte de energía proviene del gas natural, superando el 60%, seguida del petróleo y del carbón. Se puede ver como México presenta un mix fuertemente dependiente de recursos fósiles. Además, pese al elevado potencial solar que presenta [47], la generación solar no supone más del 2,21% de la demanda total.

Fuera de la Unión Europea, las políticas son distintas, en este caso no existe la obligación de realizar un PNIEC para el año 2030, sin embargo, IRENA ha realizado un roadmap con dos posibles escenarios: [48]

- *Reference Case 2030*
- REmap 2030

Ambos presentan hojas de ruta para seguir, sin embargo, el segundo presenta políticas mucho más agresivas que el *Reference Case 2030*. En primer lugar, se analizará el primer escenario:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	54,00	8,98%	80,67%
Petróleo	5,00	0,83%	
Gas Natural	400,00	66,53%	
Nuclear	26,00	4,32%	
Geotérmica	9,40	1,56%	19,33%
Biomasa	3,50	0,58%	
Hidráulica	52,00	8,65%	
Eólica (Onshore)	38,40	6,39%	
Solar FV	8,10	1,35%	
Solar Autoconsumo	4,80	0,80%	
Total	601,20	100%	

Tabla 15: Mix energético México 2030 - Reference Case

Como se puede observar, la demanda estimada para el año 2030 es casi el doble la registrada en 2019. Este primer escenario sugiere hacer frente a esta crecida principalmente con gas natural, incrementando la potencia instalada en 43 GW, aumentando la dependencia a los combustibles fósiles. En cuanto a las energías renovables, se observa cómo se sigue desaprovechando el potencial solar al no aumentar la potencia instalada de la tecnología solar fotovoltaica en mayor medida (se sugiere 3,5GW de potencia instalada), y por ende no se aumenta la participación de esta tecnología a la hora de cubrir la demanda. El mayor incremento se observa en la generación eólica que alcanza los 38 TWh de generación debido a un incremento de 10 GW de potencia instalada.

Por otro lado, el escenario REmap 2030 propone el siguiente mix energético para 2030:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	18,80	3,15%	53,21%
Petróleo	4,70	0,79%	
Gas Natural	267,90	44,91%	
Nuclear	26,00	4,36%	
Geotérmica	31,50	5,28%	46,79%
Biomasa	15,00	2,51%	
Hidráulica	72,00	12,07%	
Eólica (Onshore)	88,00	14,75%	
Eólica (Offshore)	3,50	0,59%	
Solar FV	44,50	7,46%	
Solar Autoconsumo	21,00	3,52%	
Termosolar	3,60	0,60%	
Total	596,50	100%	

Tabla 16: Mix energético México 2030 – REmap

En este caso, la demanda se prevé que va a ser similar a la estimada en el *Reference Case*. Como se puede ver, el gas natural sigue siendo la tecnología predominante, incrementando en 67 TWh la generación con respecto al año 2019, sin embargo, se observa un amplio desarrollo de las tecnologías solar fotovoltaica y eólica, debido a un incremento de la potencia instalada alcanzando los 18GW y 25,5 GW, respectivamente. Este aumento supone una penetración importante de estas tecnologías en el mix permitiendo no aumentar más la dependencia del combustibles fósiles. Por último, se puede ver cómo se incorporan nuevas tecnologías al mix como la termosolar o la eólica offshore, sin embargo, su presencia es muy baja en comparación con otras tecnologías.

6.9. Chile

El segundo de los países del continente americano que se va a estudiar es Chile. Este país cuenta con una superficie aproximada de 756.000 km², sin embargo, pese a esta gran superficie la demanda no es muy elevada, 83 TWh. Así pues, el mix energético del año 2019 es el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	28,40	33,96%	59,21%
Petróleo	7,00	8,37%	
Gas Natural	14,12	16,88%	
Geotérmica	0,20	0,24%	40,79%
Biomasa	1,80	2,15%	
Hidráulica	20,80	24,87%	
Eólica (Onshore)	4,90	5,86%	
Solar FV	6,42	7,68%	
Total	83,64	100%	

Tabla 17: Mix energético Chile 2019

Al igual que con México, el otro país de continente americano de estudio, Chile presenta una dependencia muy fuerte de los combustibles fósiles, en este caso al carbón y al gas natural. Estas dos tecnologías suponen el 50% de la generación, seguidas por la tecnología hidráulica que supone casi el 25%. Chile, pese a tener mucho recurso solar [47] y eólico [49], no lo aprovecha ya que entre los dos únicamente suponen el 13% de la generación eléctrica.

Al igual que ocurre con México, fuera de la Unión Europea, las políticas son distintas, en este caso no existe la obligación de realizar un PNIEC para el año 2030, sin embargo, E2BIZ investigación, ha realizado un roadmap con dos posibles escenarios para *Generadoras de Chile*: [50]

- Escenario Base
- Ruta hacia la descarbonización

Ambos presentan hojas de ruta para seguir, sin embargo, el segundo presenta políticas mucho más agresivas que el *Escenario Base*. En primer lugar, se analizará el primer escenario:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	21,40	22,20%	28,23%
Petróleo	0,00	0,00%	
Gas Natural	5,81	6,03%	
Geotérmica	0,20	0,21%	71,77%
Biomasa	3,21	3,33%	
Hidráulica	12,87	13,35%	
Eólica (Onshore)	15,78	16,37%	
Solar FV	37,12	38,51%	
Total	96,39	100%	

Tabla 18: Mix energético Chile 2030 – Escenario Base

Pese a que se apagan las centrales de petróleo, sigue existiendo una fuerte dependencia al carbón ya que abarca el 22% de la demanda. Sin embargo, pese a aumentar la demanda en unos 13TWh, se consigue cubrir este incremento con generación renovable. Este escenario propone que la tecnología solar fotovoltaica se alcance como la principal fuente de generación de electricidad con una producción superior a los 37 TWh, por otro lado, la tecnología eólica incrementa su producción en casi 15 TWh siendo la tercera, tras el carbón, tecnología de generación. Por último, algo que sorprende de este escenario propuesto es la disminución de la generación hidráulica en 8TWh, ya que, se trata de una tecnología renovable y es generación suplida por el carbón.

Por otro lado, el escenario *Ruta hacia la descarbonización* propone el siguiente mix energético para el año 2030:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	8,35	8,44%	12,01%
Petróleo	0,00	0,00%	
Gas Natural	3,53	3,57%	
Geotérmica	0,20	0,20%	87,99%
Biomasa	3,21	3,25%	
Hidráulica	12,87	13,02%	
Eólica (Onshore)	25,12	25,40%	
Solar FV	45,60	46,12%	
Total	98,88	100%	

Tabla 19: Mix energético Chile 2030 - Ruta hacia la descarbonización

Este escenario es similar al anterior en varios puntos como el apagón de las centrales de petróleo y el gran desarrollo fotovoltaico propuesto. Sin embargo, en este caso se observa como la generación con carbón disminuye 20TWh en comparación con el 2019. De acuerdo con este escenario, las tecnologías convencionales cubrirían alrededor del 12% de la demanda mientras que el 88% restante se cubriría con tecnología renovable. Esta generación renovable son principalmente las tecnologías solar fotovoltaica y eólica que, cubren el 46% y 25%, respectivamente.

6.10. Sudáfrica

El último bloque de países a analizar corresponde a países africanos. En primer lugar, se va a estudiar Sudáfrica. La superficie total de Sudáfrica es de 1.221.000 km², no obstante, debido a la pobreza y al poco desarrollo del país, la demanda es similar a la de Italia. En el año 2019, el mix energético que satisfizo la demanda fue el siguiente:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	218,20	88,45%	94,73%
Gas Natural	1,90	0,77%	
Nuclear	13,60	5,51%	
Biomasa	0,40	0,16%	5,27%
Hidráulica	5,60	2,27%	
Eólica	0,30	0,12%	
Solar FV	5,20	2,11%	
Termosolar	1,50	0,61%	
Total	246,70	100%	

Tabla 20: Mix energético Sudáfrica 2019

Como muchos países subdesarrollados, Sudáfrica, pese a tener un enorme potencial y recurso renovable, no es capaz de aprovecharlo. Tal y como se observa en la Tabla 19, casi el 90% de su generación se realiza con centrales térmicas de carbón, las más antiguas y contaminantes. Cabe destacar como las tecnologías renovables no llegan a cubrir ni el 10% del total de la demanda.

Tal y como ocurría en México, fuera de la Unión Europea, no existe la obligación de realizar un PNIEC para el año 2030, sin embargo, IRENA ha realizado un roadmap con dos posibles escenarios: [51]

- Reference Case 2030
- REmap 2030

Ambos presentan hojas de ruta para seguir, sin embargo, el segundo presenta políticas mucho más agresivas que el *Reference Case 2030*. En primer lugar, se analizará el primer escenario:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	202,35	56,84%	62,82%
Gas Natural	7,10	1,99%	
Nuclear	14,20	3,99%	
Biomasa	1,35	0,38%	37,18%
Hidráulica	31,95	8,97%	
Eólica	39,05	10,97%	
Solar FV	56,80	15,96%	
Termosolar	3,20	0,90%	
Total	356,00	100%	

Tabla 21: Mix energético Sudáfrica 2030 - Reference Case

En este primer escenario, se observa como la demanda crece en 110TWh, sin embargo, esta diferencia con respecto al año 2019 se cubre con tecnología renovable principalmente. Se puede ver como la generación con carbón disminuye ligeramente, sin embargo, los puntos más importantes en este escenario es el elevado desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica, aumentando en más de 50 TWh la producción, el incremento de generación eólica, alcanzando los 39TWh de generación, y la tecnología hidráulica, superando los 30TWh. No obstante, de acuerdo con este escenario, el gas natural aumenta también ligeramente para poder hacer frente al incremento en la demanda y la disminución de la generación con carbón.

Por otro lado, el escenario REmap 2030 propone el siguiente mix energético para 2030:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Carbón	168,36	45,22%	51,12%
Gas Natural	7,32	1,97%	
Nuclear	14,64	3,93%	
Biomasa	15,64	4,20%	48,88%
Hidráulica	25,62	6,88%	
Eólica	76,86	20,64%	
Solar FV	58,56	15,73%	
Termosolar	5,32	1,43%	
Total	372,32	100%	

Tabla 22: Mix energético Sudáfrica 2030 - REmap Case

Este segundo escenario propuesto por IRENA es similar al anterior, pero de manera mucho más agresiva, de manera que el carbón disminuye la generación en 50TWh. En este caso, no es la tecnología solar fotovoltaica la principal tecnología de generación renovable, sino que es la eólica. La generación eólica casi se duplica con respecto al *Reference Case* llegando a los 76,8TWh, por otro lado, la tecnología solar fotovoltaica mantiene el mismo valor de generación que en el escenario anterior mientras que la hidráulica disminuye en 5TWh, no obstante, los valores propuestos son muy superiores a los registrados en el año 2019. Cabe destacar que en este escenario la biomasa aumenta notablemente, superando los 15TWh de generación, sin embargo, aún se mantiene lejos de otras tecnologías como la solar o la eólica.

6.11. Egipto

Egipto es el segundo y último país africano de estudio. Cuenta con una superficie 1.002.000 km², de nuevo, al igual que se observó con Sudáfrica, debido al bajo desarrollo del país, la demanda eléctrica anual es muy inferior que la de un país europeo mucho más pequeño, como Italia. En el caso de Egipto, la demanda es de 198TWh, generados por el siguiente mix:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Petróleo	27,40	13,77%	90,94%
Gas Natural	153,50	77,17%	
Biomasa	0,32	0,16%	9,06%
Hidráulica	13,20	6,64%	
Eólica	3,01	1,51%	
Solar FV	0,76	0,38%	
Termosolar	0,73	0,37%	
Total	198,92	100%	

Tabla 23: Mix energético Egipto 2019

Egipto, pese a contar con un elevado potencial renovable, especialmente solar, basa su generación en el gas natural y el petróleo. Entre estas dos tecnologías abarcan el 90% de la generación anual, convirtiendo a Egipto en un país muy dependiente de los combustibles fósiles. Por otro lado, analizando la generación con tecnologías renovables, se observan unos resultados muy pobres, sobre todo en las tecnologías solar fotovoltaica y termosolar.

Al igual que con Sudáfrica, Egipto no ha desarrollado un PNIEC, sin embargo, IRENA ha realizado un roadmap con dos posibles escenarios para el año 2030: [51]

- *Reference Case 2030*
- REmap 2030

Ambos presentan hojas de ruta para seguir, sin embargo, el segundo presenta políticas mucho más agresivas que el *Reference Case 2030*. En primer lugar, se analizará el primer escenario:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Petróleo	43,47	11,28%	74,48%
Gas Natural	243,53	63,20%	
Biomasa	0,32	0,08%	25,52%
Hidráulica	14,00	3,63%	
Eólica	55,00	14,27%	
Solar FV	14,00	3,63%	
Termosolar	15,00	3,89%	
Total	385,32	100%	

Tabla 24: Mix energético Egipto 2030 - Reference Case

En este primer escenario, se puede ver como la demanda eléctrica prácticamente se duplica. Este incremento se aporta con tres tecnologías, principalmente, petróleo, gas natural y eólica. Sin embargo, se observa un desarrollo en las tecnologías solares llegando a aportar casi 30TWh. En este escenario, las tecnologías convencionales siguen siendo las principales fuentes de generación, pese a que su participación se haya disminuido con respecto al 2019.

Por otro lado, el escenario REmap 2030 propone el siguiente mix energético para 2030:

Tecnología	Producción (TWh)	%	
Petróleo	24,54	7,05%	46,55%
Gas Natural	137,46	39,50%	
Biomasa	5,00	1,44%	53,45%
Hidráulica	14,00	4,02%	
Eólica	64,00	18,39%	
Solar FV	74,00	21,26%	
Termosolar	29,00	8,33%	
Total	348,00	100%	

Tabla 25: Mix energético Egipto 2030 - REmap Case

En este escenario se observa un fuerte desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica, alcanzando los 74 TWh de generación. Siendo la demanda alrededor de 150TWh superior a la registrada en 2019, se consigue que las tecnologías convencionales reduzcan en casi el 50% su participación. Sin embargo, Egipto seguiría siendo fuertemente dependiente del gas natural al ser su principal fuente de generación.

Al igual que en el escenario *Reference Case 2030*, la tecnología eólica incrementa mucho su producción (gracias al desarrollo de nuevas instalaciones), alcanzando los 64 TWh anuales. Por otro lado, la biomasa, pese a incrementar su generación hasta los 5TWh no se sitúa como una tecnología referente del mix ya que, se encuentra lejos de otras tecnologías renovables. Por último, en este escenario, la tecnología hidráulica se sitúa en valores de generación eléctrica muy similares a los observados en el año 2019.

7. Evaluación de impactos ambientales

Una vez analizados todos los mixes energéticos propuestos por los diferentes países, mediante el software SimaPro, se van a evaluar los impactos ambientales de los diferentes escenarios para las categorías de impacto propuestas en el apartado **5.5.1. Categorías de impacto medioambientales**.

En primer lugar, se estudiará cual es el impacto generado por cada una de las tecnologías analizadas, de manera que servirá de justificación para los resultados obtenidos en el momento de analizar el impacto de cada mix.

En segundo lugar, se analizará el impacto propuesto por cada uno de los países, realizando una comparativa con el mix actual analizando los avances o retrocesos en las diferentes categorías de impacto.

Por último, en los dos primeros apartados los resultados mostrados estarán referenciados a la unidad funcional, sin embargo, el impacto global de cada uno de los mixes no es igual debido a la diferencia de tamaños entre ellos y las diferencias de demandas. Es por ello que en este último apartado se analizará el impacto global de cada uno de los mixes.

7.1. Impacto por tecnología

En el presente apartado se muestra un análisis de los impactos de cada una de las tecnologías, en la generación de 1 kWh en baja tensión. En la tabla mostrada a continuación, se incluye una última línea indicando la tecnología con mayor y menor impacto, de manera que se facilite la lectura y comprensión. Además, se recomienda acudir al **Anexo 1**, donde se muestran, de una manera más visual, por medio de gráficas los resultados de cada una de las tecnologías. Así pues, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tecnología	Agotamiento Abiótico	Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	Calentamiento Global	Destrucción de la Capa de Ozono	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad Agua Dulce	Ecotoxicidad Agua Marina	Ecotoxicidad Terrestre	Oxidación Fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
	kg Sb eq/kWh	MJ/kWh	kg CO2 eq/kWh	g CFC-11 eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg C2H4 eq/kWh	kg SO2 eq/kWh	kg PO4eq/kWh
Antracita	3,24E-06	1,51E+01	1,18E+00	6,89E-09	7,55E-01	9,20E-01	2,98E+03	6,17E-03	4,63E-04	9,11E-03	2,25E-03
Antracita CoG	3,23E-06	1,14E+01	1,26E+00	5,14E-09	7,74E-01	7,65E-01	3,05E+03	4,06E-03	3,25E-04	8,83E-03	2,12E-03
Biogás	3,57E-06	1,09E+00	2,59E-01	3,51E-09	1,54E-01	2,67E-01	2,44E+02	3,10E-03	2,31E-04	1,44E-03	3,65E-04
Biomasa	3,15E-06	7,00E-01	7,90E-02	1,73E-08	1,63E-01	2,35E-01	1,35E+02	3,54E-03	8,25E-05	1,43E-03	5,27E-04
Eólica M (1 - 3MW)	3,99E-06	1,97E-01	3,51E-02	9,79E-10	1,67E-01	2,61E-01	1,48E+02	2,97E-03	5,53E-06	1,01E-04	7,95E-05
Eólica T (< 1MW)	4,59E-06	3,27E-01	4,60E-02	1,48E-09	2,28E-01	3,57E-01	2,01E+02	3,03E-03	9,08E-06	1,50E-04	1,07E-04
Eólica T (> 3MW)	1,48E-05	5,57E-01	6,87E-02	3,26E-09	4,74E-01	1,06E+00	5,46E+02	3,11E-03	1,72E-05	2,97E-04	2,40E-04
Eólica T (1 - 3MW)	4,50E-06	3,72E-01	4,74E-02	2,19E-09	1,80E-01	3,38E-01	1,94E+02	3,00E-03	9,48E-06	1,55E-04	1,12E-04
Gas Natural CC	3,07E-06	6,08E+00	4,06E-01	2,68E-08	1,30E-01	2,31E-01	1,56E+02	2,93E-03	2,72E-05	3,48E-04	9,47E-05
Gas Natural CoG CC	3,25E-06	9,24E+00	5,97E-01	4,05E-08	1,59E-01	2,45E-01	1,79E+02	2,99E-03	7,22E-05	8,87E-04	1,62E-04
Gas Natural CoG Conv	3,96E-06	1,11E+01	7,02E-01	1,90E-08	1,93E-01	2,77E-01	2,42E+02	3,03E-03	7,13E-05	8,93E-04	2,00E-04
Gas Natural Conv.	3,63E-06	1,11E+01	6,44E-01	3,27E-08	1,21E-01	2,37E-01	1,38E+02	2,96E-03	5,14E-05	3,67E-04	1,45E-04
Geoterminia	3,13E-06	7,74E-01	8,94E-02	2,56E-09	1,47E-01	2,64E-01	2,30E+02	3,30E-03	1,79E-05	3,33E-04	1,86E-04
Hidro - Bombeo	3,46E-06	2,03E+01	1,65E+00	9,81E-09	9,96E-01	1,17E+00	3,96E+03	7,25E-03	6,18E-04	1,86E-02	4,60E-03
Hidro - fluyente	2,98E-06	7,26E-02	2,42E-02	5,12E-10	9,67E-02	2,16E-01	1,07E+02	2,89E-03	2,33E-06	5,13E-05	5,38E-05
Hidro - reserva alpina	2,99E-06	8,40E-02	2,67E-02	5,84E-10	1,00E-01	2,17E-01	1,08E+02	2,90E-03	2,54E-06	5,63E-05	5,56E-05
Hidro - reserva no alp	2,99E-06	8,39E-02	7,30E-02	5,84E-10	1,00E-01	2,17E-01	1,08E+02	2,90E-03	3,73E-06	5,63E-05	5,56E-05
Lignito	3,34E-06	1,19E+01	1,37E+00	3,91E-09	1,30E+00	2,08E+00	5,09E+03	5,49E-03	3,12E-04	8,69E-03	1,03E-02
Lignito CoG	3,35E-06	1,20E+01	1,39E+00	3,80E-09	1,20E+00	1,88E+00	4,69E+03	5,37E-03	3,05E-04	8,41E-03	9,02E-03
Nuclear BWR	3,17E-06	1,28E-01	2,78E-02	1,01E-09	1,57E-01	2,34E-01	1,40E+02	2,97E-03	3,71E-06	8,28E-05	9,03E-05
Nuclear PWR	3,16E-06	1,20E-01	2,69E-02	8,24E-10	1,53E-01	2,33E-01	1,37E+02	2,97E-03	3,60E-06	8,15E-05	8,73E-05
Petróleo	3,69E-06	1,31E+01	1,28E+00	1,35E-07	4,14E-01	3,87E-01	5,19E+02	3,74E-03	3,52E-04	1,02E-02	1,18E-03
Petróleo CoG	3,24E-06	1,11E+01	9,23E-01	1,40E-07	2,90E-01	2,59E-01	2,31E+02	3,53E-03	2,84E-04	7,93E-03	5,55E-04
Residuos	2,96E-06	3,49E-02	2,00E-02	2,37E-10	9,21E-02	2,13E-01	1,02E+02	1,88E-03	1,53E-06	3,52E-05	4,82E-05
Solar Autoc.	1,42E-05	1,13E+00	1,16E-01	1,08E-08	3,87E-01	6,03E-01	5,14E+02	3,10E-03	2,87E-05	5,26E-04	3,09E-04
Solar PFV	7,71E-06	9,33E-01	1,00E-01	8,80E-09	2,27E-01	3,75E-01	3,41E+02	3,06E-03	2,22E-05	4,24E-04	2,23E-04
Termosolar	3,34E-06	6,32E-01	6,48E-02	3,40E-09	1,30E-01	2,53E-01	1,48E+02	2,98E-03	1,19E-05	1,90E-04	8,29E-05
Máx.	Eólica T (> 3MW)	Hidro - Bombeo	Hidro - Bombeo	Petróleo CoG	Lignito	Lignito	Lignito	Hidro - Bombeo	Hidro - Bombeo	Hidro - Bombeo	Lignito
Mín	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos	Residuos

Tabla 26: Impactos ambientales por tecnología para 1kWh en baja tensión

En cuanto al agotamiento abiótico, se observa como la tecnología que mayor impacto presenta es la eólica de potencia superior a 3MW, con un resultado muy superior al resto de potencias eólicas. En segundo lugar, se encuentra la tecnología solar, particularmente el autoconsumo. Esto se debe a que para la fabricación de los módulos se requiere una gran cantidad de silicio. Además, hoy en día independientemente del tipo de instalación los módulos son bifaciales debido a que el coste de producción es menor que hacerlos monofaciales. Las tecnologías que menor impacto presentan son la generación por medio de residuos y la hidráulica en cualquiera de sus modalidades.

En lo referente al agotamiento abiótico de combustibles fósiles, la tecnología hidráulica con bombeo es la que mayor impacto presenta debido a la operativa en modo bombeo. Por otro lado, como era de esperar, las tecnologías convencionales son las que mayor impacto presentan, distando mucho del resto de tecnologías. Especialmente la antracita y el petróleo son las que mayor impacto presentan tras el bombeo. De nuevo la tecnología hidráulica fluyente, presenta junto a la generación por residuos el menor impacto.

Tal y como era de esperar, las centrales de carbón presentan un gran impacto sobre el calentamiento global, debido a sus emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. El petróleo, es la tecnología que, después de las centrales de carbón, mayor impacto presenta sobre esta categoría. Es por esta razón que son las primeras centrales que los países tratan de desmantelar. No obstante, una vez más, debido a la operación en modo bombeo, la tecnología hidráulica de bombeo presenta el mayor impacto. En cuanto a las que menor impacto tienen, la hidráulica fluyente vuelve a ser la que menor impacto presenta, en el caso de la tecnología hidráulica de bombeo se observan un impacto muy superior al resto de tecnologías, en especial las hidráulicas. La razón de estos resultados se debe a que en los periodos de bombeo, donde estas centrales consumen electricidad, SimaPro supone que se hace a través de tecnologías fósiles ya que el bombeo se realiza en horas nocturnas cuando la generación renovable es más baja⁵, de ahí estos resultados. Cabe destacar que las tecnologías nucleares presentan un impacto muy bajo en esta categoría, dado que, sus emisiones en las torres de refrigeración son de vapor de agua. Es necesario resaltar que este trabajo no tiene en cuenta los riesgos de accidente nuclear o ataque a la central, hechos que si que presentarían unos impactos muy grandes. La siguiente grafica muestra, de una manera más visual, el impacto de las diferentes tecnologías:

⁵ La razón por la que se bombea en horas nocturnas se debe a que el precio de la electricidad es más bajo que en horas diurnas, por lo que se consigue un beneficio económico almacenando de noche y produciendo de día.

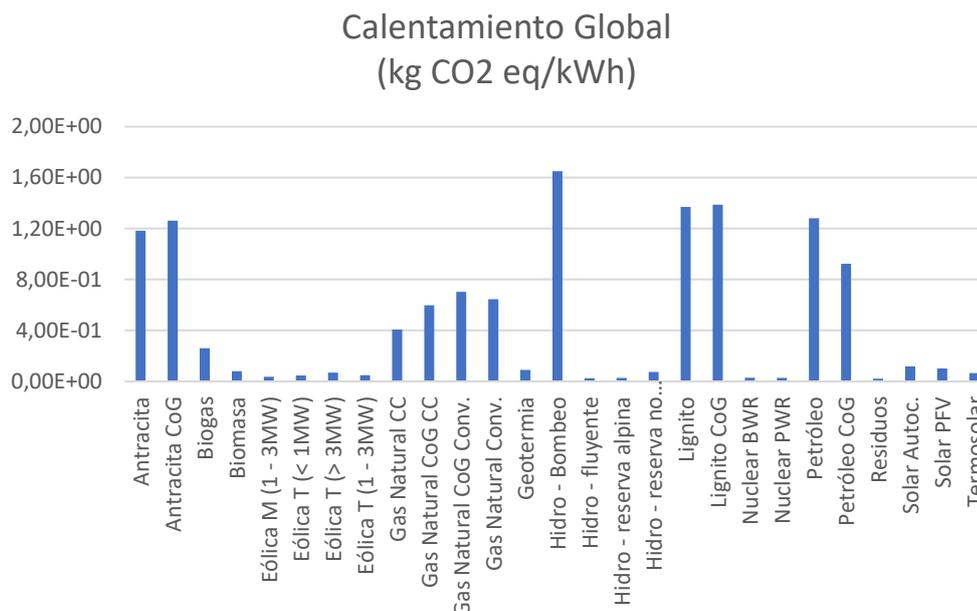


Figura 8: Calentamiento global por tecnología en la generación de 1 kWh en baja tensión en 2019

En la destrucción de la capa de ozono, las tecnologías de petróleo son las más perjudiciales junto con las centrales de gas natural. Las tecnologías renovables, especialmente la hidráulica son las que menor impacto presentan.

Las tecnologías que mayor impacto presentan frente a la toxicidad humana son las centrales de carbón, especialmente las de lignito, debido a sus emisiones durante la operación ya que presenta una menor cantidad de carbono, en comparación con la antracita, por lo tanto, es necesaria una mayor cantidad de materia prima para la obtención de 1kWh. De nuevo, la tecnología hidráulica con bombeo se sitúa entre las más nocivas. La hidráulica fluyente es la que mejores resultados presenta frente a esta categoría, seguida por las centrales de ciclo combinado.

En la ecotoxicidad marina y de agua dulce los resultados son muy similares, las tecnologías que presentan un mayor impacto, de nuevo son las centrales de lignito y antracita, así como la hidráulica de bombeo. En la ecotoxicidad de agua dulce cabe destacar que la eólica de gran potencia también resulta bastante nociva. En cuanto a las tecnologías que menor impacto presentan son la hidráulica, especialmente la fluyente, y los ciclos combinados junto con la generación con residuos.

La tecnología hidráulica de bombeo y la generación con antracita son las tecnologías más nocivas en lo que a ecotoxicidad terrestre se refiere. Una vez más, la generación con residuos presenta los menores impactos. Destacar que, en esta categoría de impacto, el resto de las tecnologías presentan un impacto muy similar.

En cuanto a la oxidación fotoquímica y acidificación, son las centrales térmicas, las que peores resultados ofrecen, por el contrario, la tecnología hidráulica presenta el menor impacto frente a esta categoría, a excepción de la tecnología con bombeo que presenta unos impactos elevados. Las centrales nucleares también presentan buenos resultados frente a estas categorías de impacto.

Por último, tras analizar la eutrofización, el lignito es con diferencia la tecnología más perjudicial. La antracita, aunque en mucho menor medida también presenta unos resultados muy diferenciados con las otras tecnologías. Las centrales hidráulicas y las turbinas eólicas son las que mejores resultados arrojan para esta categoría de impacto.

7.2. Impacto por país

Una vez analizado el impacto de cada una de las tecnologías sobre las categorías de impacto, se va a analizar el impacto de los mixes energéticos de los diferentes países. En primer lugar, se realizará una comparativa del año 2019, para poder ver qué país presenta el mejor y peor mix, posteriormente se analizará cada uno de los escenarios propuestos para 2030 y por último se compararán todos los escenarios para determinar que país es el que mejor mix presentará en base a la categoría de impacto de *Calentamiento Global*.

7.2.1. Impactos año 2019

Como se ha podido observar en el **apartado 6 *Inventario del ACV***, en el año 2019 los mixes energéticos de los países presentaban grandes diferencias entre ellos. En la siguiente tabla se muestra una comparativa de los impactos, de los diferentes países para el año 2019:

Categoría de impacto	Italia	Rep. Checa	Austria	Grecia	Portugal
Agotamiento Abiótico	3,52E-06	3,46E-06	3,26E-06	3,91E-06	3,44E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	5,48E+00	7,88E+00	2,14E+00	7,37E+00	6,03E+00
Calentamiento Global	4,18E-01	9,42E-01	1,53E-01	5,25E-01	4,95E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	5,06E-08	2,15E-08	2,34E-08	8,32E-08	2,37E-08
Toxicidad Humana	1,69E-01	5,92E-01	1,26E-01	3,77E-01	2,21E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	2,89E-01	1,02E+00	2,54E-01	6,23E-01	3,38E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	3,77E+02	2,16E+03	2,02E+02	1,20E+03	7,72E+02
Ecotoxicidad Terrestre	3,05E-03	3,66E-03	2,93E-03	3,44E-03	3,35E-03
Oxidación Fotoquímica	7,73E-05	1,24E-04	1,90E-05	9,84E-05	1,19E-04
Acidificación	1,59E-03	3,29E-03	3,24E-04	2,18E-03	3,20E-03
Eutrofización	4,36E-04	5,01E-03	2,17E-04	2,28E-03	7,65E-04

Tabla 27: Impactos medioambientales de los diferentes países en el año 2019 para 1kWh en baja tensión (1/2)

Categoría de impacto	México	Chile	Sudáfrica	Egipto
Agotamiento Abiótico	3,32E-06	3,79E-06	3,26E-06	3,13E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	6,47E+00	6,48E+00	1,38E+01	7,78E+00
Calentamiento Global	4,74E-01	5,43E-01	1,08E+00	4,99E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	2,56E-08	2,63E-08	6,41E-09	3,66E-08
Toxicidad Humana	1,97E-01	3,26E-01	7,00E-01	1,30E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	3,23E-01	4,50E-01	8,59E-01	2,29E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	4,25E+02	9,72E+02	2,72E+03	1,35E+02
Ecotoxicidad Terrestre	3,10E-03	3,31E-03	5,88E-03	3,01E-03
Oxidación Fotoquímica	5,75E-05	1,16E-04	4,21E-04	6,77E-05
Acidificación	1,26E-03	3,73E-03	1,27E-02	1,26E-03
Eutrofización	6,02E-04	1,36E-03	3,13E-03	1,64E-04

Tabla 28: Impactos medioambientales de los diferentes países en el año 2019 para 1kWh en baja tensión (2/2)

En lo referente al agotamiento abiótico, todos los mixes muestran valores similares, no obstante, Grecia destaca como el país que mayor impacto presenta debido a que las tecnologías solar fotovoltaica y eólica muestran una participación mayor en comparación con otros países. Por el otro lado, los debido al poco desarrollo fotovoltaico, México y Egipto son los países que menor impacto presentan. Si hablamos del agotamiento abiótico de combustibles fósiles, los países africanos destacan sobre el resto de los países en cuanto al mixes de mayor impacto, sin embargo, Grecia debido a que el gas natural supone el 40% de su generación también muestra un impacto notable, al igual que en el caso de la Republica Checa debido a la importante participación del lignito en el mix.

Como ya se ha comentado anteriormente, las centrales térmicas son las que mayor impacto tienen sobre el calentamiento global, es por ello que los mixes de Sudáfrica, y Republica Checa presentan los peores resultados para esta categoría de impacto. Por otro lado, Austria e Italia, con una notable generación renovable son los mixes que menor impacto presentan. En la siguiente grafica se muestran los resultados obtenidos:

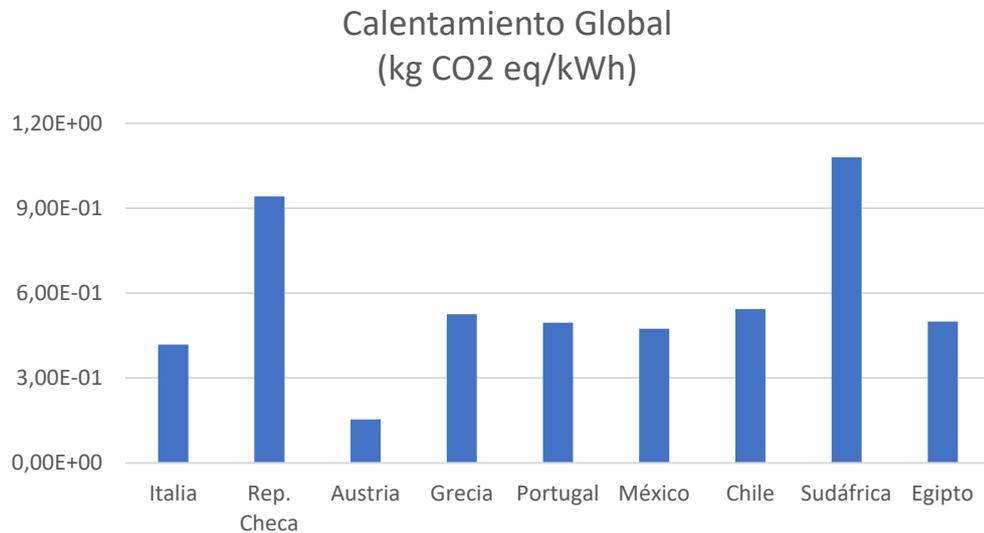


Figura 9: Potencial de Calentamiento global por mix energético en 2019

En cuanto a la destrucción de la capa de ozono, son Grecia, México y Egipto los que peores resultados muestran debido a la importancia del gas natural y del petróleo en sus mixes. Sudáfrica y la Republica Checa son los países que mejores resultados muestran debido a que la tecnología predominante es el carbón.

Los resultados observados en la toxicidad humana, ecotoxicidad marina y de agua dulce son muy similares destacando los mixes de generación de Sudáfrica y Republica checa sobre el resto debido a la importante presencia del carbón tanto lignito como antracita. En este caso, Austria y Egipto presentan los mejores resultados debido a la poca presencia de estas tecnologías.

En lo referente a la ecotoxicidad terrestre, todos los mixes presentan unos resultados muy similares, sin embargo, Sudáfrica destaca negativamente al ser el país con mayor impacto en comparación con el resto.

En la oxidación fotoquímica y acidificación se observan resultados muy similares, despuntando, una vez más el mix sudafricano sobre el resto. Cabe recordar que en este mix el carbón supone más del 88% de la generación, siendo esta la tecnología con mayor impacto sobre estas dos categorías de impacto. Por el otro lado, Austria presenta el menor impacto en esta categoría debido a la poca presencia del carbón, suplida con gas natural y generación hidráulica.

Por último, cabe recordar que el lignito es la tecnología, con mucha diferencia que mayor impacto presenta sobre la eutrofización debido a los gases emitidos durante la generación, es por ello que los países como Grecia o Republica Checa en cuyo mix el lignito se encuentra muy presente, son los países que mayor impacto presentan. La

antracita, es la tecnología que mayor impacto presenta tras el lignito, en definitiva, el carbón, es por ello que Sudáfrica también presenta unos resultados muy pobres en esta categoría. Por otro lado, Austria, Egipto e Italia son los países que menor impacto presentan.

Se recomienda acudir al **Anexo 2**, donde se muestran graficas con el impacto de cada uno de los países según la categoría de impacto.

7.2.2. Impactos escenarios 2030

En el presente apartado se analizarán los escenarios propuestos por los diferentes países para el año 2030. Además, se realizará una comparación con observando las variaciones en las categorías de impacto con respecto al escenario de 2019. Por último, se realizará una comparación de todos los escenarios determinando el mejor y el peor en relación al potencial de *Calentamiento Global*.

I. Italia

En el caso de Italia, únicamente se propone un escenario para el año 2030. Con un elevado desarrollo en las tecnologías solar fotovoltaica y eólica los resultados son los siguientes:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,52E-06	4,10E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	5,48E+00	4,59E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	4,18E-01	3,53E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	5,06E-08	4,25E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	1,69E-01	1,73E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	2,89E-01	2,95E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	3,77E+02	3,61E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,05E-03	2,91E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	7,73E-05	6,63E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	1,59E-03	1,36E-03
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	4,36E-04	3,87E-04

Tabla 29: Impactos medioambientales escenarios Italia

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	17%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-16%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-16%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-16%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	3%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	2%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-4%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-4%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-14%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-15%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-11%

Tabla 30: Comparativa impactos medioambientales escenarios Italia

Debido a la fuerte introducción de las tecnologías solar fotovoltaica y eólica el agotamiento abiótico aumenta en casi un 20%. Por otro lado, se consigue una **reducción del 16% en el potencial de calentamiento global**. Además, se observa como las medidas adoptadas giran en torno al calentamiento global ya que es la categoría de impacto en la que se observa la mayor reducción.

II. Republica Checa

La Republica Checa destaca por la poca integración de energías renovables al mix, pese a duplicar la producción, los valores estimados siguen siendo muy bajos en comparación a otras tecnologías. Los resultados para cada uno de los dos escenarios es el siguiente:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - PNIEC	2030 - CEPS
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,46E-06	3,47E-06	3,47E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	7,88E+00	5,17E+00	4,01E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	9,42E-01	6,63E-01	5,16E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	2,15E-08	9,04E-09	6,60E-09
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	5,92E-01	4,77E-01	3,98E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	1,02E+00	8,31E-01	6,96E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	2,16E+03	1,64E+03	1,30E+03
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,66E-03	3,45E-03	3,31E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	1,24E-04	9,10E-05	7,16E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	3,29E-03	2,46E-03	1,92E-03
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	5,01E-03	3,83E-03	2,98E-03

Tabla 31: Impactos medioambientales escenarios Republica Checa

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - PNIEC	2030 - CEPS
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	0%	0%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-34%	-49%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-30%	-45%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-58%	-69%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-19%	-33%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-19%	-32%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-24%	-40%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-6%	-9%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-26%	-42%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-25%	-41%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-24%	-41%

Tabla 32: Comparativa impactos medioambientales escenarios Republica Checa

Pese a la poca integración de energías renovables, los resultados obtenidos son muy favorables. Se observa como el escenario propuesto por el operador del sistema se obtienen unos resultados mucho mejores que el escenario propuesto en el PNIEC. En ambos el mejor resultado se observa en la destrucción de capa de ozono. En cuanto al **calentamiento global** se observan unas mejoras del **30% y 45%**, debido a que en ambos escenarios se consigue una reducción notable de las centrales térmicas.

III. Austria

En Austria, se plantean dos escenarios, uno de ellos se obtiene un mix energético similar al de la República Checa en el PNIEC, sin demasiadas mejoras. No obstante, el escenario WAM, con una integración más importante de las energías renovables sí que se consiguen mejores resultados. Los resultados de ambos escenarios se muestran en la siguiente tabla:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - WEM	2030 - WAM
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,26E-06	3,33E-06	3,80E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	2,14E+00	1,75E+00	1,48E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	1,53E-01	1,25E-01	1,09E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	2,34E-08	2,02E-08	1,67E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	1,26E-01	1,25E-01	1,36E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	2,54E-01	2,51E-01	2,64E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	2,02E+02	1,81E+02	1,94E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	2,93E-03	2,93E-03	2,88E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	1,90E-05	1,92E-05	1,83E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	3,24E-04	3,19E-04	3,10E-04
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	2,17E-04	1,98E-04	1,89E-04

Tabla 33: Impactos medioambientales escenarios Austria

Categoría de impacto	Unidad	2019	WEM	WAM
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	2%	17%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-18%	-31%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-18%	-29%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-14%	-28%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-1%	7%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-1%	4%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-11%	-4%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	0%	-2%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	1%	-4%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-1%	-4%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-8%	-13%

Tabla 34: Comparativa impactos medioambientales escenarios Austria

Como era de esperar los resultados obtenidos en el escenario WAM son mucho mejores que en el escenario WEM, debido a una mayor integración de energías renovables. De hecho, en el primer escenario, apenas se observan mejoras con respecto al año 2019. No obstante, en el segundo de los escenarios propuestos se observa como el **calentamiento global** disminuye en **29 puntos porcentuales** respecto al 2019. Por último, la categoría de impacto donde se obtienen los mejores resultados es en el agotamiento abiótico de combustibles fósiles.

IV. Grecia

En el PNIEC presentado por Grecia, únicamente aparece un escenario propuesto para 2030, en él, se espera una fuerte integración de tecnología solar fotovoltaica y tecnología eólica al mix de generación. Los resultados para las diferentes categorías de impacto son los siguientes:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Obj. Archiv.
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,91E-06	4,31E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	7,37E+00	3,02E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	5,25E-01	2,12E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	8,32E-08	5,23E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	3,77E-01	1,47E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	6,23E-01	2,75E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	1,20E+03	1,86E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,44E-03	2,83E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	9,84E-05	3,05E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	2,18E-03	5,08E-04
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	2,28E-03	1,40E-04

Tabla 35: Impactos medioambientales escenarios Grecia

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Obj. Archiv.
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	10%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-59%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-60%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-37%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-61%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-56%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-85%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-18%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-69%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-77%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-94%

Tabla 36: Comparativa impactos medioambientales escenarios Grecia

Los resultados obtenidos en Grecia son muy favorables. Como se puede observar, todas las categorías de impacto se consigue una mejora superior al 15% (excepto en el agotamiento abiótico, debido a las tecnologías solar y eólica). La categoría en la que se consigue el mejor resultado es en la ecotoxicidad del agua marina y en la eutrofización, debido a la disminución de generación con petróleo y al apagón de las centrales de carbón. Por la misma razón, el **calentamiento global** mejora un **60%**.

V. Portugal

En el escenario de 2030 planteado por Portugal, se observa una fuerte integración de las energías solar y fotovoltaica, además del desmantelamiento de las centrales de carbón. Así pues, los resultados obtenidos son los siguientes:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,44E-06	4,24E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	6,03E+00	4,68E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	4,95E-01	3,85E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	2,37E-08	1,93E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	2,21E-01	2,13E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	3,38E-01	3,34E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	7,72E+02	6,46E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,35E-03	3,09E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	1,19E-04	9,30E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	3,20E-03	2,47E-03
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	7,65E-04	6,12E-04

Tabla 37: Impactos medioambientales escenarios Portugal

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	23%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-22%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-22%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-18%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-4%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-1%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-16%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-8%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-22%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-23%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-20%

Tabla 38: Comparativa impactos medioambientales escenarios Portugal

Como era de esperar, se obtienen mejoras en todas las categorías de impacto. Al igual que con otros países se observa un importante incremento del agotamiento abiótico, justificado por el crecimiento de las tecnologías solar fotovoltaica y eólica. El **calentamiento global** mejora un **22%** frente al escenario actual. No obstante, es la acidificación la categoría de impacto con mejor evolución.

VI. México

En caso de México, se proponen dos escenarios, ambos con un fuerte desarrollo eólico. Además, en el caso del escenario Remap 2030, se espera un elevado crecimiento de la generación solar fotovoltaica. Los resultados son los siguientes:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,31E-06	3,32E-06	3,67E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	7,17E+00	6,47E+00	3,85E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	5,33E-01	4,74E-01	2,81E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	3,94E-08	2,56E-08	1,73E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	2,06E-01	1,97E-01	1,60E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	3,14E-01	3,23E-01	2,78E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	3,99E+02	4,25E+02	2,53E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,15E-03	3,10E-03	2,96E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	8,07E-05	5,75E-05	3,23E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	1,95E-03	1,26E-03	6,31E-04
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	5,93E-04	6,02E-04	2,75E-04

Tabla 39: Impactos medioambientales escenarios México

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	0%	11%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-10%	-46%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-11%	-47%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-35%	-56%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-4%	-23%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	3%	-11%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	7%	-37%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-1%	-6%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-29%	-60%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-35%	-68%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	2%	-54%

Tabla 40: Comparativa impactos medioambientales escenarios México

Como se puede observar, en ambos escenarios se obtienen mejoras, sin embargo, es en el segundo de ellos (*Remap*) donde se obtienen importantes disminuciones. Cabe destacar como en el escenario de referencia el agotamiento abiótico no varía apenas, sin embargo, se consigue un resultado notable en la categoría de calentamiento global, con una disminución del **11%**. Por otro lado, el escenario *Remap* 2030, sí que presenta interesantes mejoras en prácticamente todas las categorías de impacto. En particular, el **calentamiento global** mejora un **47%**, sin embargo, es la acidificación con un 68% la categoría que presenta mejor variación con respecto 2019.

VII. Chile

En Chile se proponen dos escenarios para el 2030, en ambos se observa una importante integración de la tecnología solar fotovoltaica en el mix energético. La principal diferencia entre los escenarios es que el segundo, denominado *Ruta hacia la descarbonización* la generación con centrales térmicas de carbón disminuye 13TWh con respecto el otro escenario propuesto para 2030. Los resultados son los siguientes:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Base	2030 - RhDes
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,79E-06	6,21E-06	6,83E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	6,48E+00	2,33E+00	1,17E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	5,43E-01	2,04E-01	1,02E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	2,63E-08	6,28E-09	5,53E-09
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	3,26E-01	2,61E-01	2,24E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	4,50E-01	4,12E-01	3,75E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	9,72E+02	5,83E+02	3,69E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,31E-03	2,86E-03	2,71E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	1,16E-04	4,60E-05	2,54E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	3,73E-03	1,41E-03	6,46E-04
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	1,36E-03	6,65E-04	3,21E-04

Tabla 41: Impactos medioambientales escenarios Chile

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Base	2030 - RhDes
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	64%	80%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-64%	-82%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-62%	-81%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-76%	-79%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-20%	-31%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-8%	-17%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-40%	-62%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-14%	-18%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-60%	-78%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-62%	-83%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-51%	-76%

Tabla 42: Comparativa impactos medioambientales escenarios Chile

Los resultados obtenidos en ambos escenarios son muy favorables, excepto en cuanto al agotamiento abiótico. En el caso base la destrucción de la capa de ozono es la categoría de impacto que mejor resultado obtiene, superando el 75% de mejora mientras que, en el segundo escenario, la acidificación presenta los mejores resultados. Por otro lado, el debido a la integración de las energías limpias y a la disminución de producción con centrales térmicas, el **calentamiento global** mejora un **62%** en el *escenario base* y un **79%** en el *escenario Ruta hacia la descarbonización*.

VIII. Sudáfrica

El mix energético de Sudáfrica es fuertemente dependiente del carbón, por lo que el margen de mejora de la transición energética es elevado. Además, en este caso IRENA, propone dos escenarios, siendo uno más agresivo que otro. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,26E-06	3,91E-06	3,99E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	1,38E+01	8,80E+00	7,06E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	1,08E+00	6,99E-01	5,64E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	6,41E-09	5,59E-09	4,96E-09
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	7,00E-01	4,98E-01	4,28E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	8,59E-01	6,47E-01	5,74E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	2,72E+03	1,78E+03	1,45E+03
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	5,88E-03	4,68E-03	4,31E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	4,21E-04	2,68E-04	2,15E-04
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	1,27E-02	8,03E-03	6,42E-03
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	3,13E-03	2,01E-03	1,62E-03

Tabla 43: Impactos medioambientales escenarios Sudáfrica

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	20%	22%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-36%	-49%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-35%	-48%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-13%	-23%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-29%	-39%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-25%	-33%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-35%	-47%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-20%	-27%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-36%	-49%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-37%	-50%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-36%	-48%

Tabla 44: Comparativa impactos medioambientales escenarios Sudáfrica

Pese a que los resultados obtenidos son resultan favorables en la mayoría de las categorías de impacto, no se obtiene tanta mejora en comparación con otros países y los márgenes de mejora de cada uno de ellos. Esto se debe a que pese que las centrales térmicas vean su participación en la cobertura de la demanda aminorada con respecto el 2019, siguen estando muy presentes y resultando clave. Se observa como el **calentamiento global** mejora en un **35%** y un **48%**, respectivamente.

IX. Egipto

El caso de Egipto es similar al de Sudáfrica, a día de hoy es fuertemente dependiente de tecnologías convencionales como el petróleo y el gas natural. Del mismo modo que con Sudáfrica, IRENA propone dos escenarios para el 2030 ambos marcados por el importante aumento de generación eólica. Además, en el escenario *REmap 2030* se propone que la energía solar fotovoltaica se convierta en la tecnología de generación renovable predominante, incrementándose mucho su producción con respecto al 2019. Los resultados de los impactos medioambientales según la categoría de impacto se muestran a continuación:

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	3,13E-06	3,43E-06	4,12E-06
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	7,78E+00	6,26E+00	3,53E+00
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	4,99E-01	4,06E-01	2,41E-01
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	3,66E-08	2,97E-08	1,94E-08
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	1,30E-01	1,39E-01	1,55E-01
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	2,29E-01	2,46E-01	2,66E-01
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	1,35E+02	1,48E+02	1,78E+02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	3,01E-03	2,98E-03	2,90E-03
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	6,77E-05	5,59E-05	4,70E-05
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	1,26E-03	1,04E-03	8,22E-04
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	1,64E-04	1,54E-04	1,98E-04

Tabla 45: Impactos medioambientales escenarios Egipto

Categoría de impacto	Unidad	2019	2030 - Reference	2030 - Remap
Agotamiento Abiótico	kg Sb eq/kWh	-	10%	31%
Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	MJ/kWh	-	-19%	-55%
Calentamiento Global	kg CO2 eq/kWh	-	-19%	-52%
Destrucción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq/kWh	-	-19%	-47%
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq/kWh	-	7%	19%
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DB eq/kWh	-	8%	17%
Ecotoxicidad Agua Marina	kg 1,4-DB eq/kWh	-	10%	32%
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq/kWh	-	-1%	-4%
Oxidación Fotoquímica	kg C2H4 eq/kWh	-	-17%	-31%
Acidificación	kg SO2 eq/kWh	-	-18%	-35%
Eutrofización	kg PO4eq/kWh	-	-6%	21%

Tabla 46: Comparativa impactos medioambientales escenarios Egipto

Pese al incremento de la generación eólica, no se consiguen unos resultados notablemente mejores en el *Reference Case*, debido a que la generación con centrales térmicas sigue suponiendo un 75%. El **calentamiento global** mejora en un **19%**. Por otro lado, el escenario *Remap 2030* se observan unos resultado mucho mejores, el agotamiento abiótico es la categoría de impacto con mejor evolución. Por otro lado, el **calentamiento global** mejora un **52%** con respecto al escenario propuesto en 2019.

X. Comparativa escenarios 2030

Una vez analizados todos los escenarios propuestos por los diferentes países y observadas las mejoras que se obtienen en el año 2030 en relación al 2019, se desea observar cual es el mix energético óptimo. Así pues, en las siguientes tablas se muestra una comparativa de todos los mixes para cada una de las categorías de impacto:

País	Escenario	Agotamiento Abiótico	Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	Calentamiento Global	Destrucción de la Capa de Ozono	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad Agua Dulce
		kg Sb eq/kWh	MJ/kWh	kg CO ₂ eq/kWh	kg CFC-11 eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh
Italia	PNIEC	4,10E-06	4,59E+00	3,53E-01	4,25E-08	1,73E-01	2,95E-01
Republica Checa	PNIEC	3,47E-06	5,17E+00	6,63E-01	9,04E-09	4,77E-01	8,31E-01
	CEPS	3,47E-06	4,01E+00	5,16E-01	6,60E-09	3,98E-01	6,96E-01
Austria	WEM	3,33E-06	1,75E+00	1,25E-01	2,02E-08	1,25E-01	2,51E-01
	WAM	3,80E-06	1,48E+00	1,09E-01	1,67E-08	1,36E-01	2,64E-01
Grecia	Obj. Achiv.	4,31E-06	3,02E+00	2,12E-01	5,23E-08	1,47E-01	2,75E-01
Portugal	PNIEC	4,24E-06	4,68E+00	3,85E-01	1,93E-08	2,13E-01	3,34E-01
México	Reference	3,32E-06	6,47E+00	4,74E-01	2,56E-08	1,97E-01	3,23E-01
	Remap	3,67E-06	3,85E+00	2,81E-01	1,73E-08	1,60E-01	2,78E-01
Chile	Base	6,21E-06	2,33E+00	2,04E-01	6,28E-09	2,61E-01	4,12E-01
	RhDesc.	6,83E-06	1,17E+00	1,02E-01	5,53E-09	2,24E-01	3,75E-01
Sudáfrica	Reference	3,91E-06	8,80E+00	6,99E-01	5,59E-09	4,98E-01	6,47E-01
	Remap	3,99E-06	7,06E+00	5,64E-01	4,96E-09	4,28E-01	5,74E-01
Egipto	Reference	3,43E-06	6,26E+00	4,06E-01	2,97E-08	1,39E-01	2,46E-01
	Remap	4,12E-06	3,53E+00	2,41E-01	1,94E-08	1,55E-01	2,66E-01

Tabla 47: Comparativa impactos medioambientales para la generación 1kWh en baja tensión en 2030 (1/2)

País	Escenario	Ecotoxicidad Agua Marina	Ecotoxicidad Terrestre	Oxidación Fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
		kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg C ₂ H ₄ eq/kWh	kg SO ₂ eq/kWh	kg PO ₄ eq/kWh
Italia	PNIEC	3,61E+02	2,91E-03	6,63E-05	1,36E-03	3,87E-04
Republica Checa	PNIEC	1,64E+03	3,45E-03	9,10E-05	2,46E-03	3,83E-03
	CEPS	1,30E+03	3,31E-03	7,16E-05	1,92E-03	2,98E-03
Austria	WEM	1,81E+02	2,93E-03	1,92E-05	3,19E-04	1,98E-04
	WAM	1,94E+02	2,88E-03	1,83E-05	3,10E-04	1,89E-04
Grecia	Obj. Achiv.	1,86E+02	2,83E-03	3,05E-05	5,08E-04	1,40E-04
Portugal	PNIEC	6,46E+02	3,09E-03	9,30E-05	2,47E-03	6,12E-04
México	Reference	4,25E+02	3,10E-03	5,75E-05	1,26E-03	6,02E-04
	Remap	2,53E+02	2,96E-03	3,23E-05	6,31E-04	2,75E-04
Chile	Base	5,83E+02	2,86E-03	4,60E-05	1,41E-03	6,65E-04
	RhDesc.	3,69E+02	2,71E-03	2,54E-05	6,46E-04	3,21E-04
Sudáfrica	Reference	1,78E+03	4,68E-03	2,68E-04	8,03E-03	2,01E-03
	Remap	1,45E+03	4,31E-03	2,15E-04	6,42E-03	1,62E-03
Egipto	Reference	1,48E+02	2,98E-03	5,59E-05	1,04E-03	1,54E-04
	Remap	1,78E+02	2,90E-03	4,70E-05	8,22E-04	1,98E-04

Tabla 48: Comparativa impactos medioambientales para la generación 1kWh en baja tensión en 2030 (2/2)

Entre todos los escenarios son el escenario de Chile (*Ruta hacia la descarbonización*) junto con el de Austria (WAM), los que mejores resultados se obtienen en la mayoría de las categorías de impacto. Los escenarios que peores resultados muestran son el de Sudáfrica de Referencia y el propuesto en el PNIEC de la Republica Checa. Como ya se ha comentado anteriormente, Sudáfrica cuenta con una elevada participación de combustibles fósiles por lo que, a pesar de las mejoras, es comprensible que siga figurando como el peor escenario. Por otro lado, la Republica Checa debido al poco margen de mejora junto con un mix energético con el lignito como tecnología principal, es coherente que, al igual que con Sudáfrica, sea de los peores escenarios en gran parte de las categorías de impacto.

En cuanto al calentamiento global, los Sudáfrica junto con la República Checa son los que peores resultados muestran, debido a la elevada generación con centrales térmicas. Grecia, Austria en ambos escenarios y Chile son los países que mejores resultados presentan en esta categoría debido a la gran integración de tecnologías renovables a sus respectivos mixes. En la gráfica siguiente se muestra el valor de kg CO₂ equivalente emitido por cada escenario de 2030 para la generación de 1 kWh en baja tensión.

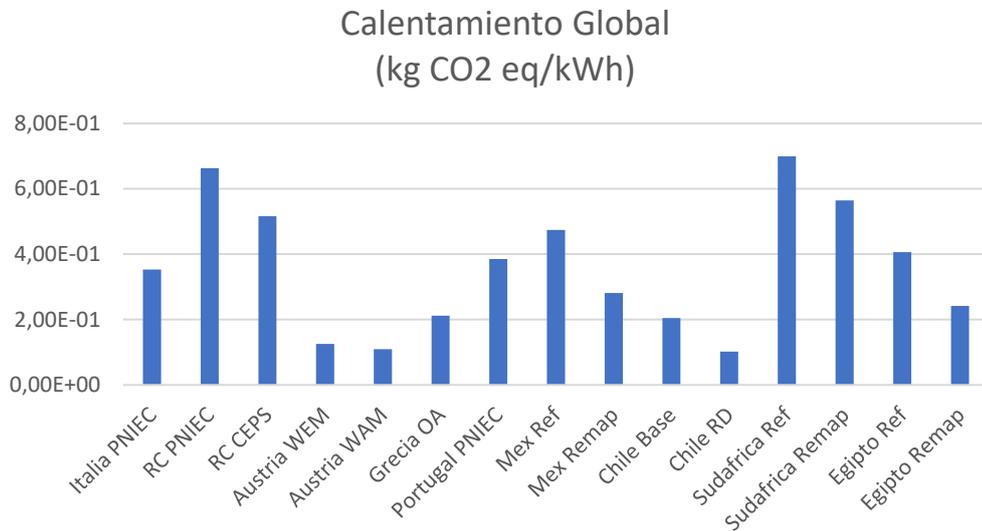


Gráfico 49: Comparativa de calentamiento global según el escenario

Se recomienda acudir al **Anexo 3**, donde se muestran gráficas con el impacto de cada uno de los mixes según la categoría de impacto.

7.3. Impacto mundial

Por último, una vez analizados los mixes energéticos en base a la unidad funcional, resulta muy interesante estudiar el impacto mundial que presentan ya que, la demanda es completamente distinta entre los países. Cabe destacar que para la realización de este apartado se ha considerado una suposición muy importante:

- La demanda de cada uno de los países se satisface con el mix del país, es decir, se supone que la interconectividad es nula y que por lo tanto las importaciones/exportaciones entre países es cero.

Así pues, las demandas para cada uno de los países son las siguientes:

Escenario	Demanda (MWh)
Italia - 2030	288.800.000
Rep. Checa - PNIEC	80.060.000
Rep. Checa - CEPS	75.030.000
Austria - WEM	70.061.000
Austria - WAM	89.261.000
Grecia - Obj Achiv	57.270.000
Portugal - 2030	67.240.000
Mexico - Ref.	601.200.000
Mexico - Remap	596.500.000
Chile - Ref.	120.810.000
Chile - Remap	123.300.000
Sudafrica - Ref.	356.000.000
Sudafrica - Remap	372.320.000
Egipto - Ref.	385.320.000
Egipto - Remap	348.000.000

Tabla 50: Demanda por país

Como se puede observar, debido a la diferencia de superficies y al nivel de industrialización de cada país, se observan grandes diferencias en las demandas entre ellos. México es el país con una demanda notablemente superior al resto de países y Grecia es el que menor demanda presenta.

A continuación, se muestra el impacto global de los mixes propuestos para el año 2030 para cada una de las categorías de impacto:

Agotamiento abiótico:

Categoría de impacto	Agotamiento Abiótico
Unidad	kg Sb eq/kWh
Italia - 2030	1,18E+06
Rep. Checa - PNIEC	2,78E+05
Rep. Checa - CEPS	2,60E+05
Austria - WEM	2,33E+05
Austria - WAM	3,39E+05
Grecia - Obj Achiv	2,47E+05
Portugal - 2030	2,85E+05
Mexico - Ref.	1,99E+06
Mexico - Remap	2,19E+06
Chile - Ref.	7,51E+05
Chile - Remap	8,42E+05
Sudafrica - Ref.	1,39E+06
Sudafrica - Remap	1,49E+06
Egipto - Ref.	1,32E+06
Egipto - Remap	1,43E+06

Tabla 51: Agotamiento abiótico por escenario 2030

Como puede observarse los dos escenarios propuestos por México son los que mayor impacto presentan siendo los de la Grecia y Austria (WEM) los que menos.

Agotamiento abiótico (combustibles fósiles) & Calentamiento Global:

Categoría de impacto	Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	Calentamiento Global
Unidad	MJ/kWh	kg CO2 eq/kWh
Italia - 2030	1,33E+12	1,02E+11
Rep. Checa - PNIEC	4,14E+11	5,31E+10
Rep. Checa - CEPS	3,01E+11	3,87E+10
Austria - WEM	1,22E+11	8,77E+09
Austria - WAM	1,32E+11	9,73E+09
Grecia - Obj Achiv	1,73E+11	1,21E+10
Portugal - 2030	3,14E+11	2,59E+10
Mexico - Ref.	3,89E+12	2,85E+11
Mexico - Remap	2,30E+12	1,68E+11
Chile - Ref.	2,81E+11	2,47E+10
Chile - Remap	1,44E+11	1,26E+10
Sudafrica - Ref.	3,13E+12	2,49E+11
Sudafrica - Remap	2,63E+12	2,10E+11
Egipto - Ref.	2,41E+12	1,56E+11
Egipto - Remap	1,23E+12	8,39E+10

Tabla 52: Agotamiento abiótico (comb. fósiles) & calentamiento global por escenario 2030

Para estas dos categorías de impacto se observan unos resultados muy similares. Por las razones previamente mencionadas (superficie, mix, desarrollo industrial...) México y

Sudáfrica (escenario de referencia) presentan los peores resultados mientras que Austria (con sus dos escenarios) los mejores.

Destrucción de la capa de ozono:

Categoría de impacto	Destrucción de la Capa de Ozono
Unidad	kg CFC-11 eq/kWh
Italia - 2030	1,23E+04
Rep. Checa - PNIEC	7,24E+02
Rep. Checa - CEPS	4,95E+02
Austria - WEM	1,41E+03
Austria - WAM	1,49E+03
Grecia - Obj Archiv	3,00E+03
Portugal - 2030	1,30E+03
Mexico - Ref.	1,54E+04
Mexico - Remap	1,03E+04
Chile - Ref.	7,58E+02
Chile - Remap	6,81E+02
Sudafrica - Ref.	1,99E+03
Sudafrica - Remap	1,85E+03
Egipto - Ref.	1,14E+04
Egipto - Remap	6,75E+03

Tabla 53: Destrucción capa de Ozono por escenario 2030

En lo referente a la destrucción de la capa de ozono, el escenario de referencia propuesto México y el mix italiano para el año 2030 son los que mayor impacto presentan mientras que los propuestos por la republica checa (CEPS) y Chile (*Ruta hacia la descarbonización*) son los más favorables.

Toxicidad humana, Ecotox. agua dulce & Ecotox. agua marina:

Categoría de impacto	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad Agua Dulce	Ecotoxicidad Agua Marina
Unidad	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh
Italia - 2030	5,00E+10	8,52E+10	1,04E+14
Rep. Checa - PNIEC	3,82E+10	6,65E+10	1,31E+14
Rep. Checa - CEPS	2,98E+10	5,22E+10	9,77E+13
Austria - WEM	8,75E+09	1,76E+10	1,26E+13
Austria - WAM	1,21E+10	2,35E+10	1,73E+13
Grecia - Obj Archiv	8,42E+09	1,58E+10	1,06E+13
Portugal - 2030	1,43E+10	2,24E+10	4,34E+13
Mexico - Ref.	1,19E+11	1,94E+11	2,55E+14
Mexico - Remap	9,53E+10	1,66E+11	1,51E+14
Chile - Ref.	3,15E+10	4,98E+10	7,05E+13
Chile - Remap	2,77E+10	4,63E+10	4,55E+13
Sudafrica - Ref.	1,77E+11	2,30E+11	6,35E+14
Sudafrica - Remap	1,59E+11	2,14E+11	5,41E+14
Egipto - Ref.	5,35E+10	9,49E+10	5,71E+13
Egipto - Remap	5,39E+10	9,27E+10	6,20E+13

Tabla 54 Toxicidad humana, Ecotoxicidad agua dulce y agua marina por escenario 2030

En estas tres categorías de impacto el resultado es similar, Sudáfrica presenta los peores resultados en ambos escenarios mientras que Austria (WEM) y Grecia son los mixes que menor impacto presentan.

Ecotox terrestre y Eutrofización:

Categoría de impacto	Ecotoxicidad Terrestre	Eutrofización
Unidad	kg 1,4-DB eq/kWh	kg PO4eq/kWh
Italia - 2030	8,41E+08	1,12E+08
Rep. Checa - PNIEC	2,76E+08	3,07E+08
Rep. Checa - CEPS	2,49E+08	2,24E+08
Austria - WEM	2,05E+08	1,39E+07
Austria - WAM	2,57E+08	1,69E+07
Grecia - Obj Achiv	1,62E+08	8,00E+06
Portugal - 2030	2,07E+08	4,11E+07
Mexico - Ref.	1,87E+09	3,62E+08
Mexico - Remap	1,77E+09	1,64E+08
Chile - Ref.	3,46E+08	8,03E+07
Chile - Remap	3,34E+08	3,96E+07
Sudafrica - Ref.	1,67E+09	7,14E+08
Sudafrica - Remap	1,60E+09	6,02E+08
Egipto - Ref.	1,15E+09	5,94E+07
Egipto - Remap	1,01E+09	6,90E+07

Tabla 55: Ecotoxicidad terrestre & Eutrofización por esenario 2030

En estas dos categorías de impacto, los mejores resultados los obtienen los mixes de Grecia y Austria (WEM). En lo referente a la Ecotoxicidad terrestre México en sus dos escenarios presenta los peores resultados mientras que en la Eutrofización son los mixes sudafricanos los que peores resultados obtienen

Oxidación fotoquímica y Acidificación:

Categoría de impacto	Oxidación Fotoquímica	Acidificación
Unidad	kg C2H4 eq/kWh	kg SO2 eq/kWh
Italia - 2030	1,92E+07	3,92E+08
Rep. Checa - PNIEC	7,29E+06	1,97E+08
Rep. Checa - CEPS	5,38E+06	1,44E+08
Austria - WEM	1,35E+06	2,24E+07
Austria - WAM	1,63E+06	2,77E+07
Grecia - Obj Achiv	1,75E+06	2,91E+07
Portugal - 2030	6,25E+06	1,66E+08
Mexico - Ref.	3,46E+07	7,56E+08
Mexico - Remap	1,93E+07	3,77E+08
Chile - Ref.	5,56E+06	1,70E+08
Chile - Remap	3,13E+06	7,97E+07
Sudafrica - Ref.	9,53E+07	2,86E+09
Sudafrica - Remap	7,99E+07	2,39E+09
Egipto - Ref.	2,15E+07	4,01E+08
Egipto - Remap	1,64E+07	2,86E+08

Tabla 56: Oxidación fotoquímica & Acidificación por escenario 2030

Por último, en estas dos categorías de impacto Austria presenta los mejores resultados con un impacto muy bajo en ambos escenarios. Por el otro lado, de nuevo Sudáfrica presenta los peores resultados con un impacto muy superior al resto.

En definitiva, pese a no tener la demanda más elevada de todos los escenarios observados, Sudáfrica presenta los peores resultados ya que, el impacto es mayor que el resto en la mayoría de las categorías de impacto. La razón se debe a que las tecnologías fósiles mantienen una presencia muy notable en su mix, pese a las mejoras propuestas en tecnologías menos contaminantes (como las renovables).

A continuación, se muestra un gráfico con el impacto sobre el calentamiento global ya que, es el principal objetivo de estas mejoras en los mixes.

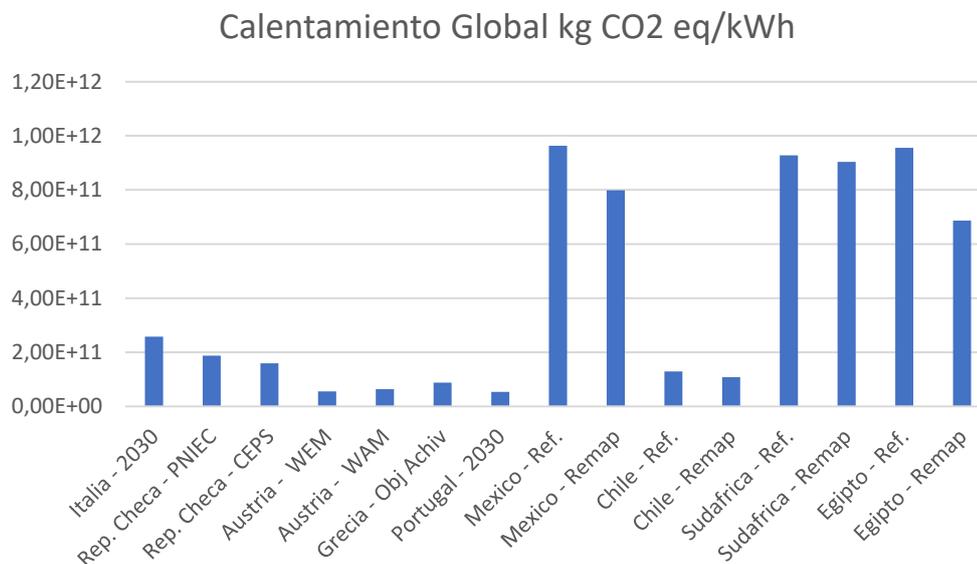


Figura 10: Calentamiento global por escenario 2030

Como se puede observar, existen grandes diferencias debido a las demandas de cada país. México, Sudáfrica y Egipto son los países con mayor demanda y por lo tanto es lógico que presenten un impacto mayor a otros países como Austria o Grecia.

Sin embargo, resulta muy interesante como México, pese a tener el doble de demanda que Sudáfrica, el impacto es relativamente similar. Esto se debe a los mixes de generación, como se ha observado en apartados anteriores, los escenarios presentados por los países africanos muestran una elevada presencia de tecnologías fósiles como el carbón y petróleo. Así pues, pese a que México es el que mayor impacto presenta, los escenarios de los países africanos son más nocivos que el resto.

Otra forma de observar este hecho es comparando los países africanos con Italia. El país europeo presenta una demanda en torno al 30% inferior a la de Egipto, sin embargo, el impacto de Egipto es más de un 150% superior. Por lo que de nuevo se observa como el mix de estos países tiene un margen de mejora muy amplio.

8. Evaluación económica

La manera de comparar los aspectos económicos de las diferentes tecnologías de generación, y por tanto los distintos mixes energéticos, es por medio del LCOE (*levelized cost of energy*). Llamado así por las iniciales de las palabras que lo forman en inglés, el coste nivelado de la energía es una medida utilizada para evaluar y comparar métodos alternativos de producción de energía. [52]

El LCOE de un activo generador de energía puede considerarse como el coste total medio de construcción y funcionamiento del activo por unidad de electricidad total generada a lo largo de una supuesta vida útil [52]. En el presente trabajo se tomará la unidad funcional para poder comparar las distintas tecnologías, 1 kWh.

La fórmula para calcular el LCOE cuenta con varios sumandos. El primero de ellos relacionado con la inversión inicial, dado que se tienen en cuenta los costes desde la construcción de la central, huerta solar, aerogenerador... así pues, este sumando se obtiene con la siguiente ecuación [53]:

$$LC_I = \frac{CAPEX}{8760 \cdot CF} \cdot f_a$$

Ecuación 3: LCOE_I

Donde:

- CAPEX: Inversión del inmovilizado fijo no anualizado (€/kW)
- CF: Factor de capacidad (%)
- f_a : Factor de amortización

En segundo lugar, es necesario tener en cuenta todos los costes operativos durante toda la vida útil de la instalación. Entre estos costes se encuentran: Operación y mantenimiento, combustible, penalizaciones por emisiones de CO₂ y por último el crédito por la producción de calor. Así pues, la ecuación correspondiente a este sumando es la siguiente [53]:

$$LC_O = (O\&M + FC + CCO_2 - HC) \cdot f_a \cdot f_\Sigma$$

Ecuación 4: LCOE_O

Donde:

- O&M: Costes asociados a la operación y mantenimiento anualizado (€/kW · año)
- FC: Coste del fuel (€/kWh)
- CCO₂: Coste de emisiones de CO₂ (€/kWh)
- HC: crédito por la producción de calor (€/kWh)
- f_a : Factor de amortización
- f_Σ : Aggregation factor

En ambos sumandos se pueden observar el factor de amortización. Este factor, va en relación a la pérdida de valor del inmovilizado con el paso del tiempo, debido a cambios

en la tecnología, pérdida del valor del dinero... y otros factores. En este caso, la fórmula de este factor es la siguiente:

$$f_a = \frac{i \cdot (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

Ecuación 5: Factor de amortización

Donde:

- i: tasa de descuento (valor típico de 7%)
- N: años de vida útil

Por otro lado, en el segundo sumando se puede observar el aggregation factor. Este factor anualiza los costes llevándolos al año 0, de manera que se puedan comparar. Esto es debido al valor temporal del dinero, con el transcurso del tiempo el dinero tiene menos valor por lo que para poder realizar una comparación correcta es necesario estudiar los costes en un único año, siendo el año el año de inversión el más sencillo. La ecuación para calcular este factor es la siguiente:

$$f_{\Sigma} = \frac{k \cdot (1 - k^n)}{1 - k}$$

Ecuación 6: Aggregation factor

Donde k es:

$$k = \frac{1 + r}{1 + i} = 96,73\%$$

Siendo:

- i: tasa de descuento (valor típico de 7%)
- r: tasa de inflación (valor típico de 3,5%)

8.1. LCOE por tecnología 2019

En primer lugar, es necesario conocer cuál es el LCOE de cada una de las tecnologías de generación vistas en los mixes energéticos de los países de estudio. No obstante, previo a realizar todos los cálculos, cabe destacar las suposiciones que se han realizado, así como aspectos relevantes durante el cálculo del LCOE:

- Muchos de los datos necesarios para calcular el LCOE dependen del país de estudio. El O&M, el factor de capacidad no es igual en Italia que en México. Por otro lado, hay otros parámetros cuyo valor es más universal como puede ser el coste de combustible. Por estas razones se ha tomado la media de varios países europeos para el cálculo del coste nivelado de la energía.
- Se ha considerado la misma vida útil por grupo de tecnología, por ejemplo, para la generación con gas natural se ha considerado 27 años independientemente de si se trata de un ciclo combinado, una central convencional o cogeneración. De igual manera para todo el resto de las tecnologías.

- En cuanto al factor de capacidad⁶, se ha considerado el mismo factor de capacidad para todas las tecnologías de generación con carbón. Al igual que en las centrales nucleares e hidráulicas de reserva, en las que no se hace distinción de ningún tipo.
- Debido que una gran cantidad de los costes se encuentran en USD, a fecha de realización de este trabajo la conversión a euros es la siguiente: 1USD = 0,93€.
- Para la tecnología de cogeneración con petróleo no se ha conseguido encontrar datos fiables por lo que el CAPEX se ha estimado con los valores de la Antracita. Caso similar ocurre con el O&M del biogás, debido a la dificultad por obtener un valor se ha supuesto el mismo que el de la biomasa debido a que en las fuentes consultadas no realizaban distinción entre ambas tecnologías.

En la siguiente imagen se muestran los datos empleados para el cálculo del LC_i:

Tecnología	Vida útil (Años)	Factor de Capacidad	CAPEX (€/kW)
Antracita	46	58,4%	3194,41
Antracita CoG	46	50,0%	1745,29
Biogás	20	48,0%	3000,00
Biomasa	25	89,0%	5980,99
Eólica M (1 - 3MW)	25	40,5%	2305,69
Eólica T (< 1MW)	25	32,0%	2697,40
Eólica T (> 3MW)	25	37,0%	1391,96
Eólica T (1 - 3MW)	25	37,0%	1391,96
Gas Natural CC	27	60,0%	1024,31
Gas Natural CoG CC	27	57,0%	1130,52
Gas Natural CoG Conv.	27	57,0%	960,16
Gas Natural Conv.	27	60,0%	615,24
Geotermia	30	71,0%	7669,44
Hidro - Bombeo	65	15,0%	1896,02
Hidro - fluyente	65	54,0%	2918,08
Hidro - reserva alpina	65	57,0%	3324,90
Hidro - reserva no alpina	65	57,0%	3324,90
Lignito	46	58,4%	3194,41
Lignito CoG	46	50,0%	1745,29
Nuclear BWR	40	92,7%	4694,60
Nuclear PWR	40	92,7%	4694,60
Petróleo	25	10,7%	324,21
Petróleo CoG	25	16,4%	178,32
Residuos	20	59,5%	2779,88
Solar Autoc.	30	17,0%	800,00
Solar PFV	30	24,6%	500,00
Termosolar	30	52,0%	5660,52

Tabla 57: Parámetros LC_i [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]

⁶ Cociente entre energía real generada durante un periodo de tiempo y energía generada durante el mismo periodo de tiempo si la central hubiese estado a potencia nominal.

Se puede observar como aquellas tecnologías con mayores factores de capacidad y una vida útil relativamente larga, son las que mayor inversión inicial requieren. Entre estas tecnologías destacan la geotermia, las centrales nucleares y la biomasa ya que son las más caras en términos de inversión inicial.

En cuanto a las más económicas se sitúan las centrales de petróleo, principalmente debido a su elevado impacto ambiental y al elevado desarrollo de las energías renovables. Además, el factor de capacidad de estas centrales es el más bajo de todos. Un caso similar es el de las centrales de gas convencionales, el desarrollo de las centrales de ciclo combinado ha supuesto un desuso de esta tecnología debido a las mejoras que presenta el CC. La tecnología solar fotovoltaica es otra de las que menores costes de inversión requieren, esto se debe a la rápida evolución de la tecnología y a la ausencia de grandes componentes (como una turbina o un generador asíncrono).

Una vez analizados los costes de inversión, en la siguiente tabla se muestran los costes variables o de operación de las tecnologías:

Tecnología	O&M (€/MWh)	FC (€/MWh)	CCO ₂ (€/MWh)	HC (€/MWh)
Antracita	18,23	23,16	25,99	-
Antracita CoG	10,73	23,16	20,22	-34,10
Biogas	26,72	38,40	-	-
Biomasa	26,72	23,36	-	-
Eólica M (1 - 3MW)	27,22	-	-	-
Eólica T (< 1MW)	18,48	-	-	-
Eólica T (> 3MW)	15,33	-	-	-
Eólica T (1 - 3MW)	15,33	-	-	-
Gas Natural CC	7,27	28,00	10,96	-
Gas Natural CoG CC	7,74	28,00	10,54	-34,10
Gas Natural CoG Conv.	7,74	28,00	15,02	-34,10
Gas Natural Conv.	7,27	28,00	16,06	-
Geotermia	21,57	-	-	-
Hidro - Bombeo	7,40	-	-	-
Hidro - fluyente	14,60	-	-	-
Hidro - reserva alpina	15,76	-	-	-
Hidro - reserva no alpina	15,76	-	-	-
Lignito	18,23	6,51	34,36	-
Lignito CoG	10,73	6,51	33,5	-34,10
Nuclear BWR	15,00	9,33	-	-
Nuclear PWR	15,00	9,33	-	-
Petróleo	26,72	48,40	22,79	-
Petróleo CoG	28,32	48,40	18,41	-34,10
Residuos	16,92	9,34	-	-
Solar Autoc.	18,78	-	-	-
Solar PFV	5,84	-	-	-
Termosolar	14,87	-	-	-

Tabla 58: Costes variables por tecnología [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]

Como se observa en la **Tabla 57**, en lo referente a la operación y mantenimiento, no se observan unas diferencias muy notables entre las distintas tecnologías, si bien es cierto que la solar fotovoltaica es la que mejor precio presenta, con un precio de 5,84€/MWh,

la tecnología más cara en esta partida es la cogeneración con petróleo con un precio de 28,32€/MWh.

Por otro lado, en las partidas de combustible y penalización por emisiones de CO₂ si que se observan diferencias muy grandes entre las tecnologías. Mientras que la mayoría de las energías renovables no presentan ningún coste en estas partidas, a excepción de la biomasa y el biogás, en el caso de las tecnologías de generación convencionales estos inputs aumentan su LCOE.

Así pues, el coste nivelado de la energía para cada una de las tecnologías en el año 2019 es el siguiente:

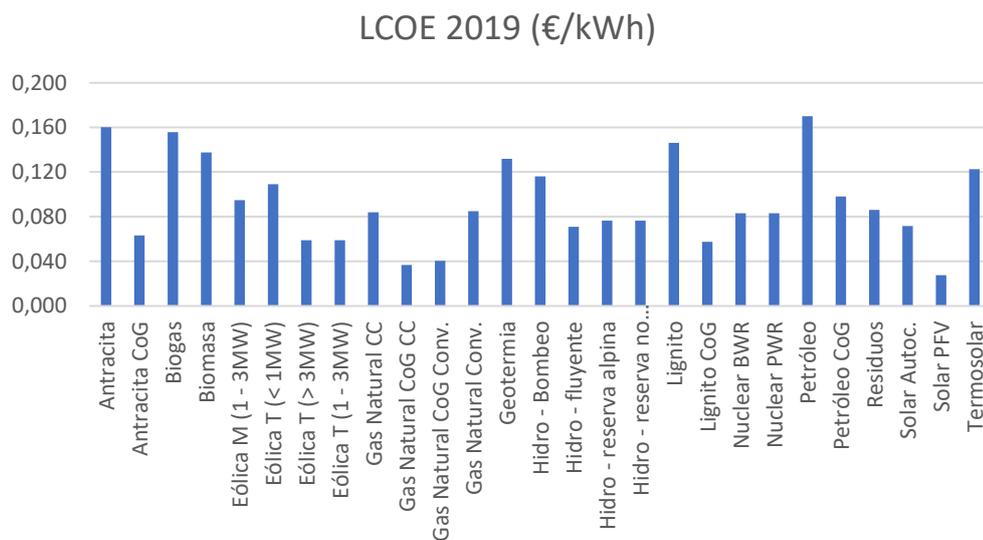


Figura 11: LCOE por tecnología en 2019

Como se puede observar en la **figura 11** según la tecnología el coste de la energía varía. Resalta como el petróleo es la tecnología con mayor LCOE, siendo esta una de las razones por las que se está desmantelando esta tecnología, y la energía solar fotovoltaica la más barata, seguido muy de cerca por las centrales de gas natural con cogeneración.

En lo referente a las centrales de carbón, se observa como la antracita tiene un precio ligeramente mayor que el lignito pese a que el coste de las emisiones por CO₂ del lignito son mayores, el elevado coste de la antracita termina empujando el coste de la tecnología un 10% por encima. Al incluir la cogeneración a estas tecnologías el coste de la energía se reduce notablemente (en casi 10 €/MWh), sin embargo, ocurre lo mismo que en las otras tecnologías, la antracita es ligeramente más cara que el lignito. Por otro lado, se observa como el precio del petróleo no es competitivo dentro de las tecnologías convencionales, debido al coste del carburante, además, al incluir cogeneración a esta tecnología el precio mejora, pero sigue lejos de los valores observados en la antracita y el lignito.

Dentro de las tecnologías convencionales, la que mejor precio alcanza es el gas natural, particularmente aquellas con cogeneración. Entre el ciclo combinado y las centrales

convencionales no se observan apenas diferencias, siendo el LCOE del ciclo combinado 0,85€/kWh mientras que el de las centrales convencionales 0,84€/kWh. Es importante destacar como tanto en las centrales de gas como en las de carbón y petróleo la cogeneración mejora de una manera muy importante el LCOE de la tecnología base, esto se debe al crédito por la producción de calor, que disminuye los costes de las tecnologías de cogeneración en 34,1€/MWh.

En lo referente a las tecnologías renovables, destaca la elevada volatilidad de precios entre las tecnologías, el biogás es la que mayor LCOE presenta seguida por la biomasa, esto se debe a que son las únicas tecnologías renovables que deben adquirir materia prima para poder funcionar. Por otro lado, la falta de estudio y los elevados costes de la geotermia y la termosolar las hacen tecnologías poco competitivas en términos económicos, además, a diferencia del biogás y la biomasa, estas tecnologías no son regulables.

Por el otro lado se pueden observar las tecnologías más asentadas en el mercado y con mayor estudio. En primer lugar, la tecnología hidráulica presenta un LCOE muy similar independientemente del emplazamiento, es relevante ver como el bombeo dispara el coste de la energía de esta tecnología, debido al bajo factor de capacidad, sin embargo, presenta la enorme ventaja de ser 100% gestionable. Por el contrario, las centrales hidráulicas de reserva se postulan como una solución mucho más económica que el biogás o la biomasa (las otras tecnologías gestionables) al poder turbinar agua cuando se desee. Por último, las minihidros o hidráulicas de agua fluyente presentan un LCOE ligeramente inferior a las centrales de reserva, sin embargo, no son gestionables.

La tecnología eólica presenta costes muy diferentes dependiendo del tamaño de la turbina. En este caso, las economías de escala son el factor determinante del LCOE, para las emplazadas en tierra, el coste de inversión de las turbinas inferiores a 1MW es tan elevado que lleva el coste a niveles similares de tecnología marina. Debido a las economías de escala en la construcción (torre, maquinaria eléctrica, palas...) el CAPEX de las turbinas superiores a 1MW es mucho menor. Por otro lado, la tecnología marina es un tipo de tecnología que, a día de hoy, sigue siendo experimental pese a existir ciertos parques offshore. El principal problema de esta tecnología es el desarrollo de la tecnología flotante para aguas más profundas y el coste de O&M, ya que los trabajos son mucho más complicados que en la tecnología terrestre.

Por último, al igual que ocurre con la tecnología eólica, en el caso de la solar fotovoltaica las economías de escala son clave para poder reducir el coste de la energía. Como se puede observar, el LCOE de la tecnología a gran escala es mucho menor que el autoconsumo, principalmente por las razones recién explicadas. Además, cabe destacar que el desarrollo de esta tecnología en los últimos años ha sido gigante llegando a ser la más económica de todas las estudiadas.

8.2. LCOE por país 2019

Una vez estudiados los costes de la energía para cada una de las diferentes tecnologías, es necesario comparar el coste de los mixes en cada país de estudio, cabe resaltar que este análisis se trata de una estimación ya que, hasta ahora, el precio queda marcado por la última tecnología que entra al mix en cada momento. Así pues, el resultado obtenido es el siguiente:

País	LCOE 2019 (€/kWh)
Italia	0,063
Republica Checa	0,079
Austria	0,075
Grecia	0,088
Portugal	0,086
México	0,097
Chile	0,109
Sudáfrica	0,151
Egipto	0,095

Tabla 59: LCOE 2019 por país

Se observa en la **tabla 58** la gran diferencia entre países europeos y no europeos, ninguno de los primeros alcanza los 0,090€/kWh mientras que el LCOE de los países latinoamericanos y africanos ninguno desciende de los 0,095€/kWh.

Italia es el país de todos que menor LCOE presenta, esto se debe a la poca presencia de tecnologías caras dentro de su mix. Con predominancia de ciclos combinados en cuanto a las tecnologías convencionales y solar fotovoltaica, hidráulica y eólica en cuanto a tecnologías renovables. Entre los países europeos destaca el caso de Grecia, con el mayor LCOE entre los países europeos. Esto coste de la energía se debe a la gran presencia de las tecnologías convencionales en su mix, entre ellas el petróleo, la peor tecnología económicamente hablando.

Sudáfrica es el país que presenta el mayor coste por kWh, no solo del continente africano sino de todos los países de estudio. Debido a que más del 90% de su mix es convencional y siendo el carbón la tecnología predominante, abarcando un 88%, el coste del kWh acaba en 0,151€. Egipto, por el contrario, es el que menor coste presenta de los países no europeos, pese a que las tecnologías renovables no alcanzan ni un 20% del mix, la generación se basa en gas natural en lugar de carbón como en Sudáfrica.

Por último, los países americanos se sitúan entre Sudáfrica y Egipto, siendo Chile el que mayor LCOE presenta debido, de nuevo a las tecnologías basadas en carbón y petróleo. Cabe destacar, que estos países con elevados costes por kWh son aquellos que mayor margen de mejora presentan y que mejorarán de una manera más notable en el año 2030. A continuación, se muestra una gráfica donde se pueden comparar los resultados de una manera más visual:

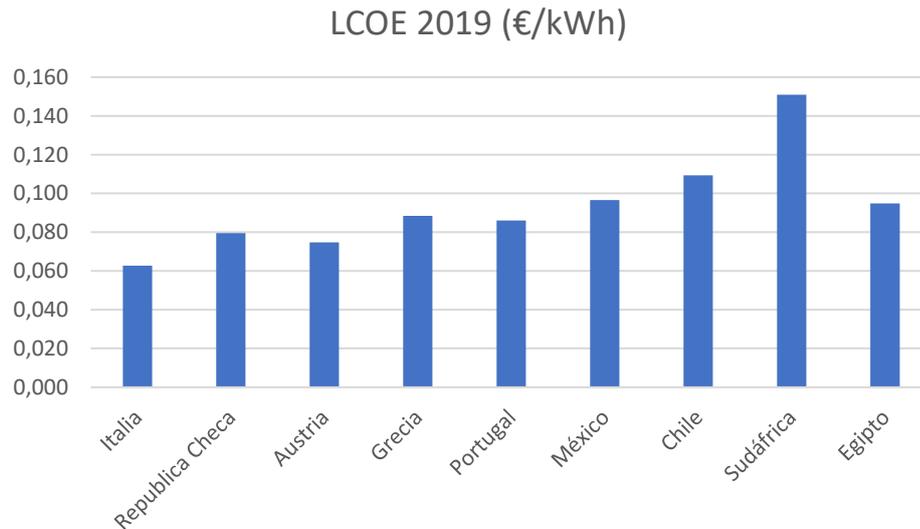


Figura 12: LCOE 2019 por país

8.3. LCOE por tecnología 2030

Como se ha visto a comienzo de este capítulo, el cálculo del LCOE depende de un gran número de factores, así pues, resulta de gran complejidad estimar varios de estos parámetros en el año 2030. Por ejemplo, el mercado de las labores de O&M no se puede estimar de una manera precisa al igual que el coste de combustible⁷.

Por otro lado, el coste de las emisiones de CO₂ si que se puede estimar, pese a que existen muchos estudios con valores muy distintos. Un estudio realizado por la *International Emissions Trading Association (IETA)* [69] indican que el precio en el año 2030 rondará los \$57 por tonelada (53,25€/tCO₂), por otro lado, el *ICIS* una compañía de análisis de mercados de commodities estimó un precio de 90€/tCO₂ [70]. Por último, *Argus Media*, una empresa dedicada a servicios de información de precios de materias primas, consultoría... estimó que es necesario que el precio del CO₂ se sitúe en \$75 por tonelada de CO₂ (70,07€/tCO₂) para poder alcanzar los objetivos de reducción de emisiones acordados en el *Acuerdo de París*. Así pues, dado que este es un valor intermedio será el que se tome para la realización de los cálculos.

El coste de las emisiones será el único parámetro que variará en el cálculo del LCOE de las tecnologías convencionales. Para el resto de tecnología, la metodología a aplicar será en función del aprendizaje de la tecnología. El denominado *Tasa de Aprendizaje* es la formulación más común por a que los costes disminuyen en un porcentaje constante por cada duplicación de experiencia, es decir, cada dos años [71]. De esta manera, la ecuación para determinar el LCOE por tecnología en el año 2030 es la siguiente:

⁷ Existen fuentes similares a OMIE, pero debido a la elevada volatilidad de estos años se ha decidido tomar como constante desde el año 2019.

$$LCOE_{2030} = LCOE_{2019} \cdot \left(\frac{Capacidad\ instalada_{2030}}{Capacidad\ instalada_{2019}} \right)^\varepsilon$$

Ecuación 7: Cálculo LCOE 2030

Donde:

- ε : experiencia

Este parámetro ε , denominado experiencia, se calcula de la siguiente manera:

$$LR = 1 - 2^\varepsilon$$

Ecuación 8: Tasa de Aprendizaje

Esta metodología para calcular el LCOE será la empleada para las tecnologías renovables ya que actualmente la mayoría de nuevos proyectos son de estas tecnologías. Las centrales de carbón, gas natural, petróleo... como se ha comentado anteriormente, se modificará el coste de las emisiones ya que no hay proyectos de nueva construcción de estas tecnologías, sino de desmantelamiento. Así pues, en la siguiente tabla se muestran las *tasas de aprendizaje* de las distintas tecnologías:

Tecnología	LR
Biogas	8,00%
Biomasa	8,00%
Eólica M (1 - 3MW)	16,00%
Eólica T (< 1MW)	7,00%
Eólica T (> 3MW)	7,00%
Eólica T (1 - 3MW)	7,00%
Geotermia	22,00%
Hidro - Bombeo	2,63%
Hidro - fluyente	2,63%
Hidro - reserva alpina	2,63%
Hidro - reserva no alpina	2,63%
Solar Autoc.	23,00%
Solar PFV	23,00%
Termosolar	2,00%

Tabla 60: Tasa de aprendizaje por tecnología [72] [73]

Debido a la falta de información, se ha supuesto que el biogás y la biomasa cuentan con la misma *tasa de aprendizaje*, al igual que la eólica terrestre y las tecnologías hidráulicas. Una vez obtenidos estos datos, es necesario conocer la capacidad instalada en 2019 y 2030 de cada una de estas tecnologías. En la siguiente tabla se muestra dicha información:

Tecnología	CI 2019 (GW)	CI 2030 (GW)
Biogas	20,2	47
Biomasa	139	306
Eólica M (1 - 3MW)	23	228
Eólica T (< 1MW)	542	1787
Eólica T (> 3MW)	542	1787
Eólica T (1 - 3MW)	542	1787
Geotermia	25	67
Hidro - Bombeo	225	306
Hidro - fluyente	1175	1626
Hidro - reserva alpina	1175	1626
Hidro - reserva no alpina	1175	1626
Solar Autoc.	0,49	9
Solar PFV	633,7	3000
Termosolar	15	83

Tabla 61: Capacidad mundial instalada en 2019 vs 2030 [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80]

Para la obtención de esta información se han tenido que tomar una serie de suposiciones debido a la falta de información. En primer lugar, para obtener la información del biogás se ha extrapolado el crecimiento de los años 2010 – 2016. Estos datos se han obtenido de *“Biogas: Developments and perspectives in Europe”* [74]. Se ha mantenido un crecimiento promedio de dichos años de un 8% hasta el 2030.

Por otro lado, debido a la enorme dificultad para encontrar diferencias por potencias en la tecnología eólica terrestre se ha supuesto la misma potencia para todas ellas, de manera que esto no modifica el precio del LCOE en años futuros, tal y como se venía haciendo con anterioridad.

Por último, en lo referente a la tecnología hidráulica, no se ha conseguido encontrar distinción entre reserva alpina, no alpina y fluyente, es por ello que, de manera similar a lo comentado con la tecnología eólica terrestre, se ha supuesto el mismo incremento en todas ellas.

Una vez explicados los supuestos tomados, resultan de gran interés destacar algunos aspectos de la tabla. Por una parte, destaca el gran salto de capacidad instalada en la tecnología solar, tanto a gran escala como en autoconsumo. De manera similar ocurre con la tecnología eólica tanto la eólica marina como la terrestre muestran un gran desarrollo en cuanto a potencia instalada, mostrando, una vez más que son las tecnologías renovables con mejores resultados y es por ello que la potencia instalada aumenta de manera tan notable.

Un escenario muy distinto es el que presenta la tecnología hidráulica, tanto de reserva como fluyente y bombeo. Principalmente, debido a la necesidad de emplazamientos muy específicos son las tecnologías que menor crecimiento presentan de cara al año 2030. Además, esta tecnología fue de las primeras que se comenzó a explotar, datando de 1882 la primera de ellas, en Wisconsin [81].

Para el resto de las tecnologías se observa un crecimiento moderado, siendo la capacidad instalada en 2030 entre 2 y 4 veces la observada en el año 2019. La falta de

desarrollo y conocimiento, traducido en sobrecostes son las principales causas de estos resultados.

Así pues, el LCOE obtenido para cada una de las tecnologías para el año 2030 es el siguiente:

Tecnología	LR	Experiencia	CI 2019	CI 2030	LCOE 2030 (€/kWh)
Antracita	-	-	-	-	0,248
Antracita CoG	-	-	-	-	0,162
Biogas	8,0%	-0,12	20,20	47,00	0,141
Biomasa	8,0%	-0,12	139,00	306,00	0,125
Eólica M (1 - 3MW)	16,0%	-0,25	23,00	228,00	0,053
Eólica T (< 1MW)	7,0%	-0,10	542,00	1787,00	0,096
Eólica T (> 3MW)	7,0%	-0,10	542,00	1787,00	0,052
Eólica T (1 - 3MW)	7,0%	-0,10	542,00	1787,00	0,052
Gas Natural CC	-	-	-	-	0,114
Gas Natural CoG CC	-	-	-	-	0,075
Gas Natural CoG Conv.	-	-	-	-	0,079
Gas Natural Conv.	-	-	-	-	0,126
Geotermia	22,0%	-0,36	25,00	67,00	0,093
Hidro - Bombeo	2,6%	-0,04	225,00	306,00	0,115
Hidro - fluyente	2,6%	-0,04	1175,00	1626,00	0,070
Hidro - reserva alpina	2,6%	-0,04	1175,00	1626,00	0,075
Hidro - reserva no alpina	2,6%	-0,04	1175,00	1626,00	0,075
Lignito	-	-	-	-	0,240
Lignito CoG	-	-	-	-	0,139
Nuclear BWR	-	-	-	-	0,083
Nuclear PWR	-	-	-	-	0,083
Petróleo	-	-	-	-	0,229
Petróleo CoG	-	-	-	-	0,146
Residuos	-	-	-	-	0,086
Solar Autoc.	23,0%	-0,38	0,49	9,00	0,024
Solar PFV	23,0%	-0,38	633,70	3000,00	0,015
Termosolar	2,0%	-0,03	15,00	83,00	0,117

Tabla 62: LCOE por tecnología en 2030

Como era de esperar, las tecnologías convencionales vuelven a presentar los costes más elevados, siendo las tecnologías con carbón las que lideran este grupo. De nuevo, las tecnologías con cogeneración presentan un coste notablemente inferior a las tecnologías “base”, sin embargo, con los bajos costes alcanzados por las tecnologías renovable pierden una cuota de mercado considerable. Entre todas las tecnologías convencionales, la energía nuclear (que no ha sufrido variación ente ambos años debido a que se ha supuesto un coste de combustible constante) y las tecnologías de gas natural son las que mejores resultados arrojan.

En cuanto a las tecnologías renovables, se observa como el biogás y la biomasa alcanzan costes competitivos en comparación con otras tecnologías renovables. La tecnología hidráulica se mantiene en una posición estable mientras que las tecnologías eólica y solar presentan los mejores resultados. Cabe destacar el elevado aprendizaje/experiencia esperada en la tecnología solar que le permite desmarcarse como la tecnología con menores costes, tanto en la instalación a gran escala como en el autoconsumo, donde no se consiguen economías de escala.

Por último, cabe destacar como la tecnología termosolar se sitúa en costes peores a los ciclos de gas natural, pese a que se espera un desarrollo en esta tecnología.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de una manera más visual:

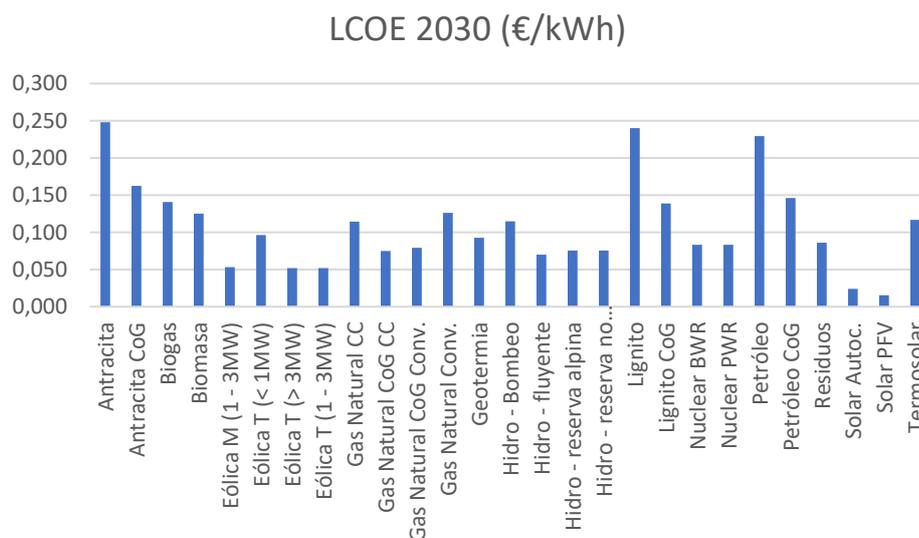


Figura 13: LCOE por tecnología en 2030

Una vez analizados los costes de cada una de las tecnologías en el año 2030, se muestra una tabla comparativa de los costes nivelados de la energía en el año 2019 y en el año 2030:

Tecnología	LCOE 2019 (€/kWh)	LCOE 2030 (€/kWh)	Δ
Antracita	0,160	0,248	35%
Antracita CoG	0,063	0,162	61%
Biogas	0,156	0,141	-11%
Biomasa	0,138	0,125	-10%
Eólica M (1 - 3MW)	0,095	0,053	-78%
Eólica T (< 1MW)	0,109	0,096	-13%
Eólica T (> 3MW)	0,059	0,052	-13%
Eólica T (1 - 3MW)	0,059	0,052	-13%
Gas Natural CC	0,084	0,114	27%
Gas Natural CoG CC	0,037	0,075	51%
Gas Natural CoG Conv.	0,040	0,079	49%
Gas Natural Conv.	0,085	0,126	33%
Geotermia	0,132	0,093	-42%
Hidro - Bombeo	0,116	0,115	-1%
Hidro - fluyente	0,071	0,070	-1%
Hidro - reserva alpina	0,076	0,075	-1%
Hidro - reserva no alpina	0,076	0,075	-1%
Lignito	0,146	0,240	39%
Lignito CoG	0,057	0,139	59%
Nuclear BWR	0,083	0,083	0%
Nuclear PWR	0,083	0,083	0%
Petróleo	0,170	0,229	26%
Petróleo CoG	0,098	0,146	33%
Residuos	0,086	0,086	0%
Solar Autoc.	0,072	0,024	-200%
Solar PFV	0,027	0,015	-80%
Termosolar	0,123	0,117	-5%

Tabla 63: Comparativa LCOE de cada tecnología en 2019 - 2030

Comparando los costes de la energía de ambos años destaca la enorme evolución de las tecnologías solar fotovoltaica, llegando a una reducción del 200% en el caso del autoconsumo. Esto se debe a que esta tecnología se favorece de los avances tecnológicos y de un gran desarrollo, existiendo cada vez más soluciones en el mercado.

Por otro lado, la eólica marina muestra, al igual que la tecnología solar fotovoltaica a gran escala una notable reducción de costes, esto se debe a que se espera que esta tecnología abarate sus costes en un futuro, disparando así la construcción de parques eólicos flotantes. Además, se estima que los aerogeneradores presenten mejoras y desarrollos como se puede observar en las líneas de la eólica terrestre, con una mejora del 13% respecto al año 2019.

Por último, resulta de gran interés resaltar el elevado desarrollo de la tecnología geotérmica, alcanzando unos costes un 42% inferiores en el año 2030. Esto lleva a pensar que es una tecnología con gran potencial que, a día de hoy, se encuentra muy poco estudiada y no se consiguen costes competitivos. Un caso muy distinto es el que plantean las tecnologías hidráulicas que, debido en parte a la necesidad de emplazamientos, de los cuales muchos ya están ocupados y al elevado impacto medioambiental que presenta (limita y ralentiza mucho los proyectos) únicamente presenta un abaratamiento del coste del 1%, sin embargo, se sigue manteniendo como una tecnología competitiva en comparación con otras.

En lo referente las tecnologías convencionales, como era de esperar todas presentan un incremento en el coste nivelado de la energía bastante similar, entre el 30% y el 60%, siendo las tecnologías de carbón, como ya se ha comentado anteriormente la que mayor coste presentan en el año 2030.

8.4. LCOE por país 2030

Una vez analizado el coste nivelado de la energía en el año 2030 para las diferentes tecnologías, es necesario analizar cómo queda el LCOE de cada uno de los mixes propuestos para este año. El LCOE para cada uno de los escenarios es el siguiente:

País	Escenario	LCOE 2030 (€/kWh)
Italia	PNIEC	0,068
Republica Checa	PNIEC	0,109
	CEPS	0,097
Austria	WEM	0,078
	WAM	0,070
Grecia	Obj. Archiv	0,077
Portugal	WEM	0,058
México	Ref. Case	0,117
	Remap	0,094
Chile	Esc. Base	0,090
	Descarbon	0,059
Sudáfrica	Ref. Case	0,166
	Remap	0,145
Egipto	Ref. Case	0,113
	Remap	0,089

Tabla 64: LCOE escenarios 2030

A diferencia de lo observado en el año 2019, en este caso los valores obtenidos son mucho más parejos entre los países europeos y no europeos, exceptuando el caso de Sudáfrica que sigue siendo el país con mayor margen de mejora en este aspecto, debido a la importancia del carbón en su mix de generación.

En lo referente a los países europeos, Portugal destaca como el país con menor coste nivelado de la energía, alcanzando un coste de 0,058€/kWh. Italia, Austria y Grecia muestran costes en torno a los 0,07€/kWh para todos sus escenarios, mientras que la Republica Checa se sitúa como el peor país europeo en términos económicos en cada uno de sus dos escenarios.

Por otro lado, en los países no europeos se observan resultados muy favorables (a excepción de Sudáfrica) en los escenarios más “agresivos” como los Remap en el caso de México y Egipto y *Ruta hacia la descarbonización* en el caso de Chile. En estos escenarios se alcanzan costes parejos a los países europeos. A continuación, se muestra una gráfica para poder comparar los diferentes mixes de una manera más visual:

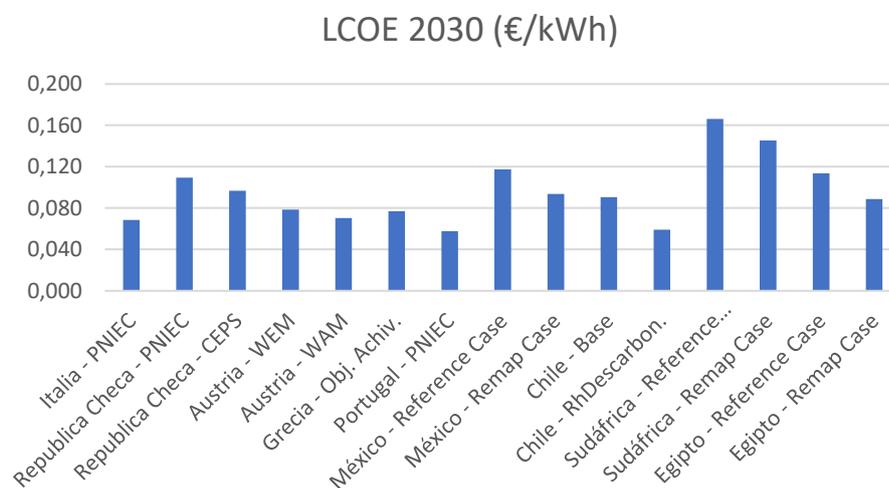


Figura 14: LCOE por escenario en 2030

Además de comparar los mixes entre sí, resulta de gran interés comparar la evolución del LCOE de cada uno de los países entre los años 2019 y 2030, así pues, el resultado es el siguiente:

País	Escenario	LCOE 2019 (€/kWh)	LCOE 2030 (€/kWh)	Δ
Italia	PNIEC	0,063	0,068	8,98%
Republica Checa	PNIEC	0,079	0,109	37,50%
	CEPS		0,097	21,61%
Austria	WEM	0,075	0,078	4,96%
	WAM		0,070	-5,93%
Grecia	Obj. Achiv	0,088	0,077	-12,97%
Portugal	WEM	0,086	0,058	-34,85%
México	Ref. Case	0,097	0,117	21,55%
	Remap		0,094	-3,12%
Chile	Esc. Base	0,109	0,090	-17,27%
	Descarbon		0,059	-46,06%
Sudáfrica	Ref. Case	0,151	0,166	9,98%
	Remap		0,145	-3,80%
Egipto	Ref. Case	0,095	0,113	19,64%
	Remap		0,089	-6,51%

Tabla 65: Comparativa LCOE de los países

Como se puede observar, los resultados obtenidos son muy variados, siendo en algunos países el coste de la energía mayor en 2019 y en otros con un coste mayor en 2030. Es muy interesante analizar estos resultados ya que, al comienzo de este trabajo se partía con la suposición de que el coste de la energía debía disminuir debido a la integración de energías renovables en los mixes.

Se observa como en los escenarios base el LCOE sube debido, principalmente al incremento que sufren las tecnologías emisoras de CO₂. De acuerdo con esto escenarios

el país que mayor coste presentaría es la República Checa, que cabe recordar, no planteaba una fuerte integración de energías renovables. Cabe destacar como en los escenarios más agresivos si que se consiguen mejores resultados, siendo Chile (*Ruta hacia la descarbonización*) y Portugal los países con mejores resultados. Es necesario resaltar como esta mejora viene, fundamentalmente por la fuerte integración de tecnología solar.

9. Análisis multicriterio e Interpretación de los resultados

Una vez realizados los análisis es necesario realizar un análisis multicriterio para poder realizar una comparativa entre los mixes energéticos de los países y determinar cuál de todos es el mejor y cuál es el que mayor margen de mejora presenta. Además, mediante este análisis se podrán observar las diferencias en relación al desarrollo de los países y poder determinar si el sector energético está relacionado con el Índice de Desarrollo Humano.

Para poder realizar el análisis multicriterio se ha seguido la metodología AHP, *Analytic Hierarchy Process*. Esta metodología ayuda a tomar decisiones complejas con varias variables de una manera organizada y estructurada, no obstante, al tratarse de una valoración subjetiva, el resultado puede variar en función de la persona que realice el análisis.

9.1. Importancia de cada categoría de impacto

En primer lugar, a la hora de realizar un análisis multicriterio con la metodología AHP es necesario determinar la importancia de cada una de las categorías de impacto de manera que el peso entre ellas sea distinto. Para las categorías de impacto analizadas el orden de importancia de cada una de ellas es la siguiente⁸:

1. Calentamiento Global
2. LCOE
3. Destrucción de la capa de Ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad de agua marina, Ecotoxicidad terrestre y Acidificación.
4. Agotamiento abiótico, Agotamiento abiótico de combustibles fósiles, Oxidación fotoquímica y Eutrofización.

Como la categoría de impacto de mayor importancia se ha situado el calentamiento global, ya que, es la razón principal de todos los tratados internacionales y que ha llevado a los países a desarrollar los planes integrados de energía y clima. Además, el calentamiento global tiene un enorme impacto para la vida humana y vida animal debido al deshielo y las consecuencias que esto acarrea.

En segundo lugar, se ha situado el coste nivelado de la energía (LCOE) debido a que, si una tecnología no es económicamente viable a gran escala, no se va a emplear. Esta categoría es de gran importancia debido a que la reducción de los costes de la tarifa de

⁸ Se ha decidido agrupar categorías en el mismo nivel para simplificar los cálculos

la luz es, a día de hoy, una de sus prioridades, prueba de ello es la reducción de los impuestos cargados a la energía en España.

En tercer lugar, se han posicionado aquellas características con un impacto directo sobre la vida humana y animal que más nocivas resultan.

Por último, en cuarto lugar, se han situado el resto de las categorías de impacto que presentan, a juicio personal, un impacto menor que el resto.

Así pues, una vez establecido la importancia de cada categoría, es necesario cuantificar la diferencia entre pertenecer al grupo 1 o grupo 3 en la escala de preferencias. Así pues, la calificación para los distintos niveles es la siguiente:

Nivel	Calificación
Mismo nivel	1
1 Nivel por debajo	2
2 niveles por debajo	3
3 niveles por debajo	4

Tabla 66: Calificación según importancia - análisis multicriterio

De esta manera, introduciendo esta calificación a cada una de las categorías de impacto se obtiene una matriz cuadrada de 12 filas y 12 columnas que permite comparar de manera directa las categorías de impacto.

Por un tema de espacio se han empleado los siguientes acrónimos:

- AA: Agotamiento abiótico
- AACF: Agotamiento abiótico de combustibles fósiles
- CG: Calentamiento global
- DCO: Destrucción de la capa de Ozono
- TH: Toxicidad Humana
- EAD: Ecotoxicidad de agua dulce
- EAM: Ecotoxicidad de agua marina
- ET: Ecotoxicidad terrestre
- OF: Oxidación fotoquímica
- A: Acidificación
- E: Eutrofización
- LCOE: Coste nivelado de la energía

El resultado obtenido es el siguiente:

	AA	AACF	CG	DCO	TH	EAD	EAM	ET	OF	A	E	LCOE
AA	1	1	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,33
AACF	1	1	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,33
CG	4	4	1	3	3	3	3	3	4	3	4	2
DCO	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
TH	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
EAD	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
EAM	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
ET	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
OF	1	1	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,33
A	2	2	0,33	1	1	1	1	1	2	1	2	0,5
E	1	1	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,33
LCOE	3	3	0,5	2	2	2	2	2	3	2	3	1

Tabla 67: Matriz comparación de las categorías de impacto

Para obtener el peso de cada una de las categorías estudiadas se ha normalizado la matriz por columnas, por último, se ha realizado el promedio de los valores obtenidos por filas para obtener el peso final de cada una de las categorías de impacto. El resultado obtenido es el siguiente:

	AA	AACF	CG	DCO	TH	EAD	EAM	ET	OF	A	E	LCOE
AA	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
AACF	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
CG	0,17	0,17	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,17	0,23	0,17	0,27
DCO	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
TH	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
EAD	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
EAM	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
ET	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
OF	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
A	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
E	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
LCOE	0,13	0,13	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,13	0,15	0,13	0,14

Tabla 68: Matriz de comparación normalizada de las categorías de impacto

Por último, como se ha comentado anteriormente, realizando el promedio por filas de cada uno de los valores obtenidos se calcula el peso de cada categoría de impacto. El resultado es el siguiente:

	Peso
AA	0,04
AACF	0,04
CG	0,21
DCO	0,08
TH	0,08
EAD	0,08
EAM	0,08
ET	0,08
OF	0,04
A	0,08
E	0,04
LCOE	0,14

Tabla 69: Peso de las categorías de impacto

Como se puede observar, el calentamiento global es la categoría con mayor peso ya que es la que se ha escogido como categoría más importante. En segundo lugar, se encuentra el coste nivelado de la energía, LCOE y así sucesivamente según la importancia que se ha dado a cada una de las categorías al comienzo de este apartado.

Una vez cuantificada la importancia de cada una de las categorías de impacto es posible cuantificar y puntuar los diferentes mixes presentados por los países, tanto para el año 2019 como para los escenarios propuestos en 2030. Para obtener dicha calificación se va a emplear la siguiente ecuación:

$$\text{Calificación mix (\%)} = \sum_{i=1}^i \text{Peso}_n \cdot \text{Impacto normalizado}_n$$

Ecuación 9: Calificación mix [17]

Donde i es el número de categorías de impacto estudiadas, es decir, 12.

Para calcular el impacto normalizado se ha seguido la siguiente ecuación:

$$\text{Impacto normalizado (\%)} = \left(1 - \frac{CI}{\text{Peor CI}}\right) \cdot 100$$

Ecuación 10: Impacto normalizado

Donde:

- CI: resultado de la categoría de impacto del mix estudiado
- Peor CI: peor resultado de todos los mixes estudiados

De esta manera, se obtienen las diferencias entre los distintos mixes, siendo el 0% aquel mix con peor resultado. El resto, puntuaran por encima de este valor siendo el mejor de todos el que mayor puntuación porcentual tenga, es decir, el que mayor distancia

porcentual sobre el 0% presente. Por lo tanto, a mayor resultado, menor impacto y por ello, mejor puntuación.

9.2. Calificaciones de los mixes en el año 2019

Una vez determinados los pesos de las distintas categorías de impacto y la metodología de cálculo que se va a seguir, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En primer lugar, se van a estudiar los casos actuales de los distintos países. Los resultados obtenidos son los siguientes:

	Italia	Rep. Checa	Austria	Grecia	Portugal	México	Chile	Sudáfrica	Egipto
AA	10,12%	11,46%	16,64%	0,00%	12,03%	15,19%	3,03%	16,63%	19,90%
AACF	60,25%	42,81%	84,47%	46,53%	56,22%	53,08%	52,97%	0,00%	43,56%
CG	61,26%	12,79%	85,80%	51,38%	54,12%	56,11%	49,71%	0,00%	53,77%
DCO	39,17%	74,17%	71,93%	0,00%	71,58%	69,21%	68,45%	92,30%	56,00%
TH	75,91%	15,46%	81,98%	46,11%	68,41%	71,81%	53,40%	0,00%	81,42%
EAD	71,70%	0,00%	75,10%	38,90%	66,90%	68,36%	55,91%	15,86%	77,59%
EAM	86,18%	20,70%	92,59%	56,00%	71,67%	84,41%	64,32%	0,00%	95,04%
ET	48,16%	37,76%	50,10%	41,50%	43,03%	47,18%	43,69%	0,00%	48,72%
OF	81,64%	70,63%	95,49%	76,66%	71,76%	86,36%	72,47%	0,00%	83,94%
A	87,52%	74,18%	97,45%	82,87%	74,86%	90,11%	70,70%	0,00%	90,08%
E	91,31%	0,00%	95,68%	54,51%	84,75%	87,99%	72,77%	37,48%	96,74%
LCOE	54,96%	47,34%	50,50%	41,43%	43,01%	36,03%	27,60%	0,00%	37,16%
Total	63,56%	32,31%	75,06%	45,40%	58,59%	61,53%	51,31%	10,86%	62,66%

Tabla 70: Resultados análisis multicriterio caso base

En la tabla 70, la línea de totales corresponde a la media ponderada de los impactos según las ponderaciones indicadas en la tabla 69. Como se puede observar, Sudáfrica es con diferencia el país con mayor margen de mejora presentando los peores resultados en prácticamente todas las categorías de impacto. Estos resultados derivan de la elevada dependencia del mix sudafricano a los combustibles fósiles, superando el 90% de la generación. El carbón es la tecnología predominante en este mix, la tecnología que mayor impacto presenta en casi todas las categorías de impacto. Además, en términos económicos también se posiciona como una de las peores tecnologías.

Republica Checa y Grecia presentan unos malos resultados, ambos por la dependencia a la generación fósil. En el caso de la Republica Checa el 42% de la generación se realiza con carbón, la tecnología que como se ha analizado con anterioridad mayores impactos medioambientales presenta. En el caso de Grecia, el resultado es ligeramente mejor que el de la Republica Checa debido a que el 40% de la generación se realiza con gas natural en lugar de con carbón (aunque esta tecnología también presenta una participación importante, superando el 15%). Esta tecnología, pese a ser convencional, tiene un impacto menor, además, en términos económicos el coste es más bajo que el de otras tecnologías.

Italia, Portugal, México, Chile y Egipto tienen un resultado similar y bastante equilibrado, pese a que presentan márgenes importantes de mejora en categorías como el agotamiento abiótico y el agotamiento abiótico de combustibles fósiles, como la

mayoría de los países. Por el otro lado, estos países presentan unos resultados especialmente buenos en tres categorías de impacto: *Oxidación fotoquímica*, *Acidificación* y *Eutrofización* superando como mínimo el 70% de calificación y alcanzando el 96% como es el caso de Egipto.

Pese a que estos resultados puedan llegar a ser sorprendentes, especialmente el de países no europeos, la elevada presencia del gas natural como principal fuente de generación fósil, y la notable generación con tecnologías renovables, especialmente hidráulica (excepto hidráulica con bombeo) han llevado a estos mixes a presentar resultados notablemente mejores que otros países europeos con mayor nivel de desarrollo, de acuerdo al Índice de Desarrollo Humano.

Por último, Austria es el país con mejor mix actualmente, alcanzando una calificación de 75%. Además, presenta unos resultados superiores al 70% en casi todas las categorías de impacto estudiadas, a excepción del agotamiento abiótico, la ecotoxicidad terrestre y el LCOE. Estos resultados tan positivos se deben principalmente a la generación hidráulica, que supone un 60% de la generación anual y a un bajo empleo de tecnologías fósiles muy contaminantes como el carbón, que supone únicamente el 2%. En su lugar se emplea el gas natural de manera que el impacto es mucho menor.

9.3. Calificaciones de los mixes en el año 2030

Una vez analizada la situación actual de cada uno de los países, resulta de gran interés estudiar la situación propuesta en el año 2030, de manera que se pueda observar si se han conseguido mejoras o por el contrario se ha retrocedido con respecto al año 2019. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

	Italia	Republica Checa		Austria		Grecia	Portugal
	PNIEC	PNIEC	CEPS	WEM	WAM	Obj. Achiv	PNIEC
AA	39,93%	49,16%	49,18%	51,19%	44,31%	36,85%	37,90%
AACF	47,82%	41,20%	54,45%	80,15%	83,17%	65,66%	46,84%
CG	49,54%	5,16%	26,17%	82,09%	84,40%	69,69%	44,88%
DCO	18,84%	82,72%	87,39%	61,47%	68,01%	0,00%	63,07%
TH	65,23%	4,34%	20,20%	74,92%	72,80%	70,51%	57,21%
EAD	64,50%	0,00%	16,21%	69,82%	68,28%	66,84%	59,83%
EAM	79,75%	8,07%	26,93%	89,87%	89,13%	89,58%	63,78%
ET	37,81%	26,35%	29,20%	37,41%	38,57%	39,53%	34,09%
OF	75,23%	66,00%	73,24%	92,82%	93,18%	88,60%	65,26%
A	83,12%	69,43%	76,05%	96,03%	96,14%	93,68%	69,29%
E	89,88%	0,00%	22,19%	94,82%	95,07%	96,35%	84,02%
LCOE	58,84%	34,16%	41,77%	52,75%	57,65%	53,65%	65,30%
Total	57,28%	27,65%	40,20%	72,56%	73,88%	63,20%	56,24%

Tabla 71: Resultados análisis multicriterio escenarios 2030(1/2)

	México		Chile		Sudáfrica		Egipto	
	Reference	Remap	Base	RhD	Reference	Remap	Reference	Remap
AA	51,41%	46,21%	8,99%	0,00%	42,76%	41,54%	49,72%	39,67%
AACF	26,49%	56,26%	73,57%	86,70%	0,00%	19,71%	28,81%	59,91%
CG	32,17%	59,82%	70,78%	85,42%	0,00%	19,25%	41,92%	65,49%
DCO	51,03%	67,00%	88,00%	89,44%	89,31%	90,51%	43,22%	62,94%
TH	60,40%	67,94%	47,60%	54,96%	0,00%	14,14%	72,15%	68,90%
EAD	61,14%	66,54%	50,38%	54,84%	22,12%	30,86%	70,36%	67,92%
EAM	76,17%	85,79%	67,27%	79,30%	0,00%	18,45%	91,68%	90,00%
ET	33,70%	36,71%	38,89%	42,07%	0,00%	7,94%	36,24%	37,94%
OF	78,53%	87,93%	82,81%	90,53%	0,00%	19,86%	79,12%	82,44%
A	84,34%	92,14%	82,49%	91,95%	0,00%	20,13%	87,05%	89,77%
E	84,28%	92,81%	82,64%	91,61%	47,59%	57,79%	95,97%	94,82%
LCOE	29,30%	43,65%	45,54%	64,49%	0,00%	12,53%	31,64%	46,58%
Total	50,27%	63,93%	61,77%	71,47%	12,64%	26,19%	55,92%	65,40%

Tabla 72: Resultados análisis multicriterio escenarios 2030 (2/2)

Entre todos los escenarios propuestos, de nuevo Austria es el país que presenta los mejores resultados, pese a que estos son ligeramente peores al escenario actual, debido a que los mixes propuestos empeoran mucho en la ecotoxicidad terrestre y en la destrucción de la capa de ozono. En 2030, el mix es más equilibrado que en 2019, donde se observaban unas categorías con muy buenos resultados, pero otras con un elevado impacto. Por último, estas diferencias con respecto al escenario actual se deben a la reducción de la participación de tecnologías de generación fósil en el mix.

En tercera posición se encuentra Chile en el escenario *Ruta hacia la descarbonización*. En este escenario, donde se propone una fuerte integración solar al mix se consiguen muy buenos resultados a excepción de en la categoría de agotamiento abiótico, en la que es el peor escenario. Cabe destacar como este escenario presenta uno de los costes de energía más bajos, justo por detrás de Portugal.

Grecia, Chile en su escenario de referencia y México y Egipto en el escenario Remap obtienen unos resultados similares. Grecia es el país con mayor impacto en cuanto a destrucción de capa de ozono, mientras que el resto de los países obtienen un resultado similar en esta categoría. La principal diferencia entre estos escenarios y los dos escenarios propuestos por Austria son en la categoría de impacto de calentamiento global con una diferencia en torno al 15%, además, esta categoría es la que mayor peso presenta. Cabe destacar como Grecia pasa de ser uno de los peores mixes a situarse en una posición intermedia en comparación con el resto de los países, esto se debe a la desaparición del carbón en la generación y a una fuerte integración de las tecnologías solar y eólica on-shore.

Italia, Portugal y los escenarios de referencia de México y Egipto presentan unos resultados similares. Además, todos estos países presentan unos resultados similares a los observados en el año 2019. Analizando cada uno de estos mixes individualmente, se observa como Italia presenta unos resultados muy bajos en cuanto a la destrucción de la capa de ozono, esto se debe a la notable presencia de gas natural y biomasa en el mix. En el caso de Portugal, se estudiaba como en el año 2030 la integración de la tecnología solar iba a pasar de 2% de la generación al 27%, es por ello que es el país que mejor LCOE presenta, debido a que esta tecnología es de las que menor coste presenta. En el caso de los escenarios de referencia de México y Egipto, se observa una notable integración de tecnologías renovables, especialmente eólica, no obstante, debido al crecimiento de la demanda, la dependencia en combustibles fósiles sigue siendo muy elevada por lo que no se consiguen apreciar los beneficios de estas tecnologías.

La Republica Checa es el país europeo que peor resultados presenta en ambos escenarios. Estos resultados se deben principalmente a un elevado impacto en el calentamiento global, que, tal y como se explicaba al comienzo del apartado, es la categoría de impacto con mayor importancia. Actualmente, la Republica Checa presenta un mix con una notable dependencia del carbón, ya que, supone el 42% de su generación. Así pues, en ninguno de los escenarios propuestos se reduce de manera importante este valor, como máximo se reduce hasta un 33% en el propuesto por CEPS. Además, a diferencia de otros países, no se observa una fuerte introducción de energías renovables por lo que, es muy complicado mejorar los resultados sin apostar por estas tecnologías.

Por último, Sudáfrica vuelve a ser el país con peores resultados, sin embargo, consigue mejorar un 16% con respecto al escenario actual en el escenario llamado *Remap*. En ambos escenarios se observa una importante integración de las tecnologías solar y eólica, sin embargo, la fuerte crecida de la demanda imposibilita reducir de una manera importante los impactos medioambientales, en el mejor de los casos se consigue que la generación con carbón se reduzca hasta el 45%.

10. Conclusiones

A la hora de realizar el análisis medioambiental, primero se han estudiado los impactos de cada una de las tecnologías llegando a las siguientes conclusiones:

- El impacto presentado por las tecnologías convencionales es muy superior al impacto presentado por las tecnologías renovables en todas las categorías estudiadas a excepción del agotamiento abiótico.
- La tecnología con más impacto en la mayoría de las categorías es la generación con lignito, aunque la generación con antracita se encuentra próxima en cuanto a impactos. Entre las categorías donde mayor impacto presentan son: la toxicidad humana, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad del agua marina y eutrofización. Además, como se puede observar en la figura 1 el carbón es la que mayor impacto presenta en cuanto al calentamiento global (a excepción de la hidráulica de bombeo cuyo caso se explicará más adelante).

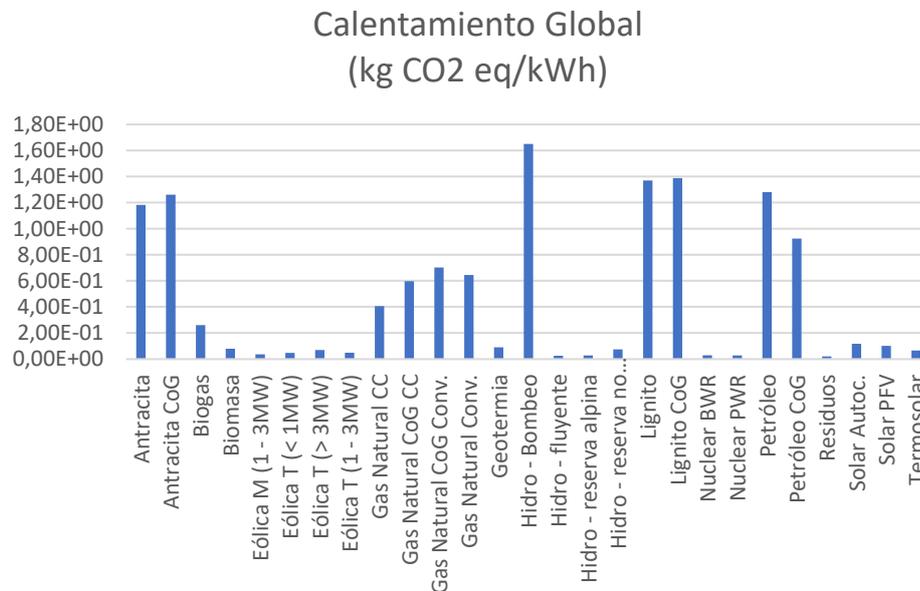


Figura 8: Calentamiento global por tecnología en la generación de 1 kWh en baja tensión

- El petróleo, tras el carbón es la tecnología de generación que presenta los mayores impactos en todas las categorías de impacto, especialmente en la destrucción de la capa de ozono, ecotoxicidad terrestre y oxidación fotoquímica.
- Por último, en lo referente a las tecnologías con combustibles fósiles, el gas natural se postula como la mejor opción entre estas tecnologías debido a una reducción muy importante de los impactos. Sin embargo, estas tecnologías presentan un impacto notorio en la destrucción de la capa de ozono, calentamiento global y agotamiento abiótico de combustibles fósiles.

- La tecnología nuclear, pese a tener una gran cantidad de oposición por parte de la población, se puede observar cómo presenta unos resultados bastante favorables en cuanto a las tecnologías de impacto, especialmente en la eutrofización y el calentamiento global, en comparación con otras tecnologías estudiadas. Sin embargo, esta tecnología presenta un impacto notable en la ecotoxicidad terrestre.
- En lo referente a las tecnologías renovables, la tecnología hidráulica de bombeo es la que mayor impacto presenta. Esto se debe a que no se ha estudiado la fuente de generación que aporta la energía durante la fase de bombeo, en muchas centrales de este tipo se instaló el bombeo fotovoltaico para, entre otras razones, no tener que consumir energía de la red eléctrica. Así pues, esta tecnología presenta unos impactos muy dispares a las otras tecnologías hidráulicas debido a que durante el bombeo se supone que el aporte de energía proviene del resto de tecnologías del mix que la conforman. Por otro lado, las centrales hidráulicas de agua fluyente presentan de los menores impactos en casi todas las categorías. Muy de cerca se encuentran las centrales de reserva alpina y no alpina con unos impactos muy bajos en casi todas las categorías de impacto.
- En cuanto a la tecnología eólica, los resultados obtenidos son muy positivos, especialmente en el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono. Cabe destacar cómo la tecnología eólica de grandes potencias presenta un impacto muy elevado en la categoría de impacto abiótico, debido al tamaño de las turbinas y la cantidad de material que requieren.
- Para la tecnología solar fotovoltaica se observa un caso similar a la eólica, ya que, el impacto es muy bajo en todas las categorías de impacto a excepción del agotamiento abiótico. En el caso de la tecnología solar fotovoltaica estos elevados resultados se deben a la necesidad de silicio para la fabricación de paneles. Por otro lado, la tecnología termosolar presenta impactos inferiores a la tecnología fotovoltaica postulándose como una solución más respetuosa con el medio ambiente.
- Por último, la generación con residuos es la tecnología que menor impacto presenta en todas las categorías de impacto, presentando unos resultados mejores que la tecnología hidráulica. Para el resto de las tecnologías, los impactos son muy parecidos y se sitúan entre la generación fósil y la generación hidráulica.

Una vez analizadas las conclusiones referentes a los impactos medio ambientales de cada una de las tecnologías, se muestran en las figuras 2 y 3 los impactos de cada uno de los escenarios estudiados en la categoría de impacto de potencial de calentamiento global:

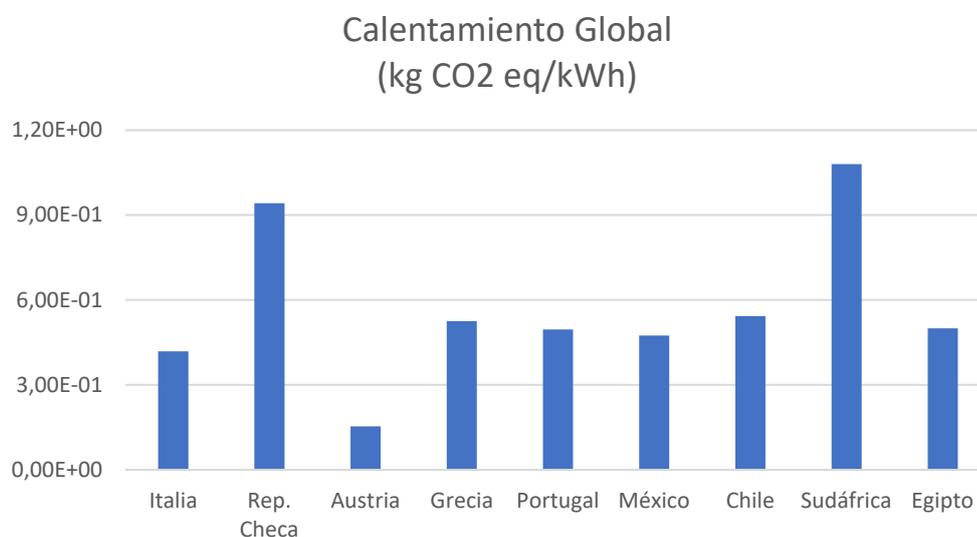


Figura 9: Calentamiento global por mix energético en 2019

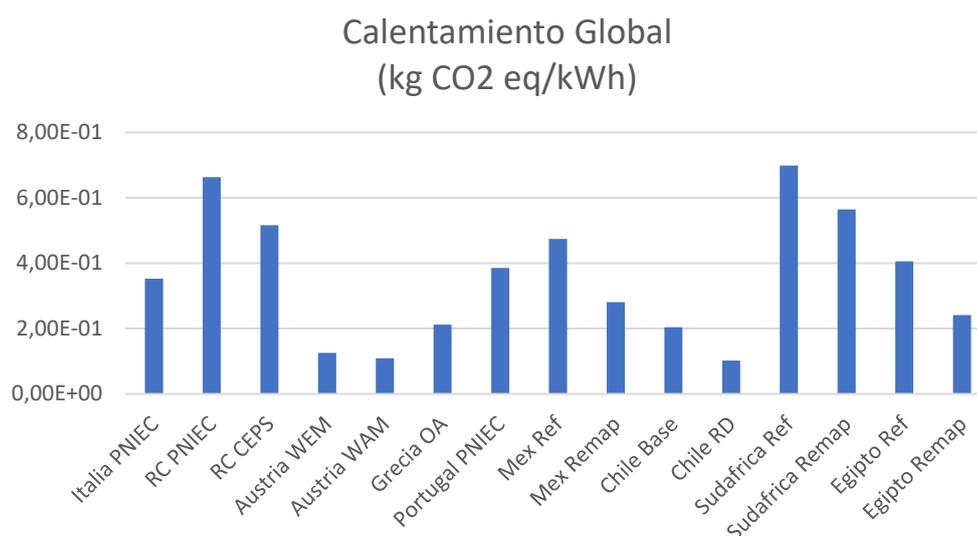


Figura 10: Comparativa de calentamiento global según el escenario en 2030

Las conclusiones extraídas de este análisis son las siguientes:

- Debido a la fuerte dependencia de los combustibles fósiles, la República Checa y Sudáfrica son los países que peores resultados arrojan en el año 2019 para la mayoría de las categorías de impacto, entre ellas el calentamiento global. Esto se debe a la gran presencia del carbón y otras tecnologías fósiles en el mix.
- Grecia, México y Egipto son los países que mayor desarrollo fotovoltaico presentan, es por ello que sus resultados en lo correspondiente al agotamiento abiótico son los peores. No obstante, no presentan malos resultados en el resto de las categorías de impacto.

- Italia y Chile presentan unos resultados medios para casi las categorías analizadas a excepción de la destrucción de la capa de ozono en el caso de Italia debido a la notable presencia del gas natural en su mix. Chile por su lado presenta unos resultados medios, sin destacar en ninguna categoría.
- Por último, Austria es el país con mejor situación actual. Debido a la enorme presencia de tecnología hidráulica en su mix. Este país, presenta los mejores resultados en todas las categorías de impacto ya que, una mínima parte de esta generación se realiza con tecnología hidráulica de bombeo.
- En definitiva, se observa una clara iniciativa por parte de los países por reducir los impactos medioambientales por medio de la introducción al mix de tecnologías menos contaminantes como la solar fotovoltaica y la eólica. No obstante, será necesario esperar hasta el año 2030 para ver si se consigue el objetivo de reducir la temperatura 2°C acordados en el Acuerdo de París.

Tras tratar todos los impactos medioambientales, a continuación, se muestran las conclusiones alcanzadas en lo referente al análisis económico. En la figura 4 se puede observar el coste nivelado para cada una de las tecnologías estudiadas para el año 2019

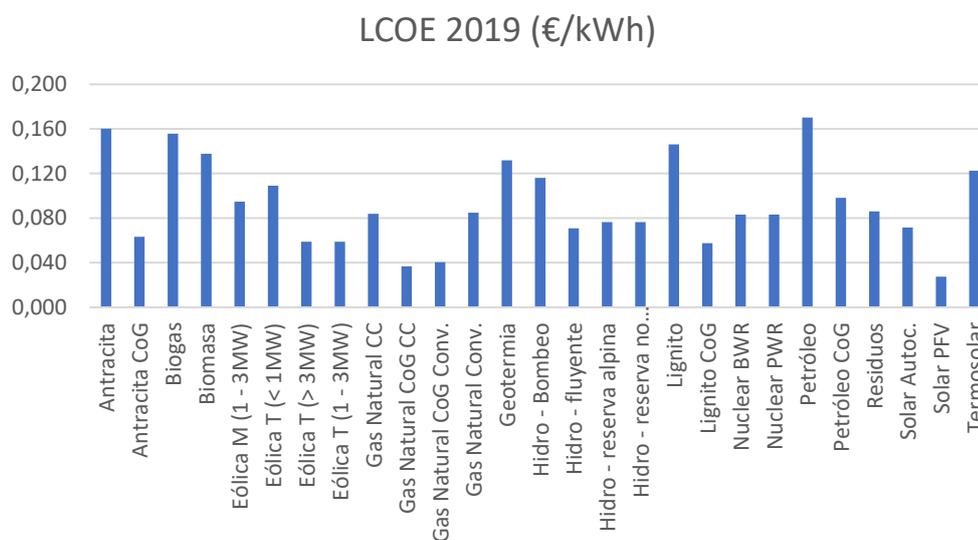


Figura 11: LCOE por tecnología en 2019

Las conclusiones alcanzadas son las siguientes:

- Al contrario de lo ocurrido en el estudio medioambiental, en este caso se observa más similitudes entre tecnologías fósiles y tecnologías renovables.
- Se puede observar cómo el petróleo es la tecnología de generación con mayor coste debido a los bajos factores de capacidad y los elevados costes, tanto fijos como variables.

- La antracita es la segunda tecnología que mayores costes presenta seguida muy de cerca por el biogás, siendo esta última la tecnología de generación renovable más cara debido a los elevados costes de combustible y de mantenimiento.
- Las tecnologías termosolar, hidráulica de bombeo, geotérmica y la biomasa presentan unos costes también elevados lo que les dificulta tener una mayor participación en el mix de generación.
- Las tecnologías eólica, solar y de gas natural son las que mejores costes presentan y por lo tanto las que mayor participación tienen, siempre y cuando exista recurso (en el caso de las renovables).

En el caso de los mixes de los países, como es de esperar, aquellos con mayor dependencia de tecnologías fósiles son los que mayores costes presentarán, como puede observarse en la figura 5:

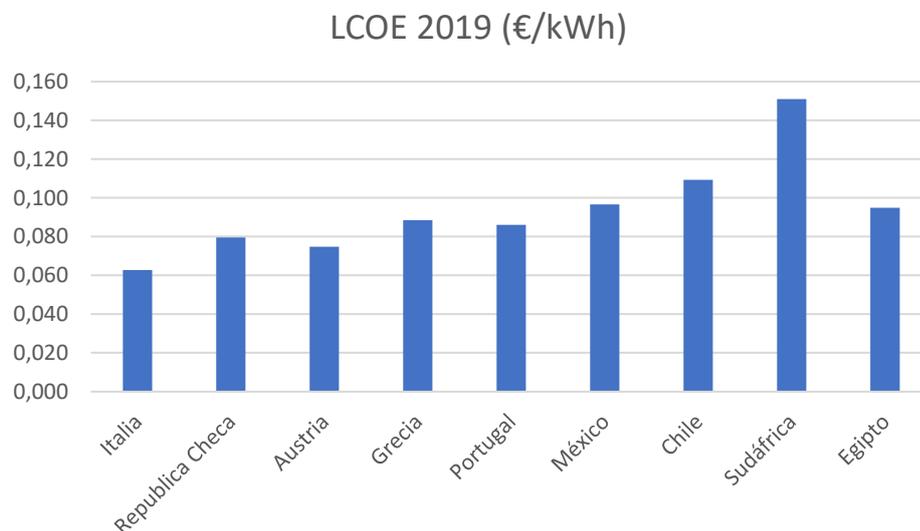


Figura 12: LCOE 2019 por país

- Sudáfrica y Chile son los países con mayor coste nivelado de la energía, seguidos de los otros dos países no europeos, México y Egipto.
- En cuanto a los países europeos el coste es muy similar en todos ellos, no obstante, el de Grecia y Portugal es ligeramente superior al resto.

Hasta la actualidad, el mayor problema que presentan las tecnologías renovables es que son relativamente nuevas y no llevan tantos años de operación como las tecnologías de generación fósil, no obstante, se esperan fuertes reducciones de los costes debido a un mayor desarrollo tecnológico de estas tecnologías. Como se observa en la figura 6, los costes nivelados de la energía en el año 2030 son:

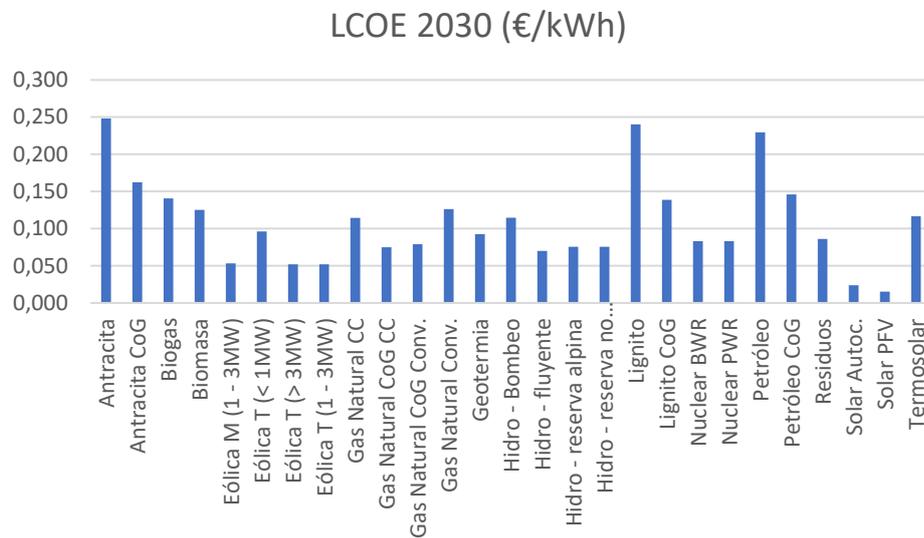


Figura 13: LCOE por tecnología en 2030

- Pese a la reducción de costes, las tecnologías fósiles están muy perjudicadas por los costes de derecho de emisiones de CO₂, siendo esta la razón principal de porque siguen presentando unos costes cada vez menos competitivos, a excepción del gas natural.
- Cabe destacar como, las tecnologías termosolar, geotérmica y biomasa reducen mucho su coste llegando a ser competitivas con el gas natural (que mantiene su posición de líder en lo que a las tecnologías convencionales se refiere).
- El biogás, pese a reducir mucho sus costes, no termina de ser competitivo en el mercado. Por otro lado, la tecnología nuclear mantiene sus costes siendo una tecnología no solo buena en términos medioambientales, sino también en términos económicos.
- Por último, las tecnologías eólica y solar se mantienen como la mejor solución para abaratar el coste de la energía. Cabe destacar cómo la energía solar de autoconsumo reduce mucho sus costes al lograrse economías de escala en el año 2030.

Por último, una vez analizados los costes estimados en el año 2030, en la figura 7 se muestra los costes estimados de cada país en este año:

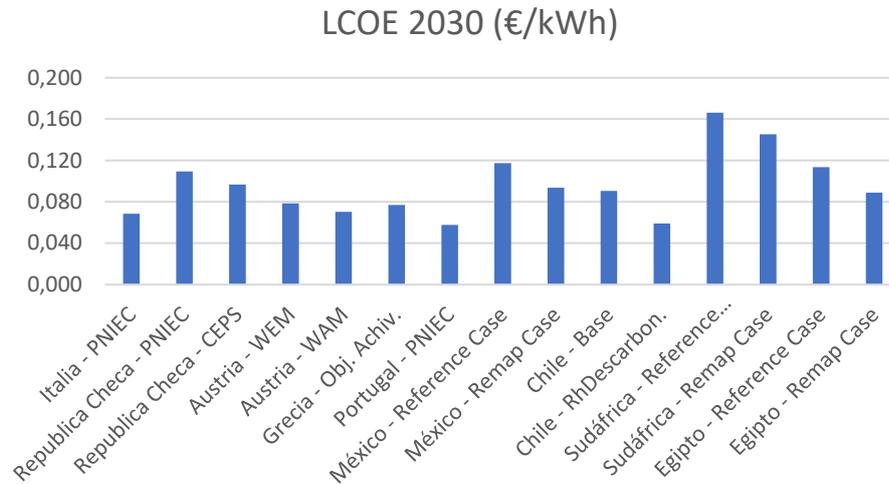


Figura 14: LCOE por escenario en 2030

Una vez más, aquellos países que hayan conseguido disminuir al máximo su dependencia fósil son los que mejores resultados presentan:

- Sudáfrica, es el país que mayor coste por kWh arroja debido a su dependencia del carbón.
- De nuevo, los países no europeos tienen a presentar un mix más caro por kWh en sus escenarios en comparación con los países europeos. No obstante, en el caso de la República Checa, tanto en el PNIEC como en el mix propuesto por el operador de mercado se obtienen unos resultados muy negativos en comparación con el resto de los países europeos.
- Italia, Austria en sus dos escenarios y Portugal son los países europeos con menores costes presentan en el año 2030 debido a una fuerte integración solar en todos ellos, no obstante, Chile en el escenario "Ruta hacia la descarbonización" es el país que mejor resultados presenta debido a la integración de tecnologías renovables.

Por último, en el presente estudio se ha realizado un análisis multicriterio de los mixes en los años 2019 y 2030. La importancia de cada uno de los impactos estudiados, de acuerdo a realizar la ponderación es la siguiente:

1. Calentamiento Global
2. LCOE
3. Destrucción de la capa de Ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad de agua marina, Ecotoxicidad terrestre y Acidificación.
4. Agotamiento abiótico, Agotamiento abiótico de combustibles fósiles, Oxidación fotoquímica y Eutrofización.

Así pues, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Austria presenta los menores impactos medioambientales desde una perspectiva de ciclo de vida , tanto en el año 2019 como en el año 2030 (en cualquiera de sus dos escenarios). Cabe destacar que este país tiene una elevada presencia de tecnología hidráulica que compagina en el año 2030 con una integración solar fotovoltaica y eólica.
- Sudáfrica es el caso contrario de lo ocurrido con Austria, ya que presenta los peores resultados en ambos años y para todos sus escenarios. El gran problema que presenta Sudáfrica es que, pese a conseguir una notable integración de energías renovables en su mix en el año 2030, la demanda eléctrica aumenta en la misma proporción prácticamente por lo que no le es posible disminuir de una manera importante la dependencia de combustibles fósiles. En el caso de la Republica Checa, presenta el peor mix europeo en el año 2030 pese a tener unos buenos resultados en la actualidad.
- El resto de los países presentan unos resultados positivos en ambos años y similares entre ellos, pese a que algunos empeoran con respecto la situación actual como Portugal o Italia y otros mejoran como México y Egipto en sus escenarios REmap, aunque en cualquier caso las diferencias de acuerdo al criterio seguido en este análisis no son muy notables.

10.1. Recomendaciones y Limitaciones

Una vez expuesto todos los puntos relevantes del análisis realizado, a continuación, se proponen una serie de limitaciones del estudio, así como recomendaciones para futuros trabajos.

En primer lugar, este estudio no tiene en cuenta los avances tecnológicos que se van a experimentar, desde una mayor eficiencia hasta la aparición de nuevas tecnologías que todavía no se han asentado en el mercado. Así pues, los valores del año 2030 están realizados en base al desarrollo hasta día de hoy ya que SimaPro no permite incluir estas mejoras. Debido a la dificultad para encontrar y plasmar las mejoras previstas para cada una de las tecnologías, este trabajo no lo incluye, no obstante, si se deseara realizar un estudio más preciso sería recomendable incluirlo.

En segundo lugar, el trabajo se basa en la inexistencia de tecnologías de almacenamiento a gran escala. Pese a que a día de hoy todavía se encuentran en fase de desarrollo y no se han implementado a gran escala, para el año 2030 si que se espera tener algo de potencia instalada. La razón por la que no se han tenido en cuenta estas tecnologías es porque la base de datos Ecoinvent no la tiene modelada. Además, pese a que su implantación es algo esperado por todos, debido a la falta de normativa ninguno de los países incluye baterías u otros sistemas de almacenamiento en los PNIEC.

En tercer lugar, en el cálculo del coste nivelado de la energía se han tomado muchos supuestos de cara al año 2030 debido a la escasez de información. Por ejemplo, la igualdad de costes de la energía nuclear en este periodo temporal. Otro supuesto que se ha tomado es la suposición de costes globales para tecnologías como el carbón o la tecnología hidráulica.

Por último, el análisis multicriterio es un análisis subjetivo de manera que según la prioridad y juicio de la persona que realiza el estudio los resultados pueden diferir. Así pues, el presente trabajo se ha centrado en la categoría de impacto del calentamiento global debido a que es el objetivo principal de los PNIEC. No obstante, no necesariamente el estudio se debe centrar en este impacto, en ese caso, los resultados y conclusiones a las que se llegue diferirán del presente trabajo.

11. Objetivos de desarrollo Sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible son 17 objetivos globales diseñados para ser un “plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos”. Firmados en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, se tiene intención de alcanzarlos para el año 2030. Estos son:



Figura 15: Objetivos de Desarrollo Sostenible [82]

El presente proyecto, está alineado con varios de estos objetivos, entre ellos:

1. Salud y bienestar (3): El presente estudio cuenta con un análisis medioambiental que afecta directamente a la salud y bienestar, tanto humana como animal. Con este estudio se pretende determinar que tecnologías son las que menor impacto tienen de manera que la contaminación sea la menor posible.
2. Acción por el clima (13): De la misma manera que lo comentado en el punto anterior, el análisis medioambiental realizado para este trabajo está fuertemente relacionado con la acción por el clima. De hecho, en todos los PNIEC de los que se ha extraído la información, el objetivo principal es el de reducir la temperatura global 2°C de los niveles preindustriales.

Además, todas las categorías de impacto analizadas presentan un impacto sobre el clima, ya que provocan las alteraciones de las estaciones... y otros problemas derivados.

3. Energía Asequible y no contaminante (7): El desarrollo y creciente suministro renovable permite obtener unos precios mucho más económicos que los conseguidos con tecnologías fósiles como el carbón o el petróleo.

Además, tal y como se ha visto en el análisis medioambiental, las tecnologías renovables presentan un impacto muy inferior a las tecnologías fósiles.

4. Industria, innovación e infraestructura (9): Como se ha visto en este trabajo, las tecnologías renovables presentan innumerables beneficios en los ámbitos medioambiental y económico. Por lo que a través de este estudio se promueve el estudio sobre las tecnologías renovables de manera que se aprovechen al máximo las ventajas presentadas por las energías renovables.
5. Vida submarina y vida de ecosistemas terrestres (13-14-15): Entre todas las categorías de impacto estudiadas, se encuentran la ecotoxicidad del agua dulce, agua marina y ecotoxicidad terrestre. Con el estudio realizado se ha podido observar que tecnologías y que mixes presentan mejores resultados en estos campos.

El presente estudio trata de proveer de la información necesaria para poder ver que tecnologías presentan un mayor impacto sobre la vida y cuales un menor impacto.

Bibliografía

- [1] «Statista» (Marzo, 2021). [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [2] E. Robberechts, «BID Invest» (Agosto, 2020). [En línea]. Available: <https://www.idbinvest.org/es/blog/energia/cuatro-paises-que-lideran-en-energia-solar-en-america-latina-y-el-caribe>.
- [3] Iberdrola, «Las negociaciones climáticas: 25 años en busca de consensos para luchar contra el cambio climático». Sostenibilidad, Cumbres climáticas. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/acuerdos-internacionales-sobre-el-cambio-climatico>. [Último acceso: 2022].
- [4] Naciones Unidas, «¿Qué es el Protocolo de Kyoto?». Process and meetings, The Kyoto Protocol. [En línea]. Available: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol. [Último acceso: 2022].
- [5] Naciones Unidas, «COP26: Juntos por el planeta». Acción por el Clima. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>. [Último acceso: 2022].
- [6] A. B. & T. A. Roberto Tucorini, «Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations» (2013). *Elsevier*, vol. 28, pp. 555-556.
- [7] G. B. F. D. & F. S. Francesco Asdrubali, «Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization» (2015). *Elsevier*, vol. 42, pp. 1113-1122.
- [8] UNECE, «Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options» (2021). Sustainable Development Goals, Reports. Genova.
- [9] N. Haque, «The Life Cycle Assessment of Various Energy Technologies» (2020). *Elsevier*, vol. 3, pp. 633-647.
- [10] G. d. España, «Impactos ambientales de la producción de electricidad. Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica». Asociación de Productores de Energías Renovables, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2015).
- [11] Energías, «Life Cycle of the Italian Electricity Scenarios to 2030» (Julio, 2020). EISSN 1996-1073, Publicado por MDPI, Italia.
- [12] M. L. Carvalho, «Life cycle assessment of Italian electricity production and comparison with the European context» (2022). *Elsevier*, vol. 8, pp. 561-568.
- [13] Energías, «Life Cycle Performance of Various Energy Sources in the Czech Republic» (2020). Publicado por MDPI, Praga.
- [14] M. P. Papadopoulou, «Assessing climate change impacts of Greek energy mix based on LCA» (2019). Heraklio, Athens.
- [15] R. Garcia, «Life-cycle assessment of electricity in Portugal» (2014). *Applied Energy*, vol. 134, pp. 563-572.

- [16] E.Santoyo-Castelazo, «Life cycle assessment of electricity generation in Mexico». (2011). *Energy*, vol. 36, pp. 1488-1499.
- [17] G. Q. Bermejo, «Análisis de ciclo de vida de posibles escenarios de mix de generación eléctrica en España en 2030» (2020). UPC, Madrid.
- [18] J. G. Martín, «Evaluación de la sostenibilidad de mixes de generación eléctrica de países con planes de desarrollo de energía eólica marina mediante el análisis de ciclo de vida» (2020). ICAI, Madrid.
- [19] A. A. R. Juárez, «Comparativa de la sostenibilidad de los mixes energéticos de distintos países bajo la perspectiva del análisis de ciclo de vida» (2019). Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- [20] J. S. Gálan, «Economipedia,» [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/indice-desarrollo-humano.html>.
- [21] T. y. Triolano. (2001). [En línea]. Available: <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html#4>.
- [22] N. R. Lamana, «Análisis de Ciclo de Vida» [En línea]. Available: <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html#1>.
- [23] Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2021). [En línea]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx>. [Último acceso: Enero 2022].
- [24] ISO, «ISO,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org>. [Último acceso: 2022].
- [25] A. Vallejo, «Metodología del Análisis de Ciclo de Vida» (2021). Facultad de ingeniería, Madrid.
- [26] «Draw.io» [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [27] O. Planas, «Energía Solar» (Julio, 2021). [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/eficiencia>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [28] «Mapchart» [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [29] Expansión, «Expansión» [En línea]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/idh>.
- [30] Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, «Conversion Energia UNEFM» [En línea]. Available: <https://conversionenergiaunefm.files.wordpress.com/2009/05/guia-ciclo-rankine-iii-091.pdf>. [Último acceso: 2022].
- [31] Explicación.net, «Explicación.net» [En línea]. Available: <https://www.explicacion.net/ciclo-combinado/>. [Último acceso: 2022].
- [32] Acelerando la Ciencia, «Acelerando la Ciencia» (2015). [En línea]. Available: <https://acelerandolaciencia.wordpress.com/2015/03/23/de-la-energia-nuclear-de-fision-5-reactores-nucleares-de-agua-en-ebullicion/>. [Último acceso: 2022].
- [33] O. Planas, «Energía Nuclear» (Junio, 2017). [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/reactor-nuclear/tipos/reactores-nucleares-de-agua-a-presion>. [Último acceso: 2022].

- [34] M. R. Pérez, «Cálculo del potencial de agotamiento abiótico. Aplicación a la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar» (2019). [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71560/fichero/TFM-1560+RODR%C3%8DGUEZ+P%C3%89REZ.pdf>.
- [35] A. A. Sánchez, «Ecología Verde» (2019). [En línea]. Available: https://www.ecologiaverde.com/destruccion-de-la-capa-de-ozono-definicion-causas-y-consecuencias-1916.html#anchor_1. [Último acceso: 2022].
- [36] A. P. Acero, Greendelta. (2015). [En línea]. Available: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>. [Último acceso: 2022].
- [37] «Saber es práctico» (2022). [En línea]. Available: <https://www.saberespractico.com/geografia/superficie-paises-europa/>. [Último acceso: 2022].
- [38] Italy, «Integrated national energy and climate plan» (2019). [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/it_final_necp_main_en.pdf. [Último acceso: 2022].
- [39] «Energy Charts» (2022). [En línea]. Available: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.html?l=en&c=IT&year=2019&interval=year>. [Último acceso: 2022].
- [40] IEA, «Czech Republic Energy policy review» (2021). [En línea]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/301b7295-c0aa-4a3e-be6b-2d79aba3680e/CzechRepublic2021.pdf>.
- [41] «National Energy and Climate Plan of the Czech Republic» (2019) https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/cs_final_necp_main_en.pdf.
- [42] CEPS, «Resource Adequacy Assessment of the Czech Power System until 2040» (2019). [En línea]. Available: https://www.mpo.cz/assets/en/energy/electricity/2022/5/Assessment-of-resource-adequacy-of-the-Czech-electricity-system-_2021_-.pdf.
- [43] Austria, «Integrated National Energy and Climate Plan for Austria» (2019). [En línea]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at_final_necp_main_en_0.pdf.
- [44] Portugal, «National Energy and Climate Plan 2021-2030» (2019). [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/pt_final_necp_main_en.pdf.
- [45] «Agencia EFE» (2022). [En línea]. Available: <https://www.efe.com/efe/america/mexico/la-produccion-industrial-en-mexico-crece-un-6-9-hasta-noviembre/50000545-4715110>. [Último acceso: 2022].
- [46] BP, «Statistical Review of World's energy» (2021). [En línea]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- [47] «Solar Photovoltaic Power Potential by Country» The World Bank, (2021). [En línea]. Available: https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/solar-photovoltaic-power-potential-by-country?cid=eae_tt_energy_en_ext. [Último acceso: 2022].

- [48] D. Giegen, «Remap 2030 Mexico» IRENA, (2015).
- [49] «Global wind atlas» [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info/>. [Último acceso: 2022].
- [50] E2BIZ, «Actualización de la proyección de emisiones 2017-2030 y análisis medida de mitigación de CO2 equivalente» (2017). POCH, Chile.
- [51] IRENA, «Renewable energy prospects: South Africa» (2020). Irena, Abu Dhabi.
- [52] Corporate Finance Institute, «Corporate Finance Institute» (Febrero, 2022). [En línea]. Available: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/levelized-cost-of-energy-lcoe/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [53] J. Linares, *Viabilidad Economica*, Madrid, (2021).
- [54] Ryna_Yiyun-Cui, «Quantifying operational lifetimes for coal power plants under the Paris goals» (2019).
- [55] A. Fusi, «Life Cycle Environmental Impacts of Electricity from Biogas Produced by Anaerobic Digestion» (2016). Frontiers.
- [56] NREL, «Nrel» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html>. [Último acceso: 2022].
- [57] S. Fernandez, «Xataka» (2021). [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/energia/miles-aerogeneradores-se-acercan-al-final-su-vida-util-gran-pregunta-que-haremos-sus-palas-despues-1>.
- [58] Sargent & Lundy, «Combined-Cycle Plant Life Assessments» (2021). [En línea]. Available: <https://sargentlundy.com/wp-content/uploads/2017/05/Combined-Cycle-PowerPlant-LifeAssessment.pdf>.
- [59] M. A. Patiño, «Expansión» (2017). [En línea]. Available: <https://www.expansion.com/empresas/energia/2017/12/10/5a2d7029ca4741d6478b45ff.html>. [Último acceso: 2022].
- [60] A. Papadimitriou, «Economic assesment of cogeneration systems in operation» (2020). Energies.
- [61] Word Bank, «Detailed Technology Descriptions and Cost assumptions» (2015). [En línea]. Available: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/986551468338480525/annex-1-detailed-technology-descriptions-and-cost-assumptions>.
- [62] G. B. Losada, «Análisis de Ciclo de Vida de una Central Termosolar» (2017). UC3M, Madrid.
- [63] EIA, «Generating Unit Annual Capital and Life Extensions Cost Analysis,» 2019. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/generationcost/pdf/full_report.pdf.
- [64] EIA, «EIA» (Octubre, 2019). [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41833>. [Último acceso: 2022].
- [65] IRENA, «Renewable power generation costs» (2014). IRENA, <https://www.irena.org/publications>.

- [66] P. EmilioEscamilla-García, «Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico» (2020). Elsevier.
- [67] W. Short, «Manual for economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies» (1995). Colorado.
- [68] L.Söder, «EG2220 Power Generation, Environment and Markets Compendium for future design» (2017). DiVA.
- [69] Reuters, «Europe carbon prices expected to rise to 2030-industry survey» (2021). [En línea]. Available: <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/europe-carbon-prices-expected-rise-2030-industry-survey-2021-06-14/>.
- [70] F. Simon, «Euractiv» Euractiv, [En línea]. Available: <https://www.euractiv.com/section/emissions-trading-scheme/interview/analyst-eu-carbon-price-on-track-to-reach-e90-by-2030/>.
- [71] A. McDonald, «Learning rates for energy technologies» (2001). Elsevier.
- [72] E. S. Rubin, «A review of learning rates for electricity supply technologies» (2015). Eseevier.
- [73] F. Trieb, «Research gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Learning-curve-of-solar-thermal-power-plants-Source-US-DOE_fig1_44898645.
- [74] NicolaeScarlat, «Biogas: Developments and perspectives in Europe» (2018). Elsevier.
- [75] «Statista,» [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/>.
- [76] H. Shukla, «Global Installed Solar Capacity Could Reach 3,000 GW by 2030: Report» (2021). [En línea]. Available: <https://mercomindia.com/global-installed-solar-capacity-could-reach-3000-gw-by-2030-report/>.
- [77] IRENA, «Future of wind» (2019). [En línea]. Available: https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf.
- [78] «IRENA» IRENA, [En línea]. Available: <https://www.irena.org/remap>.
- [79] IRENA, «Remap 2030» (2014). Irena, Abu Dhabi.
- [80] Gobierno de España, «Hoja de ruta del autoconsumo» (2021). [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hoja-ruta-autoconsumo/hojaderutaautoconsumo_tcm30-534411.pdf.
- [81] C. Nuñez, «¿Qué es la energía hidroeléctrica?» (2021). [En línea]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica>.
- [82] J. A. Espeita, «ELKomodo» (2020). [En línea]. Available: <https://www.ekomodo.eus/blog/empresas-por-un-mundo-mejor/que-son-los-ods-y-por-que-son-tan-importantes/>.
- [83] «Autosolar» (2020). [En línea]. Available: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/efecto-fotovoltaico>. [Último acceso: 2022].

[84] Facultad de Ingeniería, (2020). [En línea]. Available:

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/Analisis%20del%20Ciclo%20de%20Vida.pdf.

Anexo 1

En el presente anexo se muestran los impactos de las tecnologías para cada categoría de impacto de una manera más visual:

- Agotamiento abiótico

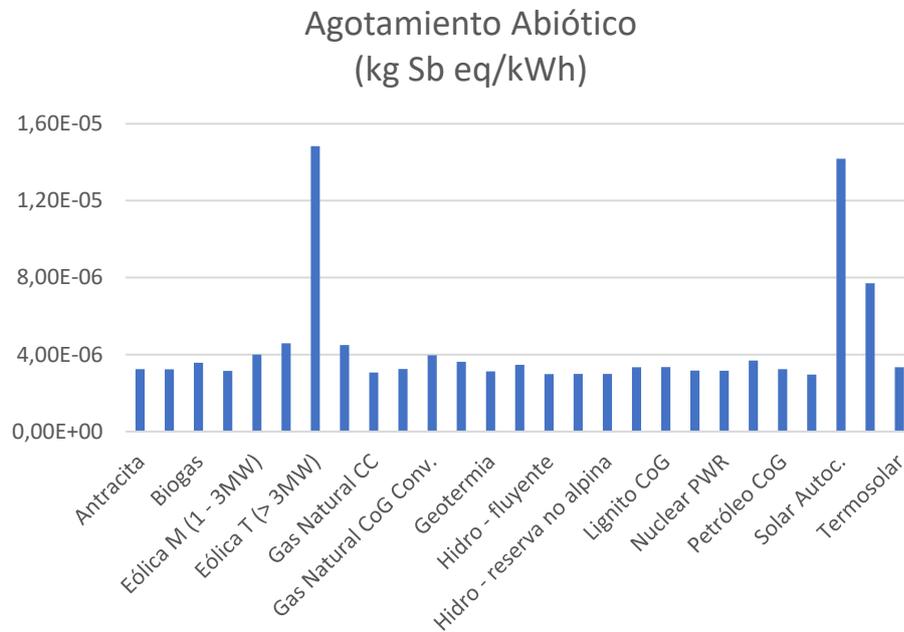


Figura 16: Impacto sobre el agotamiento abiótico por tecnología

- Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)

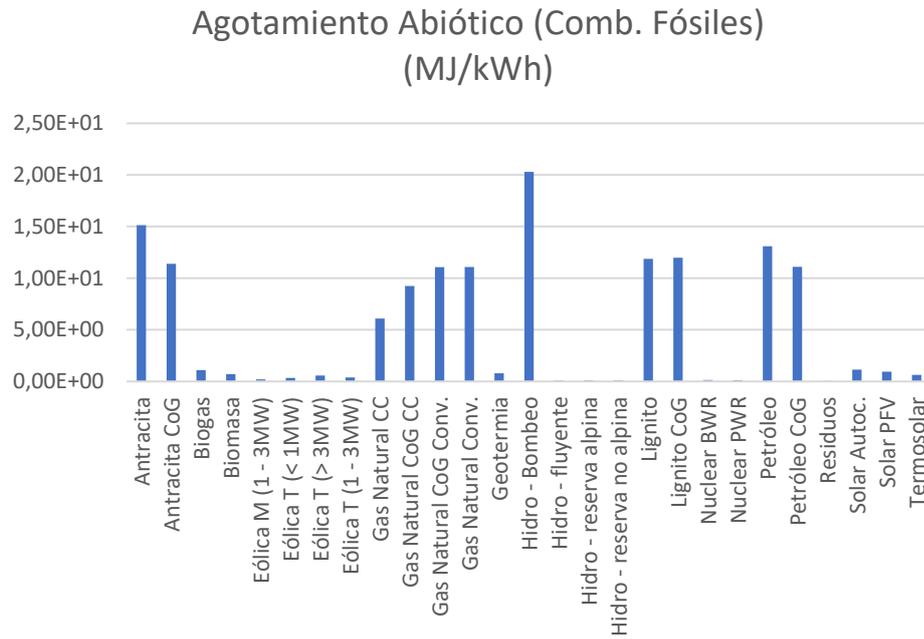


Figura 17: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por tecnología

- Calentamiento global

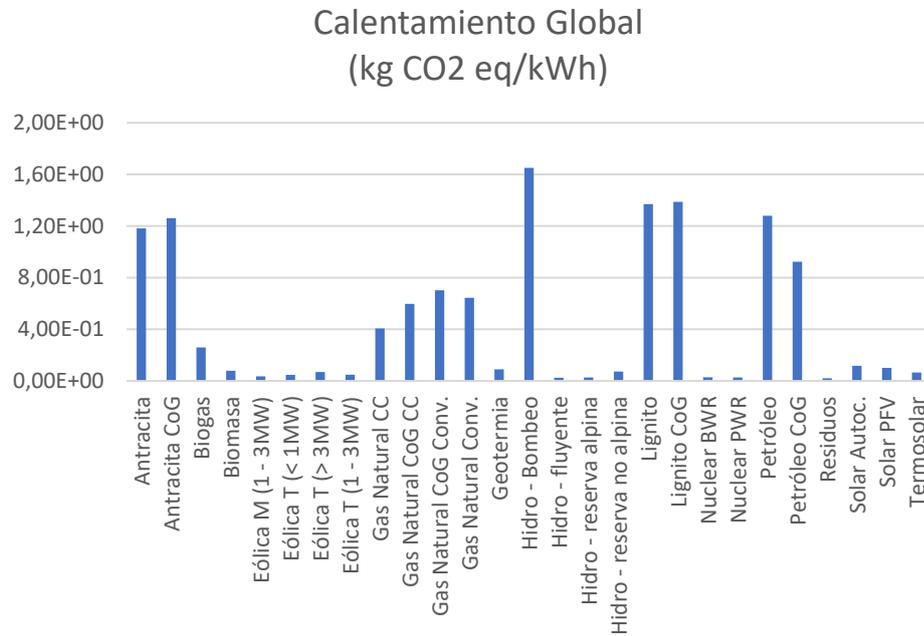


Figura 18: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por tecnología

- Destrucción de la capa de ozono

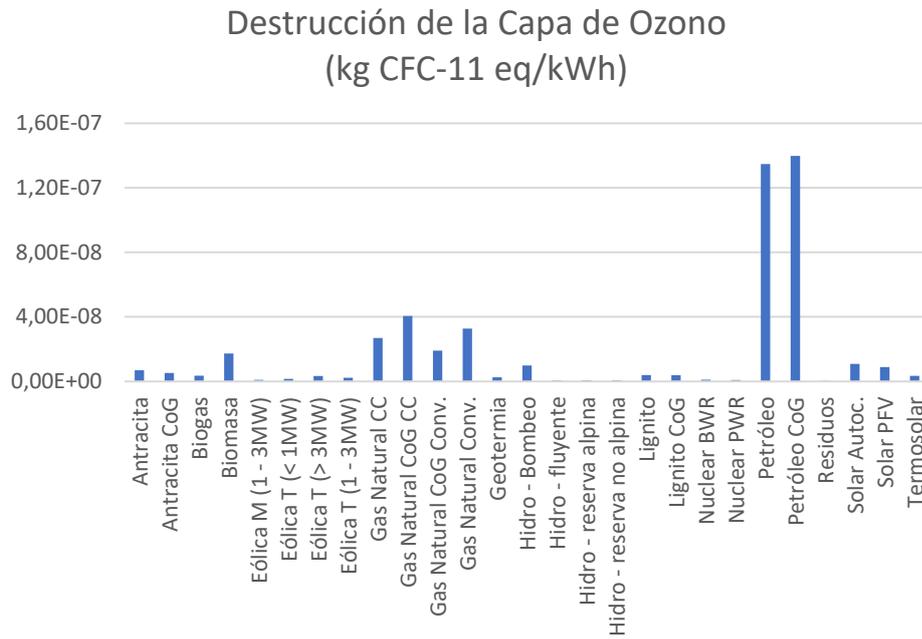


Figura 19: Impacto sobre la Destrucción de la capa de ozono por tecnología

- Toxicidad humana

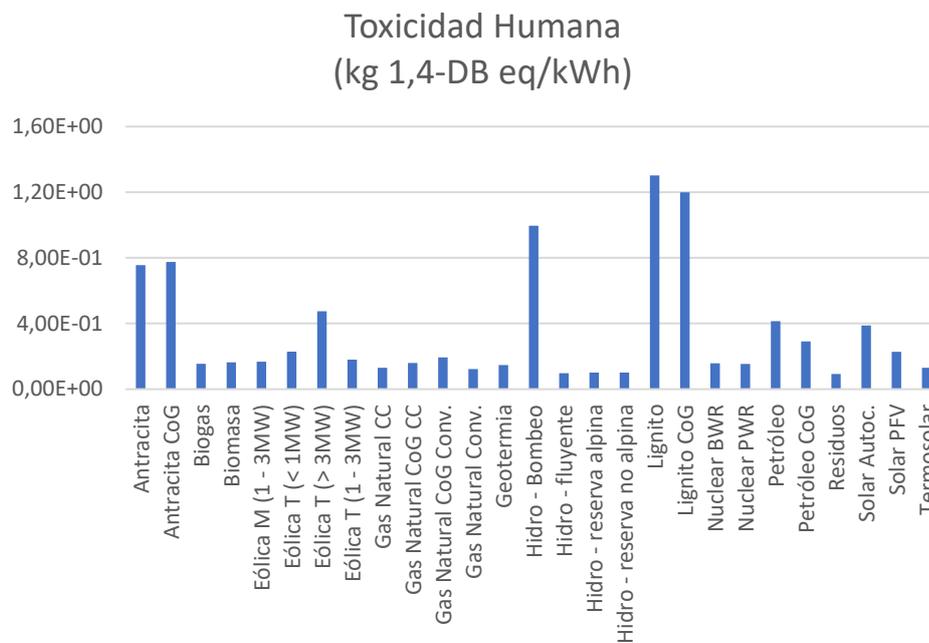


Figura 20: Impacto de Toxicidad humana por tecnología

- Ecotoxicidad de agua dulce

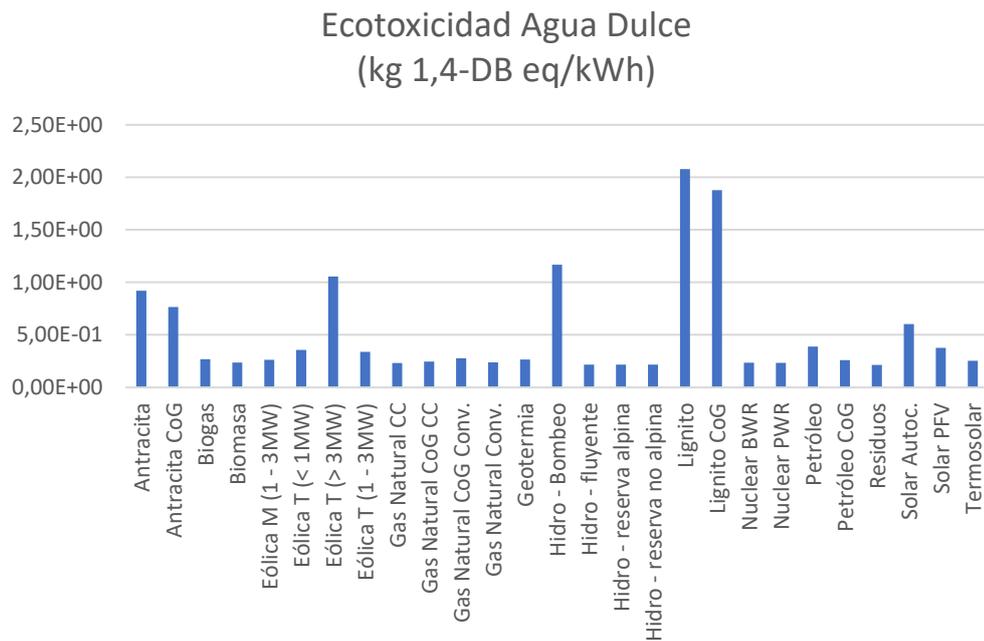


Figura 21: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua dulce por tecnología

- Ecotoxicidad de agua marina

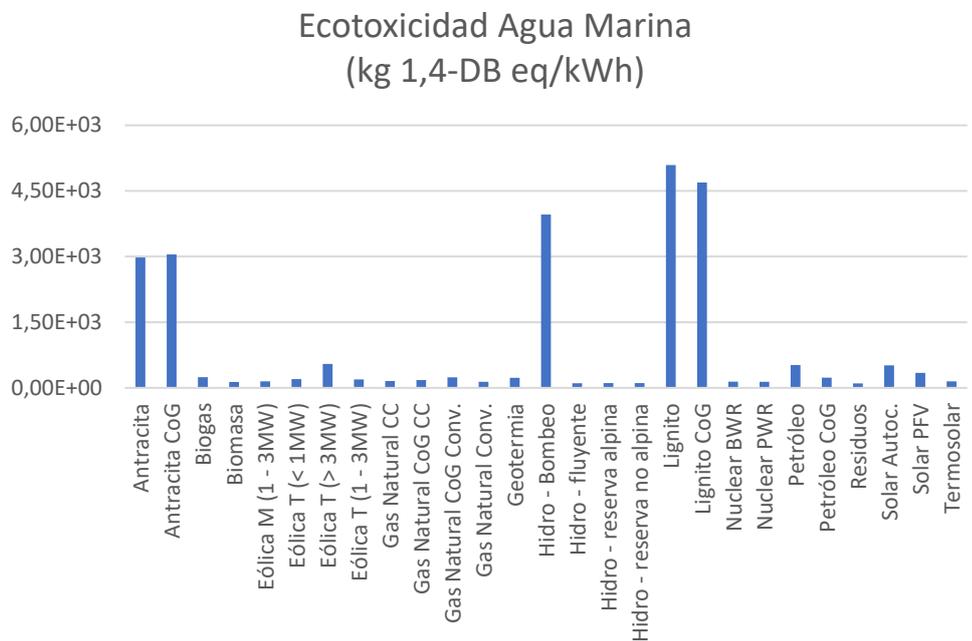


Figura 22: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por tecnología

- Ecotoxicidad terrestre

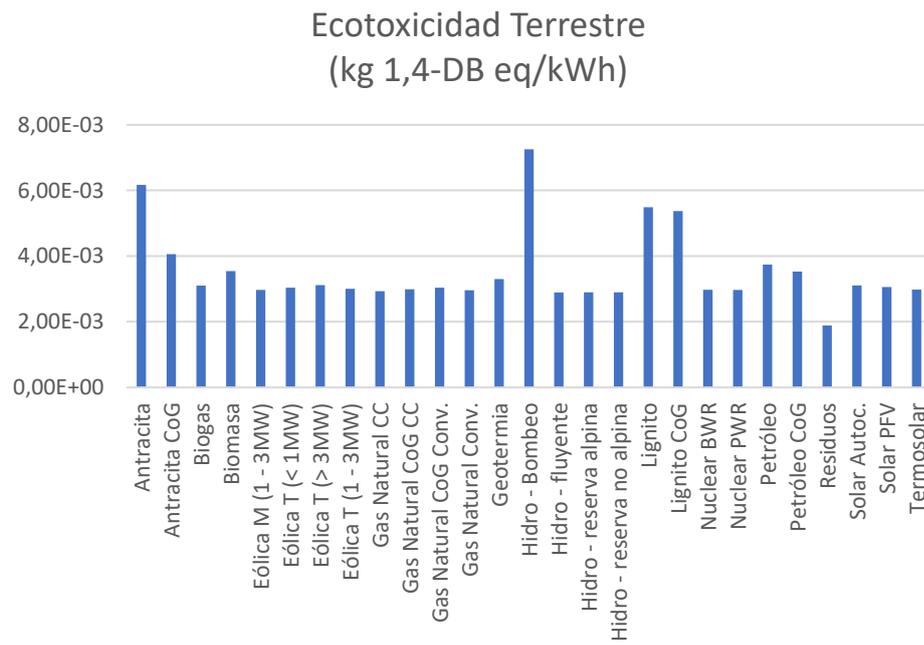


Figura 23: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por tecnología

- Oxidación fotoquímica

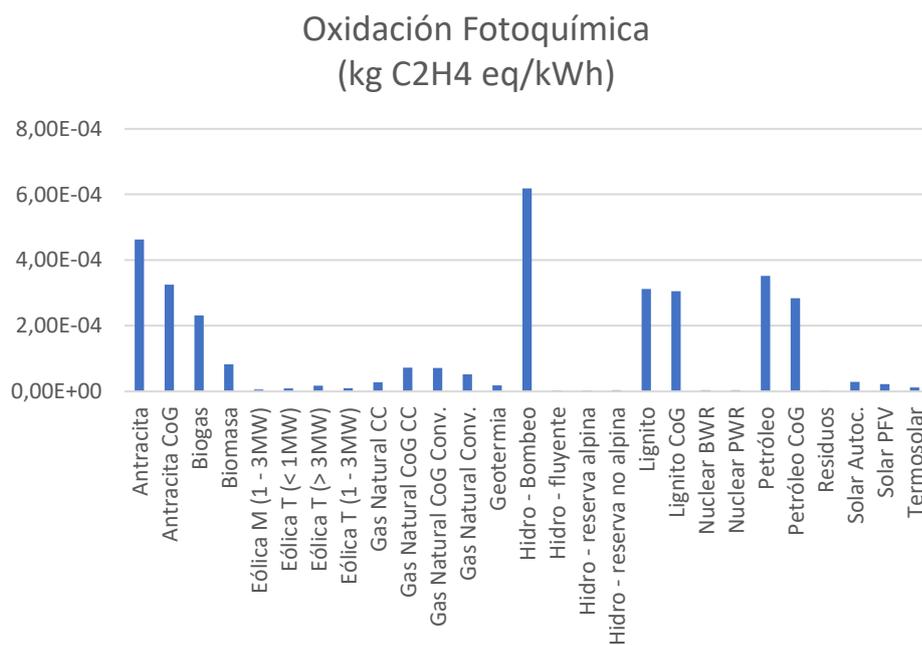


Figura 24: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por tecnología

- Acidificación

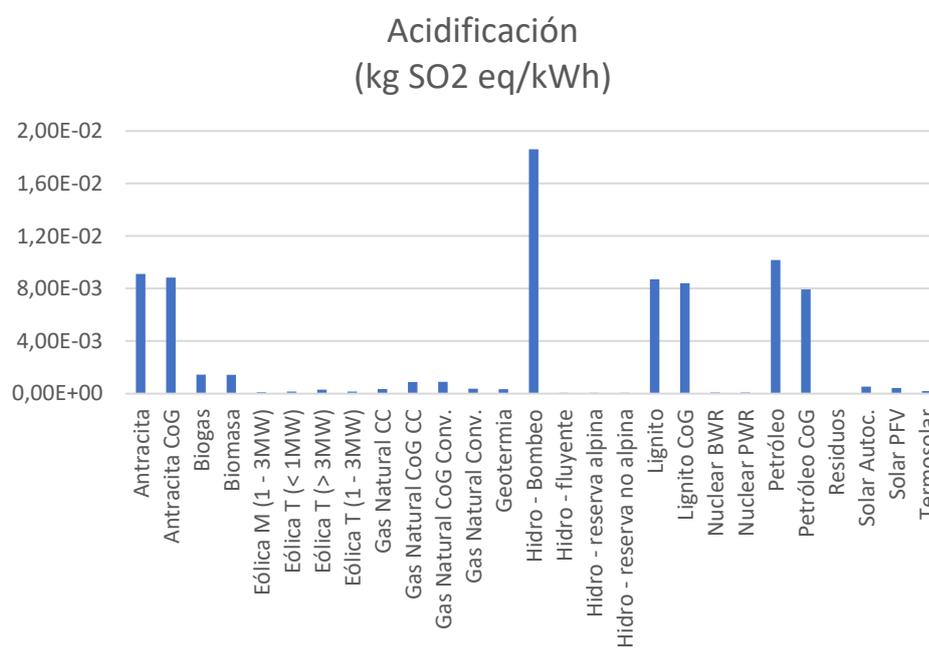


Figura 25: Impacto sobre la acidificación por tecnología

- Eutrofización

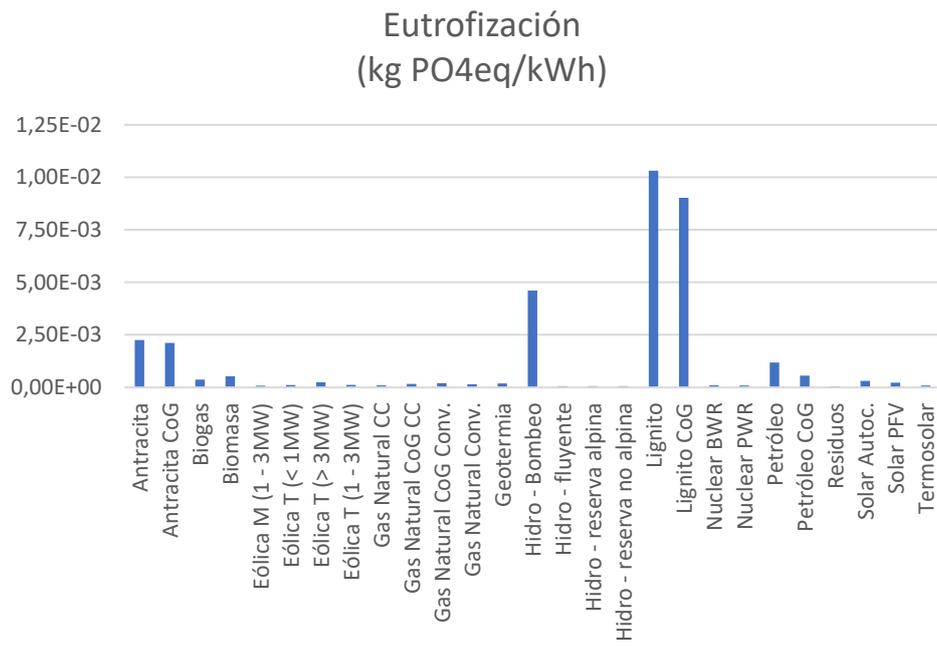


Figura 26: Impacto sobre la eutrofización por tecnología

Anexo 2

En el presente anexo, se muestran los impactos de cada mix energético en el año 2019 sobre cada una de las categorías estudiadas:

- Agotamiento abiótico

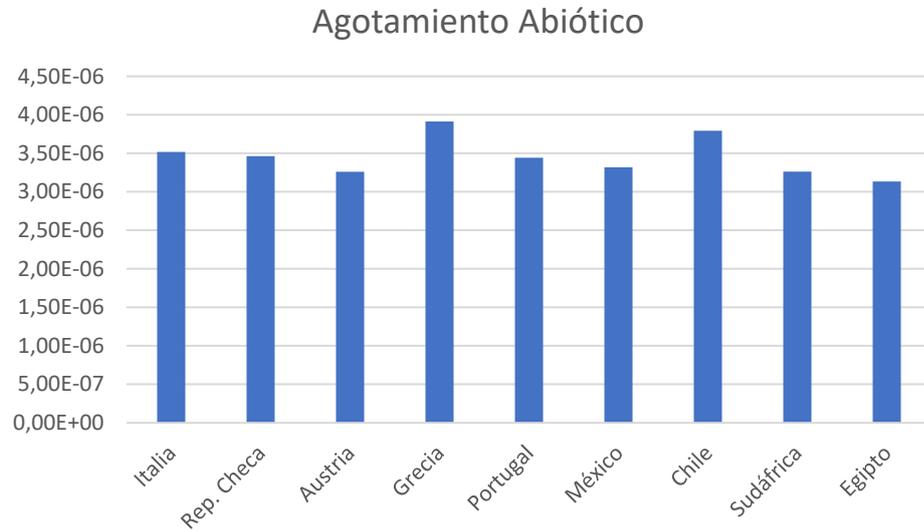


Figura 27: Impacto sobre el agotamiento abiótico por mix en 2019

- Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)

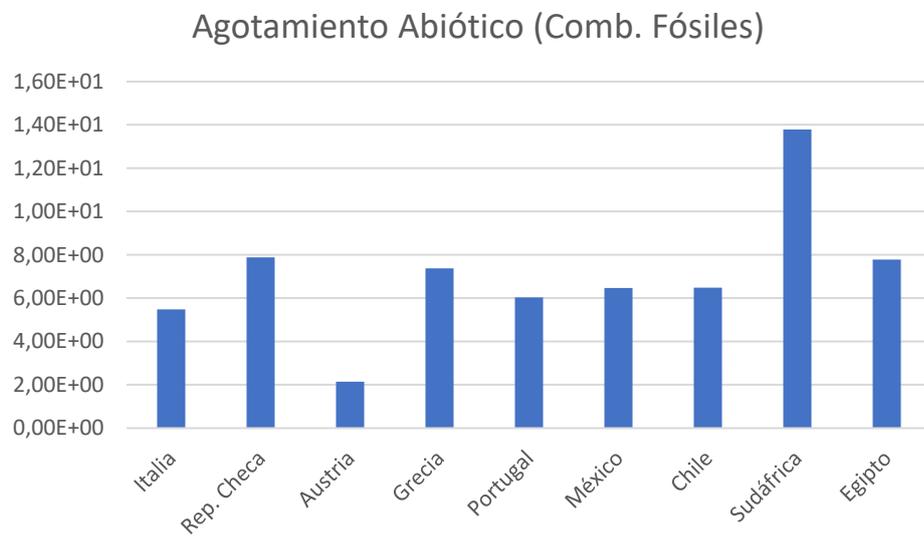


Figura 28: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por mix en 2019

- Calentamiento global

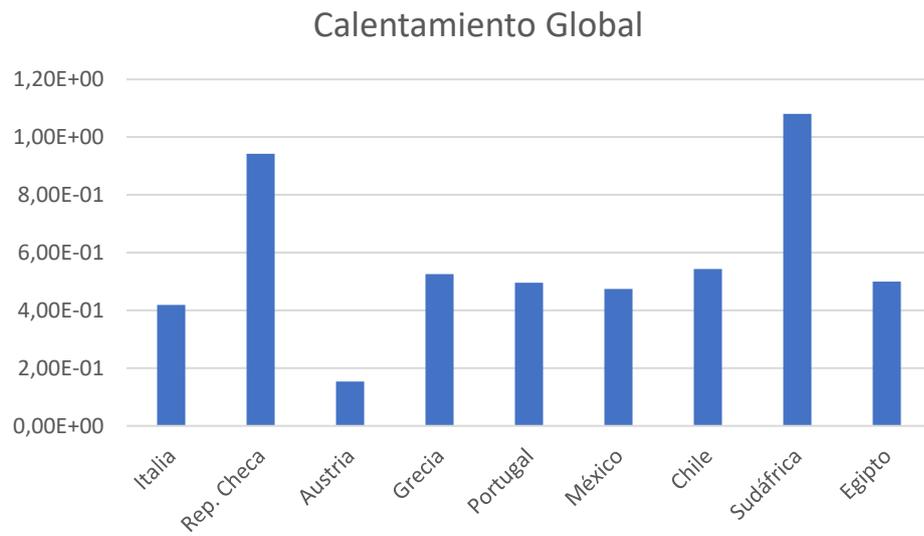


Figura 29: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por mix en 2019

- Destrucción de la capa de ozono



Figura 30: Impacto sobre la destrucción de la capa de ozono por mix en 2019

- Toxicidad humana

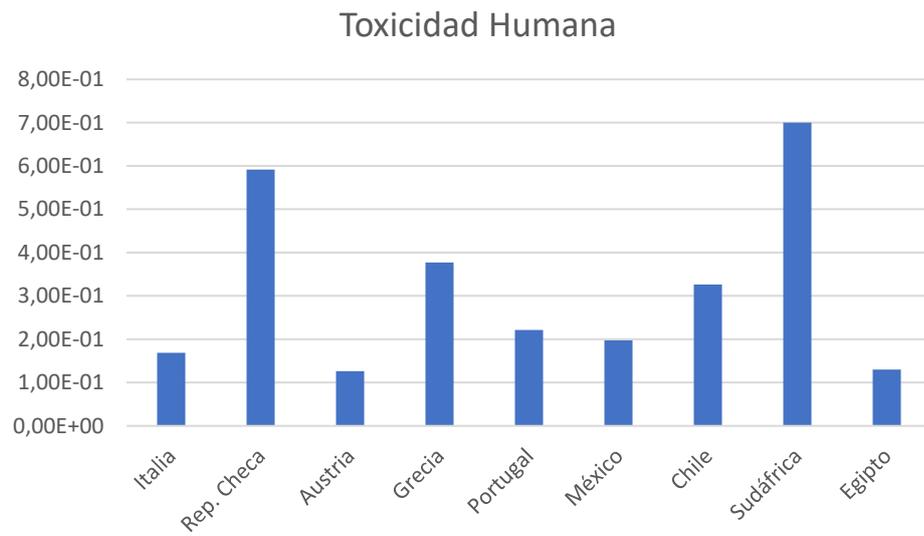


Figura 31: Impacto sobre la toxicidad humana por mix en 2019

- Ecotoxicidad de agua dulce

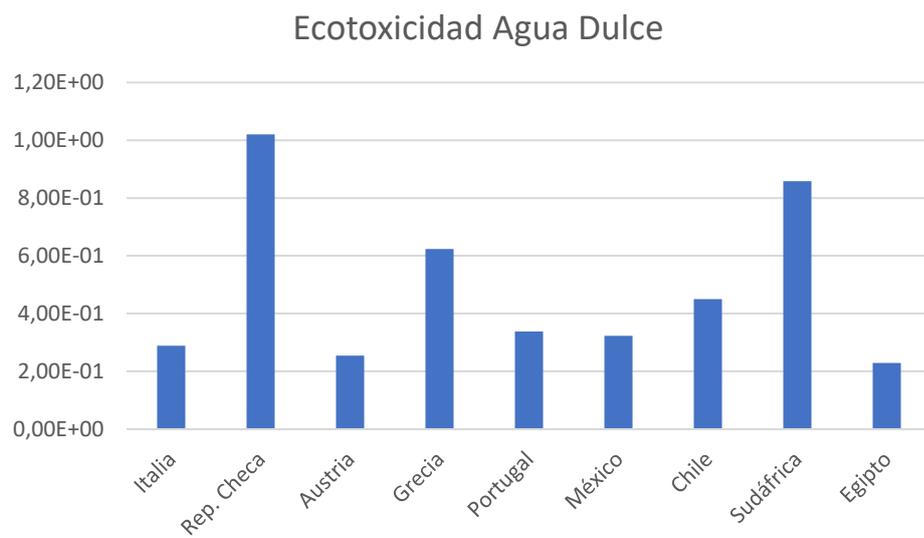


Figura 32: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua dulce por mix en 2019

- Ecotoxicidad de agua marina

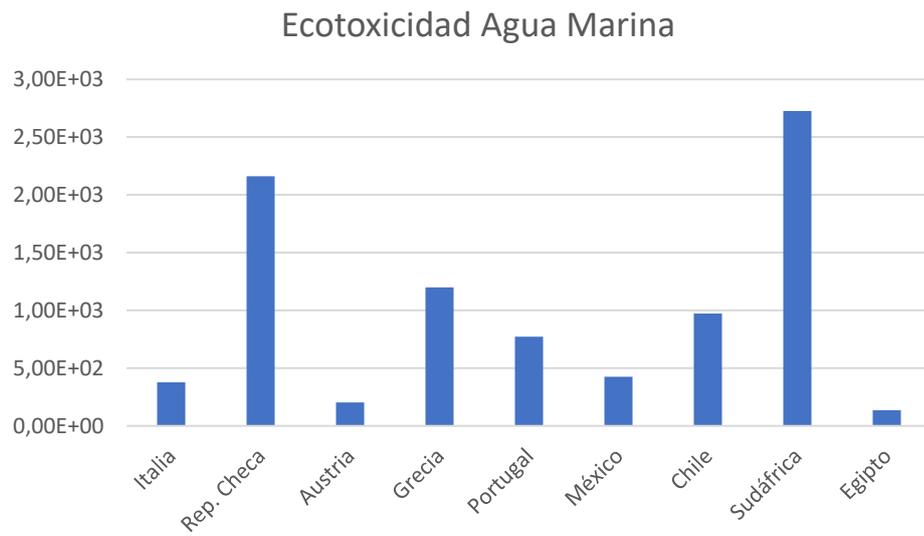


Figura 33: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por mix en 2019

- Ecotoxicidad terrestre

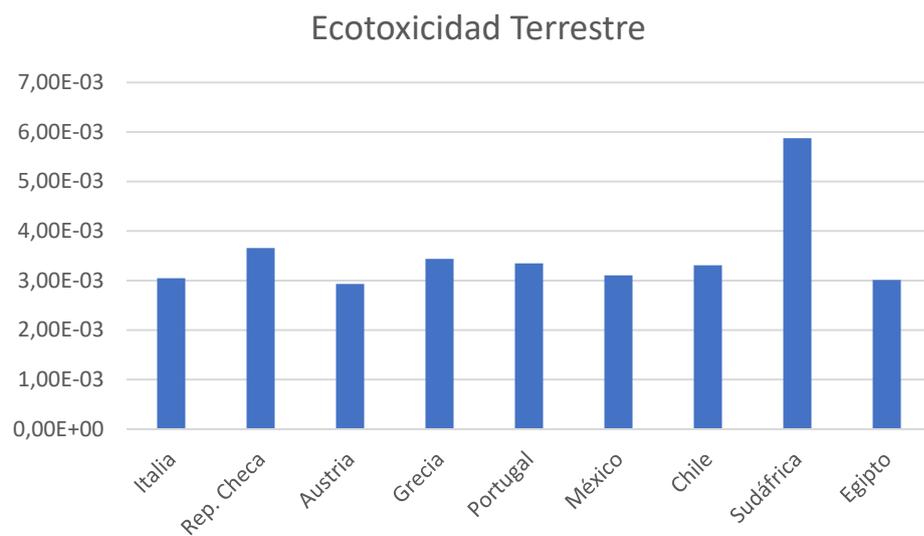


Figura 34: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por mix en 2019

- Oxidación fotoquímica

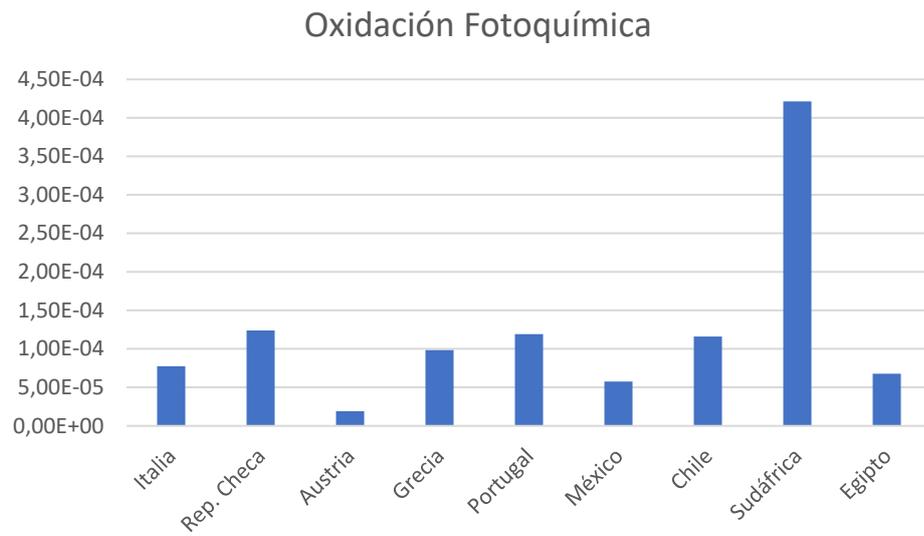


Figura 35: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por mix en 2019

- Acidificación

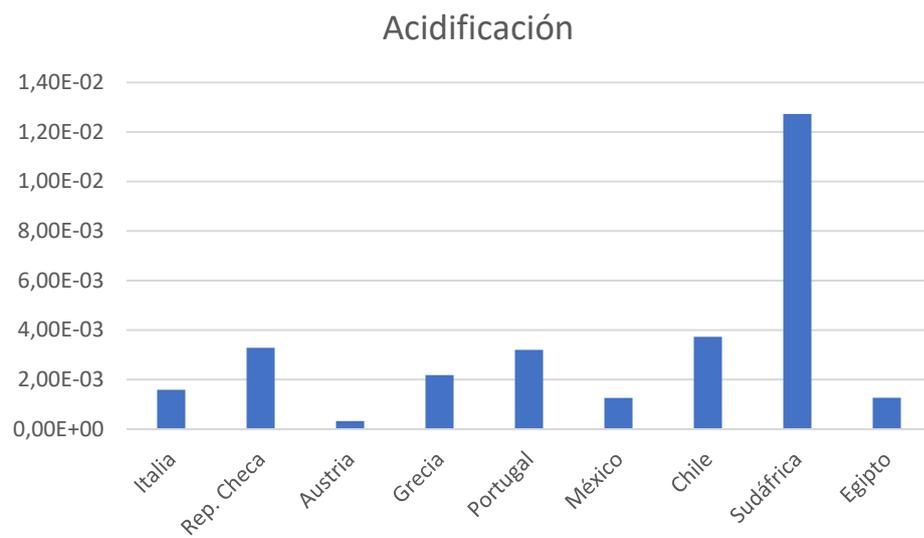


Figura 36: Impacto sobre la acidificación por mix en 2019

- Eutrofización

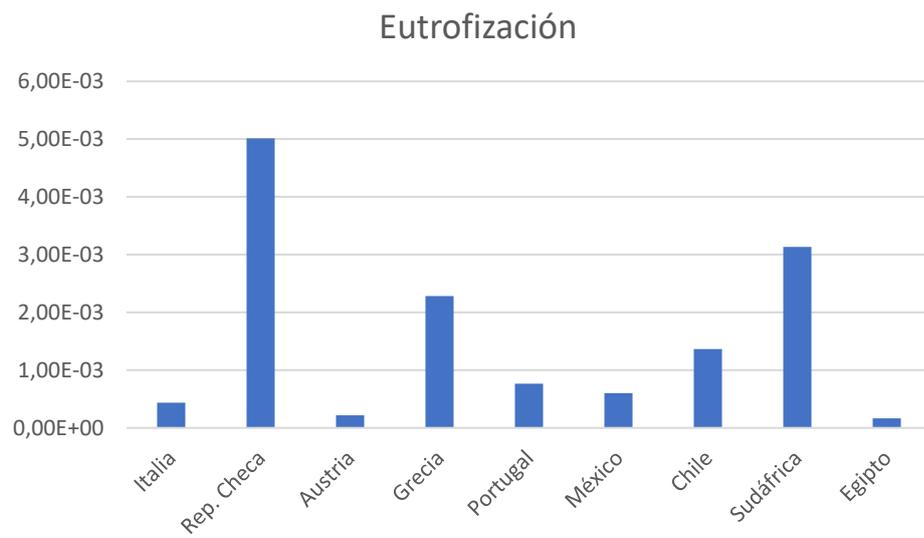


Figura 37: Impacto sobre la eutrofización por mix en 2019

Anexo 3

En el presente anexo, se muestran los impactos de cada mix energético en el año 2030 sobre cada una de las categorías estudiadas:

- Agotamiento abiótico

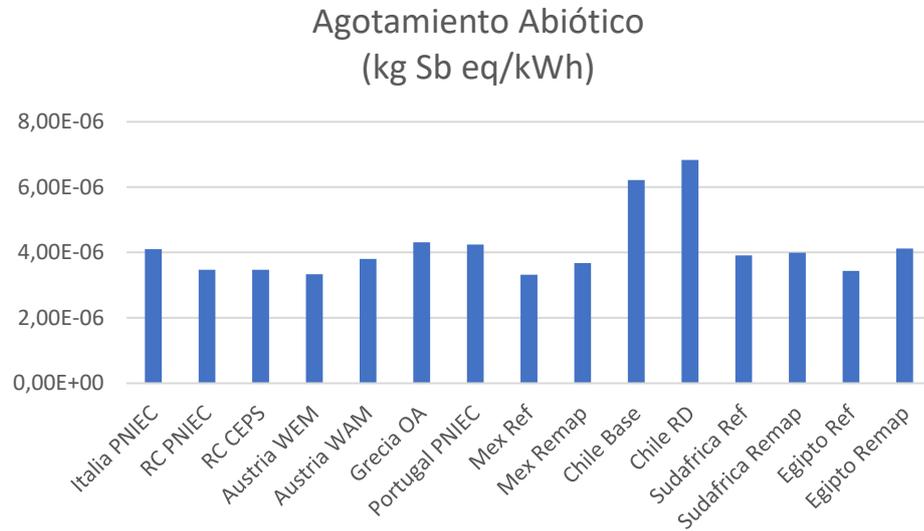


Figura 38: Impacto sobre el agotamiento abiótico por escenario en 2030

- Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)

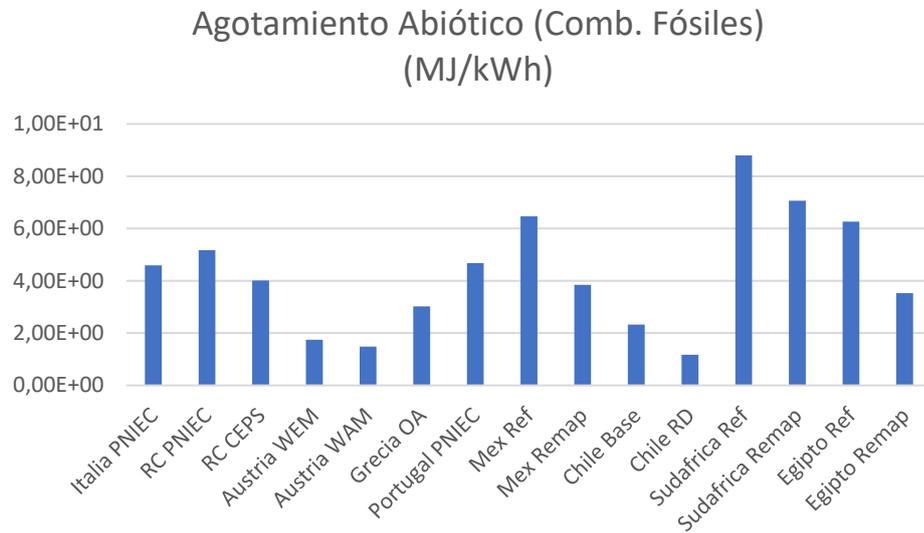


Figura 39: Impacto sobre el agotamiento abiótico de combustibles fósiles por escenario en 2030

- Calentamiento global

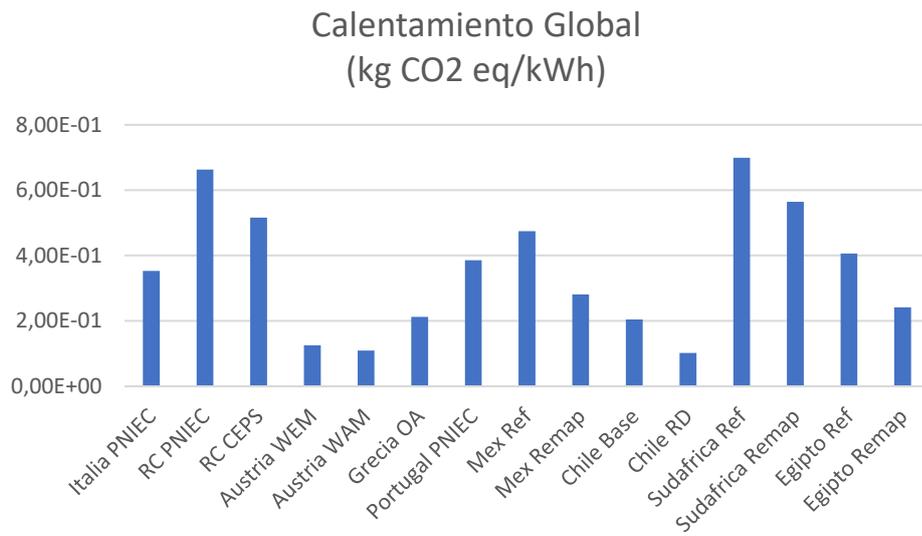


Figura 40: Impacto sobre el potencial de calentamiento global por escenario en 2030

- Destrucción de la capa de ozono

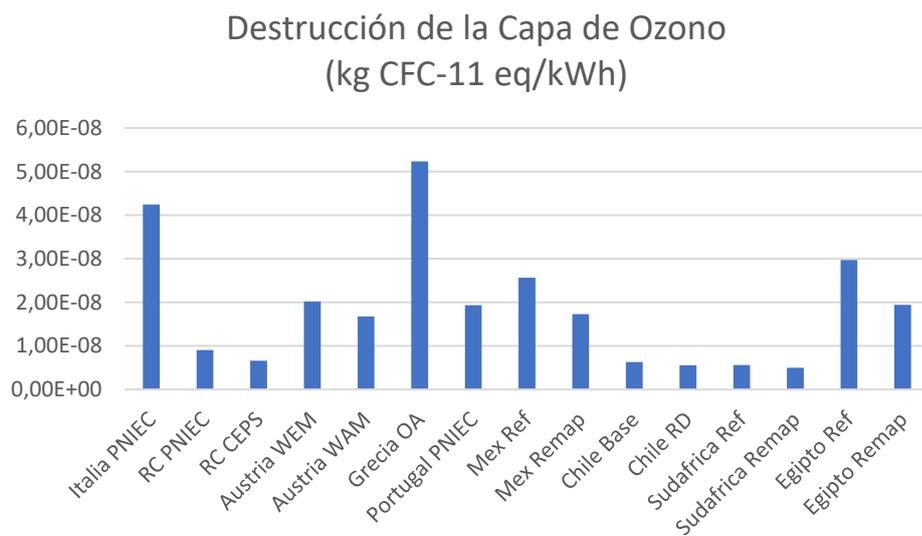


Figura 41: Impacto sobre la destrucción de la capa de ozono por escenario en 2030

- Toxicidad humana

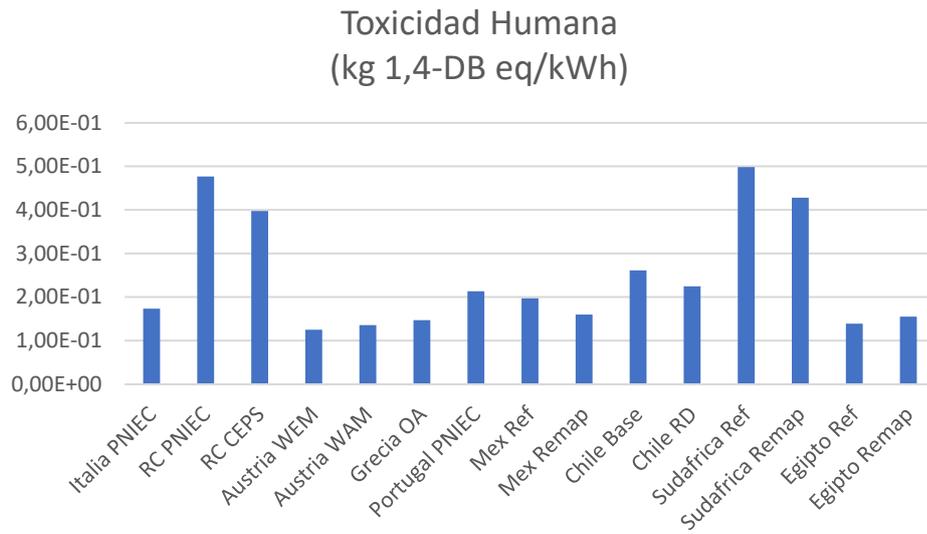


Figura 42: Impacto sobre la toxicidad humana por escenario en 2030

- Ecotoxicidad de agua dulce

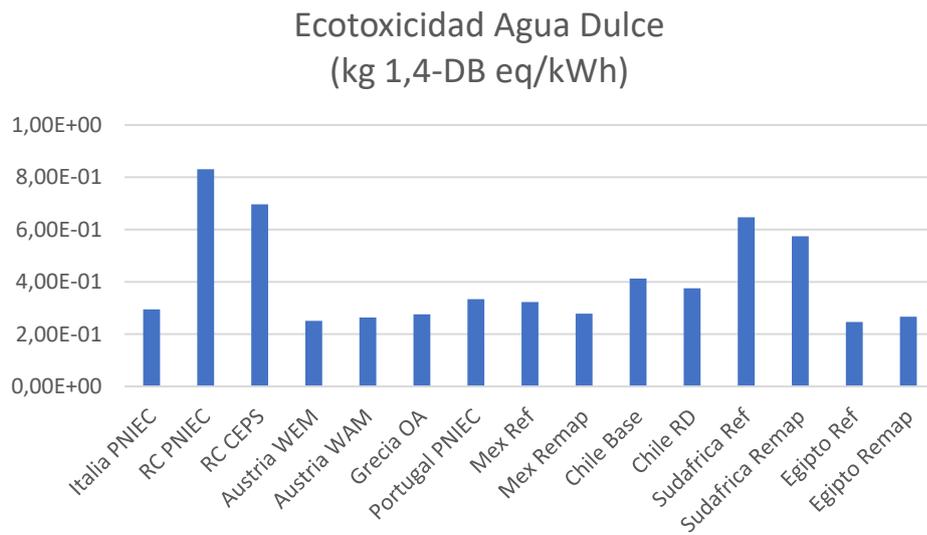


Figura 43: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua dulce por escenario en 2030

- Ecotoxicidad de agua marina

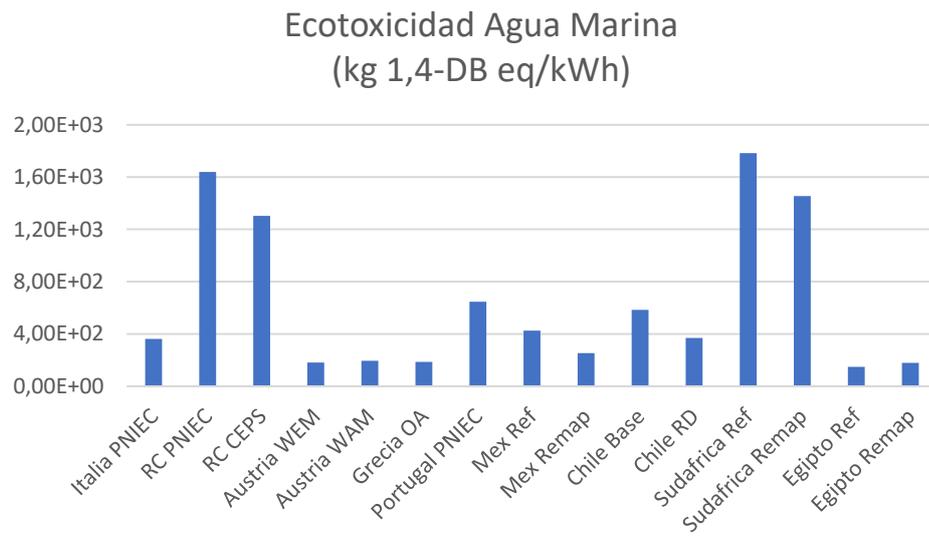


Figura 44: Impacto sobre la ecotoxicidad de agua marina por escenario en 2030

- Ecotoxicidad terrestre

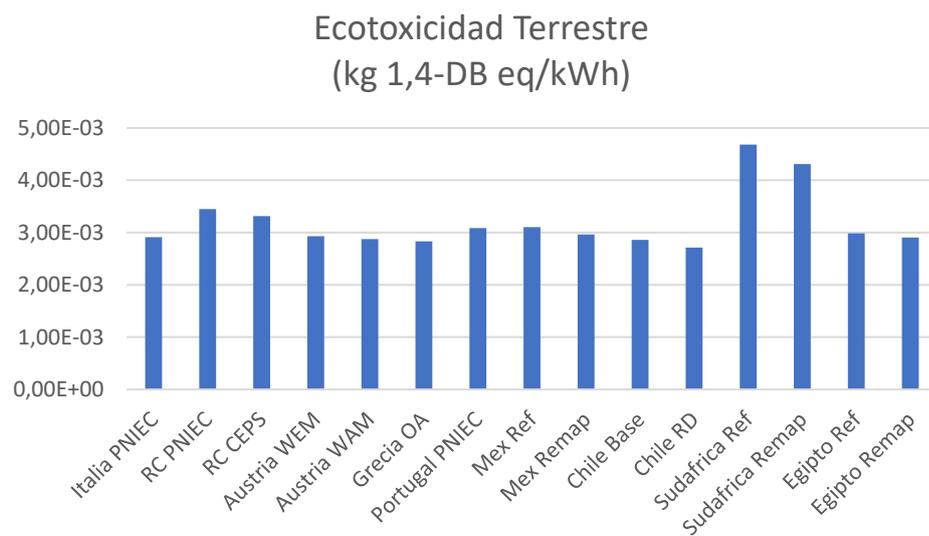


Figura 45: Impacto sobre la ecotoxicidad terrestre por escenario en 2030

- Oxidación fotoquímica

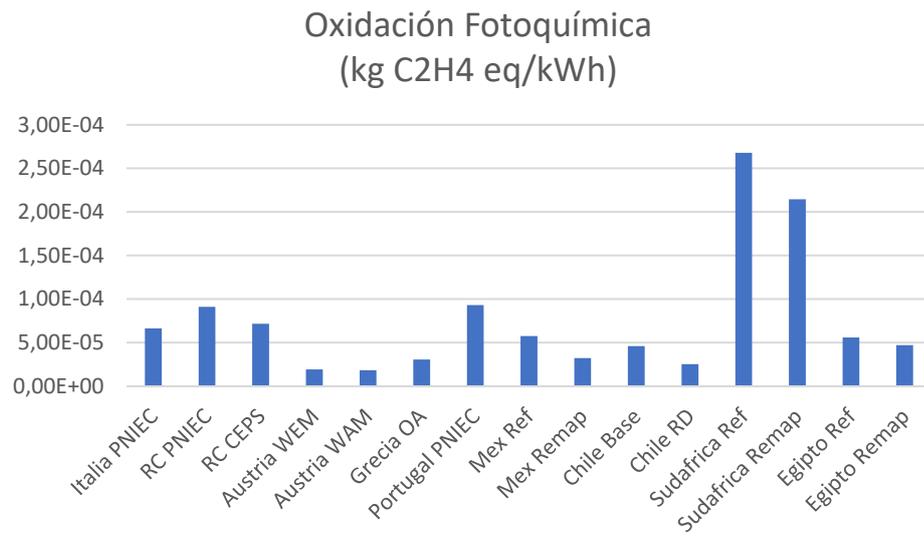


Figura 46: Impacto sobre la oxidación fotoquímica por escenario en 2030

- Acidificación

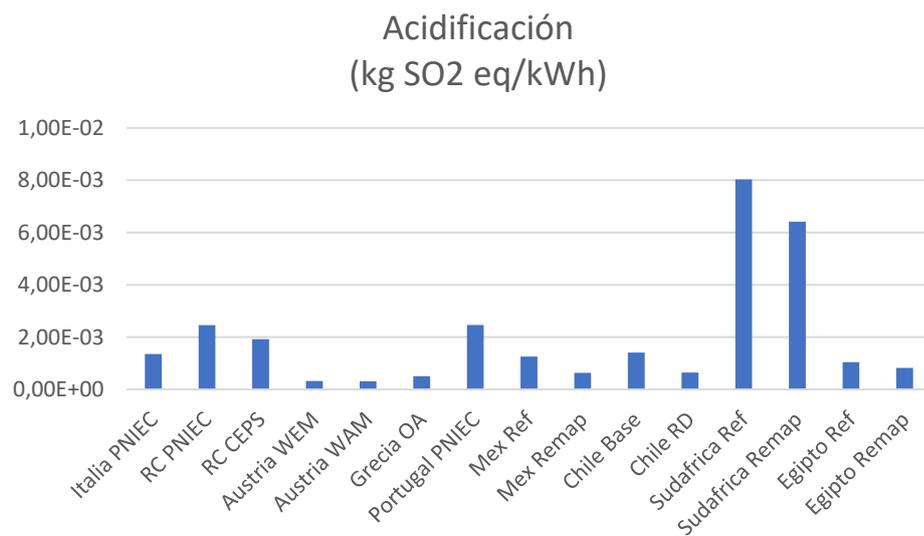


Figura 47: Impacto sobre la acidificación por escenario en 2030

- Eutrofización

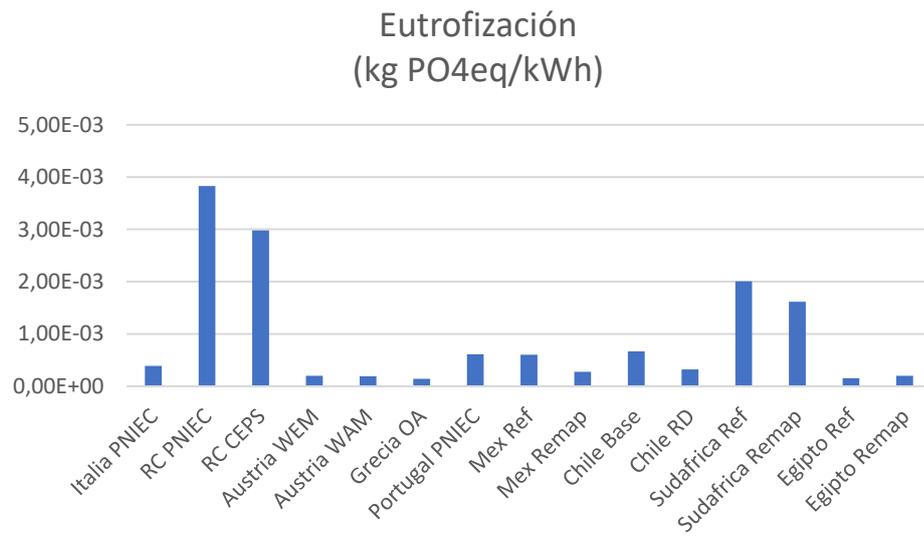


Figura 48: Impacto sobre la eutrofización por escenario en 2030

Anexo 4

En el presente anexo, se muestra una comparativa entre los años 2019 y 2030 de cada uno de los mixes de generación:

País	Escenario	Agotamiento Abiótico	Agotamiento Abiótico (Comb. Fósiles)	Calentamiento Global	Destrucción de la Capa de Ozono	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad Agua Dulce	Ecotoxicidad Agua Marina	Ecotoxicidad Terrestre	Oxidación Fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
		kg Sb eq/kWh	MJ/kWh	kg CO2 eq/kWh	kg CFC-11 eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg 1,4-DB eq/kWh	kg C2H4 eq/kWh	kg SO2 eq/kWh	kg PO4eq/kWh
Italia	2019	3,52E-06	5,48E+00	4,18E-01	5,06E-08	1,69E-01	2,89E-01	3,77E+02	3,05E-03	7,73E-05	1,59E-03	4,36E-04
	PNIEC	4,10E-06	4,59E+00	3,53E-01	4,25E-08	1,73E-01	2,95E-01	3,61E+02	2,91E-03	6,63E-05	1,36E-03	3,87E-04
Republica Checa	2019	3,46E-06	7,88E+00	9,42E-01	2,15E-08	5,92E-01	1,02E+00	2,16E+03	3,66E-03	1,24E-04	3,29E-03	5,01E-03
	PNIEC	3,47E-06	5,17E+00	6,63E-01	9,04E-09	4,77E-01	8,31E-01	1,64E+03	3,45E-03	9,10E-05	2,46E-03	3,83E-03
	CEPS	3,47E-06	4,01E+00	5,16E-01	6,60E-09	3,98E-01	6,96E-01	1,30E+03	3,31E-03	7,16E-05	1,92E-03	2,98E-03
Austria	2019	3,26E-06	2,14E+00	1,53E-01	2,34E-08	1,26E-01	2,54E-01	2,02E+02	2,93E-03	1,90E-05	3,24E-04	2,17E-04
	WEM	3,33E-06	1,75E+00	1,25E-01	2,02E-08	1,25E-01	2,51E-01	1,81E+02	2,93E-03	1,92E-05	3,19E-04	1,98E-04
	WAM	3,80E-06	1,48E+00	1,09E-01	1,67E-08	1,36E-01	2,64E-01	1,94E+02	2,88E-03	1,83E-05	3,10E-04	1,89E-04
Grecia	2019	3,91E-06	7,37E+00	5,25E-01	8,32E-08	3,77E-01	6,23E-01	1,20E+03	3,44E-03	9,84E-05	2,18E-03	2,28E-03
	Obj. Archiv.	4,31E-06	3,02E+00	2,12E-01	5,23E-08	1,47E-01	2,75E-01	1,86E+02	2,83E-03	3,05E-05	5,08E-04	1,40E-04
Portugal	2019	3,44E-06	6,03E+00	4,95E-01	2,37E-08	2,21E-01	3,38E-01	7,72E+02	3,35E-03	1,19E-04	3,20E-03	7,65E-04
	PNIEC	4,24E-06	4,68E+00	3,85E-01	1,93E-08	2,13E-01	3,34E-01	6,46E+02	3,09E-03	9,30E-05	2,47E-03	6,12E-04
México	2019	3,31E-06	7,17E+00	5,33E-01	3,94E-08	2,06E-01	3,14E-01	3,99E+02	3,15E-03	8,07E-05	1,95E-03	5,93E-04
	Reference	3,32E-06	6,47E+00	4,74E-01	2,56E-08	1,97E-01	3,23E-01	4,25E+02	3,10E-03	5,75E-05	1,26E-03	6,02E-04
	Remap	3,67E-06	3,85E+00	2,81E-01	1,73E-08	1,60E-01	2,78E-01	2,53E+02	2,96E-03	3,23E-05	6,31E-04	2,75E-04
Chile	2019	3,79E-06	6,48E+00	5,43E-01	2,63E-08	3,26E-01	4,50E-01	9,72E+02	3,31E-03	1,16E-04	3,73E-03	1,36E-03
	Base	6,21E-06	2,33E+00	2,04E-01	6,28E-09	2,61E-01	4,12E-01	5,83E+02	2,86E-03	4,60E-05	1,41E-03	6,65E-04
	RhDesc.	6,83E-06	1,17E+00	1,02E-01	5,53E-09	2,24E-01	3,75E-01	3,69E+02	2,71E-03	2,54E-05	6,46E-04	3,21E-04
Sudáfrica	2019	3,26E-06	1,38E+01	1,08E+00	6,41E-09	7,00E-01	8,59E-01	2,72E+03	5,88E-03	4,21E-04	1,27E-02	3,13E-03
	Reference	3,91E-06	8,80E+00	6,99E-01	5,59E-09	4,98E-01	6,47E-01	1,78E+03	4,68E-03	2,68E-04	8,03E-03	2,01E-03
	Remap	3,99E-06	7,06E+00	5,64E-01	4,96E-09	4,28E-01	5,74E-01	1,45E+03	4,31E-03	2,15E-04	6,42E-03	1,62E-03
Egipto	2019	3,13E-06	7,78E+00	4,99E-01	3,66E-08	1,30E-01	2,29E-01	1,35E+02	3,01E-03	6,77E-05	1,26E-03	1,64E-04
	Reference	3,43E-06	6,26E+00	4,06E-01	2,97E-08	1,39E-01	2,46E-01	1,48E+02	2,98E-03	5,59E-05	1,04E-03	1,54E-04
	Remap	4,12E-06	3,53E+00	2,41E-01	1,94E-08	1,55E-01	2,66E-01	1,78E+02	2,90E-03	4,70E-05	8,22E-04	1,98E-04

Tabla 73: Comparativa medioambiental mixes 2019 vs 2030