



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética

ANÁLISIS DE LA CRITICIDAD DE MATERIALES CONTENIDOS EN TECNOLOGÍAS RENOVABLES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA: FOTOVOLTAICA, EÓLICA Y SOLAR TERMOELÉCTRICA



Autor: Ricardo Magdalena Zarzuela

Directora: Alicia Valero Delgado

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA EINA

2015-2016



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dña. Ricardo Magdalena Zarzuela,

con nº de DNI 25198662 T en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética, (Título del Trabajo)

ANÁLISIS DE LA CRITICIDAD DE MATERIALES CONTENIDOS EN TECNOLOGÍAS
RENOVABLES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA: FOTOVOLTAICA, EÓLICA Y SOLAR
TERMOLÉCTRICA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 24 de Noviembre de 2016

Fdo: Ricardo Magdalena Zarzuela

ANÁLISIS DE LA CRITICIDAD DE MATERIALES CONTENIDOS EN TECNOLOGÍAS RENOVABLES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA: FOTOVOLTAICA, EÓLICA Y SOLAR TERMOELÉCTRICA

RESUMEN

En este estudio se pretende estimar qué restricciones pueden aparecer hasta el año 2050 en cuanto a materiales, y qué impacto van a tener éstos en las reservas del planeta.

El primer punto que se va a tener en cuenta será el de los recursos, haciendo hincapié en qué zonas del planeta se disponen de mejores recursos para cada una de las tecnologías. En el siguiente paso, se incluirán las tecnologías y las demandas de los materiales requeridos, destacando los materiales considerados críticos. Seguidamente, se realizará una proyección de la evolución de la potencia desde el año 2015 hasta el año 2050, identificando los principales problemas que podrían aparecer.

A continuación, se realizará un análisis comparativo entre la demanda de los materiales y las reservas en el planeta, tanto en cantidad como en exergía, para obtener unas conclusiones generales y específicas para cada tecnología.

Los principales materiales que podrían ser críticos en la energía eólica son las tierras raras utilizadas, como puede ser el Nd, ya que alrededor del 14 % de la producción mundial de este elemento se va a destinar únicamente a la energía eólica.

En la energía fotovoltaica, se han encontrado una serie de restricciones, debido a que la demanda de materiales podría requerir más cantidad que la producción mundial anual, la cual se ha calculado según los criterios de la curva Hubbert con los datos de producción actual. Estos serían los casos del In, Ga y Ag, los cuales igualarían este valor comentado en el año 2030, 2035 y 2040 respectivamente.

Finalmente, la solar termoeléctrica es una tecnología todavía sin desarrollar; por lo que no se disponen de potencias importantes instaladas. No se ha previsto ningún tipo de inconveniente, pero es necesario tener en cuenta materiales como el Ni, ya que su impacto en las reservas en el año 2050 sería de aproximadamente del 15 %.

Realizando un análisis global, se ha hallado mediante las estimaciones llevadas a cabo, que la tecnología más sostenible desde un punto de vista de materiales sería la energía eólica, concretamente la turbina modelo 1 analizada, mientras que los módulos fotovoltaicos CdTe son los que contienen valores de exergía más elevados.



Índice de contenido

| | |
|---|----|
| 1. Abreviaturas y acrónimos | 9 |
| 2. Objetivo y alcance | 10 |
| 3. Introducción | 10 |
| 4. Metodología | 14 |
| 4.1 Exergía..... | 15 |
| 4.2 Impacto exergético en los materiales..... | 15 |
| 4.3 Curva Hubbert para materiales | 17 |
| 4.4 Ratios de reciclaje | 18 |
| 5. Energía Eólica | 20 |
| 5.1 Introducción a la Energía Eólica..... | 20 |
| 5.2 Tecnologías | 22 |
| 5.3 Demanda de materiales en turbinas eólicas | 23 |
| 5.4 Evolución de la Energía Eólica..... | 24 |
| 5.5 Resultados..... | 26 |
| 5.5.1 Comparación exergética de las turbinas | 26 |
| 5.5.2 Stock in use –cantidad de material requerido hasta 2050–..... | 27 |
| 5.5.3 Previsión de escasez de materiales | 29 |
| 5.6 Conclusiones de la energía eólica | 30 |
| 6. Energía Solar Fotovoltaica..... | 31 |
| 6.1 Introducción a la Energía Solar Fotovoltaica | 31 |
| 6.2 Tecnologías | 33 |





| | | |
|-------|--|----|
| 6.3 | Demanda de materiales en módulos fotovoltaicos..... | 34 |
| 6.4 | Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica | 35 |
| 6.5 | Resultados..... | 38 |
| 6.5.1 | Comparación exergética de los módulos fotovoltaicos | 38 |
| 6.5.2 | Stock in use –cantidad de material requerido hasta el 2050–..... | 40 |
| 6.5.3 | Previsión de escasez de materiales | 41 |
| 6.6 | Conclusiones de la energía solar fotovoltaica | 42 |
| 7. | Energía Solar Termoeléctrica | 43 |
| 7.1 | Introducción a la Energía Solar Termoeléctrica..... | 43 |
| 7.2 | Tecnologías | 44 |
| 7.3 | Demanda de materiales en la solar termoeléctrica | 45 |
| 7.4 | Evolución de la Energía Solar Termoeléctrica..... | 46 |
| 7.5 | Resultados..... | 48 |
| 7.5.1 | Comparación exergética de las diferentes tecnologías..... | 48 |
| 7.5.2 | Stock in use –cantidad de material requerido hasta el año 2050–..... | 50 |
| 7.5.3 | Previsión de escasez de materiales | 52 |
| 7.6 | Conclusiones de la energía solar termoeléctrica..... | 54 |
| 8. | Conclusiones generales..... | 56 |
| 9. | Referencias..... | 63 |

Índice de Figuras

Figura 1. Elementos críticos hallados después de la evaluación de 12 estudios [16].... 14

Figura 2. Curva en forma de campana de *Hubbert* para el ciclo de producción de un recurso finito [20]..... 18





| | |
|--|----|
| Figura 3. Potencial eólico en el planeta [25]. | 20 |
| Figura 4. Evolución de la potencia instalada por zonas [24]. | 21 |
| Figura 5. Evolución de la potencia instalada por tipo de instalación. | 25 |
| Figura 6. Edad de los aerogeneradores [14]. | 25 |
| Figura 7. Proyección de la potencia acumulada de la energía eólica. | 26 |
| Figura 8. Comparación de masa y exergía de la Turbina 1. | 26 |
| Figura 9. Comparación de masa y exergía de la Turbina 2. | 26 |
| Figura 10. Evolución Stock in use Cu y Fe [KToe]. | 27 |
| Figura 11. Evolución Stock in use Al, Nd y Ni | 28 |
| Figura 12. Comparativa entre reservas mundiales y demanda 2015-2050 [Tn]. | 28 |
| Figura 13. Porcentaje de Nd utilizado en eólica. | 29 |
| Figura 14. Porcentaje de Cu, Fe y Ni utilizado en eólica. | 29 |
| Figura 15. Potencial solar en el planeta [44]. | 31 |
| Figura 16. Evolución de la energía solar fotovoltaica acumulada y tasa de crecimiento [45]. | 32 |
| Figura 17. Comparación de cantidad de materiales en función de la tecnología [kg/MWp]. | 35 |
| Figura 18. Porcentaje de masa por tecnología. | 36 |
| Figura 19. Potencia total instalada de Energía Solar Fotovoltaica [GW]. | 37 |
| Figura 20. Comparación masa y exergía CdTe. | 38 |
| Figura 21. Comparación masa y exergía CIGS. | 38 |
| Figura 22. Comparación masa y exergía c-Si. | 38 |
| Figura 23. Stock in use Cu, Cd y Ga [KToe]. | 39 |
| Figura 24. Comparativa entre reservas mundiales y demanda 2015-2050 [Tn]. | 40 |





| | |
|--|----|
| Figura 25. Demanda Vs Producción Sn [Tn]. | 41 |
| Figura 26. Demanda Vs Producción Ag [Tn]. | 41 |
| Figura 27. Demanda Vs Producción In [Tn]. | 41 |
| Figura 28. Demanda Vs Producción Ga [Tn]. | 41 |
| Figura 29. Evolución de la energía solar termoeléctrica acumulada [13]. | 43 |
| Figura 30. Potencia acumulada anual de la Solar Termoeléctrica [GW]. | 47 |
| Figura 31. Repowering anual en la Solar termoeléctrica [GW]. | 48 |
| Figura 32. Comparación másica y exergética de la tecnología PT. | 49 |
| Figura 33. Comparación másica y exergética de la tecnología CRS. | 49 |
| Figura 34. Evolución stock in use Al, Fe y Ni [KToe]. | 50 |
| Figura 35. Evolución de stock in use de Cr, Cu, Mn, Mo, Ag y Zn [KToe]. | 51 |
| Figura 36. Comparación entre reservas mundiales y demanda 2015-2050 [GJ]. | 51 |
| Figura 37. Comparación entre producción y demanda Cr. | 52 |
| Figura 38. Comparación entre producción y demanda Ag. | 52 |
| Figura 39. Comparación entre producción y demanda Ni [Tn]. | 53 |
| Figura 40. Porcentaje de demanda de Ag, Mo y Ni. | 54 |
| Figura 41. Reservas de Cr. Destinadas a esta tecnología. | 54 |
| Figura 42. Evolución de las tres fuentes renovables analizadas [GW]. | 56 |
| Figura 43. Porcentaje de cada recurso en función de la potencia total acumulada. | 57 |
| Figura 44. Comparación de rarity de las tecnologías [GJ/MW]. | 59 |
| Figura 45. Aportación de cada material por tecnología y % en función de reservas [Tn]. | 60 |
| Figura 46. Porcentaje de reciclado de las tecnologías estudiadas. | 62 |



| | |
|--------------------------------|----|
| Figura 47. Curva Hubbert | 71 |
|--------------------------------|----|

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Valores de exergía utilizados [18]..... | 17 |
| Tabla 2. Porcentaje de reciclado utilizados [23]..... | 19 |
| Tabla 3. Características del estudio de las turbinas eólicas [28]..... | 23 |
| Tabla 4. Materiales utilizados por tipo de turbina [kg/MW]..... | 24 |
| Tabla 5. Valores de rarity por tipo de turbina. | 27 |
| Tabla 6. Paneles fotovoltaicos por tecnología y porcentaje en el mercado [47]..... | 33 |
| Tabla 7. Eficiencia de módulos fotovoltaicos [49]..... | 34 |
| Tabla 8. Demanda de materiales por tecnología [kg/MW]. | 35 |
| Tabla 9. . Rarity de los módulos fotovoltaicos [GJ/MW]. | 39 |
| Tabla 10. Características de las instalaciones solares termoeléctricas..... | 45 |
| Tabla 11. Demanda de materiales por tipo de tecnología [66]..... | 46 |
| Tabla 12. Rarity de las diferentes tecnologías..... | 50 |
| Tabla 13. Resumen de las 3 tecnologías..... | 61 |
| Tabla 14. Exergía de los principales mienrales [22]. | 74 |

Anexos

Anexo I: Metodología

Anexo II: Energía eólica

Anexo III: Energía Solar Fotovoltaica

Anexo IV: Energía Solar Termoeléctrica

Anexo V: Conclusiones

1. Abreviaturas y acrónimos

Abreviaturas

| | |
|----------------|------------------------------------|
| € | Euro |
| a-Si | Silicio amorfo |
| c€ | Céntimo de Euro |
| CE | Comunidad Europea |
| CPV | Fotovoltaica de concentración |
| CRS | Torres de concentración solar |
| c-Si | Silicio cristalino |
| EAC | Extraction And Concentration |
| ERC | Exergy Replacement Cost |
| GJ | Gigajulio |
| GW | Gigawatio |
| GWt | Gigawatio térmico |
| IEA | International Energy Agency |
| kg | Kilogramos |
| kJ | Kilojulios |
| kW | Kilovatios |
| kWh | Kilovatios hora |
| LFR | Linear Fresnel |
| m | Metros |
| m ² | Metros cuadrados |
| MW | Megavatios |
| °C | Grados centígrados |
| PD | Discos parabólicos |
| PT | Concentradores solares parabólicos |
| rpm | Revoluciones por minuto |
| Tn | Toneladas |
| UE | Unión Europea |
| Wp | Vatios pico |

Elementos tabla periódica

| | |
|----|----------|
| Ag | Plata |
| Al | Aluminio |
| Cd | Cadmio |

| | |
|----|-----------|
| Cr | Cromo |
| Cu | Cobre |
| Fe | Hierro |
| Ga | Galio |
| Ge | Germanio |
| In | Indio |
| K | Potasio |
| Mg | Magnesio |
| Mn | Manganeso |
| Mo | Molibdeno |
| Na | Sodio |
| Nd | Neodimio |
| Ni | Níquel |
| Pb | Plomo |
| Se | Selenio |
| Si | Silicio |
| Sn | Estaño |
| Te | Teluro |
| Ti | Titanio |
| V | Vanadio |
| Zn | Zinc |

Compuestos químicos

| | |
|-------------------|---------------------------|
| KNO ₃ | Nitrato de potasio |
| NaNO ₃ | Nitrato de sodio |
| CdTe | Telururo de cadmio |
| CIGS | Cobre-Indio-Galio-Selenio |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |

2. Objetivo y alcance

El principal objetivo es determinar la evolución de las tendencias de la potencia instalada que tienen diferentes tecnologías desde el año 2015 hasta el año 2050 y las restricciones que éstas se podrían encontrar en el camino. De la misma manera, se pretende analizar y estudiar el comportamiento anual que podrían experimentar, previendo tanto picos futuros como el aprovisionamiento de los materiales requeridos.

Asimismo, también se quiere a través de este trabajo y otros estudios [1] acordes a él, mostrar otro aspecto de la sostenibilidad que no se ha tenido en cuenta hasta ahora en las renovables. Las tecnologías que se van a estudiar durante este trabajo son las que transforman directamente el recurso renovable en energía eléctrica, analizando las principales fuentes, las cuales se muestran a continuación:

- Energía eólica
- Energía solar fotovoltaica
- Energía solar termoeléctrica

3. Introducción

Los recursos renovables han experimentado un crecimiento importante en las últimas décadas, debido a la necesidad de implantar y desarrollar nuevas tecnologías que pudieran sustituir a los combustibles fósiles. Además, la posibilidad de negocio unido con los resultados obtenidos de éstos, han hecho que algunas de las fuentes renovables de las que dispone el planeta estén experimentando una tasa de crecimiento elevada.

El cambio climático que se está produciendo en el planeta es un hecho evidente y que nadie puede negar [2]. Está representado en diferentes aspectos; uno de ellos es el aumento de la temperatura media del planeta la cual ha aumentado en 0.8 °C si se compara con la época preindustrial y se espera que continúe aumentando [3].

Por otro lado, si el ser humano continúa en el planeta de la misma manera que hasta ahora, dentro de no mucho tiempo podría desaparecer la vida tal y como la conocemos [4]. Según el profesor Montagnaro de la Universidad de Nápoles, para el año 2100 habrá 200 millones de personas refugiadas debido a varios motivos, entre los que se encuentran por ejemplo, los fenómenos atmosféricos, los cuales irán aumentando en intensidad puesto que al haber más temperatura, habrá más energía en la atmósfera, produciéndose peores desastres naturales.

Por este motivo, cada día es más importante la implantación de energías renovables de una manera sostenible. Se habla de la palabra sostenible porque los recursos en la Tierra son finitos y se debe hacer un uso de ellos de manera en la que todo el mundo se pueda beneficiar.

Se prevé que una de las principales necesidades que podría existir en el año 2050 sea el requerimiento de electricidad, lo que supondría una mayor demanda debido a diversos motivos [5]. El primero de ellos es el aumento de la población, ya que se espera que para dicho año la Tierra albergue alrededor de 9 mil millones de habitantes [6]. Otro de los motivos será el aumento del consumo de electricidad de la población desarrollada, puesto que se espera que crezca el consumo individual. Y por último, otro factor muy importante, es que la población que hoy permanece sin luz, se espera que para el 2050 se encuentre desarrollada y por lo tanto haga uso de la electricidad.

Todos estos factores llevan a la conclusión de que la demanda de la electricidad aumentará. Sin embargo, existen otros campos en los que se puede trabajar para que este aumento no suponga un incremento en las emisiones a la atmósfera, como puede ser suplir dicha demanda mediante recursos renovables y no recursos fósiles, que por otro lado, las reservas de estos recursos se están agotando debido al excesivo uso que se está haciendo de ellas en las últimas décadas.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, los gases de efecto invernadero podrían llegar a duplicarse para el año 2050. Esto supondría un aumento en la demanda de los recursos renovables disponibles además de que existe la idea de

consolidar la seguridad de energía, es decir, ante un pico de la misma, que existan los medios necesarios para que nadie se quede sin ella [7].

La Unión Europea está comprometida a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % para el año 2020, mientras que para el año 2050 se pretende que la reducción de dichos gases sea del 60 % al 80 %. Para ello, es necesario que las políticas que se están llevando a cabo en referencia al cambio climático –tanto energías renovables como emisiones de CO₂ a la atmósfera– se modifiquen, y que hagan posible de una manera sencilla la implantación de energías renovables y por lo tanto una menor emisión de gases.

Hoy en día, los combustibles fósiles son los que aportan mayor porcentaje para la generación de electricidad [8]. Por ello, la Agencia Internacional de la Energía ha identificado la energía eólica como la tecnología líder que más puede aportar en esta transición, debido a que es la que más desarrollada se encuentra actualmente.

Sin embargo, los objetivos que han sido marcados por la Unión Europea no se pueden alcanzar únicamente con la energía eólica, por lo que será necesario contabilizar el resto de recursos renovables que se encuentran a disposición, teniendo en cuenta que el aprovechamiento de la energía se pueden dividir en:

Aprovechamiento térmico¹:

- Energía geotérmica: El límite de la temperatura inferior es de 20 °C mientras que el límite superior se encuentra a 150 °C, contando con gran variedad de aplicaciones como puede ser el calentamiento de agua de piscinas y balnearios, secado y uso industrial y calefacción y refrigeración entre otros, aunque el predominante de todos ellos es la bomba de calor geotérmica [9].
- Energía solar térmica: Los principales usos que se demandan en esta tecnología son para el calentamiento de agua y aire mediante colectores

¹ Se citan dos tecnologías a modo de ejemplo. Sin embargo, existen muchas otras tecnologías renovables térmicas que no han sido mencionadas.

solares [10] [11], con una capacidad total instalada de casi 270 GWt, siendo China la que más potencia dispone con más de 180 GWt [10].

Aprovechamiento transformando la energía directamente en electricidad:

- Energía eólica [12]: Es la tecnología renovable más desarrollada, en la que sin embargo, no se está aprovechando todo el potencial instalado que los parques disponen, ya sea porque no existen métodos eficientes de almacenamiento de energía o porque toda la energía producida por los aerogeneradores no puede ser aprovechada, desperdiciando una parte de ésta.
- Energía fotovoltaica: Se considera una tecnología desarrollada, y por lo tanto, se espera que pueda sustituir gran cantidad de energía que hoy está siendo producida con recursos fósiles.
- Energía Solar Termoelectrica [13]: Es una tecnología que no ha sido todavía desarrollada, ya que las primeras potencias instaladas se empezaron a implantar aproximadamente hace unos 10 años. No obstante, gracias a la solar termoelectrica se podrán generar potencias a gran escala, haciendo que la producción de electricidad se pueda considerar limpia.

Realizando un análisis profundo de los diferentes recursos en el sector económico, no sólo se incluye la energía utilizada a lo largo de su ciclo de vida, sino que también es necesario incluir los materiales requeridos para la fabricación del sistema analizado. El abastecimiento de materiales críticos es un tema importante que actualmente se está considerando como una amenaza que puede poner en riesgo lo que se denomina como "*Green Economy*". Existe una lista de 20 materiales considerados críticos, lo cual puede crear un impacto importante en la economía. Dicha lista ha sido publicada recientemente por la Comisión Europea [14].

Algunos de estos materiales, son el grupo del platino y las tierras raras. Sin embargo, existen materiales los cuales no son considerados como críticos en esta lista pero son necesarios mencionarlos. El término "crítico" tal y como lo definió la

| 1 IA | | Group IUPAC Group CAS | | | | | | | | | | mentioned as "critical" | | | | | | | | | | | | | 18 VIIIA | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-----------------|------------|----------------|------------|------------|------------|----|----|----|-----|----|-----------|----------|-----------|------|----------|-----|----------|----|-----------|-----|-----------|------|--|
| | 1 | | | | | | | | | | | 0 | 1-2 | 3-4 | 5-6 | 7-9 | 9-10 | >10 | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | |
| 1 | H | | | | | | | | | | | 1 | IA | | | | | | | | | | | 18 | VIIA | He | | | | | | | | | | |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | | Atomic number → | 1 | ← relevant for | | | | | | | | | | | 13 | IIIA | 14 | IVA | 15 | VA | 16 | VIA | 17 | VIIA | |
| 3 | Na | Mg | 3 | IIIB | 4 | IVB | 5 | VB | 6 | VIB | 7 | VII B | 8 | VIII | 9 | VIII | 10 | VIII | 11 | IB | 12 | IIB | 13 | Al | 14 | Si | 15 | P | 16 | S | 17 | Cl | 18 | Ar | | |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Cs | Ba | La-Lu | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Fr | Ra | Ac-Lr | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Uub | Uut | Uuq | Uup | Uuh | Uus | Uuo | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

↑ motors/generators
 ⚡ photovoltaics
 🔋 batteries

LANTHANIDE

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |

ACTINIDE

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

M. Ritthoff 2014

La Figura 1 muestra los materiales más críticos después de la evaluación de 12 estudios diferentes. Se puede observar que existen ciertos materiales que corren un peligro potencial de no poder ser abastecidos para las tecnologías analizadas. Si se compara la Figura 1 con la lista publicada por la CE [14], salta a la vista que algunos materiales identificados en la figura anterior no aparecen y sí que es necesario mencionarlos porque se convertirán en críticos con el paso del tiempo.

En este apartado, se van a comentar los diferentes métodos utilizados para los diferentes apartados de los que se compone el proyecto realizado. En primer lugar, se realizará una evaluación del recurso del cual se aprovecha cada tecnología y la evolución que han experimentado cada una de ellas. Seguidamente, se llevará a cabo

una revisión del estado del arte de las tecnologías analizadas, para que, una vez hallados los materiales y las cantidades de ellos que se utilizan, transformarlas a exergía.

Posteriormente, se procederá a evaluar el impacto exergético asociado a los materiales, los cuales se compararán finalmente con la producción de los mismos. Dichos valores de producción se han hallado mediante la curva *Hubbert*, la cual se ha utilizado históricamente para calcular los picos de las reservas de petróleo. Todos estos términos comentados se desarrollan en los apartados siguientes.

4.1 Exergía

La exergía se define como *“la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un sistema por la interacción espontánea entre éste y su ambiente de referencia”* [17]. Además, es un indicador que ayuda a contabilizar el impacto de la actividad humana sobre la naturaleza, ya que al utilizar recursos no renovables para la extracción de minerales, se genera un aumento natural de la entropía.

Se ha decidido utilizar esta unidad puesto que no sólo tiene en cuenta el análisis de ciclo de vida, sino que también incluye factores como la disponibilidad de los materiales. Además, es una unidad de medida con la cual se pueden comparar diferentes tecnologías, y es ésta la principal causa; comparar las diferentes tecnologías analizadas y hallar gracias a la exergía cuál es más sostenible –desde un punto de vista de materiales–.

4.2 Impacto exergético en los materiales

Una vez explicada la unidad a utilizar, se procede a explicar el impacto del uso de materiales, para el que se ha utilizado el método desarrollado por Valero y Valero [18], donde se realiza un análisis del ciclo de vida teniendo en cuenta todos los materiales, además de su coste exergético, tanto en uso como en reposición. Dicho método contiene las siguientes consideraciones:

- **De la cuna a la puerta (EAC):** Explica el coste exergético para producir un metal desde la mina hasta su uso industrial.

- **De la tumba a la cuna (ERC):** Explica el coste exergético de reposición, para devolver los materiales desde un estado disperso a un estado inicial en las minas.

Esta metodología utiliza el concepto termodinámico “rarity” [18], el cual es un indicador de una medida exergética de la calidad del mineral en cuanto a aspectos físicos se refiere como la concentración, la composición química y la energía de extracción y concentración. Además, ofrece una dimensión adicional, la cual tiene en cuenta la criticidad de materiales en aspectos como la escasez de los mismos en la corteza terrestre y la cantidad de energía que es necesaria para poder extraerlos.

Es por este último motivo por el que se decide utilizar esta metodología, para poder evaluar el impacto de las energías renovables en las reservas mundiales de la extracción de minerales y comprobar de esta manera, la sostenibilidad llevada a cabo hasta el momento y su previsión en el periodo de tiempo analizado. Para poder identificar las restricciones en los diferentes sectores analizados, se necesita realizar una combinación de los términos bottom-up y top-down:

Bottom-up: Explica la evolución estimada de la producción del material de acuerdo con las reservas actuales y los valores históricos de producción. Los datos de reservas y de producción vienen recogidos en [19], que han sido determinados mediante la curva *Hubbert*.

Top-down: Explica la estimación de demanda de materiales de diferentes estudios en función de las proyecciones esperadas de potencia instalada por tipo de tecnología en cada recurso estudiado.

Las exergías de los principales materiales analizados a lo largo de este trabajo vienen reflejadas en la Tabla 1, donde se puede apreciar que el concepto de “rarity” es la suma de todos los costes exergéticos.

Tabla 1. Valores de exergía utilizados [18].

| | ERC [GJ/Tn] | EAC [GJ/Tn] | rarity | | ERC [GJ/Tn] | EAC [GJ/Tn] | rarity |
|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Ag | 1.281,4 | 7.371 | 8.652,4 | Pb | 0,9 | 36,62 | 37,52 |
| Al | 10,5 | 627,34 | 637,84 | Si | 0,7 | 0,73 | 1,43 |
| Cd | 263,9 | 5.898 | 6.161,9 | Sn | 15,2 | 426,35 | 441,55 |
| Cu | 35,3 | 291,7 | 327 | Te | 589.366,1 | 2.235.699 | 2.825.065,1 |
| Fe | 0,7 | 17,75 | 18,45 | Zn | 1,5 | 155,03 | 156,53 |
| Ga | 610.000 | 144.828 | 754.828 | Nd | 78,42 | 591,7 | 670,12 |
| Ge | 498 | 23.749 | 24.247 | Cr | 4,54 | 0,1 | 4,64 |
| In | 3.319,7 | 360.598 | 363.917,7 | Mn | 15,64 | 0,2 | 15,84 |
| Mg | 0 | 25,56 | 25,56 | Ti | 6,2 | 9,18 | 15,38 |
| Mo | 136 | 907,91 | 1.043,91 | V | 1.055 | 136 | 1191 |
| Ni | 9,98 | 523,61 | 533,59 | | | | |

Considerando los valores de la Tabla 1, se observa con claridad que existe gran diferencia en utilizar 1 Tn. de Si, el cual tiene una rarity de 1,43 GJ. que la misma cantidad de Nd, que tiene una rarity de 670 GJ. Se puede consultar el origen de los valores exergéticos en el apartado “Valores exergéticos” en el capítulo ANEXO I.

4.3 Curva Hubbert para materiales

Hubbert fue un geofísico que trabajó para la royal Dutch Shell en Texas y predijo a mediados de los años 50 que la tendencia de la producción del petróleo de las reservas casi siempre seguían un patrón idéntico [20] [21].

Las tendencias que *Hubbert* observó, estaban y siguen estando basadas hoy en día en el hecho de que ningún recurso finito puede sostener más allá de un breve periodo de tiempo, una tasa de crecimiento de producción. Las tasas de producción inicialmente tienden a aumentar de una manera exponencial, sin embargo, existen límites físicos que impiden que esto se siga produciendo a lo largo del tiempo. La curva que predijo *Hubbert* se muestra en la Figura 2 la cual se muestra a continuación [20].

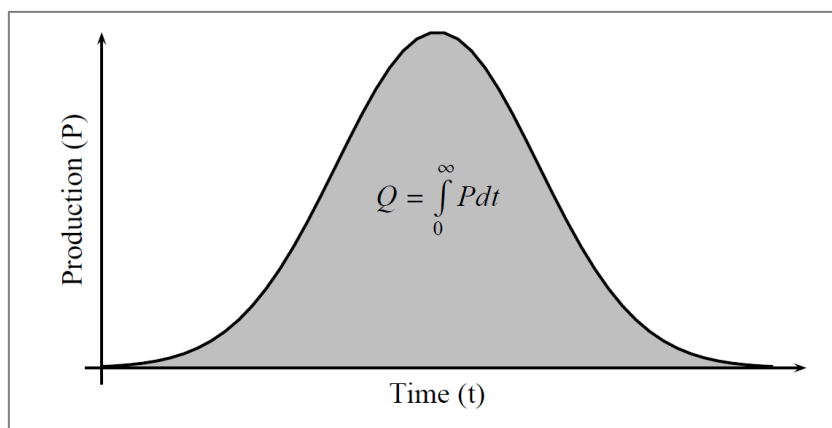


Figura 2. Curva en forma de campana de *Hubbert* para el ciclo de producción de un recurso finito [20].

El modelo de la curva *Hubbert* viene definido mediante la siguiente ecuación:

$$f(t) = \frac{R}{b_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_0}{b_0} \right)^2}$$

En donde la R son las reservas de los recursos y los parámetros b_0 y t_0 son las incógnitas. La función del máximo viene reflejada mediante el parámetro t_0 , y cumple la siguiente expresión:

$$f(t_0) = \frac{R}{b_0 \sqrt{2\pi}}$$

Es necesario tener en cuenta muchos factores para lograr una predicción más exacta, ya que las curvas pueden ser asimétricas, siendo la disminución de la producción mucho más pronunciada que hasta lograr el pico máximo de la reserva. Algunos de estos factores son económicos, geológicos, políticos y tecnológicos. Además, un factor que no está incluido en el modelo *Hubbert* es el reciclaje, por lo que se explica en el apartado que viene a continuación [22]. Para conocer más datos sobre este modelo se puede consultar el apartado “*Hubbert*” en el capítulo ANEXO I.

4.4 Ratios de reciclaje

Los materiales son utilizados en gran cantidad de aplicaciones, por lo que el concepto de reciclaje es un factor importante. Una vez que dichos materiales; los cuales componen una tecnología, aplicación, máquina, etc., llegan al fin de su vida útil,

éstos pueden ser reutilizados, minimizando de esta manera la necesidad de extraer los materiales de las minas.

Los ratios de reciclaje se pueden explicar de muchas maneras diferentes en función de factores como por ejemplo el producto, el metal y el metal en el producto. Según la UNEP, los valores de reciclaje que se han utilizado en este estudio vienen reflejados en la Tabla 2 que se muestra a continuación:

Tabla 2. Porcentaje de reciclado utilizados [23].

| Material | Reciclaje | Material | Reciclaje | Material | Reciclaje |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ag | 30% | Mg | 33% | Zn | 23% |
| Al | 36% | Mo | 33% | Nd | 5% |
| Cd | 25% | Ni | 29% | Cr | 20% |
| Cu | 30% | Pb | 50% | Mn | 37% |
| Fe | 50% | Se | 5% | V | 0% |
| Ga | 25% | Si | 0% | Ti | 52% |
| Ge | 35% | Sn | 22% | | |
| In | 38% | Te | 1% | | |

En el modelo *Hubbert* no se tiene en cuenta el porcentaje de reciclaje, por lo que dicha cifra es necesaria incluirla. En este caso no se va a sumar el porcentaje a la curva que se muestra en la Figura 2, sino que se utilizará la siguiente expresión:

$$D_{Ti} = D_{Ai} - R_i D_{Ai}$$

Donde D_A es la demanda anual y R es el porcentaje de reciclado de un material i . De este modo, a la demanda anual de un material se le restará la cantidad de material reciclado, prolongando en el tiempo de esta manera la curva *Hubbert*.

En las próximas secciones de este proyecto, se procede a comentar las diferentes tecnologías renovables analizadas de generación eléctrica.

5. Energía Eólica

5.1 Introducción a la Energía Eólica

Hoy en día la electricidad que se consume gracias a la energía eólica supone un 2,5 % del total de la energía mundialmente demandada. Gran parte de este logro es gracias a países como Dinamarca, Portugal y España en los que la generación de electricidad debido a esta tecnología supera el 20 % [12], esperando incluso que esta cifra aumente considerablemente en los próximos años [24].

Existe gran cantidad de viento en diferentes puntos del planeta como se puede observar en la Figura 3. Se aprecian diferentes zonas destacando tres colores: azul, verde y rojo. En las zonas azules la velocidad del viento es baja por lo que el recurso es mínimo. Las zonas verdes se consideran lugares en donde el recurso disponible es medio, mientras que las zonas rojas son puntos favorables para la instalación de aerogeneradores puesto que el recurso eólico en esos lugares es muy alto.

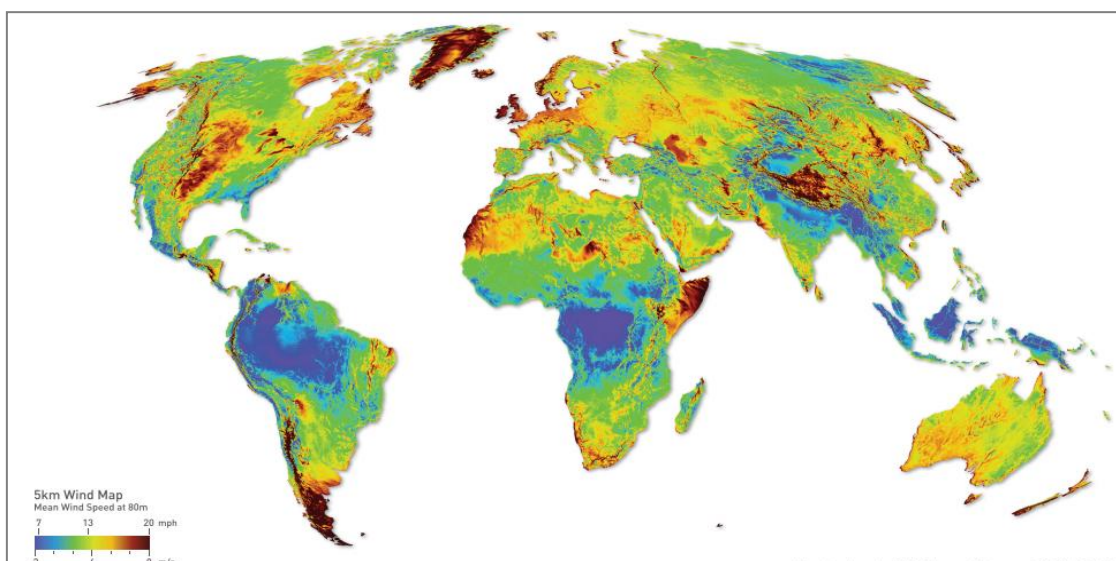


Figura 3. Potencial eólico en el planeta [25].

Hoy en día existen un total de 4.155 [25] parques eólicos distribuidos en los 5 continentes. Sin embargo, no todos ellos están siendo explotados de una manera correcta debido a su ubicación, puesto que las zonas en que se encuentran algunos de los parques eólicos no disponen de un gran recurso y, por lo tanto, no se aprovechan al máximo.

El crecimiento que ha experimentado el sector eólico en el planeta no ha sido uniforme como se puede observar en la Figura 4, sino que en función del lugar geográfico que se mire, la implantación habrá sido de una manera u otra.

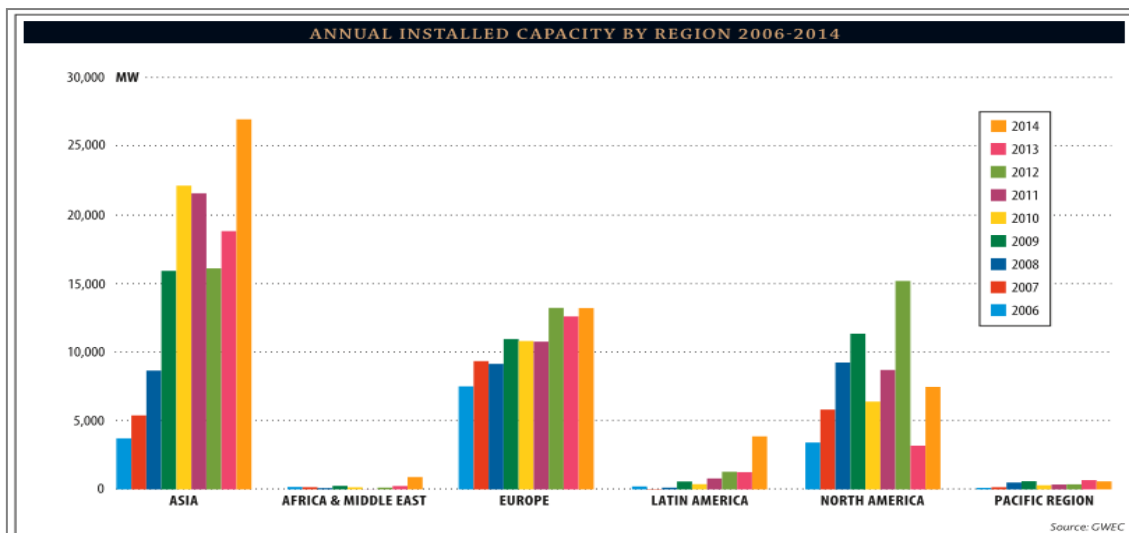


Figura 4. Evolución de la potencia instalada por zonas [24].

En la Figura 4 se observa como la implantación anual de potencia instalada en Europa ha sido lineal, siendo beneficiada por las diferentes subvenciones y ayudas de cada país [12]. En cambio, en Norte-América el crecimiento ha sido muy variable, donde la potencia instalada en el año 2013 se vio reducida más de 5 veces respecto del año anterior. Por otro lado, el crecimiento más espectacular que se ha visto se ha producido en el continente asiático, en el que se ha llegado a doblar la capacidad instalada en el año 2014 en Europa y a triplicar la capacidad instalada anual en Norte-América. Las principales razones de que el crecimiento haya sido exponencial ha sido la necesidad de mejorar la calidad del aire en algunos países, como China, en donde la contaminación en la atmósfera es muy alta y la calidad del aire muy baja [24].

Con el crecimiento visto en el párrafo anterior, se puede esperar que el desarrollo de la energía eólica vaya a experimentar un incremento importante, lo que también incluye un aumento de la demanda de materiales, lo cual puede dar lugar a problemas de cuellos de botella². Para poder identificar los diferentes motivos de los cuellos de botella y los futuros problemas, resulta importante analizar la producción

² Cuello de botella: Se denomina cuello de botella cuando en un proceso productivo una fase de la cadena de producción es más lenta que otras, ralentizando el proceso de producción global.

esperada de energía eólica y los materiales asociados a ella para poder definir las futuras políticas de energía.

En el sector de la energía eólica la demanda de materiales usados en generadores, redes eléctricas, convertidores de potencia, etc. están aumentando rápidamente. Un ejemplo de ello es la capacidad de potencia eólica global instalada, la cual se ha multiplicado por tres desde el año 2007 –20.310 MW– hasta el año 2015 –60.013 MW– [26] y la proyección que se espera para el año 2050 es que se incremente esta cifra hasta 2.500 GW aproximadamente [27]. Además, la repotenciación de las actuales turbinas eólicas al final de sus vidas, implicaría un incremento de la demanda de los materiales que se requieren. Ambas cuestiones, hacen que sea crítico realizar un análisis profundo del uso de dichos materiales en la industria de la energía eólica, para poder garantizar que su evolución no se verá limitada por las restricciones en cuanto a los materiales.

5.2 Tecnologías

Las turbinas eólicas que se están implantando actualmente y seguramente las que se implantarán en el futuro dispondrán de las siguientes características [28]:

- Torres de hasta 140 m. de altura.
- Rotor de 3 palas con un sistema de giro para mantener la alineación con la dirección del viento.
- Regulación para alta velocidad del viento con un ajuste del ángulo pitch, lo que permite a las palas girar sobre sus ejes.
- Rotor de velocidad variable para incrementar la productividad para velocidades bajas del viento, además de poder hacer un balance de la producción de electricidad con la demanda.
- Tren de transmisión en donde la caja de cambios se adapta a la baja velocidad angular del rotor en función de los requerimientos del generador de electricidad. Sin embargo, existen otros tipos de generadores, llamados multipolar, los cuales pueden ir directamente acoplados al rotor.

Teniendo en cuenta el estudio de algunos autores [28] [29], las turbinas que utilizan caja de cambios o multiplicadora son las que más abundan en el mercado representando un 75 % aproximadamente del mismo. No obstante, es la otra tecnología, las turbinas que no disponen de multiplicadora, las que están creciendo, y se espera que su contribución sea alta en un periodo corto. Debido a estas razones, se han considerado dos tipos diferentes de turbinas en el presente estudio:

- **Modelo 1:** Con multiplicadora para transferir potencia del rotor al generador.
- **Modelo 2:** Transmitiendo la potencia directamente desde el rotor al generador.

Las principales características de los modelos comentados de las turbinas eólicas vienen reflejadas a continuación –Tabla 3–.

Tabla 3. Características del estudio de las turbinas eólicas [28]

| | Modelo 1 | Modelo 2 |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Multiplicadora | 1-2 etapas | No tiene |
| Generador | Velocidad media (60 – 600 rpm) | Velocidad baja (8-20 rpm) |
| Convertidor de potencia | Todo | Todo |

5.3 Demanda de materiales en turbinas eólicas

Para poder identificar los materiales que se usan en los modelos de turbinas mencionados, se ha llevado a cabo un análisis del estado del arte, el cual se ha obtenido mediante una revisión bibliográfica.

En la Tabla 4 que aparece a continuación, se muestran los diferentes materiales críticos identificados por diferentes autores. Dicha Tabla es un resumen de toda la información recogida la cual se puede consultar en el apartado “*Lista de materiales utilizados en turbinas eólicas*” en el capítulo *ANEXO II*.

Por otro lado, también es necesario tener en cuenta la localización de las turbinas para la demanda de materiales, puesto que se necesita gran cantidad de Cu para transportar la energía generada off-shore hasta el lugar de abastecimiento. Además del Cu, la cantidad de Fe que se usa en off-shore es considerablemente más

elevada que la que se usa on-shore debido a la cimentación requerida. Estos datos de demanda de materiales para turbinas eólicas off-shore se pueden encontrar en el apartado “*Demanda de materiales para turbinas eólicas off-shore*” en el capítulo *ANEXO II*. Contando los materiales del párrafo anterior con lo que se ha mencionado en éste, se obtiene un resumen de los resultados consultados en diferentes fuentes bibliográficas [30] [31] [32] [33] [28] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42].

Tabla 4. Materiales utilizados por tipo de turbina [kg/MW].

| | Al | | Cu | | Fe | | Nd | | Ni | |
|-----------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| | On shore | Off shore | On shore | Off shore | On shore | Off shore | On shore | Off shore | On shore | Off shore |
| Modelo 1 | 840 | 840 | 2700 | 11500 | 172100 | 292100 | 60,92 | 60,92 | 111 | 111 |
| Modelo 2 | 560 | 560 | 7 | 15800 | 112670 | 232670 | 182,7 | 182,7 | 111 | 111 |

5.4 Evolución de la Energía Eólica

Es necesario realizar un estudio donde se realicen proyecciones de potencia instalada desde el 2015 hasta el 2050 para analizar el impacto de las demandas de los materiales de la energía eólica en las reservas. Para poder realizarlo, se han consultado los valores provenientes de diferentes fuentes [12] [26] [24] [28] y [43].

Considerando los datos de las referencias del párrafo anterior, se muestra la Figura 5 a continuación, la cual refleja la evolución de la potencia instalada desde el año 2016 hasta el año 2050 por tipo de instalación, es decir, on-shore y off-shore. Los datos consultados aparecen por décadas, por lo que se ha decidido estimar un crecimiento lineal. Como se puede apreciar, existe una tendencia a que el mercado off-shore se incremente en gran cantidad hasta el año 2050, llegando a duplicar el valor de la potencia instalada on-shore.

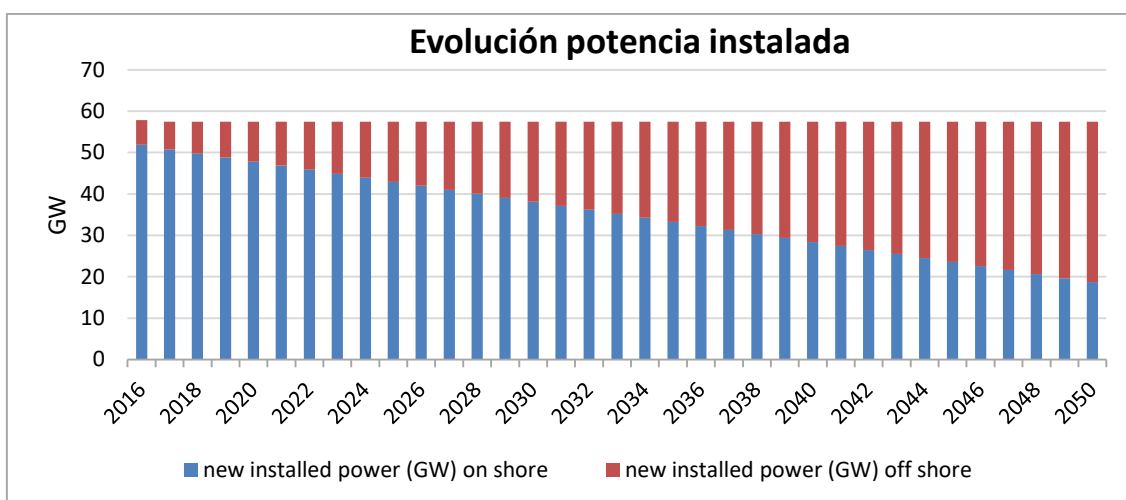


Figura 5. Evolución de la potencia instalada por tipo de instalación.

Un factor importante para explicar la demanda futura de los materiales es el efecto repowering de las instalaciones eólicas al final de su vida. De acuerdo con [26], la vida útil de una turbina eólica se encuentra entre 20 – 25 años. En el presente estudio se ha considerado la cifra más conservativa con respecto al uso de la demanda de materiales, es decir, 25 años.

Para explicar este impacto, es necesario calcular la edad de las actuales instalaciones eólicas, ya que, como se puede apreciar en el apartado “*Repowering de los aerogeneradores hasta el año 2050*” en el capítulo ANEXO II, una vez que la vida útil de las turbinas eólicas llegan a su fin, es necesario realizar el repowering, previendo de esta manera picos futuros. La Figura 6, muestra como más del 14 % de la capacidad total instalada tiene un año; mientras que el 40 % se encuentra entre 3 y 7 años.

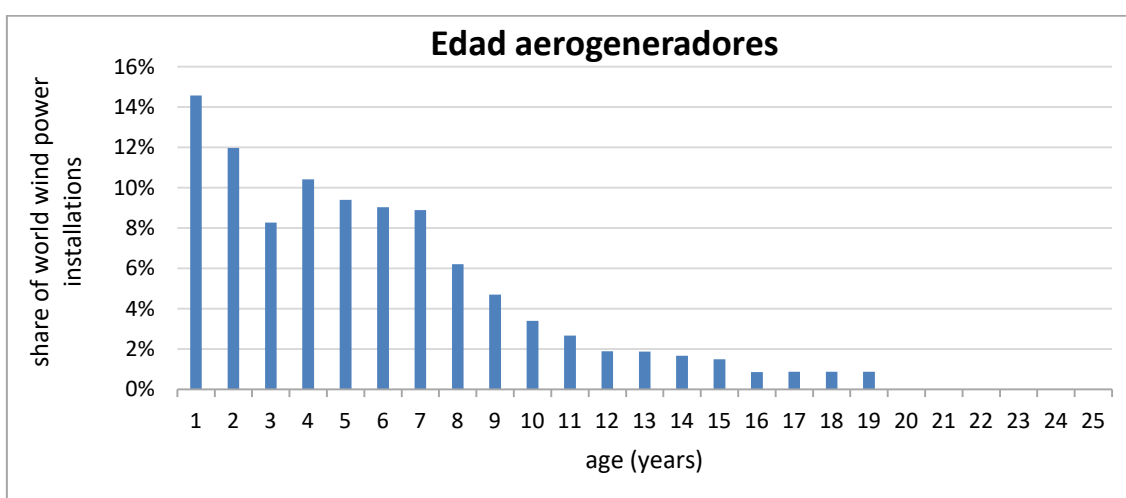


Figura 6. Edad de los aerogeneradores [14].

Conociendo la potencia instalada anualmente que se va a producir desde el 2015 hasta el 2050, con los datos de potencia instalada actualmente, se puede estimar la potencia acumulada que habrá anualmente hasta el 2050, diferenciándolas tanto en on-shore como en off-shore. Tal y como muestra la Figura 7 que aparece a continuación, se espera una potencia acumulada de alrededor de 2.500 GW en el 2050, habiendo una tendencia de 54 GW/año de potencia instalada.

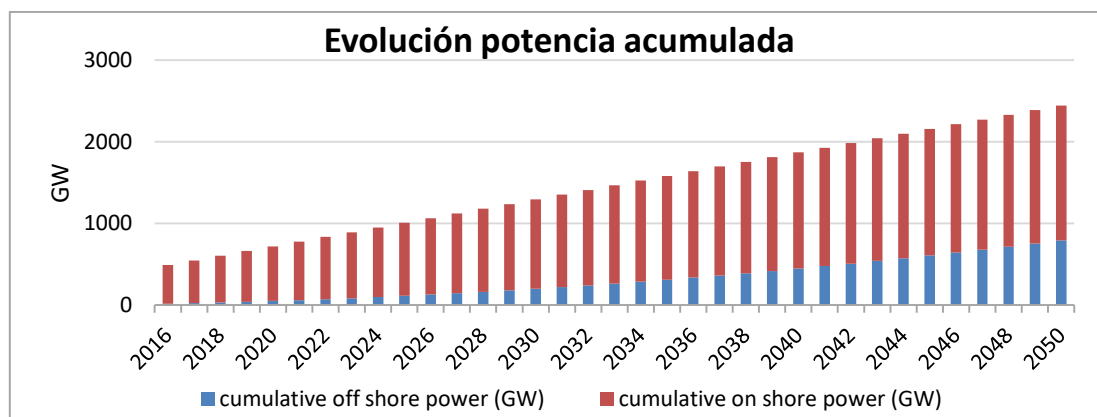


Figura 7. Proyección de la potencia acumulada de la energía eólica.

5.5 Resultados

5.5.1 Comparación exergetica de las turbinas

Cuando se analiza un tipo de turbina en función de los materiales utilizados, no solo se debe tener en cuenta la cantidad que se ha usado de dicho material, sino la cantidad de energía que es necesaria para poder extraerlo y de la misma manera reponerlo; es decir, el rarity.

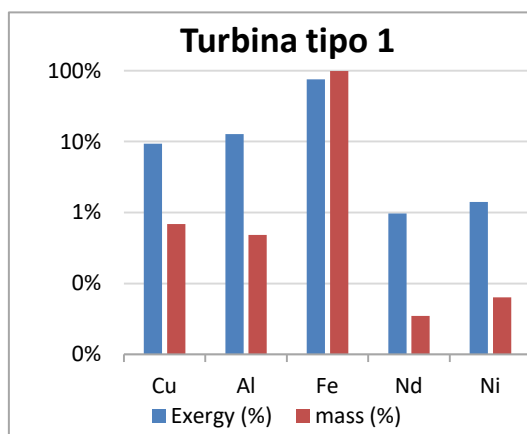


Figura 8. Comparación de masa y exergetia de la Turbina 1.

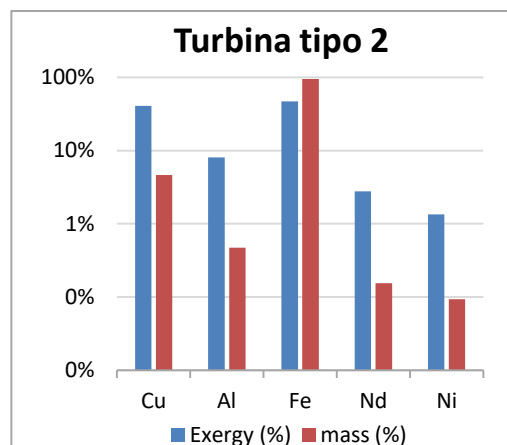


Figura 9. Comparación de masa y exergetia de la Turbina 2.

En la Figura 8 y la Figura 9 hay que destacar que el eje de ordenadas es logarítmico en base 10, debido a las grandes diferencias entre valores. Como se puede apreciar en dichas Figuras, –los valores se pueden consultar en el apartado “Comparativa másica y exergética de las turbinas” en el capítulo ANEXO II–; la mayor parte de la masa de las turbinas es debido al Fe, mientras que otros elementos como el Cu no supera el 1 %. Sin embargo, si se miden los mismos valores en exergía, aparece un cambio considerable en donde valores como el Nd o el Al se multiplican por 18, mientras que el Fe se reduce a la mitad, debido a que con la exergía se está teniendo en cuenta la calidad de los sistemas.

Con las Figuras anteriores no se puede determinar cuál de las dos turbinas contiene más rarity. De este modo, se muestra la Tabla 5 en el que aparecen los resultados de la suma de todos los materiales de cada tipo de turbina analizada.

Tabla 5. Valores de rarity por tipo de turbina.

| | Modelo 1 | Modelo 2 |
|---------------|----------|----------|
| Total [GJ/MW] | 4.203 | 4.416 |

5.5.2 Stock in use –cantidad de material requerido hasta 2050–

Cuando se nombra el concepto de “Stock in use” se refiere a la cantidad de material que se está utilizando en una tecnología ya instalada, en este caso, en la energía eólica. Los principales materiales que se utilizan y sus cantidades han sido mencionados a lo largo de este capítulo, por lo que se podría realizar una proyección hasta el 2050 para conocer cuál será la evolución de los mismos.

Como se observa en la Figura 10 y la Figura 11, algunos materiales podrían experimentar un crecimiento importante hasta el año 2050; como ejemplo se muestra el Al, que vería multiplicada por seis la cantidad utilizada.

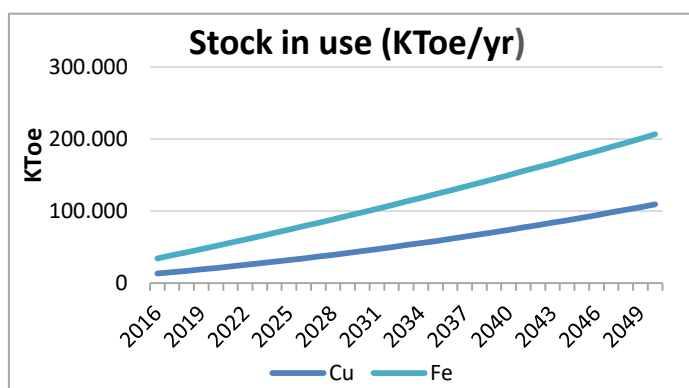


Figura 10. Evolución Stock in use Cu y Fe [KToe].

Por otro lado, la cantidad de Nd que se utilizaría en el año 2050 dependerá de la evolución de los tipos de turbina que se instalen. En cualquier caso, la cantidad a utilizar será bastante más grande que la que hoy se está usando.

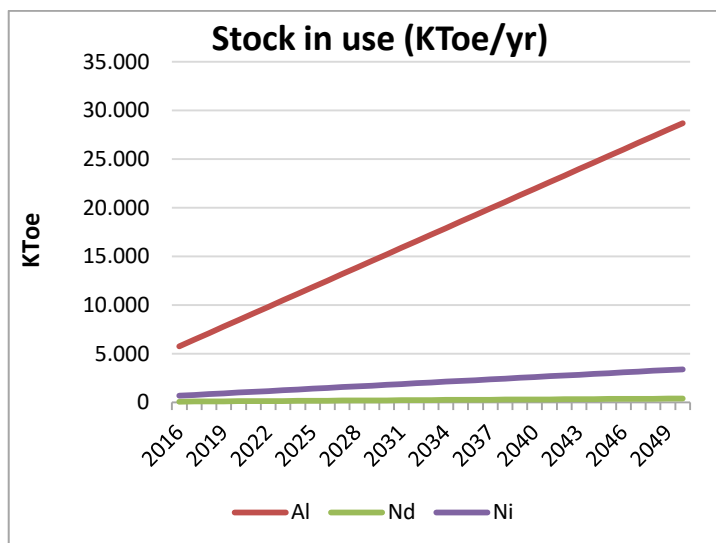


Figura 11. Evolución Stock in use Al, Nd y Ni

En la Figura 12, se muestra una comparativa de los materiales demandados en esta tecnología desde el año 2015 respecto de las reservas mundiales. Como se aprecia en el eje vertical izquierdo, que se encuentra en escala logarítmica, se pueden observar que las reservas en toneladas todavía son muy elevadas, ya que como se observa en el eje secundario de la derecha, el impacto en las reservas no supone más del 2,5 % en el caso del cobre, el cual dispone del valor más elevado.

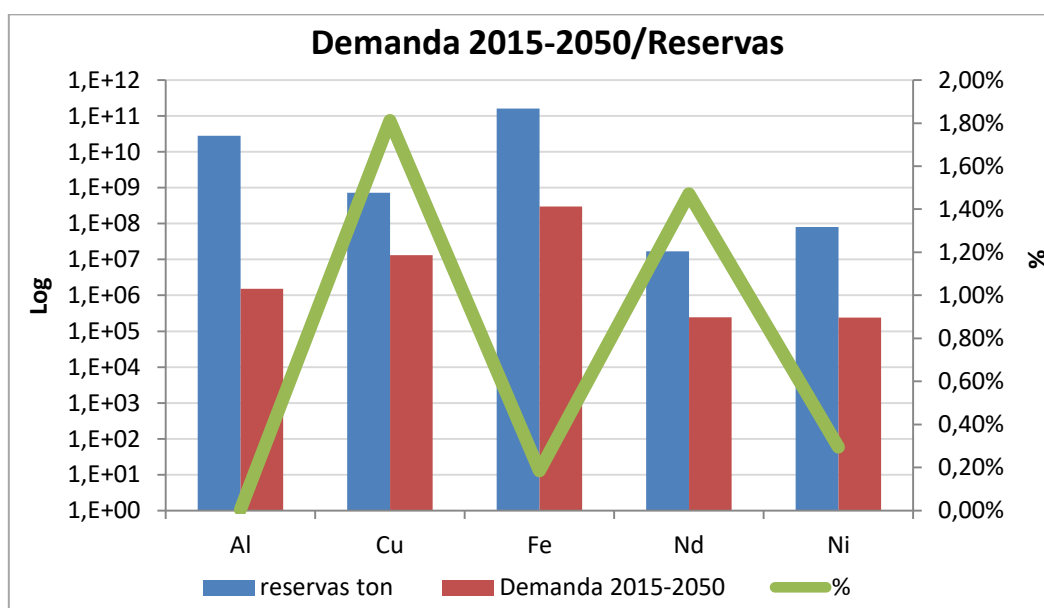


Figura 12. Comparativa entre reservas mundiales y demada 2015-2050 [Tn].

5.5.3 Previsión de escasez de materiales

Una vez que se han explicado y analizado las diferentes turbinas desde el punto de vista de los materiales, se va a proceder a comentar la demanda de materiales que se podría esperar desde el 2015 hasta el 2050, donde el principal objetivo es poder determinar la escasez de algunos materiales a lo largo de estos años en el sector eólico. El procedimiento que se va a seguir va a ser comparar los datos de producción mundial de cada material con la demanda de ese mismo material en las turbinas del sector eólico.

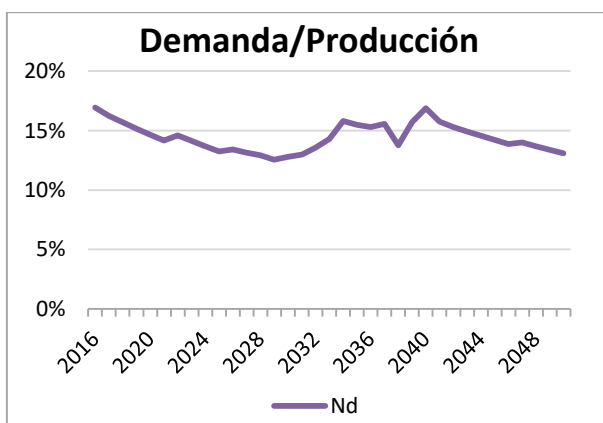


Figura 13. Porcentaje de Nd utilizado en eólica.

Aunque no existiría peligro de una restricción del Nd en el periodo que se ha estudiado, es necesario resaltarlo, puesto que la demanda que requeriría este material únicamente para la energía eólica se encontraría alrededor del 14 % de la producción mundial.

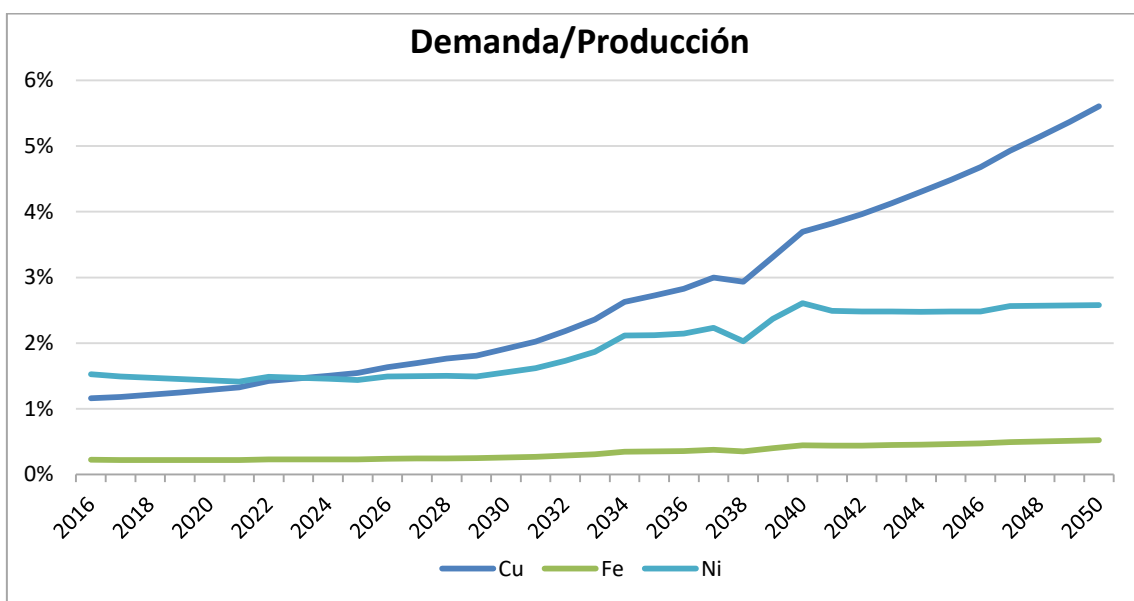


Figura 14. Porcentaje de Cu, Fe y Ni utilizado en eólica.

En un principio no existiría riesgo de escasez de materiales como el Fe o el Cu. Sin embargo, es importante mencionarlos debido a las enormes cantidades que se requerirían de estos materiales para la implantación de aerogeneradores. Tanto es así,

que como se aprecia en la Figura 14, más del 5 % de la producción mundial de Cu en el año 2050 estaría destinada al sector eólico, siendo ahora poco más del 1 %.

Esto es debido a principalmente dos fenómenos que se van a experimentar; uno de ellos es el crecimiento de la potencia instalada off-shore, la cual requiere mucha más cantidad de Cu. Sin embargo, como se puede ver en el apartado *“Demanda Vs Producción” en el capítulo ANEXO II*, el principal factor de que este valor crezca exponencialmente es la gran caída que experimentaría la producción de Cu después de alcanzar su pico máximo de producción en el año 2022.

5.6 Conclusiones de la energía eólica

Los materiales que han sido analizados a lo largo de todo este capítulo son los que se han considerados como críticos o que se prevé una criticidad no muy lejana, ya sea por su escasez en la corteza terrestre o por la gran cantidad demandada de los mismos.

Por ello, la principal conclusión que se obtiene después de estudiar las diferentes turbinas, es que el modelo 1 se considera más sostenible que el modelo 2, desde un punto de vista exergético, puesto que ésta segunda dispone de un 5 % más de exergía que la primera –ver Tabla 5–.

En el sector eólico la demanda de Nd que se requiere se encuentra en torno al 14 %, por lo que es importante seguir estudiando y analizando este material en años posteriores para poder identificar futuros cuellos de botella y estar prevenidos ante tales situaciones.

Por otra parte, se ha visto que la energía eólica off-shore experimentaría un incremento importante de la potencia acumulada instalada –crecimiento medio anual del 12 %–, lo que conlleva al uso de más materiales para el transporte de la energía, como es el Cu, donde se utilizan 10,30 Tn/MW, mientras que en on-shore se requieren 1,50 Tn/MW.

6. Energía Solar Fotovoltaica

6.1 Introducción a la Energía Solar Fotovoltaica

El efecto fotovoltaico se puede resumir como la capacidad de algunos materiales semiconductores capaces de generar corriente directa, gracias a la irradiación solar, cuando éstos son conectados a una resistencia eléctrica.

La corriente eléctrica será siempre proporcional a la irradiación solar, por lo que a causa de esto, suponiendo que todos los módulos fotovoltaicos están conectados a cargas eléctricas, será necesaria la utilización de sistemas de apoyo –generador diesel o conexiones a red– para aquellos momentos en que la generación de electricidad sea menor que la demanda, como por ejemplo en días nublados o durante la noche.

Sin embargo, no todo el mundo puede instalar módulos fotovoltaicos y que le sea rentable, ya que no todos los puntos del planeta son idóneos para instalar esta tecnología, debido a que no todos los lugares disponen de la misma cantidad de sol. Como se observa en la Figura 15, existen lugares ideales, como por ejemplo Chile, donde la implantación de módulos fotovoltaicos generaría más electricidad que en otros lugares que no exista tanta disponibilidad del sol, como es el caso de Alemania.

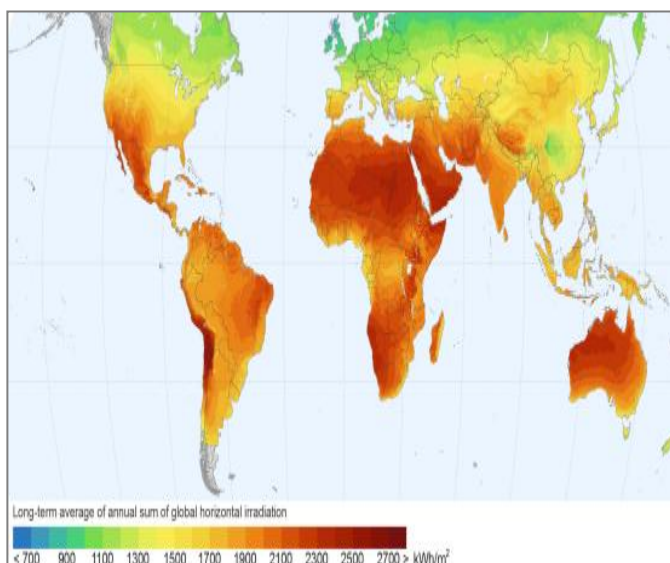


Figura 15. Potencial solar en el planeta [44].

La Figura 15 muestra dos zonas diferenciadas. Una de ellas en la que el color es verde, y por lo tanto el recurso solar es bajo, y otra zona en la que el color es rojo, siendo estos lugares ideales para la implantación de tecnologías renovables con aprovechamiento del sol, puesto que el recurso en dichas zonas es muy elevado.

La evolución que ha experimentado esta tecnología se puede observar en la Figura 16, donde se han alcanzado tasas de crecimiento de más del 70 % anual desde el año 2004, experimentando el máximo valor en el año 2008, donde se llegó a un crecimiento de casi el 80 %. Se encuentra distribuida a lo largo de todo el planeta, siendo la UE líder con el mayor potencial instalado.

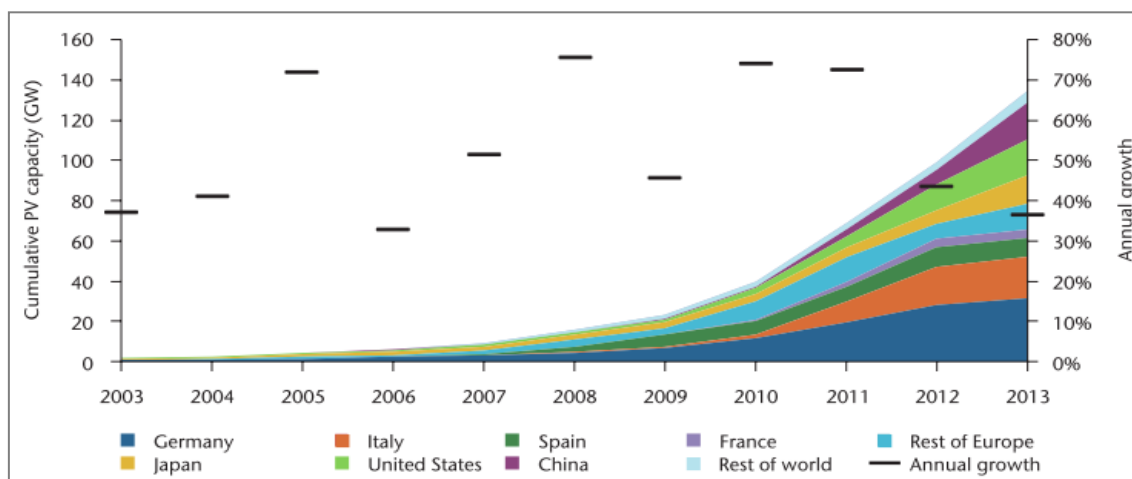


Figura 16. Evolución de la energía solar fotovoltaica acumulada y tasa de crecimiento [45].

Al igual que sucede con la energía eólica, no todas las instalaciones solares están siendo explotadas y obteniendo el máximo rendimiento, puesto que estas instalaciones se encuentran en un lugar con menor recurso solar. A modo de ejemplo se comentará Alemania, ya que es el país con mayor potencia fotovoltaica instalada en el mundo [45], siendo el recurso mucho menor si se compara con el recurso que se dispone en África –ver Figura 15–, por lo que si toda esa potencia instalada se encontrara en el continente africano, se obtendría mayor energía eléctrica con la misma instalación.

Aunque esta tecnología de los módulos fotovoltaicos se empezó a explotar al principio de la década de 1990, no fue hasta el año 2005 donde se instalaron las primeras potencias importantes, considerándose una tecnología madura ya que hoy en día existe una potencia instalada de alrededor de 220 GW con una proyección de alcanzar 4.500 GW a finales de 2050, siendo capaz de generar el 16 % de toda la demanda eléctrica consumida mundialmente [46] [47]. La experiencia que se tiene en esta tecnología, unido a los valores de rendimientos –ceranos al 15 % para Silicio monocristalino y un rango entre 6 y 12 % para modelos de capas finas–, debería ser

suficiente para considerar los módulos fotovoltaicos un sistema fiable para la generación de electricidad.

Entre los años 2005 y 2010 se produjeron dos fenómenos importantes que cambiarían el devenir de esta tecnología. El primero, fue un cambio de las políticas en los países europeos donde se modificó la legislación. El otro fenómeno que se produjo, fue el incremento de productores de módulos, lo que hizo, unido con lo anterior, que los precios se vieran reducidos considerablemente, llegando a un precio de 1,5 €/Wp³. Hoy en día, aunque los precios se ven afectados por la economía de escala, se pueden adquirir módulos por precios cercanos a los 0,6 €/Wp. Algunos estudios indican, que en un periodo corto de tiempo –a finales de 2017– el valor se reducirá hasta 0,5 €/Wp con una vida útil garantizada por los fabricantes de 25 años, la cual igualará a los métodos térmicos tradicionales de generación de electricidad en la red eléctrica [48].

6.2 Tecnologías

El primer paso para evaluar los requerimientos de materiales para la fabricación de los módulos fotovoltaicos es la identificación de la disponibilidad de las tecnologías fotovoltaicas actuales y futuras. Para ello, se muestra la Tabla 6 en la cual se observa la evolución hasta el año 2030.

Tabla 6. Paneles fotovoltaicos por tecnología y porcentaje en el mercado [47].

| Tecnología | | 2014 | 2020 | 2030 |
|-----------------------|----------------------------------|------|-------|-------|
| Silicio (c-Si) | Monocristalino | 92% | 73.3% | 44.8% |
| | Policristalino | | | |
| | Ribbon | | | |
| | a-Si –Silicio amorfo– | | | |
| Capa fina | Cobre Indio Galio Selenio (CIGS) | 2% | 5.2% | 6.4% |
| | Telururo de Cadmio (CdTe) | 5% | 5.2% | 4.7% |
| Otros | Concentración solar (CPV) | 1% | 1.2% | 0.6% |
| | Módulos orgánicos (OPV) | | 5.8% | 8.7% |
| | Silicio cristalino | | 8.7% | 25.6% |
| | Metales pesados | | 0.6% | 9.3% |

Históricamente, como se puede apreciar en la Tabla 6, la mayoría de los módulos fotovoltaicos estaban basados en el Si, principalmente monocristalino y policristalino.

³ Wp: Máxima potencia eléctrica que un módulo puede generar.

Hoy en día, la introducción en el mercado de los módulos finos –CIGS y CdTe– ha provocado el requerimiento de otros materiales como el Cu, In, Ga, Se, Cd y Te.

Aunque existen diferencias en la composición y en la producción de cada módulo, el objetivo es el mismo en todos ellos: que los materiales semiconductores sean capaces de convertir la energía solar en electricidad.

Las principales diferencias entre las tecnologías vienen reflejadas en la eficiencia⁴. En la Tabla 7 aparece un resumen de las tecnologías disponibles actualmente y sus eficiencias, las cuales están representadas cualitativamente ya que no están basadas en un modelo específico.

Tabla 7. Eficiencia de módulos fotovoltaicos [49].

| | Eficiencia celda [%] | Eficiencia modulo [%] | [m²/kW] | Vida |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------|
| Mono-c-Si | 16-22 | 13-19 | 7 | 25 |
| Poli-c-Si | 14-18 | 11-15 | 8 | 25 |
| a-Si | 4-8 | | 15 | 25 |
| CdTe | 10-11 | | 10 | 25 |
| CIGS | 7-12 | | 10 | 25 |
| PV orgánico | 2-4 | | 15 | N/A |
| CPV | 20-25 | | N/A | N/A |

La principal diferencia de la tecnología basada en Si, es la estructura interna, en la que puede ser monocristalino o policristalino. El otro gran bloque, los módulos de capa fina, son completamente diferentes debido a que no sólo usan diferentes metales, sino que además el proceso de fabricación también es distinto.

6.3 Demanda de materiales en módulos fotovoltaicos

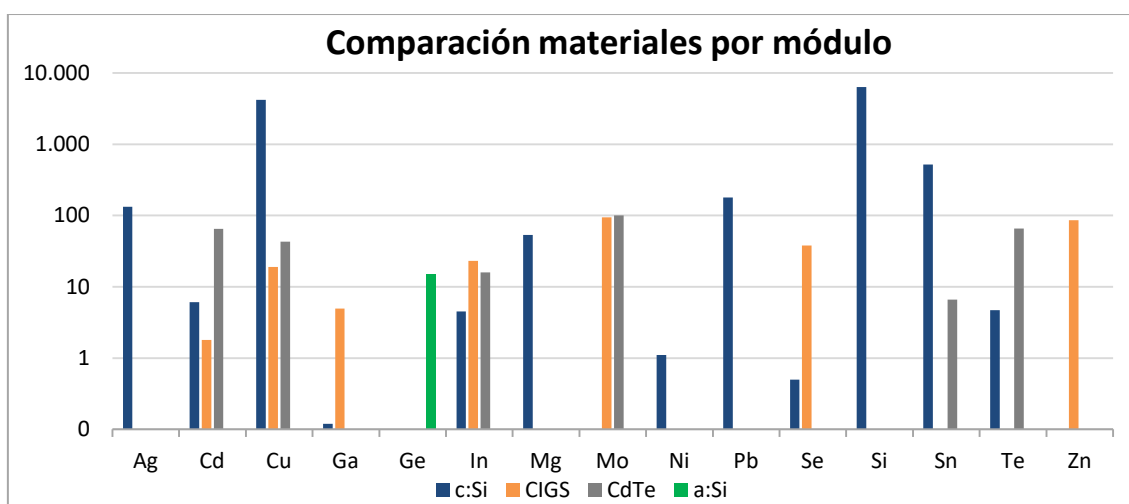
Para identificar qué materiales son usados en los diferentes tipos de tecnologías, es necesario realizar una revisión bibliográfica sobre el estado del arte, consultando diferentes autores. La Tabla 8 muestra el resumen de los materiales utilizados en función de los diferentes autores consultados [50] [40] [51] [52] [53] [54] [55] [56].

⁴ Se entiende eficiencia como potencia por m² en condiciones normales: 1000 W/m² y 25 °C.

Tabla 8. Demanda de materiales por tecnología [kg/MW].

| | c-Si | CIGS | CdTe | a-Si |
|-----------|---------|------|-------|------|
| Ag | 133 | | | |
| Cd | 6,1 | 1,8 | 65,2 | |
| Cu | 4.177,5 | 19 | 42,8 | |
| Ga | 0,1 | 4,9 | | |
| Ge | | | | 14,8 |
| In | 4,5 | 23,2 | 15,9 | |
| Mg | 53,5 | | | |
| Mo | | 94,3 | 100,5 | |
| Ni | 1,1 | | | |
| Pb | 178,6 | | | |
| Se | 0,5 | 38,1 | | |
| Si | 6.326,5 | | | |
| Sn | 520 | | 6,6 | |
| Te | 4,7 | | 65,4 | |
| Zn | | 85,8 | | |

En el apartado “*Lista de materiales utilizados en módulos fotovoltaicos*” en el capítulo *ANEXO III*, se puede consultar cómo se han obtenido estos resultados. Si nos fijamos en la Figura 17, resalta a primera vista que se necesita gran cantidad de Cu y Si para los módulos c-Si, mientras que el material más utilizaos en CIGS y en CdTe es el Mo.


Figura 17. Comparación de cantidad de materiales en función de la tecnología [kg/MWp].

6.4 Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica

Con el objetivo de evaluar las restricciones físicas y analizar el impacto de la energía solar fotovoltaica, es necesario determinar qué tecnología es la que domina en el mercado y cuál podría ser la evolución de éstas a lo largo del tiempo. Basándose en

la información y el análisis realizado por [40], el mercado hoy en día se basa en 85 % para c-Si, 5 % para CIGS, 5 % para CdTe y 5 % para a-Si. Esta predicción se encuentra cercana al estado del arte de la tecnología, sin embargo, como se puede observar en la Tabla 6, se pueden producir modificaciones que afectarían directamente a los requerimientos de materiales estimados.

Una vez que se dispone del porcentaje de la tecnología en el mercado, se procede a calcular la cantidad de cada material utilizado en total. Como se observa en la Figura 18, casi todos los materiales son utilizados en la tecnología c-Si puesto que es la que domina en el mercado –los datos se pueden consultar en el apartado “Contribución en masa de los módulos fotovoltaicos” en el capítulo ANEXO III–.

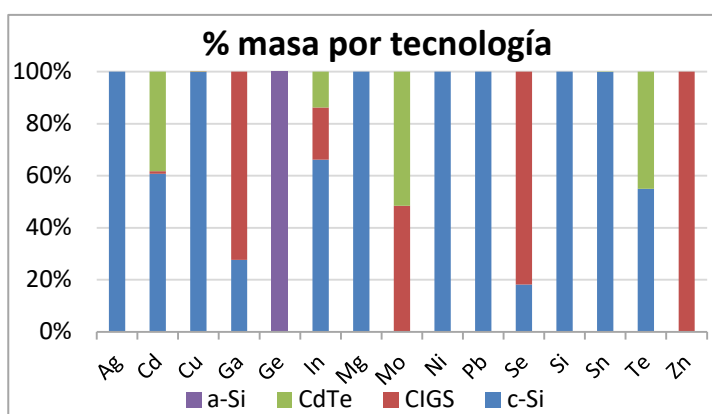


Figura 18. Porcentaje de masa por tecnología

Calculadas las cantidades de materiales totales en el mercado, el siguiente paso es determinar la evolución de la potencia instalada anualmente para obtener la demanda que existirá en el año 2050.

No existe una única evolución de los módulos fotovoltaicos, sino que existen diferentes alternativas en la implantación de esta tecnología. En este caso, se han tenido en cuenta dos modelos de evolución, como es el autoconsumo y las plantas fotovoltaicas.

La facilidad en la instalación de las placas fotovoltaicas, unido a la reducida superficie que se necesita para cubrir la demanda eléctrica de una casa –en función de la demanda, se requerirá un sistema de almacenamiento–, presenta un escenario muy prometedor para el autoconsumo ya que además de las facilidades comentadas, el consumidor de electricidad se convertiría en productor de la misma.

Tomando como referencia diferentes estudios y proyecciones [57] [58] [59] [60] y considerando el análisis realizado por [61], se prevé que en el año 2050 existiría una introducción en el mercado del autoconsumo del 30 % con un crecimiento anual del 15 %. Con estas estimaciones ya es posible obtener la capacidad de potencia instalada para el periodo estudiado.

Aunque las primeras instalaciones fotovoltaicas se produjeron a principio de 1990, no fue hasta el año 2008 cuando se empezaron a implantar las grandes plantas fotovoltaicas [45]. Es muy importante tener en cuenta estos datos, debido a que al final de su vida útil, que como se ha mencionado anteriormente es de 25 años, sería necesario realizar el efecto repowering.

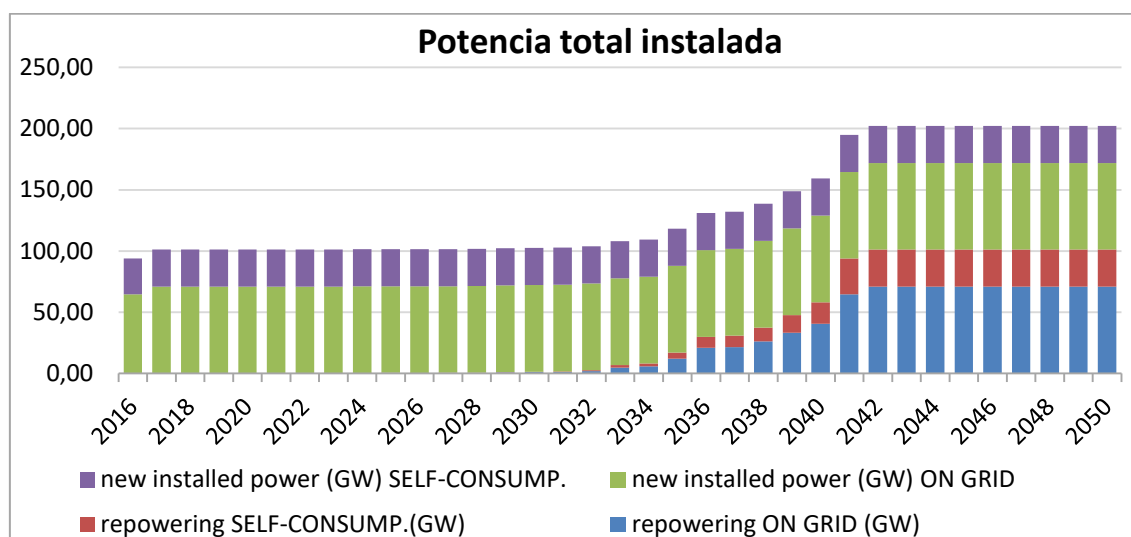


Figura 19. Potencia total instalada de Energía Solar Fotovoltaica [GW].

En la Figura 19, se muestra la potencia total instalada anual que se ha estimado hasta el año 2050. En dicha figura, está incluida la potencia nueva instalada y el repowering –se pueden consultar los datos en “Repowering en la Energía Solar Fotovoltaica” en el capítulo ANEXO III–. Destaca cómo en la década de 2030 a 2040 se produce un incremento de la tendencia el cual es producido por el efecto repowering, debido a la gran potencia instalada en el año 2008 y posteriores.

De acuerdo con los datos de la Figura 19 y la Tabla 8, es posible calcular los metales asociados a la energía solar fotovoltaica. Sin embargo, no todos los metales requeridos por esta tecnología son extraídos desde las minas, sino que existe un

porcentaje de reciclado que hay que tener en cuenta a la hora de calcular las restricciones de cada material –ver Tabla 2–.

6.5 Resultados

6.5.1 Comparación exergética de los módulos fotovoltaicos

En las Figuras que aparecen a continuación se ha realizado una comparación másica y exergética de los diferentes módulos. Para ello, se han calculado los pesos de cada uno de los materiales para cada tecnología y se han dividido para el peso total, obteniendo de esta manera su porcentaje en peso. Se ha procedido de manera similar desde un punto de vista exergético, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

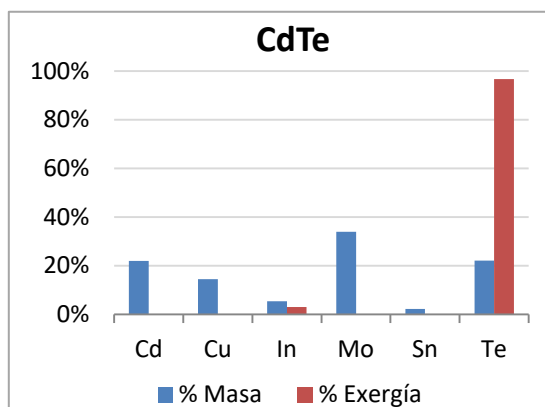


Figura 20. Comparación masa y exergía CdTe.

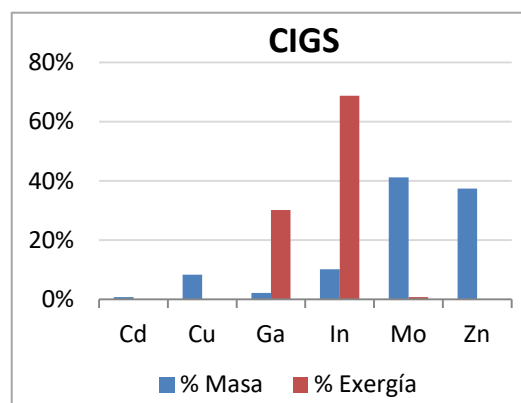


Figura 21. Comparación masa y exergía CIGS.

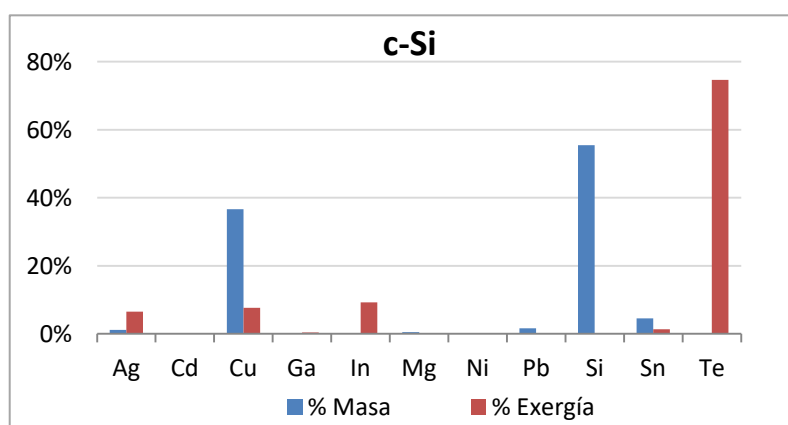


Figura 22. Comparación masa y exergía c-Si.

En las diferentes Figuras anteriores se puede comprobar cómo varía el porcentaje en masa respecto al porcentaje en exergía. El principal material que

destaca es el Te, el cual eleva su cifra de kilogramos a exergía de 20 % aproximadamente a más del 95 % respectivamente para módulos CdTe.

Para los módulos CIGS, el principal coste exergético que se obtiene es el In, puesto que dicho coste llega a superar el 65 % respecto al 10 % en composición másica.

Para comprobar cuál de ellos es el más sostenible, se va a realizar una comparación entre los diferentes módulos fotovoltaicos analizados, en donde se calcularán todos los valores exergéticos.

Para ello, se tomarán los valores de exergía comentados, los cuales se pueden consultar en el apartado “Comparación exergética de módulos fotovoltaicos” en el capítulo ANEXO III. En la Tabla 9 que aparece a continuación se muestra la diferencia de rarity que contienen los diferentes módulos fotovoltaicos.

Tabla 9. . Rarity de los módulos fotovoltaicos [GJ/MW].

| c-Si | CIGS | CdTe |
|--------|--------|---------|
| 17.792 | 12.270 | 191.069 |

Como se puede observar, el que más exergía dispone es el CdTe. Esto se debe a la gran cantidad de Te que se necesita y a los valores correspondientes de rarity. Mientras que el más sostenible desde un punto de vista de materiales el CIGS, puesto que su valor es el más bajo de los tres analizados.

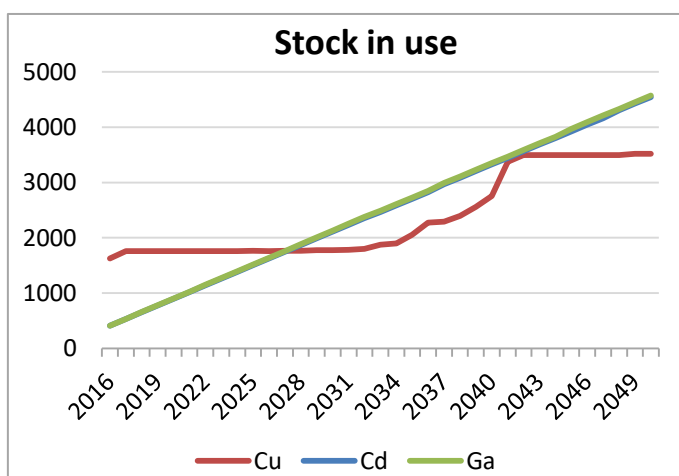


Figura 23. Stock in use Cu, Cd y Ga [KToe].

La demanda del Cu como se aprecia en la Figura 23, se mantiene constante hasta el año 2032; momento en el que empieza a crecer de manera exponencial hasta el año 2040, donde vuelve a permanecer constante.

6.5.2 Stock in use –cantidad de material requerido hasta el 2050–

El crecimiento del Stock in use del resto de materiales sería similar –se pueden ver los datos y gráficas en el apartado “*Stock in use de materiales en módulos fotovoltaicos*” en el capítulo *ANEXO III*–, pero es necesario mencionar algunos de ellos, como el In y la Ag, puesto que los valores de ambos materiales para el año 2050 serían realmente altos.

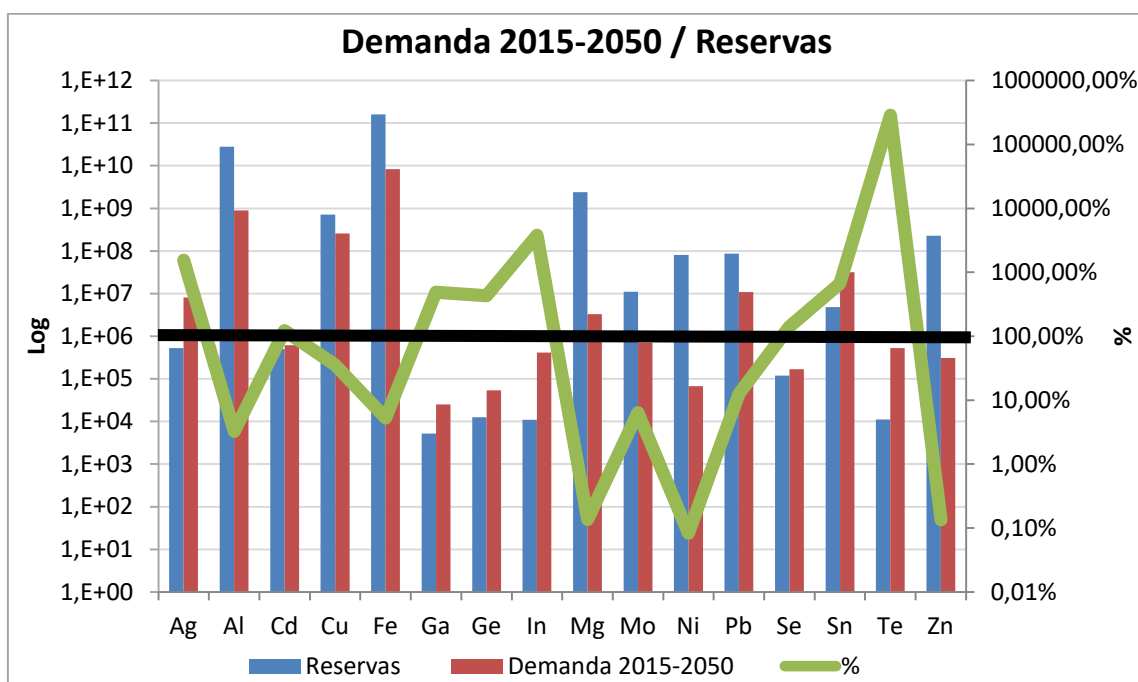


Figura 24. Comparativa entre reservas mundiales y demanda 2015-2050 [Tn].

Como se aprecia en la Figura 24 existen varios materiales que demandarían más cantidad de la que hay hoy en día en las reservas. Con esto se identifican qué materiales son los que se podrían encontrar más críticos respecto a las reservas y, por lo tanto, los que podrían correr riesgo de abastecimiento.

Por otro lado, materiales como el Zn, Mg o Ni, supondrían un impacto cercano al 0,1 %, por lo que no correrían ningún riesgo en el periodo de tiempo analizado. El material que más se utilizaría según las estimaciones realizadas, es el Fe, y a pesar de las grandes cantidades que se demandan en esta tecnología, sólo supondría poco más del 5 % de las reservas mundiales contabilizadas hoy en día.

6.5.3 Previsión de escasez de materiales

Una de las principales preocupaciones que se tiene desde un punto de vista de los materiales, es la posibilidad de que exista una escasez de los mismos y no se pueda satisfacer la demanda. De este modo, se ha analizado mediante un enfoque *BAU*⁵, un análisis de los diferentes materiales; para hallar en qué año la demanda se igualaría con la producción.

Una vez vistas las posibles restricciones en las demandas de los materiales, en función de las reservas actuales, se procede a analizar qué limitaciones podrían existir conociendo los valores de demanda anual y producción.

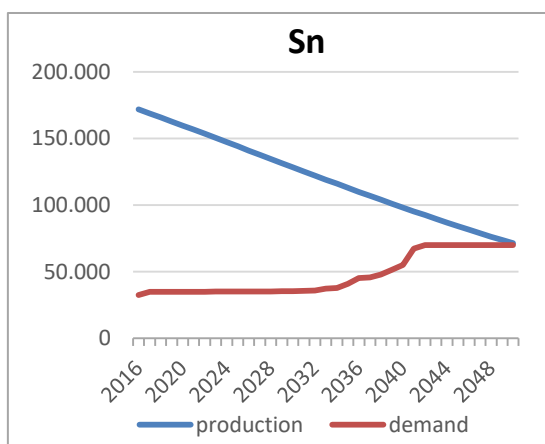


Figura 25. Demanda Vs Producción Sn [Tn].

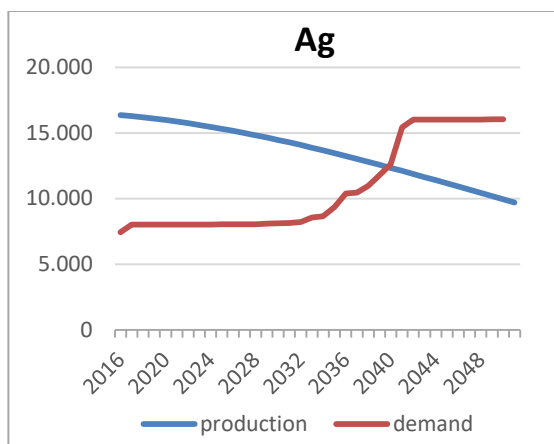


Figura 26. Demanda Vs Producción Ag [Tn].

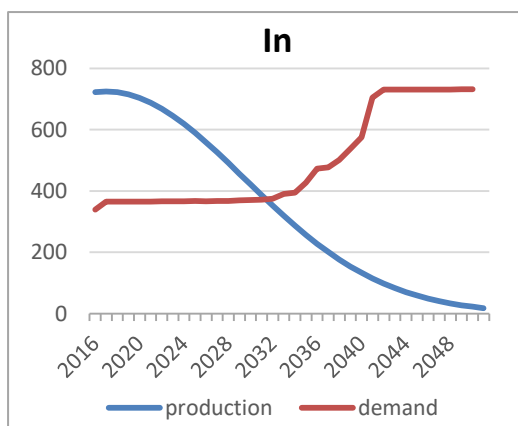


Figura 27. Demanda Vs Producción In [Tn].

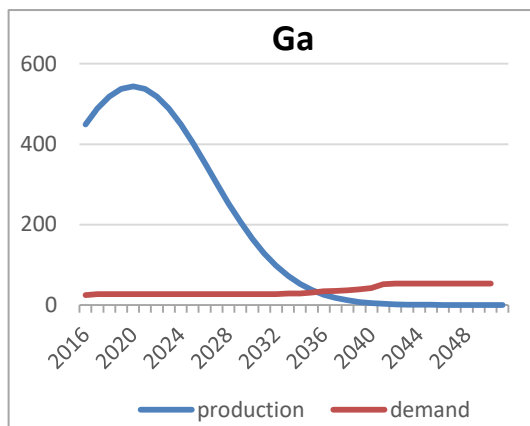


Figura 28. Demanda Vs Producción Ga [Tn].

⁵ BAU -Business As Usual-: Este término se refiere a la tendencia esperada según el comportamiento que se tiene hoy en día.

La restricción de un material vendría determinada cuando ambas líneas de las Figuras anteriores se cruzasen. De ese modo, si se observan, se estima que existen posibles limitaciones; In en el año 2030, Ga en el año 2035, Ag en el año 2040 y Sn en el año 2050. Para los años mencionados, la producción de los materiales sería la misma que la demanda, únicamente para el sector de la solar fotovoltaica. Hay que mencionar que los datos de tendencia de producción del Ga no se pueden considerar fiables, puesto que son fruto de un subproducto y no son realistas.

En cuanto al Sn, se aprecia en la Figura 25 que según las estimaciones que se han realizado, no existiría un cuello de botella hasta el año 2050. Esto es debido a que la producción se ha estimado asumiendo únicamente las reservas disponibles de extracción. Estas cifras de reservas se pueden considerar bajas hoy en día si se comparan con los recursos disponibles.

Existe otro material que también aparece con riesgo de escasez y no ha sido nombrado; es el caso del telurio. Como se puede ver en *“Riesgo de escasez de materiales en módulos fotovoltaicos”* en el capítulo *ANEXO III*, la demanda de este material es muy superior a la producción hoy en día, lo cual no tiene sentido porque existiría un cuello de botella y la tecnología se vería afectada negativamente. Estos valores son debidos a las informaciones recogidas puesto que se han apreciado deficiencias en ellas.

6.6 Conclusiones de la energía solar fotovoltaica

Una de las primeras conclusiones que se obtendrían con las suposiciones realizadas son los principales materiales demandados en esta tecnología, como son el Te, el In, el Cu y la Ag. Mediante un enfoque *BAU* y estimando la curva de producción mediante *Hubbert*, podrían existir restricciones de materiales, es decir, que la producción de materiales sería inferior a la demanda; por lo que es posible que exista un riesgo de abastecimiento de materiales, como es el caso de la Ag, el In y el Ga. Además, cuando se comparan los datos de las demandas hasta el 2050 con las reservas actuales, destacan siete materiales los cuales superarían el 100 % de este valor, por lo

que es posible, que si no se aumentan las reservas acordes a los datos de demanda, que se produzcan cuellos de botella.

Desde un punto de vista de materiales, se consideraría que la tecnología más sostenible es la CIGS, puesto que su mayor aportación exergética se debe al In –casi 70 %–, mientras que para las tecnologías c-Si y CdTe predomina el Te, el cual dispone de una aportación exergética del 65 % y 97 % respectivamente, siendo la rarity del Te 6 veces mayor que la del In.

7. Energía Solar Termoeléctrica

7.1 Introducción a la Energía Solar Termoeléctrica

Actualmente, la energía solar termoeléctrica se está comercializando en 19 países –ver Figura 29–, siendo España y Estados Unidos los lugares donde se encuentra gran parte de la potencia instalada. El recurso que hace posible esta tecnología es abundante en todo el planeta –ver Figura 15– lo que hace posible que se pueda implantar en todos los lugares que se disponga de él.

Sin embargo, a lo largo de los últimos años, el sector ha tenido que hacer frente a diferentes desafíos debido a la inestabilidad política y una fuerte competencia con otras tecnologías renovables, concretamente a la solar fotovoltaica, debido a la experiencia que se tiene en este campo y a la reducción de los costes que se espera de la misma [62].

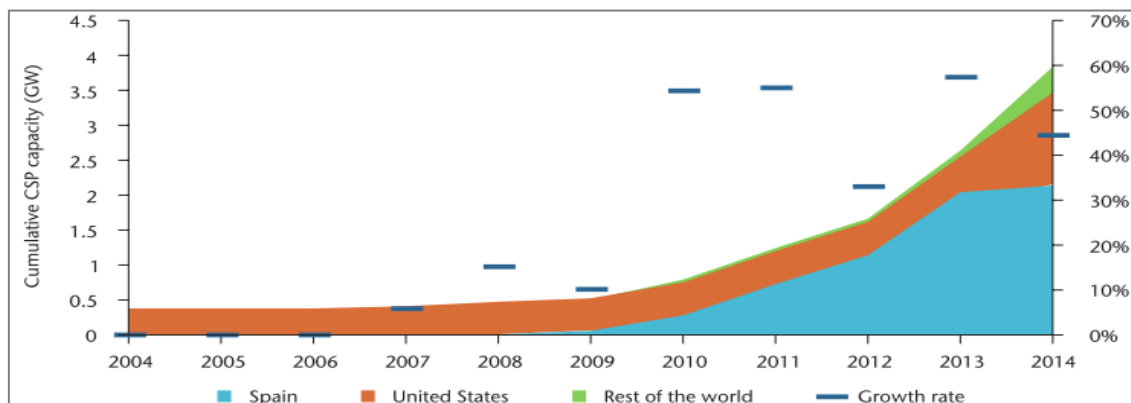


Figura 29. Evolución de la energía solar termoeléctrica acumulada [13].

Las expectativas futuras de esta tecnología son muy prometedoras puesto que se trata de un recurso renovable sin desarrollar, y se espera que se pueda alcanzar mediante los concentradores solares hasta el 12 % del consumo de electricidad mundial [63].

El desarrollo de las energías renovables, y concretamente la concentración solar termoeléctrica, requerirán una demanda importante de materiales que podrían provocar posibles cuellos de botella, por lo que es importante analizar la tendencia de la producción esperada de esta tecnología y los materiales asociados a ella para poder definir unas buenas políticas energéticas en el futuro.

La demanda de materiales en este sector para diferentes componentes como los generadores, la red eléctrica, almacenamiento de calor, espejos, etc. está aumentando rápidamente. Esto se puede ver reflejado en el crecimiento que ha experimentado, ya que la energía solar termoeléctrica ha visto multiplicada por seis la potencia instalada desde el año 2009 –600 MW– hasta el año 2013 –3.600 MW– y se espera que esa cifra aumente hasta cerca de los 1.000 GW para el año 2050 [13].

Por otra parte, se espera un repowering de las instalaciones al final de sus vidas, lo que conllevaría a un aumento adicional de necesidades de materias primas. Ambas cuestiones hacen que sea crítico analizar profundamente el uso de los materiales en la industria de la solar termoeléctrica para garantizar que su evolución no sea limitada.

7.2 Tecnologías

Las plantas solares termoeléctricas concentran la irradiación solar para calentar un fluido, el cual hace girar directa o indirectamente una turbina cuyo funcionamiento se realiza mediante un ciclo Rankine Termodinámico. Esta concentración de la irradiación solar permite que el fluido alcance suficiente temperatura para asegurar el funcionamiento con la eficiencia necesaria para convertir el calor en electricidad, produciéndose pérdidas de calor en el receptor.

Existen actualmente tres tecnologías predominantes las cuales son concentradores solares parabólicos –PT–, tipo Fresnel –LFR– y torres de concentración

solar –CRS–. Sin embargo, existe una cuarta tecnología llamada discos parabólicos –PD– que usa un motor Stirling para transformar la potencia térmica en electricidad. No se han llevado a cabo proyectos a gran escala con los discos parabólicos, por lo que no se puede considerar todavía un competidor en el mercado si se compara con el resto de tecnologías.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía [13], los PT son la tecnología más madura entre todas ellas. No obstante los CRS están experimentando un crecimiento importante puesto que presenta eficiencias más altas que los PT [63]. Además, otra ventaja de los CRS es que son menos sensibles a las variaciones de las estaciones, lo que hace pensar que el mercado de esta tecnología aumente en los próximos años. Hay que tener en cuenta que hoy en día el mercado está definido por los PT y los CRS con un porcentaje de 85 % y 10 % respectivamente.

Al ser una tecnología renovable relativamente nueva y con diferentes tipos de tecnologías, no están implantadas en el mercado todas ellas como se puede ver en el párrafo anterior. Por ello, en la Tabla 10 que se muestra a continuación, aparecen las principales diferencias y características de las tecnologías que se han tenido en cuenta para el estudio.

Tabla 10. Características de las instalaciones solares termoelectricas.

| | PT | CRS | Autor |
|--|-------------|-------------|--------------|
| Temperatura de operación | 400 °C | 1.000 °C | [13] |
| Capacidad | 10 – 300 MW | 10 – 200 MW | [64] |
| Eficiencia | 11 – 16 % | 7 – 20 % | [64] |
| Horas equivalentes al año⁶ | 4.000 | 6.450 | [65] |
| Mercado | 85 % | 10 % | [63] |

7.3 Demanda de materiales en la solar termoelectrica

Es necesario realizar un análisis bibliográfico sobre el estado del arte de esta tecnología renovable para poder identificar qué materiales son los más críticos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11 que se adjunta a continuación.

⁶ Considerando un sistema de almacenamiento de la energía.

Tabla 11. Demanda de materiales por tipo de tecnología [66].

| Material | PT [Tn/GW] | CRS [Tn/GW] |
|----------|------------|-------------|
| Ag | 13 | 16 |
| Al | 740 | 23.000 |
| Cr | 2.200 | 3.700 |
| Cu | 3.200 | 1.400 |
| Fe | 650.000 | 393.000 |
| Mn | 2.000 | 5.700 |
| Mo | 200 | 56 |
| Ni | 940 | 1.800 |
| Ti | 25 | 0 |
| V | 2 | 2 |
| Zn | 650 | 1.400 |

Como se puede apreciar, existen grandes demandas de ciertos materiales, en los que destaca por encima de todos el Fe. También hay que mencionar otro material, que aunque no es considerado como un material crítico, se necesitan grandes cantidades. Se está hablando del Al, que como se verá más adelante el valor exergético que aporta es realmente alto.

Es necesario mencionar también que el material utilizado para el sistema de almacenamiento de energía –KNO₃ y NaNO₃– no está incluido en los materiales que aparecen en la Tabla 11, puesto que no ha sido considerado en este estudio. No se han tenido en cuenta debido a que a pesar de las cifras utilizadas de estos elementos – 150.000 Tn/GW para los CRS y 220.000 Tn/GW para los PT–, cuando se comparan con las reservas actuales y los recursos, se vuelven insignificantes. Un ejemplo de ello es la producción pico del K, la cual se ha estimado que está más allá del año 2300 –basado en recursos– [18], mientras que para el Na existen unos recursos “ilimitados”⁷ [67].

7.4 Evolución de la Energía Solar Termoelectrónica

Como se puede ver en el apartado “*Edad de las plantas solares termoelectrificadas*” en el capítulo ANEXO IV, las edades de estas tecnologías son muy bajas –más del 87 % tiene menos de 7 años–, por lo que como ya se ha mencionado durante todo el capítulo se considera una tecnología nueva.

⁷ Los materiales son finitos, quiere decir que la cantidad es tan grande que no se espera que exista riesgo de escasez en un periodo corto de tiempo.

Actualmente, la potencia instalada es muy baja, lo que quiere decir que dispone de un gran potencial de mejora de todas las tecnologías e incrementar en un gran porcentaje su aportación a la red. Para poder realizar una proyección hacia el futuro, se han consultado diferentes fuentes bibliográficas que aportan valores que se han tenido en cuenta [13] [63] [68].

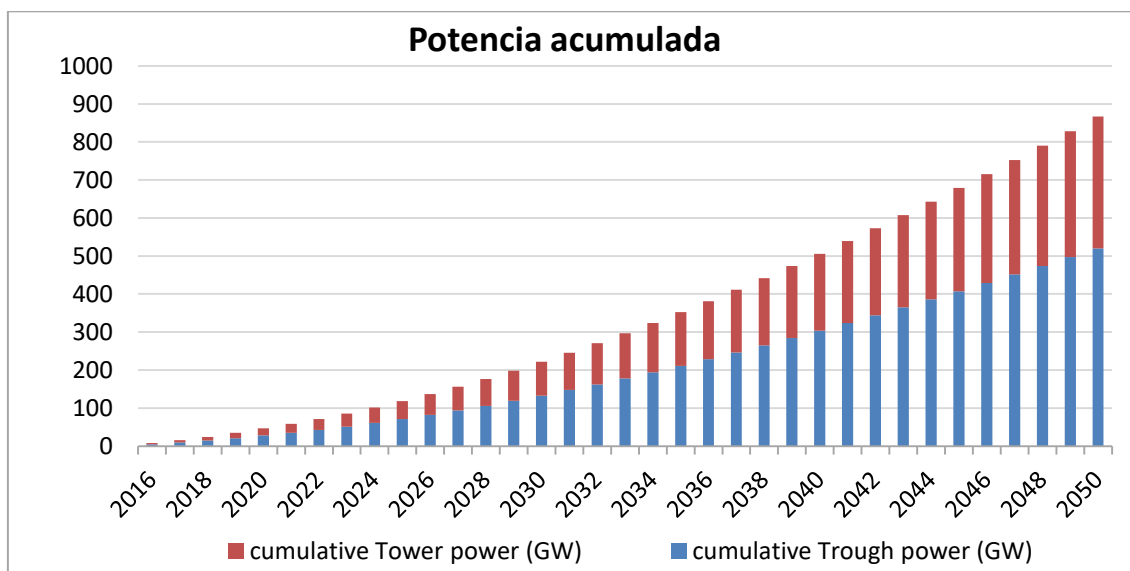


Figura 30. Potencia acumulada anual de la Solar Termoeléctrica [GW].

Como se aprecia en la Figura 30 el crecimiento que experimentaría es exponencial, produciéndose un ligero aumento a partir del año 2030 y otro más importante a partir del año 2040.

Con esta potencia total acumulada, el crecimiento anual de la nueva potencia instalada tendría que crecer a un promedio del 7 % anual aproximadamente. Además, considerando que la vida útil de las plantas es de 25 años [69], hay que tener en cuenta el efecto repowering, puesto que este fenómeno no sólo afectaría a la potencia nueva instalada, sino que también provocaría un incremento importante de la demanda de materiales para aquellos años en los que se produzca.

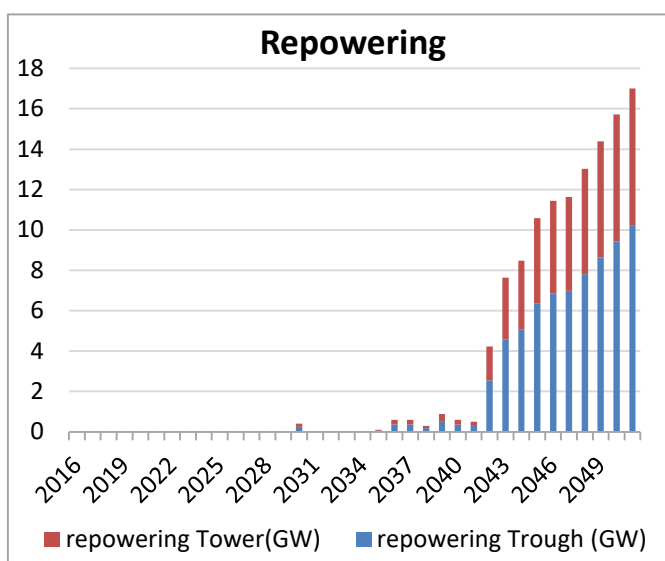


Figura 31. Repowering anual en la Solar termoeléctrica [GW].

Al existir tan poca potencia instalada actualmente, este efecto no tendrá un valor importante hasta el año 2040, donde se alcanzarán más de los 4 GW. A partir de ese momento, comenzará un repowering relativamente alto fruto de la nueva potencia instalada 25 años antes.

Hay que mencionar que el estudio de este recurso renovable se ha analizado con un enfoque *BAU*, por lo que cabe la posibilidad –aunque no se han encontrado fuentes que lo afirmen– que las otras tecnologías comiencen a lo largo de este periodo a disponer de potencia instalada. De cualquier manera, la estimación que se ha realizado sobre la evolución, incluye todos los tipos de tecnologías por lo que también estarían incluidas las no analizadas. Todos los distintos datos que afectan a la evolución se pueden consultar en el apartado “Evolución de la potencia de las plantas solares termoeléctricas” en el capítulo ANEXO IV.

7.5 Resultados

7.5.1 Comparación exergetica de las diferentes tecnologías

Para poder analizar en detalle qué materiales son los que pueden producir cuellos de botella, se va a llevar a cabo una comparativa másica y exergetica de las diferentes tecnologías analizadas.

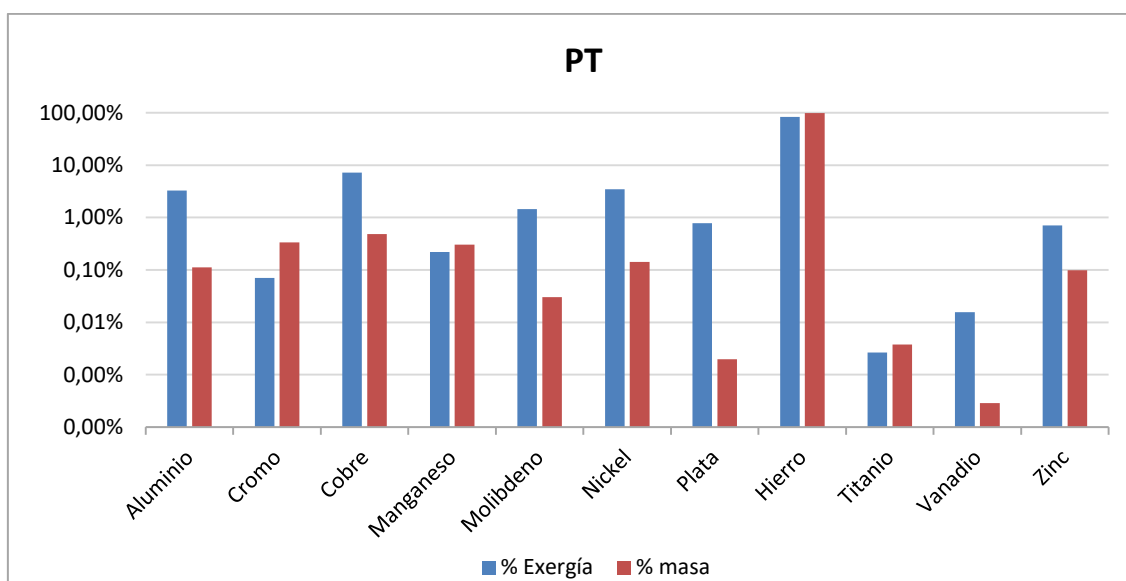


Figura 32. Comparación másica y exergética de la tecnología PT.

Observando la Figura 32, la cual corresponde a la tecnología PT, se puede apreciar que la aportación exergética de materiales como el Al, Cu, Mo, Ni, Ag y V se ve multiplicada por más de 10 frente a la aportación másica de los mismos materiales. Por otro lado, materiales con gran aportación másica en esta tecnología como el Cr, Fe y Mn, reducen su aportación cuando estos valores se transforman en exergía.

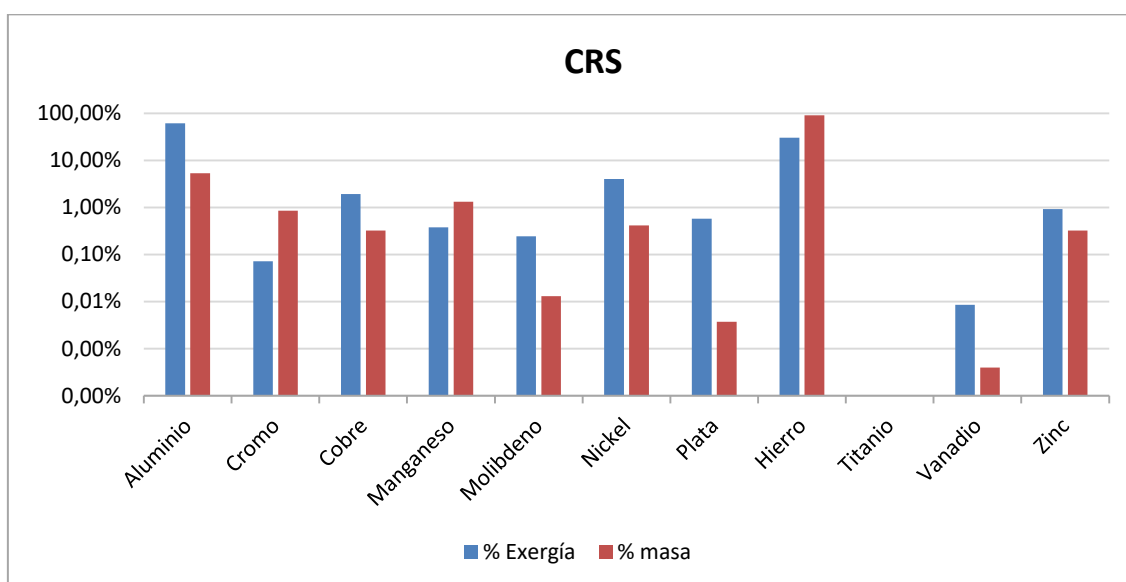


Figura 33. Comparación másica y exergética de la tecnología CRS.

Caso parecido sucede con la tecnología CRS. Se producen dos fenómenos totalmente contrarios. Uno de ellos es el caso del Al y Mo, que ven multiplicado su valor por más de 10 –5,35 % a 61,47 % el Al y 0,01 % a 1,47 % el Mo–. Por el contrario

se tiene el caso del Fe, el cual dispone de una aportación másica de más del 90 %, reduciendo su valor hasta el 30 % cuando se transforma en exergía. Esto se explica por los valores de rarity que contiene cada material, ya que el valor del Al es más de 34 veces mayor y la del Mo es más de 56.

Estos valores vienen determinados por la rarity que acumula cada tecnología la cual viene reflejada en la Tabla 12. Dichos valores se pueden consultar en el apartado “Comparación másica de las plantas solares termoeléctricas” y “Comparación exergética de las plantas solares termoeléctricas” en el capítulo ANEXO IV.

Tabla 12. Rarity de las diferentes tecnologías.

| | PT | CRS |
|---------------|--------|--------|
| Total [GJ/MW] | 14.480 | 23.866 |

7.5.2 Stock in use –cantidad de material requerido hasta el año 2050–

Como se ha visto en el capítulo *Evolución de la Energía Solar Termoeléctrica* la evolución que se espera de esta tecnología es importante, por lo que la cantidad de materiales que se van a utilizar también van a ser elevados.

Aunque se ha observado que existen unos materiales con unos porcentajes altos de exergía, se ha decidido analizar todos los materiales debido al gran desarrollo que necesita experimentar, ya que, es posible que hubiera algún material no considerado crítico hoy en día pero que sí se consideraría como tal durante el periodo del tiempo analizado.

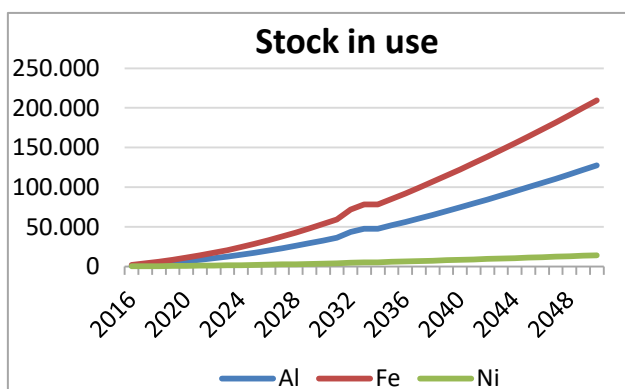


Figura 34. Evolución stock in use Al, Fe y Ni [KToe].

En la Figura 34 se observa como el material más demandado es el Fe, con una gran demanda hasta el año 2050. Por el contrario, el Al dispone de una cantidad 2,5 veces menor que el Fe, mientras que el Ni no presentaría ninguna posible complicación.

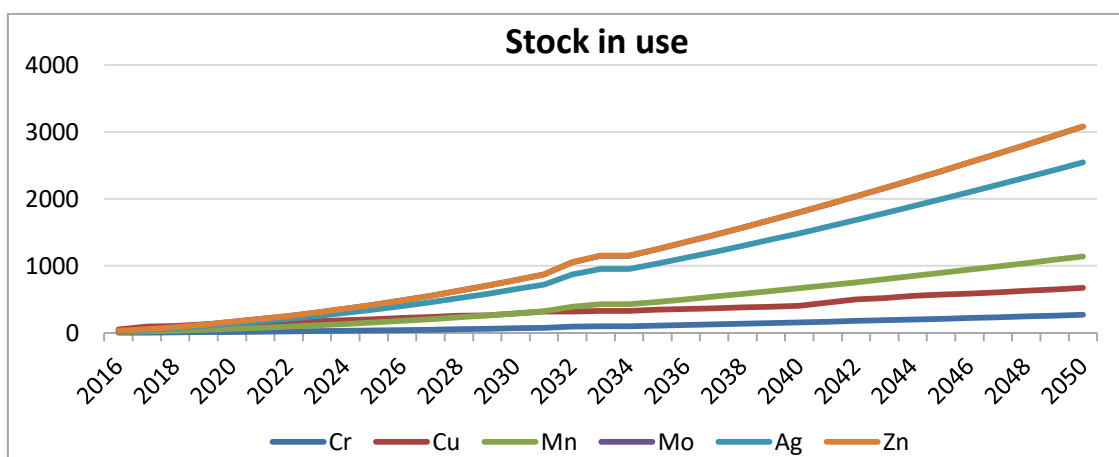


Figura 35. Evolución de stock in use de Cr, Cu, Mn, Mo, Ag y Zn [KToe].

En la Figura 35 se identifica la evolución de stock in use del resto de materiales que dispone este recurso renovable. Aunque no se aprecia demasiado, el material más demandado a día de hoy –sin tener en cuenta los mencionados, Al, Fe y Ni–, es el Cu. Sin embargo, a lo largo del tiempo este material pasa a ser el segundo con menor cantidad.

La cantidad de Cr no se consideraría relevante si se compara con el resto de materiales, pero sí que es necesario mencionar el caso del Zn, Mo y Ag, ya que el crecimiento de stock in use de los mismos se asemeja a una curva exponencial. Estos tres últimos materiales mencionados experimentarían un pico en su crecimiento en el año 2032, por lo que habría que estar preparados para cuando esta demanda se produjera. Todos estos datos se pueden consultar en el apartado “Stock in use en plantas solares termoeléctricas” en el capítulo ANEXO IV.

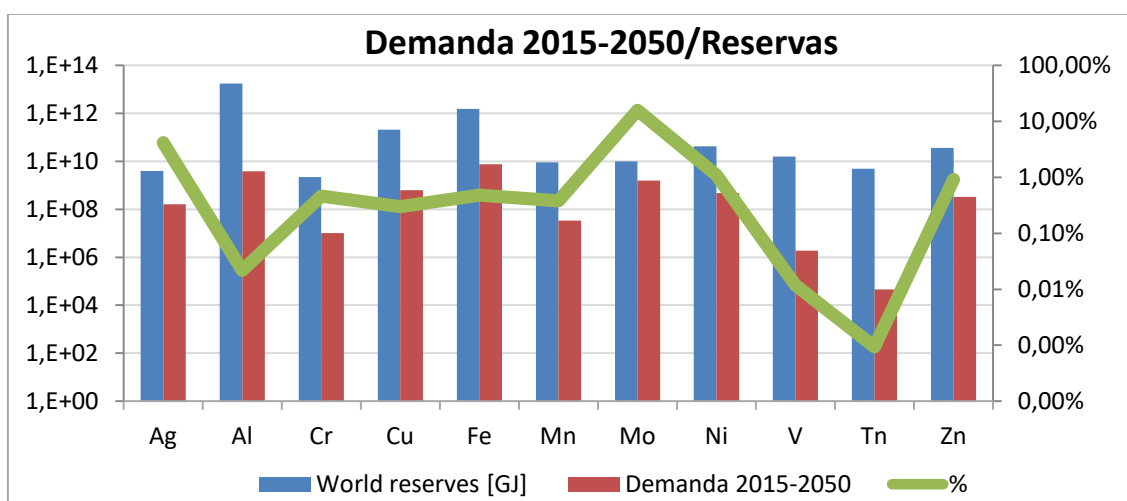


Figura 36. Comparación entre reservas mundiales y demanda 2015-2050 [GJ].

Ningún material tiene una restricción de aprovisionamiento. Sin embargo, sí que es importante comentar los valores de Fe, Ag, Mo y Ni, ya que las cantidades que se demandan son muy elevadas. Por otro lado, como se aprecia en la Figura 36, aunque existiría gran cantidad de demanda de algunos materiales, ninguno supondría un impacto importante en las reservas –se recuerda que los datos de reservas son actuales–, puesto que en el caso del Mo, el cual dispondría del mayor impacto, no superaría el 16 %.

7.5.3 Previsión de escasez de materiales

Una vez que se han analizado las instalaciones termoeléctricas desde un punto de vista de materiales, se va a llevar a cabo un estudio para hallar futuros cuellos de botella en estas tecnologías, así como prever una escasez de algunos materiales durante este periodo de tiempo. Hay que recordar que este análisis se ha realizado mediante un enfoque *BAU* y los datos de producción se han hallado mediante la curva *Hubbert*, asumiendo las reservas disponibles para el año 2015 en función de referencias bibliográficas consultadas [67].

De entre todos los materiales que aparecen en estas tecnologías se va a centrar el estudio en aquellos que se encuentran en un estado más crítico. El resto se puede consultar junto con los datos en el apartado “*Previsión de escasez de materiales en plantas solares termoeléctricas*” en el capítulo *ANEXO IV*.

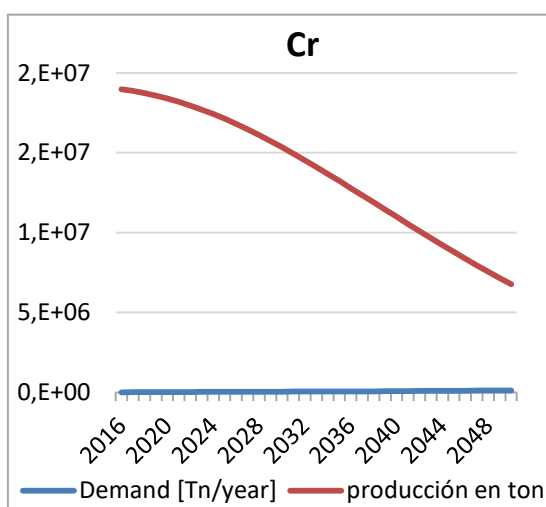


Figura 37. Comparación entre producción y demanda Cr.

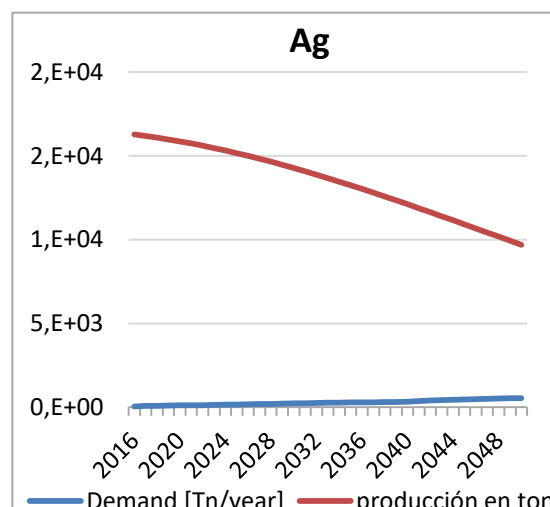


Figura 38. Comparación entre producción y demanda Ag.

En la Figura 37 y la Figura 38 se muestran dos materiales los cuales no se ven comprometidos hasta el año 2050. Sin embargo, el problema principal no es el crecimiento de la demanda, sino que la estimación de la evolución de la producción ya ha experimentado su pico, por lo que ésta iría disminuyéndose gradualmente aproximadamente hasta el año 2025, momento en el cual empezaría a disminuir de una manera considerable sus datos de producción.

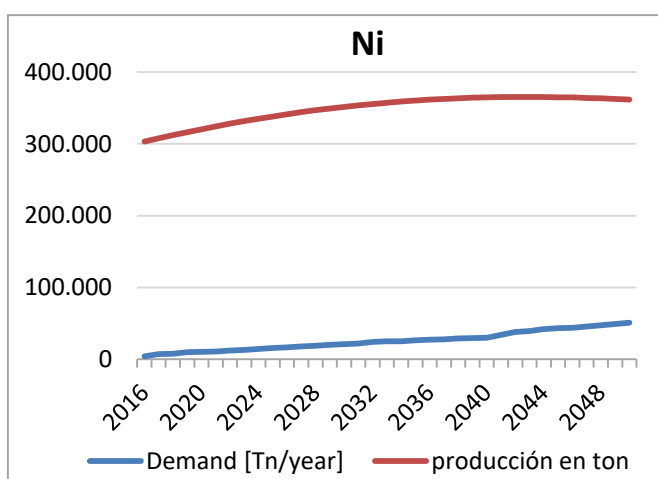


Figura 39. Comparación entre producción y demanda Ni [Tn].

Caso diferente es el del Ni. Como se puede observar en la Figura 39 el pico máximo de su producción estaría previsto para el año 2050 aproximadamente, momento en el cual este material habría comenzado una tendencia de demanda que podría considerarse importante.

No existen cuellos de botella previstos para las tecnologías de este recurso renovable. No obstante, es importante mencionar el crecimiento de la demanda en función de la producción, ya que todos ellos aumentarían respecto al 2016.

Esto indica que aunque no se han previsto posibles restricciones en cuanto a materiales, sí que es posible que conforme se vayan desarrollando más las diferentes tecnologías, este fenómeno aparezca. El caso del Ni es claro, ya que hoy en día demanda un 1,25 % y se espera que este valor ascienda hasta 14 % para el año 2050. Otros materiales que también experimentarían un crecimiento de este valor serían la Ag -0,26 %—y el Mo -0,18 %—, los cuales tendrán un valor de 5,7 % y 2,54 % respectivamente como se puede comprobar en la Figura 40 que aparece a continuación.

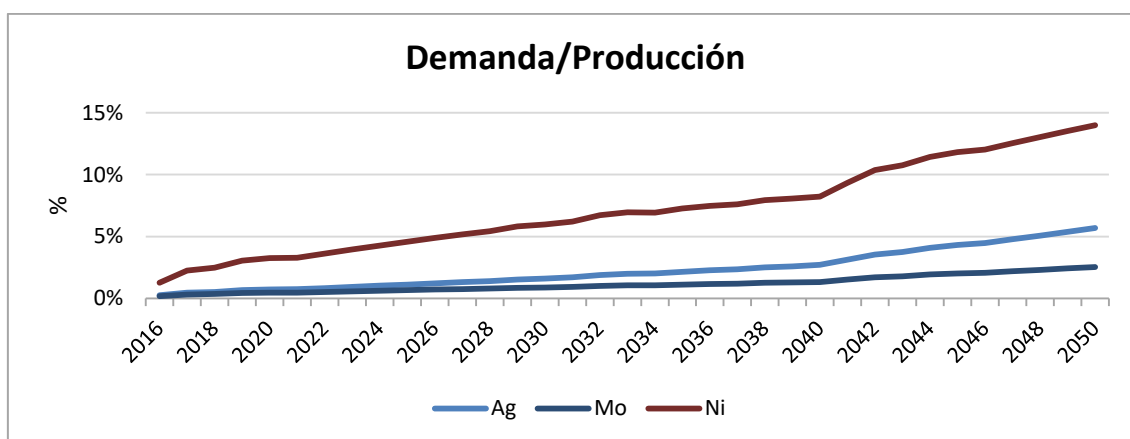


Figura 40. Porcentaje de demanda de Ag, Mo y Ni.

Aunque no tiene mucha trascendencia en cuanto a la demanda en el 2050, es necesario comentar el caso del Cr; se puede observar el crecimiento de su demanda en la Figura 41.

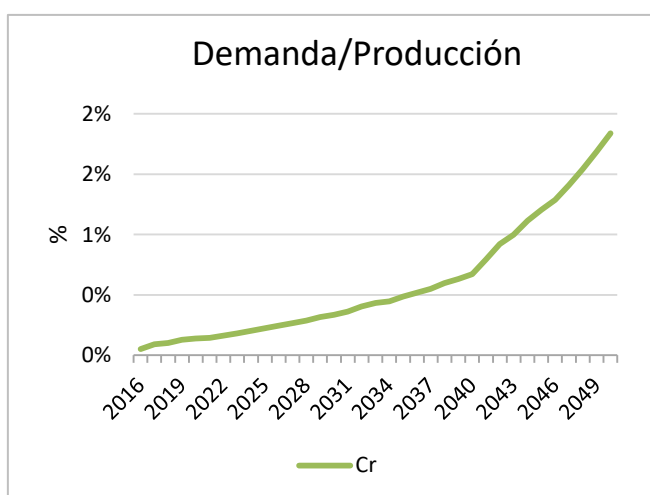


Figura 41. Reservas de Cr. Destinadas a esta tecnología.

Este material no dispondría de una gran demanda en porcentaje en el año 2050, pero sí que hay que destacar el crecimiento que tendría desde el año 2040. A partir de este año, los valores se incrementan exponencialmente, previendo una futura demanda mucho más importante que la prevista hasta el año analizado.

7.6 Conclusiones de la energía solar termoeléctrica

Las tecnologías de la energía solar termoeléctrica son todavía demasiado nuevas, por lo que es necesario que sigan desarrollándose, experimentando un crecimiento que aporte más a la sociedad.

Se espera un gran desarrollo hasta el año 2050 por lo que la potencia instalada crecería hasta alcanzar casi los 900 GW, que si se compara con los 8 GW que se tienen

hoy en día, se tendrá un crecimiento anual medio de la potencia nueva instalada del 7 %.

Este crecimiento afectaría directamente a la demanda de materiales, que habría que prever para asegurar el abastecimiento de los mismos para estas tecnologías. Además, unido a esto, hay que añadir el efecto repowering, lo que supondría a partir del año 2030 un ligero incremento de la demanda de materiales, pero que sin embargo, una vez que se alcance la década del año 2040, concretamente en el 2042, se iniciaría una demanda adicional de aproximadamente 7,5 GW, valor que iría aumentando anualmente a una media de 10 %.

En este capítulo se han analizado dos tecnologías, los PT y los CRS. Desde un punto de vista exergético, y por lo tanto de materiales, se ha visto que son más críticos los CRS, ya que su coste exergético es un 65 % mayor que el de los PT. Esto se debe principalmente por la gran cantidad de Al que utiliza y el coste en exergía que éste dispone.

En cuanto a la criticidad de materiales, no se han hallado cuellos de botella ni ninguna otra restricción que pueda limitar las tecnologías analizadas. También es cierto que es una tecnología relativamente nueva, por lo que necesita experimentar todavía mucho desarrollo así como iniciar otro tipo de tecnologías para el uso de este recurso como se ha mencionado en apartados anteriores.

Aunque no se ha detectado ninguna restricción, es importante mencionar algún material, que con los datos obtenidos, a día de hoy no afectan pero que en un estudio futuro podrían ser preocupantes; es el caso del Cr. El Cr es el material menos demandado en esta tecnología, pero a su vez, también es el material del cual se esperaría menos producción, lo que hace que haya que tener cuidado con el uso de él. Otro caso importante es el del Ni. Al contrario que el Cr, no se espera una caída importante de su producción, sino que la demanda de este material se dispararía a partir del año 2040 aproximadamente, y aunque no se han encontrado posibles problemas, sí que se podrían esperar futuras restricciones más allá del 2050.

8. Conclusiones generales

La primera conclusión que se obtiene es que las tecnologías renovables de generación eléctrica que se han analizado van a experimentar un crecimiento importante en cada una de ellas.

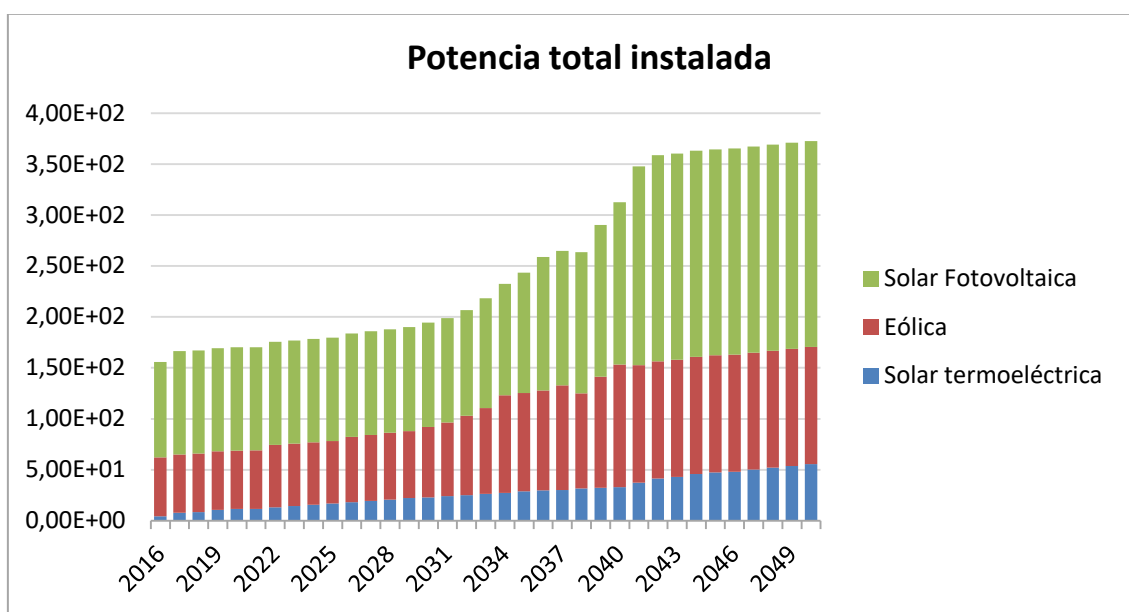


Figura 42. Evolución de las tres fuentes renovables analizadas [GW].

Como se ve en la Figura 42, se está instalando actualmente más potencia fotovoltaica que cualquiera de las otras dos, suponiendo más del 60 %. Sin embargo, a lo largo del tiempo hasta el año 2050, este porcentaje se reduciría por la aparición de nueva potencia instalada de la solar termoeléctrica, la cual pasaría de tener un 2 % en el año 2016 a más del 14 % en el 2050. No solo disminuiría la fotovoltaica, es más, la energía eólica se encontraría más afectada, puesto que los porcentajes de ésta disminuirían entre el 2016 y el 2050 desde un 37 % hasta un 30 %.

Mucha de esta potencia total instalada se debe al efecto repowering. Tanto es así que en alguna tecnología incluso superaría a veces la demanda por dicho efecto que por la nueva potencia a instalar. No obstante, una manera de valorar el crecimiento de cada una de las tecnologías es según la aportación que ésta tenga en función de la potencia acumulada, la cual se puede ver en la Figura 43 que se muestra a continuación.

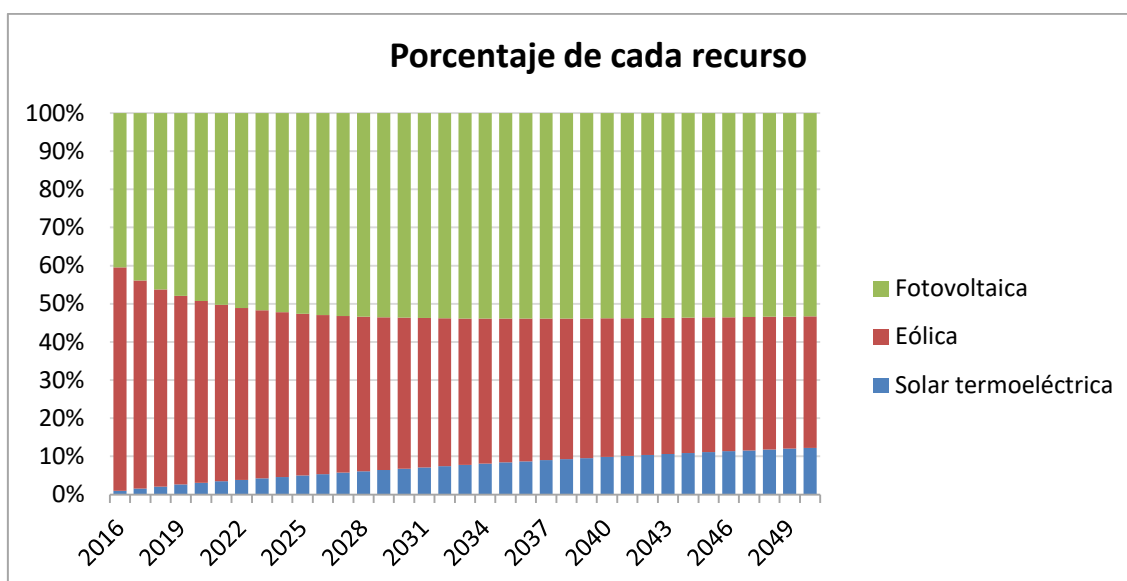


Figura 43. Porcentaje de cada recurso en función de la potencia total acumulada.

Tal y como se puede apreciar en la Figura anterior, existen dos tecnologías predominantes a día hoy, las cuales son la fotovoltaica y la eólica, siendo ésta segunda la líder con un valor cercano al 60 %. Conforme van sucediendo los años, este porcentaje se vería disminuido –en la parte inferior– debido a la solar termoeléctrica, ya que se empiezan a instalar potencias importantes, mientras que por la zona superior, ese porcentaje perdido por la eólica lo recogería la fotovoltaica debido a las grandes cantidades de potencia nueva instalada que este recurso va a experimentar.

La Figura 43 indica que hasta el día hoy la tecnología que más se estaba instalando, posiblemente por sus altos rendimientos y su gran desarrollo, es la energía eólica. Pero ya ha tocado techo, es decir, a partir de este momento según indica la IEA, se podría afirmar que mediante las estimaciones realizadas, que la energía eólica, aunque va a seguir disponiendo de gran cantidad de potencia instalada anual, ya no va a ser la predominante, ya que en el año 2020 sería la energía fotovoltaica la que más potencia instalada acumule en el mercado. En cuanto a la solar termoeléctrica, aunque hoy en día no dispone de mucha aportación ni mucha potencia instalada en comparación con las otras tecnologías, es importante mencionarla puesto que el crecimiento que experimentaría va a ser de más del 15 %, mientras que la energía eólica y fotovoltaica no superarían el 5 % y 7,5 % respectivamente, por lo que con el paso del tiempo, esta tecnología podría llegar a competir con las otras dos analizadas.

Según los resultados obtenidos, se ha llegado a la conclusión de que los componentes más críticos que se podrían encontrar en los aerogeneradores van a ser los generadores y los elementos encargados de la transmisión de energía, en donde el Nd y el Cu son los materiales más demandados respectivamente.

De acuerdo con las estimaciones que se han realizado, la energía eólica no dispondría de ninguna restricción en cuanto a materiales. Sin embargo, sí que dispone de materiales que hay que tener en cuenta, como es el caso del Nd, puesto que la demanda de esta tecnología requeriría en torno al 14 % de la producción mundial, mientras que elementos como el Fe y Ni, los cuales no son críticos, ascenderían a un valor del 5 % en el año 2050, por lo que se podría decir que las tecnologías de este recurso no se ven en peligro de abastecimiento.

En cuanto a la solar termoeléctrica, es conocido que es un recurso sin desarrollar y prueba de ello es el poco repowering esperado en el tiempo analizado. Por ello, la potencia instalada no es muy elevada, y aunque se espera que se desarrolle y que se convierta en un recurso competente, no conseguiría llegar al 2050 con una cuarta parte de la potencia acumulada que disponga la solar fotovoltaica –la cual será líder entonces–. Al ser una tecnología tan reciente, será necesario realizar otro estudio similar a este cuando este recurso se encuentre más desarrollado, que informe del estado del arte en que se encuentra la tecnología y posibles restricciones, porque aunque no se prevé en el año 2050, sí que se intuye que puedan existir problemas con alguno de ellos a partir de esa fecha.

La energía solar fotovoltaica se espera que tenga un crecimiento importante, lo que lleva consigo un crecimiento de la demanda de materiales. El principal problema de este recurso es que dispone de varias tecnologías las cuales usan gran cantidad de materiales entre los que se encuentran algunos potencialmente críticos, como son el Ga, In, Sn y Ag –El Te ya se ha comentado que se han encontrado deficiencias en los datos de las fuentes consultadas–. En el caso del Ga y el In esta criticidad podría venir dada por la caída en la producción de esos materiales ya que las tecnologías en las que se usan no se espera que sean las que más evolucionen. Por el contrario, la Ag

experimentaría un crecimiento que haría que en el año 2040 se igualasen los datos de demanda y producción, originando un posible cuello de botella con este material.

Realizando una comparativa entre las tecnologías estudiadas, no sería justo analizar todas ellas por la cantidad de material utilizado, puesto que cada tecnología necesita una serie de materiales diferentes. Por eso utilizamos la unidad de medida exergía, ya que gracias a ella, se puede realizar una comparativa entre todas las tecnologías analizadas y hallar cuál de ellas es la más sostenible.

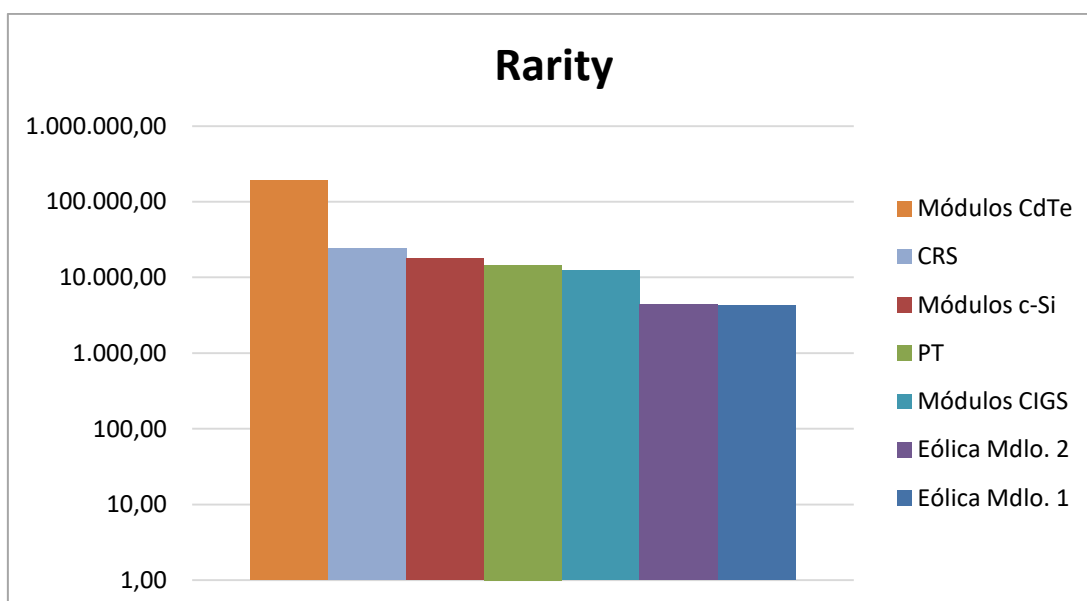


Figura 44. Comparación de rarity de las tecnologías [GJ/MW].

Como se observa en la Figura 44, la tecnología que más rarity dispone es la solar fotovoltaica, concretamente los módulos CdTe, la cual dispone de 8 veces más de exergía que los CRS, los cuales se encuentran en segundo lugar. En cuanto al resto de tecnologías fotovoltaicas y los PT, tienen un valor exergético muy similar, el cual sin embargo, supone más de 3 veces de las tecnologías más sostenibles, las cuales pertenecen a la energía eólica. Tanto el modelo 1 como el modelo 2 son las tecnologías que menos exergía contienen, siendo entre estas dos, el modelo 1 la más sostenible desde un punto de vista de materiales, ya que su valor es ligeramente superior a los 4.200 GJ/MW, valor muy alejado de los módulos CIGS –poco superior a 12.200 GJ/MW, el más sostenible en la fotovoltaica– y los PT –poco menor de 14.500 GJ/MW, el más sostenible en la solar termoelectrica–.

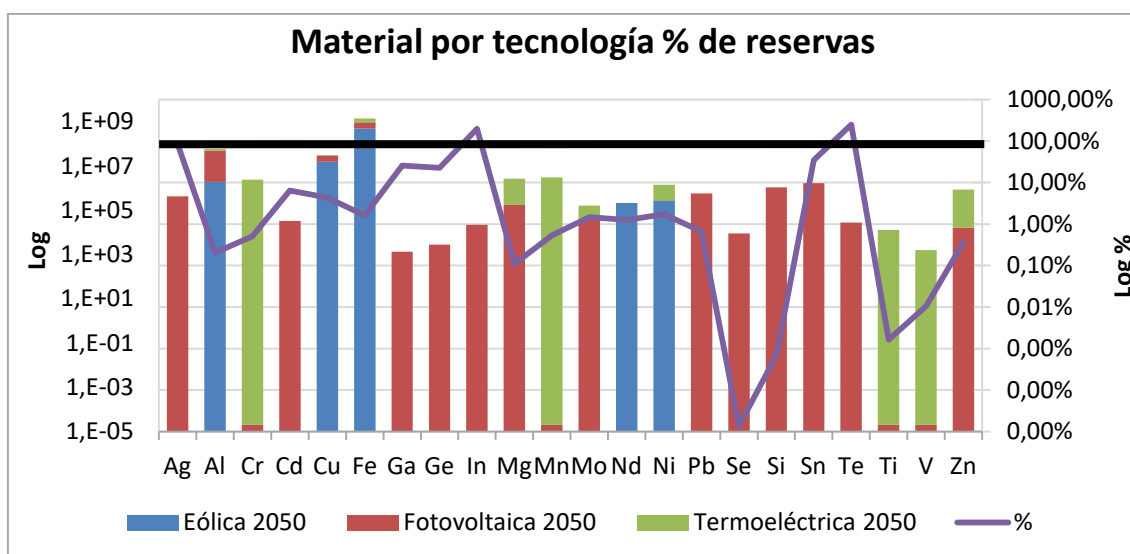


Figura 45. Aportación de cada material por tecnología y % en función de reservas [Tn].

En la Figura 45 se puede observar la cantidad de material utilizado en cada tecnología. Se han adjuntado en el apartado “*Material por tecnología y reservas*” en el capítulo *ANEXO V* gráficas similares donde se pueden consultar con más detalle cada material. En cualquier caso, en la Figura 45 aparece el porcentaje –observar el eje vertical derecho– para cada material en función de las reservas disponibles en el 2016, por lo que se puede comprobar el impacto que provocaría cada material si no se ampliaran las reservas de las cuales se disponen hoy.

Como se puede apreciar, existen dos materiales los cuales superarían el 100 % de las reservas; son el In y el Te. Además, la Ag alcanzaría el 80 % del impacto en las reservas actuales. Con respecto al resto de materiales destaca también el Sn con casi el 35 % y el Ga y Ge con un 25 % y 22 % respectivamente. Todos ellos son debidos a las grandes cantidades que se utilizarían en la energía fotovoltaica, que como se puede apreciar en la Figura 45 la energía eólica afecta directamente al Cu, Nd, Fe, Ni y Al mientras que la energía solar termoeléctrica afecta al Cr, Mn, V y Ti entre otros.

Las tecnologías no sólo se pueden ver afectadas por el impacto que éstas tengan en las reservas, ya que la producción de cada material anual tiene que satisfacer las demandas de todas las tecnologías analizadas, y como se puede observar en la Tabla 13, la solar fotovoltaica contiene más de un material que superaría este valor de producción.

Tabla 13. Resumen de las 3 tecnologías.

| Recurso | Tecnología | | Evolución esperada | Posibles limitaciones | Materiales críticos | Demanda año 2050 [Tn] | Demanda Vs Producción 2050 | Impacto sobre reservas | Exergía [GW/MW] |
|----------------------|------------------------|-------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|
| | Más sost. ⁸ | Menos sost. | | | | | | | |
| Eólica | Modelo 1 | Modelo 2 | 1.950 GW | No | Nd | 9.614 | 13% | 1,47% | 61 |
| | | | | | Cu | 619.800 | 5,60% | 1,81% | 309 |
| Fotovoltaica | CIGS | CdTe | 3.440 GW | Sí | Ag | 16.000 | 165% | 1538% | 1.058 |
| | | | | | Cd | 1.300 | 24% | 123% | 55 |
| | | | | | Ge | 98 | 70% | 427% | 4 |
| | | | | | In | 732 | 4.109% | 3.786% | 1.965 |
| | | | | | Sn | 70.000 | 98% | 664% | 211 |
| Solar termoeléctrica | PT | CRS | 845 GW | No | Ag | 552 | 6% | 1,84% | 116 |
| | | | | | Mo | 5.300 | 3% | 0,85% | 186 |
| | | | | | Mn | 121.800 | 39% | 0,38% | 40,47 |

En la Tabla 13 se muestra un resumen de las tres tecnologías analizadas con los resultados más relevantes. Lo primero que resalta es que para la energía solar fotovoltaica surgirían problemas con más de un material, ya que, con los datos de producción que se han estimado mediante la curva *Hubbert*, la Ag y el In no alcanzarían los valores de demanda en el año 2050, mientras que el Sn se quedaría muy cerca.

Si se analiza el impacto de la demanda en las reservas actuales, ni la energía eólica ni la solar termoeléctrica se verían afectadas, puesto que sus valores no superarían el 2 %. Sin embargo, la energía solar fotovoltaica, tiene cinco materiales los cuales los superarían en valores muy altos, como es el caso del In, que tendría un impacto de casi 3.800 %.

Los valores de exergía calculados se han realizado mediante el share de mercado actual de cada tecnología, detectando que los que mayor rarity contienen entre los materiales considerados críticos serían el In y la Ag en la energía fotovoltaica, el Cu para la energía eólica y el Mo para la solar termoeléctrica.

Podrían existir más materiales críticos que los que aparecen reflejados en la Tabla 13, como son el caso del Fe, Ga y Te. El Fe no es material crítico, y según el estudio realizado tampoco se podría considerar como tal, ya que a pesar de manejar

⁸ Sost. Se refiere a sostenibilidad.

cantidades muy elevadas con dicho material, el impacto en la producción y en las reservas no serían relativamente importantes. Por otra parte, el Ga y el Te son materiales que como se puede observar en las figuras adjuntadas en el apartado *“Resumen de las 3 tecnologías recursos y reservas”* en el Anexo V, tendrían unos impactos muy importantes. No se han tenido en cuenta en la Tabla anterior puesto que los datos de producción no son muy fiables, debido a que se han detectado deficiencias en ellos.

Por los motivos que se han comentado en el párrafo anterior, un pilar importante cuando se habla de materiales es el reciclaje, ya que todo el material que se consigue reciclar, es material que no es necesario extraer de las minas, dándole de esta manera una nueva vida.

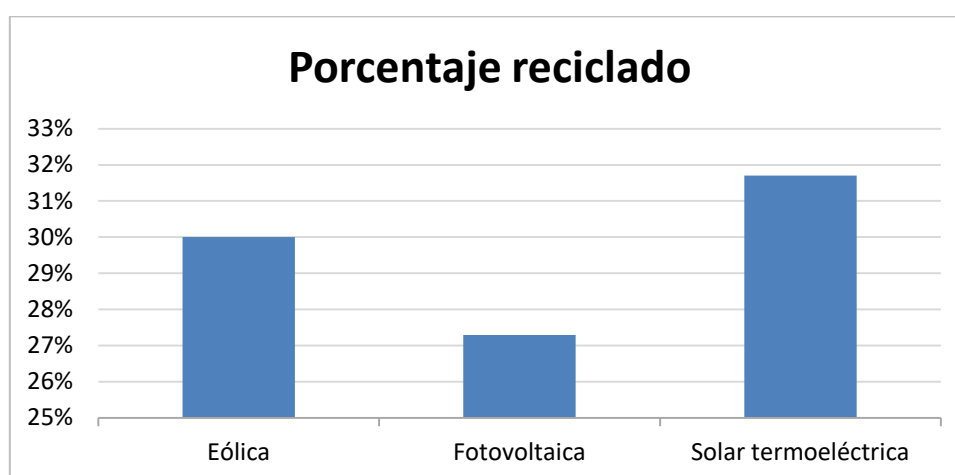


Figura 46. Porcentaje de reciclado de las tecnologías estudiadas.

La Figura 46 muestra el reciclaje medio que se tiene por cada tecnología. No hay que centrarse en que la tecnología menos desarrollada es la que más porcentaje tiene, ya que los valores de reciclaje van en función del material, no de la tecnología. Pero si se observan los porcentajes, el más alto no supera el 32 %, mientras que la energía fotovoltaica dispone de poco más del 27 % de reciclaje medio.

Se ha dicho que el reciclaje se mide por material y no por tecnología, puesto que existen materiales comunes que se pueden utilizar en más de una tecnología. El porcentaje medio de las tecnologías analizadas no supera el 30 %; esto quiere decir que todavía se puede mejorar este valor en un 70 %, lo cual puede representar

millones de toneladas, mejorando los datos reflejados en la Tabla 13 y evitando posibles cuellos de botella que limiten la evolución de las tecnologías renovables, realizándolo de una manera sostenible.

No solo hay que invertir en investigaciones sobre el reciclaje, sino en el desarrollo de nuevas tecnologías más sostenibles que consigan los mismos resultados que hasta ahora, o incluso mejores con un coste exergético menor. Es otro camino que se debe seguir para poder dar otra salida a los recursos estudiados sin futuras restricciones.

Finalmente, se concluye este trabajo con una serie de resultados en las que sólo se vería afectada la energía fotovoltaica. El estudio analizado se ha realizado hasta el año 2050, pero si quiere que estas tecnologías sirvan de base para una sociedad sostenible en el futuro, es necesario y muy importante llevar a cabo informes como este periódicamente –cada 10-15 años–, en el que se analicen todas las tecnologías con los respectivos materiales y prever las restricciones, para que, de esta manera, se esté preparado para las consecuencias que habrá en el momento que ya no queden materiales para esos recursos.

9. Referencias

- [1] Greenpeace, «Greenpeace Climate Vision», *Amsterdam*, n.º May, 2009.
- [2] «Hon Kong climate change Report 2015», *Environ. Bur.*, n.º November, 2015.
- [3] IPCC, «Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers», 2014.
- [4] Greenpeace, «México ante el cambio climático», *México*, n.º June, 2010.
- [5] IEA, «Energy Technology perspectives», *París*, vol. escenarios & strategies to 2050, 2008.
- [6] U. Nations, «WORLD POPULATION TO 2300», *N. Y.*, vol. Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2004.
- [7] IEA, «Technology roadmap - Wind energy», *Technol. Roadmap*, p. 58, 2013.
- [8] IEA, «Key World Energy», *París*, 2015.

- [9] B. Zheng, J. Xu, T. Ni, y M. Li, «Geothermal energy utilization trends from a technological paradigm perspective», *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 430–441, may 2015.
- [10] P. B. Weiss, W., «Potential of Solar Thermal in Europe», *IEA*, vol. Solar Heating and cooling, 2009.
- [11] R. Zhao, L. Zhao, S. Deng, y N. Zheng, «Trends in patents for solar thermal utilization in China», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 852–862, dic. 2015.
- [12] IEA, «Technology roadmap - Wind energy», *Technol. Roadmap*, p. 58, 2013.
- [13] International Energy Agency, «Technology Roadmap Solar Thermal Electricity», p. 52, 2014.
- [14] European Commission, «Report on critical raw materials for the EU, Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials», n.º May, p. 41, 2014.
- [15] A. Valero Capilla, A. Valero Delgado, y A. Domínguez, «Exergy Replacement Cost of Mineral Resources», *Env. Acc. Manag.*, pp. 147-159, 2013.
- [16] P. Viebahn, O. Soukup, S. Samadi, J. Teubler, K. Wiesen, y M. Ritthoff, «Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 655–671, 2015.
- [17] J. Szargut, D. Morris, y Steward, «Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes.», vol. 11, pp. 245-261, 1987.
- [18] A. Valero y A. Valero, «Thanatia : The Destiny of Mineral Resources», 2014.
- [19] G. C. Sevillano, «Exergy assessment of mineral extraction , trade», *Tesis Univ. Zaragoza*, 2016.
- [20] Hubbert, M. K., *Nuclear Energy and the fossil fuels*. 1956.
- [21] Hubbert, M. K., «Energy resources: a report to the Committee on Natural Resources of the National Academy of Sciences», Washington, D.C. (USA), 1962.
- [22] A. Valero y A. Valero, «Resources , Conservation and Recycling Physical geonomics : Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, n.º 12, pp. 1074–1083, 2010.
- [23] U. International y R. Panel, *Recycling Rates of Metals*, May. 2011.
- [24] A. . Fallis, «Global Wind Statisitcs 2015. GWEC», *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, n.º 9, pp. 1689–1699, 2015.

- [25] Vaisala Energy, «Irradiance Global Horizontal», *Vaisala 3TIER Serv. Glob. Wind Dataset Annu. Mean Valid.*, 2015.
- [26] The European Wind Energy Association (EWEA), «The European Offshore Wind Industry: Key Trends and Statistics 1st Half 2015», n.º January, 2015.
- [27] O. D. Asia, O. N. America, S. America, y U. States, «Regional wind power shares of global Key findings», pp. 0–3, 2010.
- [28] R. L. Arántegui, T. Corsatea, y K. Suomalainen, «2012 JRC wind status report energy», 2012.
- [29] R. Llorente Iglesias, R. Lacal Arantegui, y M. Aguado Alonso, «Power electronics evolution in wind turbines - A market-based analysis», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 9, pp. 4982–4993, 2011.
- [30] K. Habib y H. Wenzel, «Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling», *J. Clean. Prod.*, vol. 84, n.º 1, pp. 348–359, 2014.
- [31] B. Guezuraga, R. Zauner, y W. Pölz, «Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines», *Renew. Energy*, vol. 37, n.º 1, pp. 37–44, ene. 2012.
- [32] T. Zimmermann, «Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, n.º 1, pp. 49–60, 2013.
- [33] K. Habib y H. Wenzel, «Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 1–12, 2015.
- [34] E. Martínez, F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jiménez, y J. Blanco, «Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine», *Renew. Energy*, vol. 34, n.º 3, pp. 667–673, mar. 2009.
- [35] J. Chiavari y C. Tam, «GOOD PRACTICE POLICY FRAMEWORK FOR ENERGY TECHNOLOGY RESEARCH, DEVELOPMENT AND DEMONSTRATION (RD&D)», *lea*, vol. Accelerating Energy Innovation Series, n.º Information paper, 2011.
- [36] R. Lacal-Arántegui, «Materials use in electricity generators in wind turbines e state-of-the-art and future specifications», *J. Clean. Prod.*, vol. 87, n.º 1, pp. 275–283, 2015.
- [37] U.S. Department of Energy, «U.S. Department of Energy: Critical materials strategy», 2011.
- [38] D. R. Wilburn, «Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 Through 2030», *Sci. Investig. Rep.*, 2011.

- [39] Elsam Engineering A/S., «Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms», *Engineering*, n.º October, p. 54, 2004.
- [40] A. Elshkaki y T. E. Graedel, «Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies», *J. Clean. Prod.*, vol. 59, pp. 260–273, 2013.
- [41] A. García-Olivares, J. Ballabrera-Poy, E. García-Ladona, y A. Turiel, «A global renewable mix with proven technologies and common materials», *Energy Policy*, vol. 41, pp. 561–574, 2012.
- [42] T. C. Estate, «A Guide to an Offshore Wind Farm», *Crown Estate*, vol. Power, pp. 1–70, 2010.
- [43] A. Franco, A; Nicolau, C; Alcaraz, «Anuario Eólica 2015», *Aee*, p. Madrid, 2015.
- [44] S. Francisco, «Presented at ASES SOLAR 2014 Conference, San Francisco, 7-9 July 2014», n.º July, pp. 7–9, 2014.
- [45] Iea, «Solar Photovoltaic Energy», *Technol. Roadmap*, p. 60, 2014.
- [46] V. V. Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, y J. A. L. Selvaraj, «Progress in solar PV technology : Research and achievement», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 443–461, 2013.
- [47] Stephanie Weckend, Andreas Wade, y Garvin Heath, «Solar photovoltaic Panels», *End Life Manag. IEA IRENA*, 2016.
- [48] Maria Van Der Hoeven, «Technology Roadmap, Carbon capture and storage», *IEA*, 2013.
- [49] Gtm Research, «PV Technology and Cost Outlook, 2013-2017, <http://www.greentechmedia.com/research/report/pv-technology-and-cost-outlook-2013-2017>», 2013.
- [50] R. L. Moss, E. Tzimas, H. Kara, P. Willis, y J. Kooroshy, «The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies», *Energy Policy*, vol. 55, pp. 556–564, 2013.
- [51] M. Al-Jassim, *et al.*, «16 th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules : Materials and Processes», n.º August, 2006.
- [52] V. Fthenakis, «Sustainability of photovoltaics : The case for thin-film solar cells», vol. 13, pp. 2746–2750, 2009.
- [53] USGS, «Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells Circular 1365», 2010.

- [54] A. Andersson, «Monitoring and assessing technology choice : the case of solar cells &», vol. 28, 2000.
- [55] Chiara Candelise, Jamie Spiers, y Robert Gross, «Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: a real concern?», *Imp. Coll. Cent. Energy Policy Technol.*, vol. ICEPT Working Paper, n.º February, pp. 1–26, 2011.
- [56] W. Berger, F. Simon, K. Weimann, y E. A. Alsema, «Resources , Conservation and Recycling A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, n.º 10, pp. 711–718, 2010.
- [57] C. Parrado, A. Girard, F. Simon, y E. Fuentealba, «2050 LCOE (Levelized Cost of Energy) projection for a hybrid PV (photovoltaic)-CSP (concentrated solar power) plant in the Atacama Desert, Chile», *Energy*, vol. 94, pp. 422–430, 2016.
- [58] Erec & Greenpeace, «Energy revolution: a sustainable world energy outlook», *Energy Revolut.*, vol. A SUSTAINABLE WORLD ENERGY OUTLOOK, n.º report 3rd edition 2010 world energy scenario, 2010.
- [59] UNEF, «La energía fotovoltaica una alternativa real», vol. Informe anual 2015, n.º Noviembre, 2015.
- [60] Fraunhofer ISE, «Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems», *Curr. Future Cost Photovolt.*, feb. 2015.
- [61] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, y J. Palm, «Photovoltaic self-consumption in buildings: A review», *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 80–94, 2015.
- [62] Johannes N. Mayer, Dr. Simon Philipps, Noha Saad Hussein, Dr. Thomas Schlegl, y Charlotte Senkpiel, «Current and Future Cost of Photovoltaics Current and Future Cost of Photovoltaics», *Fraunhofer*, 2015.
- [63] E. Teske, S., Leung, J., Crespo, L., Bial, M., Dufour, E., Richter, C., Rochon, «Solar thermal electricity - Global outlook 2016», *Greenpeace*, 2016.
- [64] J. Khan y M. H. Arsalan, «Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 414–425, 2016.
- [65] H. M. J. de la Hoz, M. C. G. Velasco, y J.L. García de Vicuña, «Promotion of concentrating solar thermal power (CSP) in Spain», *Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1052-1068, 2015.
- [66] E. Pihl, D. Kushnir, B. Sandén, y F. Johnsson, «Material constraints for concentrating solar thermal power», *Energy*, vol. 44, n.º 1, pp. 944–954, 2012.
- [67] U.S. Geological Survey, «Mineral Commodity Summaries», n.º January, 2016.



- [68] Solar Paces y ESTELA, «Energía Solar Térmica de Concentración», *Perspect. Mund. 2009*, vol. Greenpeace, p. 88, 2009.
- [69] D. R. Mills, «Solar Thermal Electricity - Full Steam Ahead», *Univ. Syd.*, 2006.
- [70] «Petróleo: Cuando el futuro nos alcance», *Campaña Public. Chevron Texaco*, n.º Julio, 2005.
- [71] Faber M y Proops JI., «National accounting, time and environment», *Columbia Univ. Press*, pp. 214-233, 1991.





ANEXOS





Anexo I: Metodología



Curva Hubbert

La curva Hubbert fue desarrollada por Marion King Hubbert y es conocida por los estudios realizados sobre la disponibilidad de petróleo y gas natural. Predijo que la producción de petróleo de una reserva experimenta una evolución descrita como la campana de Gauss, alcanzando su máximo cuando la mitad del petróleo ha sido extraído y a continuación decayendo [70].

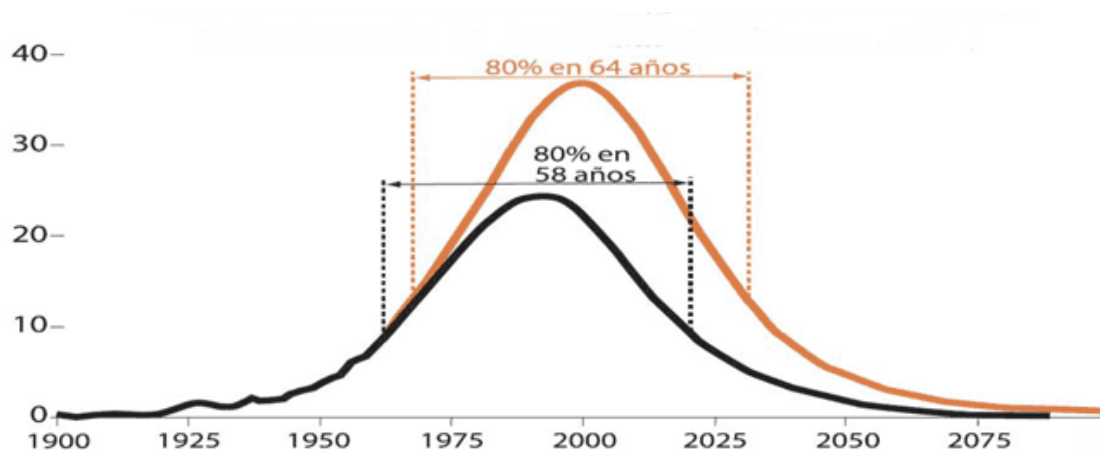


Figura 47. Curva Hubbert⁹

La Figura 47 muestra una curva típica como la que predijo Hubbert, en forma de campana de Gauss. La curva superior muestra que, aunque las reservas fuesen una vez y media mayores, la fecha del pico de la producción solo se retrasaría ocho años, mientras que el tiempo que la humanidad invertiría en consumir el 80% de todas las reservas mundiales se ampliaría tan solo seis años.

Este método ha sido el que se ha utilizado para la previsión de la producción de materiales, en donde algunos minerales ya han alcanzado su pico y otros, por el contrario, no se ha previsto donde está [19].

De acuerdo con las posibles desviaciones que se pueden obtener de los datos empíricos de las curvas teóricas halladas, se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Inestabilidad política

⁹ <http://www.crisisenergetica.org/>

- Inversión especializada
- Factores de salud y medioambientales
- Naturaleza del producto
- Concentración del suministro
- Factores tecnológicos

El modelo Hubbert puede ser más fiable para aquellos minerales en donde el factor de la concentración no es importante, como por ejemplo combustibles fósiles líquidos y gaseosos. Sin embargo, ha habido recientes estudios que relacionan el modelo Hubbert con minerales no fósiles, los cuales han aplicado las curvas exponenciales a la producción de diferentes materias primas. La curva con forma de campana se adapta mejor para minerales no fósiles que los propios fósiles si se toma la exergía como una función de tiempo en vez de masa. Esto se debe a que mientras que la calidad del combustible fósil permanece constante con la extracción, la calidad de los minerales no fósiles se degrada con el paso del tiempo. Por lo tanto, la exergía es una medida mejor que la de masa, ya que no sólo tiene en cuenta la cantidad, sino que también tiene en cuenta la calidad del mineral y la composición.

Valores exergéticos

Las características más importantes para establecer el coste exergético de un recurso mineral es por una parte su composición química y por otra parte su concentración [22].

La composición química de una sustancia es el factor clave para determinar el uso final del recurso. Además, dispone de una influencia directa de la energía requerida por el material [22]. La exergía química viene determinada por la siguiente expresión [17].

$$b_{ch} = \sum v_k b_{che,k}^o + \Delta G_{Mineral} \text{ [KJ/Kmol]}$$

Donde $b_{che,k}^o$ es la exergía química estándar de los elementos que componen el mineral y pueden ser fácilmente encontrados en tablas. v_k es el número de moles el elemento k en el mineral y ΔG es la energía libre de Gibbs [22].

La mínima cantidad de energía involucrada en la concentración de una sustancia de una mezcla ideal de dos componentes viene determinada por la siguiente expresión [71].

$$b_c = -RT^0 \left[\ln x_i + \frac{(1 - x_i)}{x_i} \ln (1 - x_i) \right]$$

Donde b_c es la concentración exergética, x_i es la concentración molar de una sustancia i , R es la constante de los gases $-8,3145 \text{ J/mol K}$ - y T^0 es la temperatura de referencia $-298,15 \text{ K}$ -. De este modo, la exergía total de reposición $-b_t \text{ [kJ/mol]}$ -, representa el mínimo de exergía requerido para restablecer el recurso desde un estado disperso a las condiciones iniciales del mineral en la mina, por lo que es calculado como la suma de los componentes químicos exergéticos y la concentración exergética [22].

$$b_t = b_c + b_{ch}$$

El cálculo del coste de la exergía de reposición de un recurso, representa la exergía actual requerida para reemplazar el recurso una vez utilizado hasta su estado inicial en las minas, que actualmente tiene dos contribuciones.

$$b_t^* = k_{ch} b_{ch} + k_c b_c$$

La variable k representa el coste unitario de exergía de reposición de un mineral, y se define como la relación entre la energía invertida en el proceso real de la obtención para el refinamiento $-k_{ch}$ - o la concentración del mineral $-k_c$ -. Finalmente, la composición química no se tiene en cuenta, quedando la expresión siguiente:

$$b_t^* = k_c b_c$$

Tabla 14. Exergía de los principales minerales [22].

| | E(x) | x_e [g/g] | x_m [g/g] | x_e [g/g] | ERC - Bonus | Mining and conc. | Smelting and refining | Thermodynamic rarity (beneficiation) |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Aluminium - Bauxite (Gibbsite) | $E=1,508x^{-0.5}$ | 1,38E-03 | 7,03E-01 | 9,50E-01 | 627,344 | 10,5 | 23,9 | 638 |
| Antimony (Stibnite) | $E=2,72x^{-0.5}$ | 2,75E-07 | 5,27E-02 | 9,00E-01 | 474,489 | 1,4 | 12,0 | 476 |
| Arsenic (Arsenopyrite) | $E=26,3x^{-0.5}$ | 4,71E-06 | 2,17E-02 | 9,00E-01 | 399,838 | 9,0 | 19,0 | 409 |
| Barite | $E=7,099x^{-0.5}$ | 7,09E-04 | 9,50E-01 | 9,90E-01 | 38,338 | 0,9 | - | 39 |
| Beryllium (Beryl) | $E=4,51x^{-0.5}$ | 3,22E-05 | 7,80E-02 | 9,00E-01 | 252,732 | 7,2 | 450,0 | 260 |
| Bismuth (Bismuthinite) | $E=26,3x^{-0.5}$ | 5,10E-08 | 2,46E-03 | 9,00E-01 | 489,221 | 3,6 | 52,8 | 493 |
| Cadmium (Greenockite) | $E=26,3x^{-0.5}$ | 1,16E-07 | 1,28E-04 | 3,86E-03 | 5,898,405 | 263,9 | 278,5 | 6.162 |
| Cerium (Monazite) | $E=55,8x^{-0.5}$ | 1,03E-04 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 97,193 | 523,1 | - | 620 |
| Chromium (Chromite) | $E=11,81x^{-0.5}$ | 1,98E-04 | 6,37E-01 | 8,10E-01 | 4,537 | 0,1 | 36,3 | 5 |
| Cobalt (Linnaeite) | $E=2,24x^{-0.64}$ | 5,15E-09 | 1,90E-03 | 4,56E-02 | 10,871,925 | 9,2 | 129,0 | 10.881 |
| Copper (Chalcopyrite) | $E=25,651x^{-0.366}$ | 6,64E-05 | 1,67E-02 | 8,09E-01 | 291,701 | 35,3 | 21,4 | 327 |
| Fluorite | $E=7,25x^{-0.5}$ | 1,12E-05 | 2,50E-01 | 9,00E-01 | 182,657 | 1,5 | - | 184 |
| Gadolinium-Monazite | $E=50,3x^{-0.5}$ | 1,30E-04 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 478,052 | 3607,3 | - | 4.085 |
| Gallium (in Bauxite) | $E=4310x^{-0.5}$ | 1,76E-05 | 5,00E-05 | 9,00E-01 | 144,828,051 | 610000,0 | - | 754.828 |
| Germanium (in Zinc) | $E=273x^{-0.5}$ | 1,41E-06 | 3,00E-03 | 9,00E-01 | 23,749,112 | 498,0 | - | 24.247 |
| Gold | $E=169630x^{-0.275}$, x [g/t] | 1,28E-09 | 2,24E-06 | 1,38E-04 | 553,044,197 | 110016,1 | - | 663.060 |
| Graphite | $E=4,32x^{-0.5}$ | 2,41E-04 | 1,50E-01 | 8,70E-01 | 20,386 | 1,1 | - | 22 |
| Gypsum | $E=1,81x^{-0.5}$ | 1,26E-04 | 8,00E-01 | 9,50E-01 | 15,410 | 0,2 | - | 16 |
| Indium (in Zinc) | $E=704x^{-0.5}$ | 5,61E-08 | 4,50E-04 | 9,00E-01 | 360,597,516 | 3319,7 | - | 363.917 |
| Iron ore (Hematite) | $E=5,97x^{-0.5}$ | 9,66E-04 | 7,30E-01 | 9,50E-01 | 17,751 | 0,7 | 13,4 | 18 |
| Lanthanum-Monazite | $E=24,0x^{-0.5}$ | 1,30E-04 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 39,327 | 296,8 | - | 336 |
| Lead (Galena) | $E=1,28x^{-0.5}$ | 6,67E-06 | 2,37E-02 | 6,35E-01 | 36,622 | 0,9 | 3,3 | 38 |
| Lime | $E=2,09x^{-0.5}$ | 8,00E-03 | 6,00E-01 | 9,50E-01 | 2,616 | 0,4 | 5,8 | 3 |
| Lithium (Spodumene) | $E=21,6x^{-0.5}$ | 3,83E-04 | 8,04E-01 | 9,50E-01 | 545,829 | 12,5 | 420,0 | 558 |
| Magnesite | $E=21,6x^{-0.5}$ | 2,50E-02 | 4,20E-01 | 1,00E+00 | 25,555 | 9,5 | - | 35 |
| Manganese (Pyrolusite) | $E=0,911x^{-0.5}$ | 4,90E-05 | 5,00E-01 | 6,71E-01 | 15,642 | 0,2 | 57,4 | 16 |
| Mercury (Cinnabar) | $E=96,8x^{-0.5}$ | 5,73E-08 | 4,41E-03 | 9,00E-01 | 28,297,999 | 157,0 | 252,0 | 28.455 |
| Molybdenum (Molybdenite) | $E=23,6x^{-0.5}$ | 1,83E-06 | 5,01E-04 | 9,18E-01 | 907,911 | 136,0 | 12,0 | 1.044 |
| Neodymium-Monazite | $E=40,8x^{-0.5}$ | 1,30E-04 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 78,415 | 591,7 | - | 670 |
| Nickel (sulphides) Pentlandite | $E=17,01x^{-0.67}$ | 5,75E-05 | 3,36E-02 | 4,68E-01 | 761,035 | 15,5 | 100,0 | 777 |
| Nickel (laterites) Garnierite | $E=2,11x^{-0.5}$ | 4,10E-06 | 4,42E-02 | 8,04E-02 | 167,488 | 1,7 | 412,0 | 169 |
| Niobium (ferrocolumbite) | $E=138,5x^{-0.5}$ | 8,10E-06 | 2,00E-02 | 6,00E-01 | 4,421,968 | 132,0 | - | - |
| Palladium | $E=2160x^{-0.5}$ | 3,95E-10 | 8,02E-07 | 9,00E-01 | 8.983.376,981 | 583333,3 | - | - |
| Phosphate rock (Apatite) | $E=0,373x^{-0.5}$ | 4,03E-04 | 5,97E-03 | 9,00E-01 | 0,352 | 0,3 | 4,6 | 1 |
| Platinum | $E=2070x^{-0.5}$ | 3,95E-10 | 8,02E-07 | 9,00E-01 | 4.491.688,491 | 291666,7 | - | - |
| Potassium (Sylvite) | $E=8,38x^{-0.5}$ | 2,05E-06 | 3,99E-01 | 9,00E-01 | 664,922 | 1,7 | N.A. | 667 |
| Praseodymium-Monazite | $E=10,8x^{-0.5}$ | 7,10E-06 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 577,078 | 296,3 | - | 873 |
| Rhenium | $E=23,8x^{-0.5}$ | 1,98E-10 | 2,33E-04 | 9,00E-01 | 102,931,439 | 156,0 | - | 103.087 |
| Silicon (Quartz) | $E=3,97x^{-0.5}$ | 2,29E-01 | 6,50E-01 | 9,80E-01 | 0,000 | 0,7 | 76,0 | 1 |
| Silver (Argentite) | $E=24,7x^{-0.5}$ | 1,24E-08 | 4,27E-06 | 9,00E-01 | 7,371,408 | 1281,4 | 284,8 | 8.653 |
| Sodium (Halite) | $E=8,13x^{-0.5}$ | 5,89E-04 | 2,00E-01 | 9,00E-01 | 44,073 | 3,3 | 39,6 | 47 |
| Tantalum (Tantalite) | $E=429x^{-0.5}$ | 1,58E-07 | 7,44E-03 | 3,80E-01 | 482,827,991 | 3082,8 | 8,1 | 485.911 |
| Tellurium-Tetradymite | $E=3540x^{-0.5}$ | 5,00E-09 | 1,00E-06 | 9,00E-01 | 2.235.698,904 | 589366,1 | 39,2 | 2.825.065 |
| Tin (Cassiterite) | $E=10,6x^{-0.5}$ | 2,61E-06 | 6,09E-03 | 8,63E-01 | 426,354 | 15,2 | 11,4 | 442 |
| Titanium (Ilmenite) | $E=8,16x^{-0.5}$ | 4,71E-03 | 2,42E-02 | 9,00E-01 | 4,511 | 7,2 | 128,1 | 12 |
| Titanium (Rutile) | $E=6,32x^{-0.5}$ | 2,73E-04 | 2,10E-03 | 9,00E-01 | 8,824 | 13,8 | 243,8 | 23 |
| Uranium (Uraninite) | $E=138,8x^{-0.28}$ | 1,51E-06 | 3,18E-03 | 7,50E-01 | 901,402 | 188,8 | N.A. | 1.090 |
| Vanadium | $E=1,92x^{-0.5}$ | 9,70E-05 | 2,00E-02 | 9,00E-01 | 1.055,296 | 136,0 | 381,0 | 1.191 |
| Wolfram (Scheelite) | $E=1,61x^{-0.5}$ | 2,67E-06 | 8,94E-03 | 9,00E-01 | 7.429,276 | 213,0 | 381,0 | 7.642 |
| Yttrium-Monazite | $E=9,21x^{-0.5}$ | 1,30E-04 | 3,00E-04 | 9,00E-01 | 158,798 | 1198,3 | - | 1.357 |
| Zinc (Sphalerite) | $E=4,49x^{-0.786}$ | 9,96E-05 | 6,05E-02 | 7,90E-01 | 155,031 | 1,5 | 40,4 | 157 |
| Zirconium (Zircon) | $E=330,0x^{-0.5}$ | 3,88E-04 | 4,02E-03 | 9,00E-01 | 654,431 | 738,5 | 633,0 | 1.393 |



Anexo II: Energía Eólica



Lista de materiales utilizados en turbinas eólicas

| Autor | Cu (kg/MW) | Fe (kg/MW) | Al (kg/MW) | Nd (kg/MW) | Ni (kg/MW) | Modelo |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| [30] | | | | 150 | | 2 |
| [31] | 1.200 | 148.000 | | | | 1 |
| | 5.500 | 98.900 | | | | 2 |
| [32] | | | 560 | | | 2 |
| [33] | 4.700 | | | 200 | | 2 |
| [28] | | 120.000 | | | | 2 |
| [34] | 1.750 | 89.840 | | | | 1 |
| [35] | | | | 30 % | | 2 |
| [36] | | | | 195 | | 2 |
| [37] | | | | 186 | | 2 |
| [38] | 2.500 | | | 43,2 | | 1 |
| [39] | 1.408 | | 830 | | | 1 |
| [40] | | | | | 111 | 1 and 2 |

Demanda de materiales para turbinas eólicas off-shore

| Demanda materiales off-shore [Tn. /MW] | |
|--|-------|
| [42] | [41] |
| Acero | Cu |
| 120,00 | 10,30 |

Los valores de cobre anotados son los que vienen de la referencia [31], puesto que es el único estudio que compara las turbinas eólicas del Modelo 1 y del Modelo 2. Los otros estudios que investigan el uso del cobre han sido [34], [39], [38] y [33], los cuales no comparaban los Modelos 1 y 2 juntos.



En el caso de la demanda de Cobre para la infraestructura de la red eléctrica, había únicamente una referencia [41], la cual estudiaba el requerimiento de Cobre tanto en on-shore como en off-shore.

Los valores del Aluminio se han obtenido de [32] y [39] para el Modelo 1 y 2, respectivamente debido a que era el único estudio que incluía el contenido en Aluminio.

El caso del Hierro es similar al del Cobre. Varios autores han analizado el contenido de Fe en turbinas eólicas pero solamente una referencia [36] ha hecho la comparativa entre el Modelo 1 y el Modelo 2.

Con respecto a la cantidad de Fe utilizada para las infraestructuras de las instalaciones off-shore, solo había una referencia [42] que analizaba esta variable.

La cantidad de Neodimio para el Modelo 2, ha sido calculada como una media entre los valores de diferentes referencias [30], [33], [36] y [37]. Para el Modelo 1 se ha asumido que la cantidad de Nd con respecto al Modelo 2 es del 33 % según lo que dice la referencia [37].

Para el Níquel había solo un estudio [40] que analizaba este material, por lo que se ha tomado el valor directamente de la referencia.



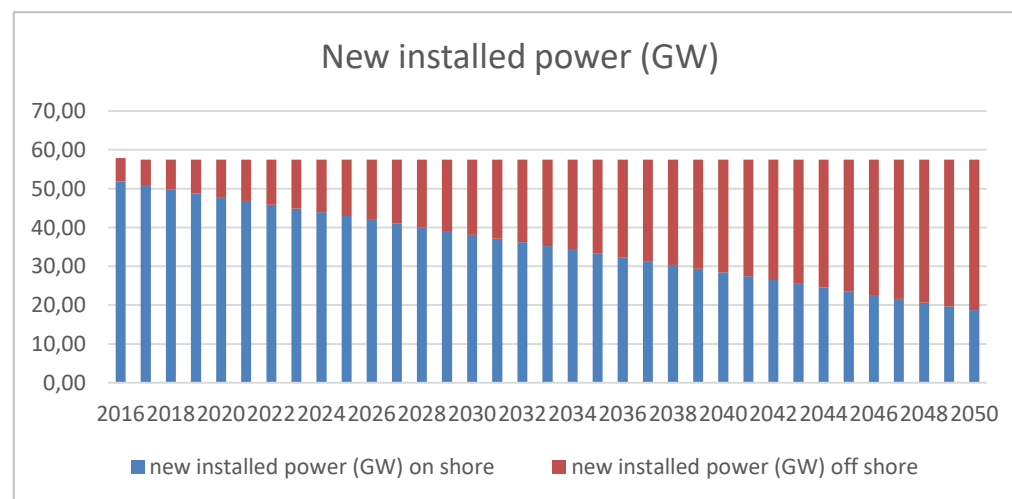


Datos nueva potencia instalada 2015-2050

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| new installed power [GW] on shore | 51,87 | 50,71 | 49,74 | 48,77 | 47,80 | 46,83 | 45,86 | 44,89 | 43,92 | 42,95 | 41,98 | 41,01 |
| new installed power [GW] off shore | 5,99 | 6,75 | 7,72 | 8,69 | 9,66 | 10,63 | 11,60 | 12,57 | 13,54 | 14,50 | 15,47 | 16,44 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 40,04 | 39,07 | 38,10 | 37,13 | 36,16 | 35,19 | 34,22 | 33,25 | 32,28 | 31,31 | 30,35 | 29,38 | 28,41 | 27,44 | 26,47 |
| 17,41 | 18,38 | 19,35 | 20,32 | 21,29 | 22,26 | 23,23 | 24,20 | 25,17 | 26,14 | 27,11 | 28,08 | 29,05 | 30,02 | 30,99 |

| 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25,50 | 24,53 | 23,56 | 22,59 | 21,62 | 20,65 | 19,68 | 18,71 |
| 31,96 | 32,93 | 33,90 | 34,87 | 35,84 | 36,81 | 37,78 | 38,75 |



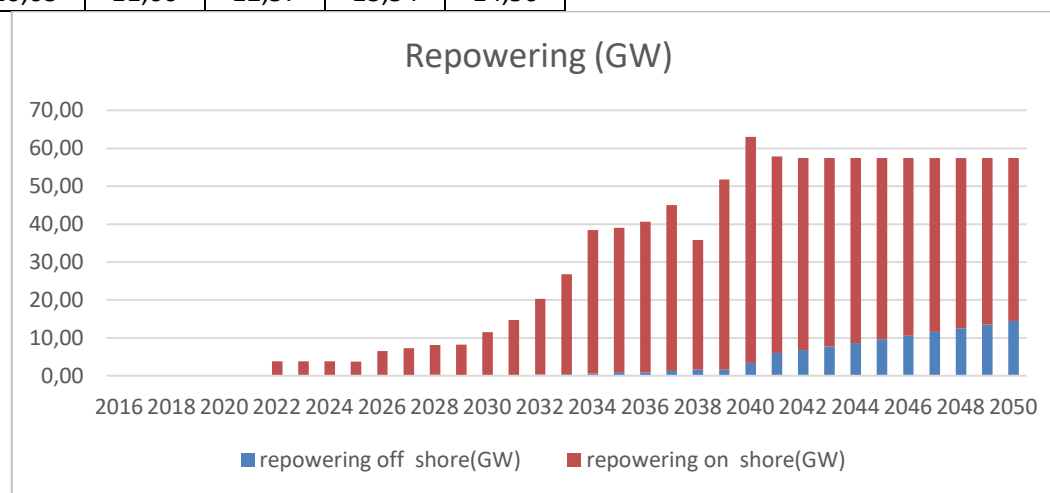


Repowering de los aerogeneradores hasta el año 2050

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| repowering on shore(GW) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,80 | 3,80 | 3,80 | 3,76 | 6,45 | 7,10 |
| repowering off shore(GW) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,17 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7,86 | 8,12 | 11,44 | 14,56 | 19,94 | 26,38 | 37,81 | 38,12 | 39,71 | 43,74 | 34,17 | 50,06 | 59,64 | 51,87 | 50,71 |
| 0,28 | 0,09 | 0,09 | 0,15 | 0,37 | 0,43 | 0,64 | 0,94 | 0,92 | 1,30 | 1,63 | 1,68 | 3,38 | 5,99 | 6,75 |

| 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 49,74 | 48,77 | 47,80 | 46,83 | 45,86 | 44,89 | 43,92 | 42,95 |
| 7,72 | 8,69 | 9,66 | 10,63 | 11,60 | 12,57 | 13,54 | 14,50 |

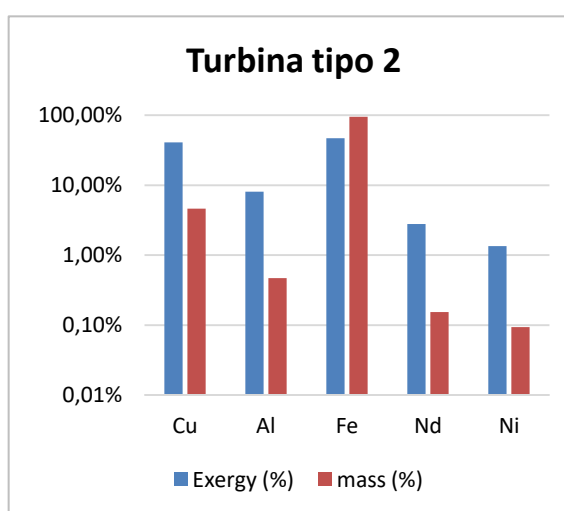
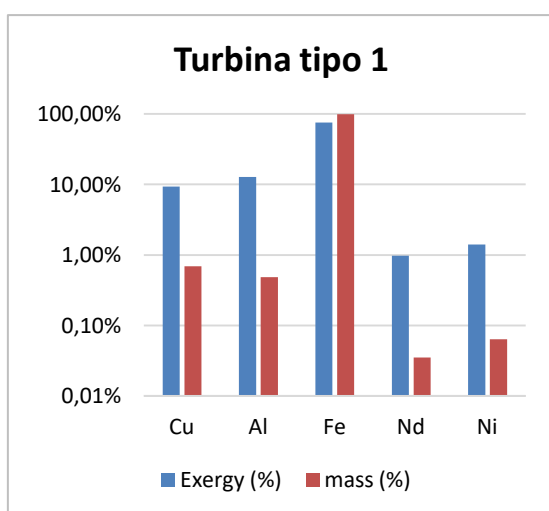


Comparativa másica y exergética de las turbinas

| | Modelo 1 | Modelo 2 |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| Cu (kJ/MW) | 392.400.000 | 1.798.500.000 |
| Al (kJ/MW) | 535.701.600 | 357.134.400 |
| Fe (kJ/MW) | 3.175.245.000 | 2.078.761.500 |
| Nd (kJ/MW) | 40.823.710 | 122.464.430 |
| Ni (kJ/MW) | 59.228.490 | 59.228.490 |
| Total (kJ/MW) | 4.203.398.800 | 4.416.088.820 |

| Modelo 1 | | | | | | | | |
|--------------|------------------|----------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|-------------|
| | masa (kg/MW) | masa (%) | DR (KJ/MW) | DR (%) | OR (KJ/MW) | OR (%) | Exergía (KJ) | Exergía (%) |
| Cu | 1200,00 | 0,01 | 3,50E+08 | 0,09 | 4,24E+07 | 0,20 | 3,92E+08 | 0,09 |
| Al | 840,00 | 0,00 | 5,27E+08 | 0,13 | 8,82E+06 | 0,04 | 5,36E+08 | 0,13 |
| Fe | 172100,00 | 0,99 | 3,05E+09 | 0,76 | 1,20E+08 | 0,58 | 3,18E+09 | 0,76 |
| Nd | 60,92 | 0,00 | 4,78E+06 | 0,00 | 3,60E+07 | 0,17 | 4,08E+07 | 0,01 |
| Ni | 111,00 | 0,00 | 5,81E+07 | 0,01 | 1,11E+06 | 0,01 | 5,92E+07 | 0,01 |
| Total | 174311,92 | | 3,99E+09 | | 2,09E+08 | | 4,20E+09 | |

| Modelo 2 | | | | | | | | |
|--------------|------------------|----------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|-------------|
| | masa (kg/MW) | masa (%) | DR (KJ/MW) | DR (%) | OR (KJ/MW) | OR (%) | Exergía (KJ) | Exergía (%) |
| Cu | 5500,00 | 0,05 | 1,60E+09 | 0,40 | 1,94E+08 | 0,50 | 1,80E+09 | 0,41 |
| Al | 560,00 | 0,00 | 3,51E+08 | 0,09 | 5,88E+06 | 0,02 | 3,57E+08 | 0,08 |
| Fe | 112670,00 | 0,95 | 2,00E+09 | 0,50 | 7,89E+07 | 0,20 | 2,08E+09 | 0,47 |
| Nd | 182,75 | 0,00 | 1,43E+07 | 0,00 | 1,08E+08 | 0,28 | 1,22E+08 | 0,03 |
| Ni | 111,00 | 0,00 | 5,81E+07 | 0,01 | 1,11E+06 | 0,00 | 5,92E+07 | 0,01 |
| Total | 119023,75 | | 4,03E+09 | | 3,88E+08 | | 4,42E+09 | |





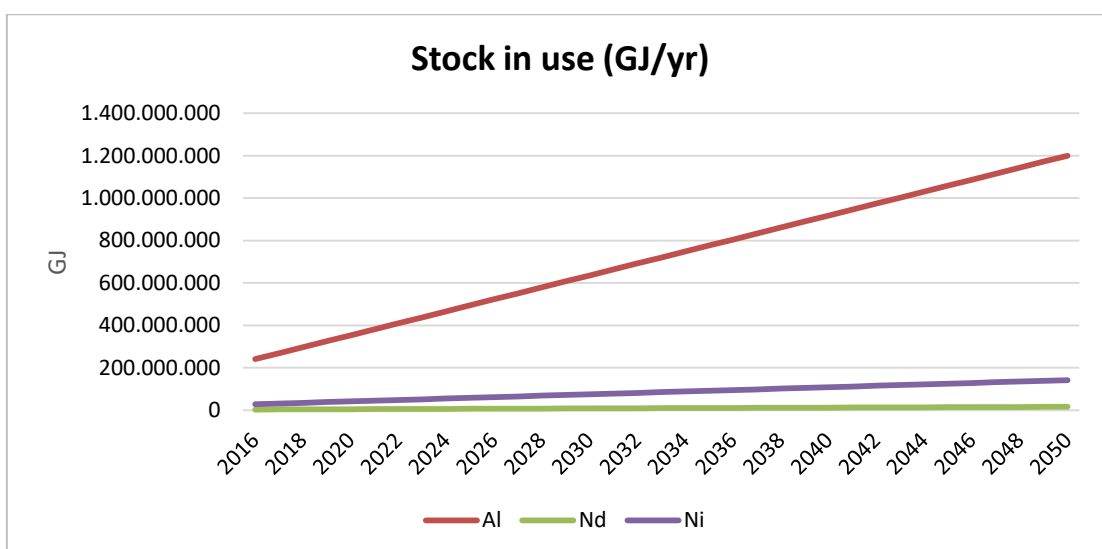
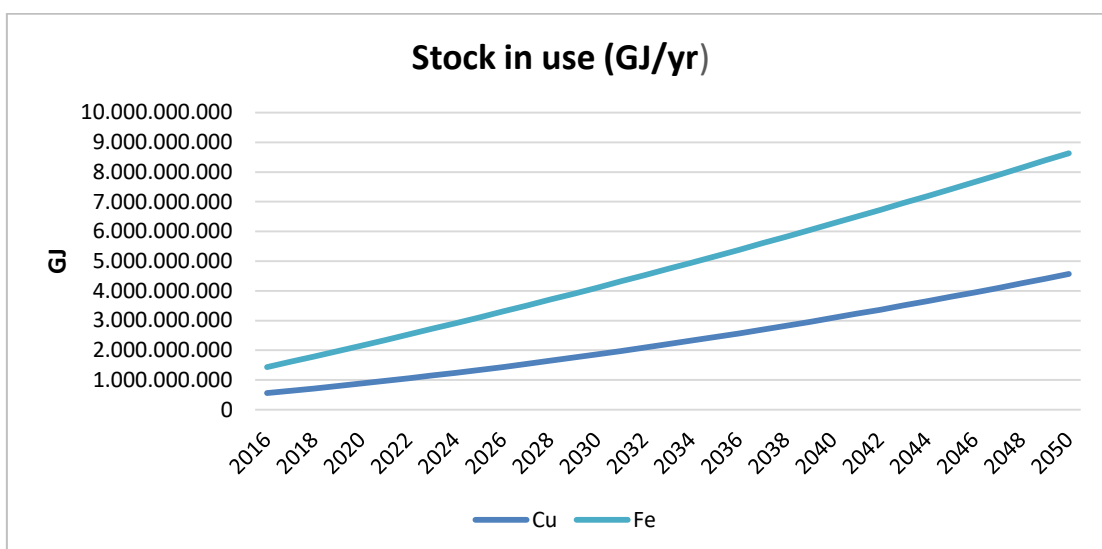
Stock in use e los materiales [GJ/año]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cu | 5,557E+08 | 6,327E+08 | 7,122E+08 | 7,941E+08 | 8,786E+08 | 9,655E+08 | 1,055E+09 | 1,147E+09 | 1,241E+09 | 1,338E+09 | 1,438E+09 | 1,539E+09 |
| Al | 2,407E+08 | 2,689E+08 | 2,971E+08 | 3,253E+08 | 3,535E+08 | 3,817E+08 | 4,099E+08 | 4,381E+08 | 4,664E+08 | 4,946E+08 | 5,228E+08 | 5,510E+08 |
| Nd | 3,279E+06 | 3,663E+06 | 4,047E+06 | 4,432E+06 | 4,816E+06 | 5,200E+06 | 5,584E+06 | 5,969E+06 | 6,353E+06 | 6,737E+06 | 7,121E+06 | 7,506E+06 |
| Ni | 2,850E+07 | 3,183E+07 | 3,517E+07 | 3,851E+07 | 4,185E+07 | 4,519E+07 | 4,853E+07 | 5,187E+07 | 5,521E+07 | 5,855E+07 | 6,189E+07 | 6,523E+07 |
| Fe | 1,433E+09 | 1,611E+09 | 1,791E+09 | 1,972E+09 | 2,156E+09 | 2,342E+09 | 2,530E+09 | 2,721E+09 | 2,913E+09 | 3,107E+09 | 3,303E+09 | 3,502E+09 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,644E+09 | 1,751E+09 | 1,860E+09 | 1,972E+09 | 2,086E+09 | 2,203E+09 | 2,322E+09 | 2,444E+09 | 2,568E+09 | 2,695E+09 | 2,824E+09 | 2,956E+09 |
| 5,792E+08 | 6,074E+08 | 6,356E+08 | 6,638E+08 | 6,920E+08 | 7,202E+08 | 7,484E+08 | 7,766E+08 | 8,048E+08 | 8,330E+08 | 8,613E+08 | 8,895E+08 |
| 7,890E+06 | 8,274E+06 | 8,659E+06 | 9,043E+06 | 9,427E+06 | 9,811E+06 | 1,020E+07 | 1,058E+07 | 1,096E+07 | 1,135E+07 | 1,173E+07 | 1,212E+07 |
| 6,857E+07 | 7,191E+07 | 7,525E+07 | 7,859E+07 | 8,192E+07 | 8,526E+07 | 8,860E+07 | 9,194E+07 | 9,528E+07 | 9,862E+07 | 1,020E+08 | 1,053E+08 |
| 3,702E+09 | 3,905E+09 | 4,110E+09 | 4,316E+09 | 4,525E+09 | 4,736E+09 | 4,949E+09 | 5,164E+09 | 5,381E+09 | 5,600E+09 | 5,821E+09 | 6,044E+09 |

| 2040 | 2041 | 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3,090E+09 | 3,227E+09 | 3,366E+09 | 3,508E+09 | 3,652E+09 | 3,799E+09 | 3,948E+09 | 4,100E+09 | 4,254E+09 | 4,410E+09 | 4,570E+09 |
| 9,177E+08 | 9,459E+08 | 9,741E+08 | 1,002E+09 | 1,030E+09 | 1,059E+09 | 1,087E+09 | 1,115E+09 | 1,143E+09 | 1,172E+09 | 1,200E+09 |
| 1,250E+07 | 1,289E+07 | 1,327E+07 | 1,365E+07 | 1,404E+07 | 1,442E+07 | 1,481E+07 | 1,519E+07 | 1,558E+07 | 1,596E+07 | 1,634E+07 |
| 1,086E+08 | 1,120E+08 | 1,153E+08 | 1,187E+08 | 1,220E+08 | 1,253E+08 | 1,287E+08 | 1,320E+08 | 1,354E+08 | 1,387E+08 | 1,420E+08 |
| 6,269E+09 | 6,497E+09 | 6,726E+09 | 6,957E+09 | 7,191E+09 | 7,427E+09 | 7,664E+09 | 7,904E+09 | 8,146E+09 | 8,390E+09 | 8,636E+09 |







Demanda Vs producción

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cu | 1,16% | 1,18% | 1,21% | 1,25% | 1,29% | 1,32% | 1,42% | 1,46% | 1,50% | 1,54% | 1,63% | 1,70% | 1,76% | 1,81% | 1,91% |
| Al | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% |
| Fe | 0,22% | 0,22% | 0,22% | 0,22% | 0,22% | 0,22% | 0,23% | 0,23% | 0,23% | 0,23% | 0,24% | 0,24% | 0,25% | 0,25% | 0,26% |
| Nd | 16,94% | 16,24% | 15,68% | 15,15% | 14,64% | 14,16% | 14,60% | 14,13% | 13,68% | 13,24% | 13,40% | 13,14% | 12,91% | 12,54% | 12,78% |
| Ni | 1,53% | 1,49% | 1,47% | 1,45% | 1,43% | 1,41% | 1,49% | 1,47% | 1,46% | 1,44% | 1,49% | 1,49% | 1,50% | 1,49% | 1,56% |

| 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 | 2043 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2,02% | 2,18% | 2,36% | 2,63% | 2,72% | 2,83% | 3,00% | 2,93% | 3,31% | 3,69% | 3,82% | 3,96% | 4,13% |
| 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,02% | 0,01% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% |
| 0,27% | 0,29% | 0,31% | 0,35% | 0,35% | 0,36% | 0,37% | 0,35% | 0,40% | 0,44% | 0,44% | 0,44% | 0,45% |
| 12,98% | 13,58% | 14,31% | 15,81% | 15,47% | 15,29% | 15,55% | 13,77% | 15,70% | 16,87% | 15,74% | 15,29% | 14,91% |
| 1,62% | 1,73% | 1,87% | 2,11% | 2,12% | 2,14% | 2,23% | 2,03% | 2,37% | 2,61% | 2,49% | 2,48% | 2,48% |

| 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 4,30% | 4,49% | 4,68% | 4,93% | 5,14% | 5,37% | 5,60% |
| 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% |
| 0,45% | 0,46% | 0,47% | 0,49% | 0,50% | 0,51% | 0,52% |
| 14,55% | 14,20% | 13,87% | 14,00% | 13,68% | 13,37% | 13,07% |
| 2,48% | 2,48% | 2,48% | 2,57% | 2,57% | 2,57% | 2,58% |





Anexo III: Energía Solar

Fotovoltaica



Lista de materiales utilizados en módulos fotovoltaicos

- c-Si [kg/MW]

| | [50] | [50] | [40] | [51] | Media |
|-----------|-------|---------|---------|------|---------|
| Ag | 24 | 19,2 | 355,9 | | 133 |
| Cd | | 6.1 | | | 6.1 |
| Cu | 2,741 | 2,194.1 | 7,597.5 | | 4,177.5 |
| Ga | | 0.1 | | | 0.1 |
| In | | 4.5 | | | 4.5 |
| Mg | 53.5 | | | | 53.5 |
| Ni | | | 1.1 | | 1.1 |
| Pb | 336 | | 21.2 | | 178.6 |
| Se | | 0.5 | | | 0.5 |
| Si | 3,653 | | | 9 | 6,326.5 |
| Sn | 577 | 463.1 | | | 520.0 |
| Te | | 4.70 | | | 4.7 |

- CIGS [kg/MW]

| | [50] | [40] | [52] | [53] | [54] | [55] | Media |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Cd | | | | | | 1.8 | 1.8 |
| Cu | 21.0 | | | | | 16.9 | 19.0 |
| Ga | 2.3 | 5.0 | | 7.5 | 5.0 | 5.0 | 4.9 |
| In | 18.9 | 27.4 | 15.5 | 22.5 | 27.4 | 27.4 | 23.2 |
| Mo | | | | | | 94.3 | 94.3 |
| Se | 9.6 | 45.3 | | 45.0 | 45.3 | 45.3 | 38.1 |
| Zn | | | | | | 85.8 | 85.8 |

- CdTe [kg/MW]

| | [50] | [40] | [52] | [56] | [53] | [54] | [55] | Media |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Cd | | 63,3 | | | 85 | 63,3 | 49,2 | 65.2 |
| Cu | | | | 42.8 | | | | 42.8 |
| In | 15.9 | | | | | | | 15.9 |
| Mo | | | | | | | 100.5 | 100.5 |
| Sn | | | | | | | 6.6 | 6.6 |
| Te | | 61.9 | 55.0 | | 97.5 | | 47.2 | 65.4 |

- A-Si[kg/MW]

| | [40] | [52] | [54] | [55] | Media |
|-----------|------|------|------|------|-------|
| Ge | 6.9 | 42.0 | 6.9 | 3.4 | 14.8 |

Contribución en masa de los módulos fotovoltaicos

| | Masa [kg/MW] | | | | % en masa | | | |
|--------------|--------------|------|-------|------|-----------|---------|---------|---------|
| | c-Si | CIGS | CdTe | a-Si | c-Si | CIGS | CdTe | a-Si |
| Ag | 133 | | | | 1,17% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Cd | 6,1 | 1,8 | 65,2 | | 0,05% | 0,79% | 22,00% | 0,00% |
| Cu | 4177,5 | 19 | 42,8 | | 36,63% | 8,30% | 14,44% | 0,00% |
| Ga | 0,1 | 4,9 | | | 0,00% | 2,14% | 0,00% | 0,00% |
| Ge | | | | 14,8 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 100,00% |
| In | 4,5 | 23,2 | 15,9 | | 0,04% | 10,13% | 5,36% | 0,00% |
| Mg | 53,5 | | | | 0,47% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Mo | | 94,3 | 100,5 | | 0,00% | 41,18% | 33,91% | 0,00% |
| Ni | 1,1 | | | | 0,01% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Pb | 178,6 | | | | 1,57% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Si | 6326,5 | | | | 55,47% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Sn | 520 | | 6,6 | | 4,56% | 0,00% | 2,23% | 0,00% |
| Te | 4,7 | | 65,4 | | 0,04% | 0,00% | 22,06% | 0,00% |
| Zn | | 85,8 | | | 0,00% | 37,47% | 0,00% | 0,00% |
| TOTAL | 11405,6 | 229 | 296,4 | 14,8 | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

NOTA: El mercado es 85 % c-Si, y 5 % el resto de tecnologías.

Contribución en exergía de los módulos fotovoltaicos

| | Exergía [GJ/MW] | | | | % en Exergía | | | |
|--------------|-----------------|----------|-----------|--------|--------------|---------|---------|---------|
| | c-Si | CIGS | CdTe | a-Si | c-Si | CIGS | CdTe | a-Si |
| Ag | 1150,77 | | | | 6,47% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Cd | 37,59 | 11,09 | 401,76 | | 0,21% | 0,09% | 0,21% | 0,00% |
| Cu | 1366,04 | 6,21 | 14,00 | | 7,68% | 0,05% | 0,01% | 0,00% |
| Ga | 75,48 | 3698,66 | | | 0,42% | 30,14% | 0,00% | 0,00% |
| Ge | | | | 358,86 | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 100,00% |
| In | 1637,63 | 8442,89 | 5786,29 | | 9,20% | 68,81% | 3,03% | 0,00% |
| Mg | 1,36 | | | | 0,01% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Mo | | 98,44 | 104,91 | | 0,00% | 0,80% | 0,05% | 0,00% |
| Ni | 0,59 | | | | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Pb | 6,70 | | | | 0,04% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Si | 8,86 | | | | 0,05% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Sn | 229,58 | | 2,91 | | 1,29% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Te | 13277,81 | | 184759,26 | | 74,63% | 0,00% | 96,70% | 0,00% |
| Zn | | 13,43 | | | 0,00% | 0,11% | 0,00% | 0,00% |
| TOTAL | 17792,40 | 12270,72 | 191069,13 | 358,86 | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |



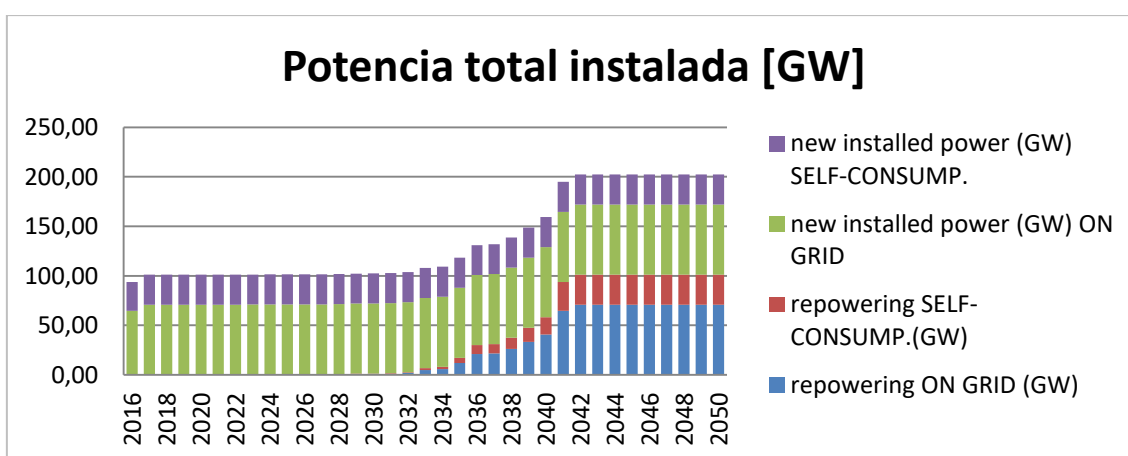
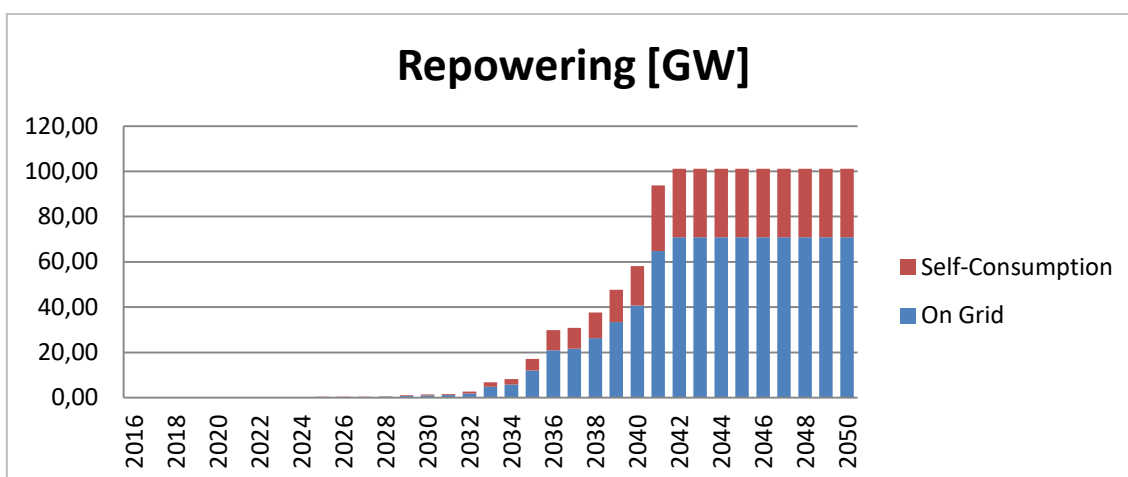
Repowering en la Energía Solar Fotovoltaica [GW]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| new installed power ON GRID | 64,76 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 |
| new installed power SELF-CONSUMP. | 29,08 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 |
| repowering ON GRID | 0,00 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,17 | 0,31 | 0,22 | 0,31 |
| repowering SELF-CONSUMP. | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,13 | 0,10 | 0,13 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 |
| 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,36 | 30,35 | 30,36 |
| 0,39 | 0,79 | 0,95 | 1,10 | 1,87 | 4,74 | 5,74 | 11,95 | 20,92 | 21,60 | 26,29 | 33,32 | 40,67 | 64,76 | 70,81 |
| 0,17 | 0,34 | 0,41 | 0,47 | 0,80 | 2,03 | 2,46 | 5,12 | 8,97 | 9,26 | 11,27 | 14,28 | 17,43 | 29,08 | 30,36 |

| 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 |
| 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,36 | 30,35 |
| 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 | 70,81 |
| 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,35 | 30,36 | 30,36 | 30,35 |





Valores de exergía en la Energía Solar Fotovoltaica

| | kg/MW | (A) [GJ/Tn] | (B) [GJ/Tn] | (A)+(B) GJ/Ton | (A)+(B) | % Masa | % Exergía |
|-----------|----------|-------------|-------------|----------------|---------|--------|-----------|
| Ag | 113,08 | 1281,4 | 7,371.0 | 8652,4 | 978,4 | 1,16 | 3.86 |
| Cd | 8,54 | 263.9 | 5,898.0 | 6161,9 | 52.6 | 0,09 | 0.21 |
| Cu | 3.554,00 | 35.3 | 291.7 | 327 | 1162,1 | 36,55 | 4.58 |
| Ga | 0,35 | 610 | 144,828.0 | 754828 | 264,4 | 0,00 | 1.04 |
| Ge | 0,74 | 498.0 | 23,749.0 | 24247 | 17,9 | 0,01 | 0.07 |
| In | 5,78 | 3319,7 | 360,598.0 | 363917,7 | 2102,7 | 0,06 | 8.30 |
| Mg | 45,48 | --- | 25.5 | 25,5 | 1,16 | 0,47 | 0.10 |
| Mo | 9,74 | 136.0 | 907.9 | 1043,9 | 10,1 | 0,10 | 0.04 |
| Ni | 0,94 | 9.9 | 523,6 | 533,5 | 0,5 | 0,01 | 0.00 |
| Pb | 151,82 | 0.9 | 36.6 | 37,5 | 5,7 | 1,56 | 0.02 |
| Se | 2,33 | ----- | ---- | ---- | ---- | 0,02 | 0.00 |
| Si | 5.377,5 | 0.7 | 0.7 | 1,4 | 7,6 | 55,30 | 0.03 |
| Sn | 442,37 | 15.2 | 426.3 | 441,5 | 195,3 | 4,55 | 0.77 |
| Te | 7,27 | 589,3661 | 2235699.0 | 2825065 | 20525,5 | 0,07 | 80.97 |
| Zn | 4,29 | 1,5 | 155.0 | 156,5 | 0,6 | 0,04 | 0.00 |

Comparación Masa Vs Exergía de los diferentes módulos

| | c-Si | |
|-----------|--------|--------|
| Ag | 1,17% | 6,47% |
| Cd | 0,05% | 0,21% |
| Cu | 36,63% | 7,68% |
| Ga | 0,00% | 0,42% |
| In | 0,04% | 9,20% |
| Mg | 0,47% | 0,01% |
| Ni | 0,01% | 0,00% |
| Pb | 1,57% | 0,04% |
| Si | 55,47% | 0,05% |
| Sn | 4,56% | 1,29% |
| Te | 0,04% | 74,63% |

| | CIGS | |
|-----------|--------|--------|
| Cd | 0,79% | 0,09% |
| Cu | 8,30% | 0,05% |
| Ga | 2,14% | 30,14% |
| In | 10,13% | 68,81% |
| Mo | 41,18% | 0,80% |
| Zn | 37,47% | 0,11% |

| | CdTe | |
|-----------|--------|--------|
| Cd | 22,00% | 0,21% |
| Cu | 14,44% | 0,01% |
| In | 5,36% | 3,03% |
| Mo | 33,91% | 0,05% |
| Sn | 2,23% | 0,00% |
| Te | 22,06% | 96,70% |



Stock in use de materiales en módulos fotovoltaicos [GJ]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Si | 1,33E+06 | 1,73E+06 | 2,13E+06 | 2,52E+06 | 2,92E+06 | 3,32E+06 | 3,71E+06 | 4,11E+06 | 4,51E+06 | 4,91E+06 | 5,30E+06 | 5,70E+06 |
| Cu | 6,81E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,35E+07 | 7,36E+07 | 7,37E+07 | 7,36E+07 | 7,37E+07 |
| Sn | 6,40E+07 | 8,31E+07 | 1,02E+08 | 1,21E+08 | 1,40E+08 | 1,59E+08 | 1,78E+08 | 1,98E+08 | 2,17E+08 | 2,36E+08 | 2,55E+08 | 2,74E+08 |
| Pb | 1,89E+06 | 2,45E+06 | 3,01E+06 | 3,57E+06 | 4,14E+06 | 4,70E+06 | 5,26E+06 | 5,82E+06 | 6,39E+06 | 6,95E+06 | 7,51E+06 | 8,07E+06 |
| Ag | 2,83E+08 | 3,67E+08 | 4,51E+08 | 5,36E+08 | 6,20E+08 | 7,04E+08 | 7,89E+08 | 8,73E+08 | 9,57E+08 | 1,04E+09 | 1,13E+09 | 1,21E+09 |
| Mg | 3,94E+05 | 5,12E+05 | 6,29E+05 | 7,47E+05 | 8,65E+05 | 9,82E+05 | 1,10E+06 | 1,22E+06 | 1,33E+06 | 1,45E+06 | 1,57E+06 | 1,69E+06 |
| Cd | 1,71E+07 | 2,22E+07 | 2,73E+07 | 3,24E+07 | 3,74E+07 | 4,25E+07 | 4,76E+07 | 5,27E+07 | 5,78E+07 | 6,29E+07 | 6,80E+07 | 7,31E+07 |
| Mo | 3,00E+06 | 3,89E+06 | 4,79E+06 | 5,68E+06 | 6,58E+06 | 7,47E+06 | 8,37E+06 | 9,26E+06 | 1,02E+07 | 1,11E+07 | 1,19E+07 | 1,28E+07 |
| Te | 5,51E+09 | 7,15E+09 | 8,80E+09 | 1,04E+10 | 1,21E+10 | 1,37E+10 | 1,54E+10 | 1,70E+10 | 1,87E+10 | 2,03E+10 | 2,19E+10 | 2,36E+10 |
| In | 7,07E+08 | 9,17E+08 | 1,13E+09 | 1,34E+09 | 1,55E+09 | 1,76E+09 | 1,97E+09 | 2,18E+09 | 2,39E+09 | 2,60E+09 | 2,81E+09 | 3,03E+09 |
| Zn | 2,26E+05 | 2,93E+05 | 3,60E+05 | 4,28E+05 | 4,95E+05 | 5,62E+05 | 6,30E+05 | 6,97E+05 | 7,64E+05 | 8,32E+05 | 8,99E+05 | 9,66E+05 |
| Se | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| Ni | 1,66E+05 | 2,16E+05 | 2,65E+05 | 3,15E+05 | 3,64E+05 | 4,14E+05 | 4,63E+05 | 5,13E+05 | 5,62E+05 | 6,12E+05 | 6,61E+05 | 7,11E+05 |
| Ga | 1,72E+07 | 2,23E+07 | 2,75E+07 | 3,26E+07 | 3,77E+07 | 4,29E+07 | 4,80E+07 | 5,32E+07 | 5,83E+07 | 6,34E+07 | 6,86E+07 | 7,37E+07 |
| Ge | 5,97E+06 | 7,75E+06 | 9,54E+06 | 1,13E+07 | 1,31E+07 | 1,49E+07 | 1,67E+07 | 1,84E+07 | 2,02E+07 | 2,20E+07 | 2,38E+07 | 2,56E+07 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 6,10E+06 | 6,49E+06 | 6,89E+06 | 7,29E+06 | 7,69E+06 | 8,08E+06 | 8,48E+06 | 8,88E+06 | 9,27E+06 | 9,67E+06 | 1,01E+07 | 1,05E+07 | 1,09E+07 |
| 7,38E+07 | 7,42E+07 | 7,44E+07 | 7,46E+07 | 7,54E+07 | 7,83E+07 | 7,94E+07 | 8,58E+07 | 9,51E+07 | 9,58E+07 | 1,01E+08 | 1,08E+08 | 1,16E+08 |
| 2,93E+08 | 3,12E+08 | 3,31E+08 | 3,50E+08 | 3,69E+08 | 3,88E+08 | 4,07E+08 | 4,27E+08 | 4,46E+08 | 4,65E+08 | 4,84E+08 | 5,03E+08 | 5,22E+08 |
| 8,64E+06 | 9,20E+06 | 9,76E+06 | 1,03E+07 | 1,09E+07 | 1,14E+07 | 1,20E+07 | 1,26E+07 | 1,31E+07 | 1,37E+07 | 1,43E+07 | 1,48E+07 | 1,54E+07 |
| 1,29E+09 | 1,38E+09 | 1,46E+09 | 1,55E+09 | 1,63E+09 | 1,72E+09 | 1,80E+09 | 1,88E+09 | 1,97E+09 | 2,05E+09 | 2,14E+09 | 2,22E+09 | 2,31E+09 |
| 1,81E+06 | 1,92E+06 | 2,04E+06 | 2,16E+06 | 2,28E+06 | 2,39E+06 | 2,51E+06 | 2,63E+06 | 2,75E+06 | 2,86E+06 | 2,98E+06 | 3,10E+06 | 3,22E+06 |





| | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 7,82E+07 | 8,33E+07 | 8,84E+07 | 9,35E+07 | 9,86E+07 | 1,04E+08 | 1,09E+08 | 1,14E+08 | 1,19E+08 | 1,24E+08 | 1,29E+08 | 1,34E+08 | 1,39E+08 |
| 1,37E+07 | 1,46E+07 | 1,55E+07 | 1,64E+07 | 1,73E+07 | 1,82E+07 | 1,91E+07 | 2,00E+07 | 2,09E+07 | 2,18E+07 | 2,27E+07 | 2,36E+07 | 2,45E+07 |
| 2,52E+10 | 2,69E+10 | 2,85E+10 | 3,02E+10 | 3,18E+10 | 3,34E+10 | 3,51E+10 | 3,67E+10 | 3,84E+10 | 4,00E+10 | 4,17E+10 | 4,33E+10 | 4,49E+10 |
| 3,24E+09 | 3,45E+09 | 3,66E+09 | 3,87E+09 | 4,08E+09 | 4,29E+09 | 4,50E+09 | 4,71E+09 | 4,92E+09 | 5,13E+09 | 5,34E+09 | 5,55E+09 | 5,77E+09 |
| 1,03E+06 | 1,10E+06 | 1,17E+06 | 1,24E+06 | 1,30E+06 | 1,37E+06 | 1,44E+06 | 1,50E+06 | 1,57E+06 | 1,64E+06 | 1,71E+06 | 1,77E+06 | 1,84E+06 |
| 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| 7,60E+05 | 8,10E+05 | 8,59E+05 | 9,09E+05 | 9,59E+05 | 1,01E+06 | 1,06E+06 | 1,11E+06 | 1,16E+06 | 1,21E+06 | 1,26E+06 | 1,31E+06 | 1,35E+06 |
| 7,88E+07 | 8,40E+07 | 8,91E+07 | 9,42E+07 | 9,94E+07 | 1,04E+08 | 1,10E+08 | 1,15E+08 | 1,20E+08 | 1,25E+08 | 1,30E+08 | 1,35E+08 | 1,40E+08 |
| 2,74E+07 | 2,91E+07 | 3,09E+07 | 3,27E+07 | 3,45E+07 | 3,63E+07 | 3,80E+07 | 3,98E+07 | 4,16E+07 | 4,34E+07 | 4,52E+07 | 4,69E+07 | 4,87E+07 |

| 2041 | 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,13E+07 | 1,17E+07 | 1,21E+07 | 1,25E+07 | 1,28E+07 | 1,32E+07 | 1,36E+07 | 1,40E+07 | 1,44E+07 | 1,48E+07 |
| 1,42E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 | 1,47E+08 |
| 5,41E+08 | 5,60E+08 | 5,79E+08 | 5,98E+08 | 6,17E+08 | 6,36E+08 | 6,55E+08 | 6,75E+08 | 6,94E+08 | 7,13E+08 |
| 1,59E+07 | 1,65E+07 | 1,71E+07 | 1,76E+07 | 1,82E+07 | 1,88E+07 | 1,93E+07 | 1,99E+07 | 2,04E+07 | 2,10E+07 |
| 2,39E+09 | 2,48E+09 | 2,56E+09 | 2,64E+09 | 2,73E+09 | 2,81E+09 | 2,90E+09 | 2,98E+09 | 3,07E+09 | 3,15E+09 |
| 3,33E+06 | 3,45E+06 | 3,57E+06 | 3,69E+06 | 3,80E+06 | 3,92E+06 | 4,04E+06 | 4,16E+06 | 4,27E+06 | 4,39E+06 |
| 1,44E+08 | 1,49E+08 | 1,55E+08 | 1,60E+08 | 1,65E+08 | 1,70E+08 | 1,75E+08 | 1,80E+08 | 1,85E+08 | 1,90E+08 |
| 2,54E+07 | 2,63E+07 | 2,72E+07 | 2,81E+07 | 2,89E+07 | 2,98E+07 | 3,07E+07 | 3,16E+07 | 3,25E+07 | 3,34E+07 |
| 4,66E+10 | 4,82E+10 | 4,99E+10 | 5,15E+10 | 5,32E+10 | 5,48E+10 | 5,65E+10 | 5,81E+10 | 5,97E+10 | 6,14E+10 |
| 5,98E+09 | 6,19E+09 | 6,40E+09 | 6,61E+09 | 6,82E+09 | 7,03E+09 | 7,24E+09 | 7,45E+09 | 7,66E+09 | 7,87E+09 |
| 1,91E+06 | 1,98E+06 | 2,04E+06 | 2,11E+06 | 2,18E+06 | 2,25E+06 | 2,31E+06 | 2,38E+06 | 2,45E+06 | 2,51E+06 |
| 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| 1,40E+06 | 1,45E+06 | 1,50E+06 | 1,55E+06 | 1,60E+06 | 1,65E+06 | 1,70E+06 | 1,75E+06 | 1,80E+06 | 1,85E+06 |
| 1,46E+08 | 1,51E+08 | 1,56E+08 | 1,61E+08 | 1,66E+08 | 1,71E+08 | 1,76E+08 | 1,82E+08 | 1,87E+08 | 1,92E+08 |
| 5,05E+07 | 5,23E+07 | 5,41E+07 | 5,59E+07 | 5,76E+07 | 5,94E+07 | 6,12E+07 | 6,30E+07 | 6,48E+07 | 6,65E+07 |





Riesgo de escasez de materiales en módulos fotovoltaicos –Demanda/Producción–.

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cu | 1,50% | 1,61% | 1,60% | 1,60% | 1,60% | 1,60% | 1,60% | 1,60% | 1,61% | 1,61% | 1,62% | 1,63% |
| Sn | 18,84% | 20,70% | 21,06% | 21,45% | 21,87% | 22,30% | 22,76% | 23,24% | 23,76% | 24,33% | 24,84% | 25,44% |
| Pb | 0,22% | 0,24% | 0,24% | 0,25% | 0,25% | 0,26% | 0,26% | 0,27% | 0,27% | 0,28% | 0,28% | 0,29% |
| Ag | 45,62% | 49,51% | 49,79% | 50,13% | 50,50% | 50,90% | 51,36% | 51,85% | 52,40% | 53,05% | 53,56% | 54,25% |
| Mg | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% |
| Mo | 0,27% | 0,29% | 0,28% | 0,28% | 0,28% | 0,28% | 0,28% | 0,27% | 0,27% | 0,27% | 0,27% | 0,27% |
| Zn | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Cd | 3,36% | 3,70% | 3,77% | 3,84% | 3,93% | 4,02% | 4,11% | 4,21% | 4,33% | 4,45% | 4,57% | 4,70% |
| Te | 509,96% | 550,26% | 550,07% | 550,32% | 550,73% | 551,37% | 552,41% | 553,49% | 555,11% | 557,48% | 558,23% | 560,52% |
| In | 46,79% | 50,65% | 51,12% | 51,94% | 53,12% | 54,68% | 56,67% | 59,10% | 62,07% | 65,68% | 69,72% | 74,66% |
| Ni | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% |
| Ge | 36,18% | 38,62% | 38,20% | 37,83% | 37,47% | 37,14% | 36,84% | 36,55% | 36,30% | 36,11% | 35,82% | 35,64% |
| Ga | 5,05% | 5,13% | 4,95% | 4,89% | 4,95% | 5,13% | 5,45% | 5,93% | 6,60% | 7,54% | 8,80% | 10,54% |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1,64% | 1,66% | 1,67% | 1,69% | 1,72% | 1,81% | 1,85% | 2,03% | 2,27% | 2,32% | 2,47% | 2,69% | 2,93% | 3,64% |
| 26,06% | 26,83% | 27,55% | 28,30% | 29,33% | 31,28% | 32,53% | 36,12% | 41,13% | 42,60% | 46,04% | 50,81% | 56,01% | 70,64% |
| 0,30% | 0,30% | 0,31% | 0,32% | 0,33% | 0,35% | 0,37% | 0,41% | 0,47% | 0,48% | 0,52% | 0,58% | 0,64% | 0,81% |
| 54,97% | 55,97% | 56,84% | 57,75% | 59,22% | 62,49% | 64,31% | 70,65% | 79,63% | 81,62% | 87,31% | 95,38% | 104,08% | 129,96% |
| 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,04% | 0,04% |
| 0,27% | 0,27% | 0,27% | 0,27% | 0,28% | 0,29% | 0,29% | 0,32% | 0,35% | 0,36% | 0,38% | 0,41% | 0,44% | 0,54% |
| 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% |
| 4,85% | 5,02% | 5,19% | 5,37% | 5,61% | 6,03% | 6,33% | 7,10% | 8,16% | 8,54% | 9,33% | 10,41% | 11,61% | 14,83% |





| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 562,96% | 568,02% | 571,44% | 575,00% | 583,72% | 609,61% | 620,77% | 674,63% | 751,99% | 762,03% | 805,68% | 869,61% | 937,33% | 1155,83% |
| 80,47% | 87,66% | 95,80% | 105,36% | 117,61% | 135,89% | 154,04% | 187,49% | 235,50% | 270,56% | 326,30% | 404,20% | 503,09% | 720,72% |
| 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,03% | 0,03% | 0,03% | 0,04% |
| 35,47% | 35,47% | 35,37% | 35,28% | 35,51% | 36,77% | 37,14% | 40,03% | 44,26% | 44,50% | 46,69% | 50,01% | 53,51% | 65,50% |
| 12,92% | 16,30% | 20,98% | 27,67% | 37,68% | 54,05% | 77,41% | 121,12% | 199,03% | 304,41% | 497,35% | 849,30% | 1482,85% | 3032,48% |

| 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 3,85% | 3,92% | 3,99% | 4,07% | 4,16% | 4,25% | 4,35% | 4,45% | 4,56% |
| 75,58% | 77,92% | 80,39% | 82,98% | 85,70% | 88,58% | 91,58% | 94,77% | 98,17% |
| 0,87% | 0,90% | 0,93% | 0,96% | 1,00% | 1,03% | 1,07% | 1,11% | 1,16% |
| 137,67% | 140,54% | 143,58% | 146,77% | 150,13% | 153,70% | 157,42% | 161,37% | 165,61% |
| 0,05% | 0,05% | 0,05% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% |
| 0,57% | 0,57% | 0,58% | 0,59% | 0,60% | 0,60% | 0,61% | 0,62% | 0,63% |
| 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,01% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% | 0,02% |
| 16,07% | 16,78% | 17,55% | 18,38% | 19,26% | 20,21% | 21,22% | 22,31% | 23,50% |
| 1208,77% | 1217,81% | 1227,59% | 1237,82% | 1248,57% | 1260,07% | 1271,92% | 1284,69% | 1298,64% |
| 881,04% | 1043,91% | 1245,15% | 1494,73% | 1805,98% | 2196,52% | 2688,41% | 3312,71% | 4110,33% |
| 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% | 0,04% |
| 68,01% | 68,04% | 68,12% | 68,22% | 68,36% | 68,54% | 68,75% | 69,01% | 69,34% |
| 5384,91% | 9431,39% | 16921,61% | 31093,52% | 58516,92% | 112809,82% | 222703,51% | 450414,02% | 933428,56% |



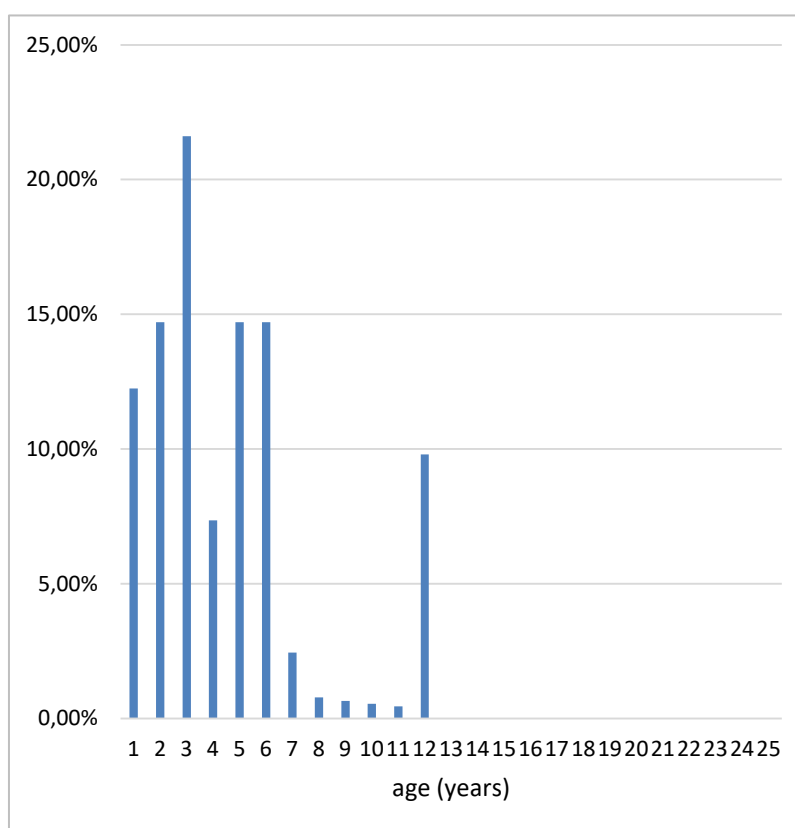


Anexo IV: Energía Solar Termoeléctrica



Edad de las plantas solares termoelectricas

| años | % del total |
|---------|-------------|
| 1 año | 12,25% |
| 2 años | 14,70% |
| 3 años | 21,61% |
| 4 años | 7,35% |
| 5 años | 14,70% |
| 6 años | 14,70% |
| 7 años | 2,45% |
| 8 años | 0,78% |
| 9 años | 0,65% |
| 10 años | 0,54% |
| 11 años | 0,45% |
| 12 años | 9,80% |
| 13 años | 0,00% |
| 14 años | 0,00% |
| 15 años | 0,00% |
| 16 años | 0,00% |
| 17 años | 0,00% |
| 18 años | 0,00% |
| 19 años | 0,00% |
| 20 años | 0,00% |
| 21 años | 0,00% |
| 22 años | 0,00% |
| 23 años | 0,00% |
| 24 años | 0,00% |
| 25 años | 0,00% |





Evolución de la potencia de las plantas solares termoelectricas [GW]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 |
|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| new installed power (GW) ON Trough | 2,54 | 4,58 | 5,08 | 6,35 | 6,86 | 7,03 | 7,82 | 8,63 | 9,43 | 10,20 | 10,96 | 11,70 | 12,41 |
| new installed power (GW) Tower | 1,69 | 3,05 | 3,39 | 4,24 | 4,58 | 4,68 | 5,21 | 5,76 | 6,29 | 6,80 | 7,31 | 7,80 | 8,28 |
| repowering Trough (GW) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| repowering Tower(GW) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| total installed power Trough (GW) | 2,54 | 4,58 | 5,08 | 6,35 | 6,86 | 7,03 | 7,82 | 8,63 | 9,43 | 10,20 | 10,96 | 11,70 | 12,41 |
| total installed power Tower (GW) | 1,69 | 3,05 | 3,39 | 4,24 | 4,58 | 4,68 | 5,21 | 5,76 | 6,29 | 6,80 | 7,31 | 7,80 | 8,28 |
| cumulative Trough power (GW) | 4,99 | 9,56 | 14,65 | 21,00 | 27,86 | 34,89 | 42,71 | 51,34 | 60,77 | 70,97 | 81,94 | 93,63 | 106,05 |
| cumulative Tower power (GW) | 3,32 | 6,38 | 9,76 | 14,00 | 18,58 | 23,26 | 28,47 | 34,23 | 40,51 | 47,32 | 54,62 | 62,42 | 70,70 |

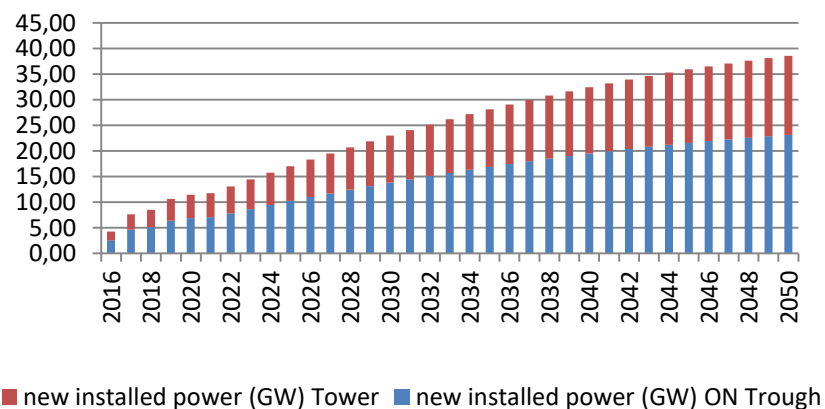
| 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 | 2042 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 13,11 | 13,79 | 14,44 | 15,08 | 15,70 | 16,29 | 16,87 | 17,43 | 17,96 | 18,48 | 18,98 | 19,45 | 19,91 | 20,35 |
| 8,74 | 9,19 | 9,63 | 10,05 | 10,46 | 10,86 | 11,25 | 11,62 | 11,97 | 12,32 | 12,65 | 12,97 | 13,27 | 13,56 |
| 0,24 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,06 | 0,36 | 0,36 | 0,18 | 0,53 | 0,36 | 0,30 | 2,54 | 4,58 |
| 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,24 | 0,24 | 0,12 | 0,35 | 0,24 | 0,20 | 1,69 | 3,05 |
| 13,35 | 13,80 | 14,46 | 15,09 | 15,71 | 16,35 | 17,23 | 17,79 | 18,14 | 19,01 | 19,34 | 19,75 | 22,45 | 24,92 |
| 8,90 | 9,20 | 9,64 | 10,06 | 10,48 | 10,90 | 11,49 | 11,86 | 12,09 | 12,67 | 12,89 | 13,17 | 14,96 | 16,62 |
| 119,16 | 132,94 | 147,38 | 162,46 | 178,16 | 194,45 | 211,32 | 228,74 | 246,71 | 265,18 | 284,16 | 303,61 | 323,52 | 343,87 |
| 79,44 | 88,63 | 98,26 | 108,31 | 118,77 | 129,63 | 140,88 | 152,50 | 164,47 | 176,79 | 189,44 | 202,41 | 215,68 | 229,24 |



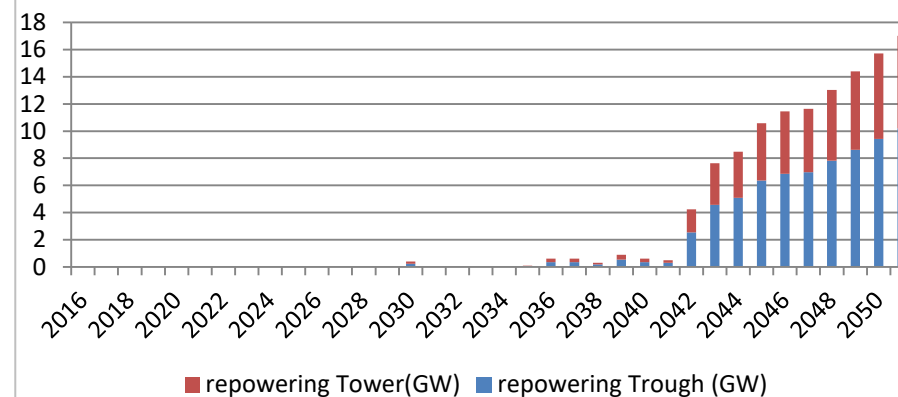


| 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20,76 | 21,16 | 21,54 | 21,89 | 22,23 | 22,55 | 22,85 | 23,12 |
| 13,84 | 14,11 | 14,36 | 14,60 | 14,82 | 15,03 | 15,23 | 15,42 |
| 5,08 | 6,35 | 6,86 | 6,98 | 7,82 | 8,63 | 9,43 | 10,20 |
| 3,39 | 4,24 | 4,58 | 4,65 | 5,21 | 5,76 | 6,29 | 6,80 |
| 25,85 | 27,51 | 28,40 | 28,87 | 30,05 | 31,18 | 32,27 | 33,33 |
| 17,23 | 18,34 | 18,93 | 19,25 | 20,03 | 20,79 | 21,52 | 22,22 |
| 364,63 | 385,79 | 407,33 | 429,22 | 451,45 | 474,00 | 496,85 | 519,97 |
| 243,09 | 257,19 | 271,55 | 286,15 | 300,97 | 316,00 | 331,23 | 346,65 |

Nueva potencia instalada

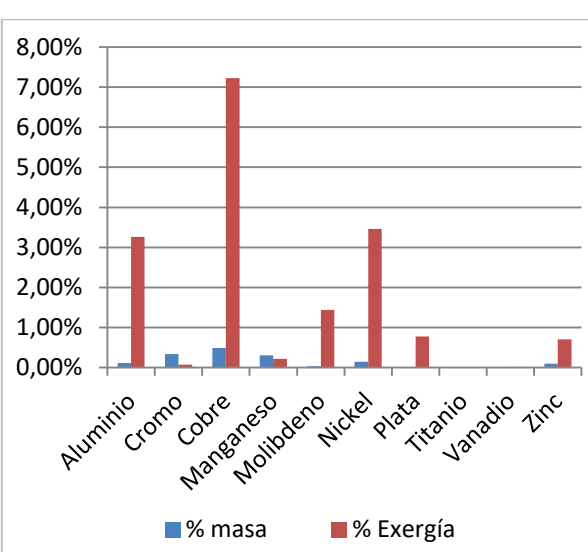


Repowering



Comparación másica de las plantas solares termoelectricas

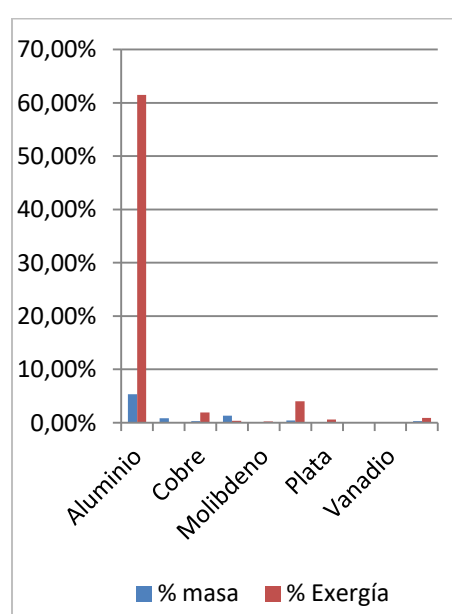
| | Tn/GW | | % masa | |
|-----------|-------|-------|--------|-------|
| | PT | CRS | PT | CRS |
| Aluminio | 740 | 23000 | 0,11% | 5,35% |
| Cromo | 2200 | 3700 | 0,33% | 0,86% |
| Cobre | 3200 | 1400 | 0,48% | 0,33% |
| Manganeso | 2000 | 5700 | 0,30% | 1,33% |
| Molibdeno | 200 | 56 | 0,03% | 0,01% |
| Nickel | 940 | 1800 | 0,14% | 0,42% |
| Plata | 13 | 16 | 0,00% | 0,00% |
| Titanio | 25 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| Vanadio | 1,9 | 1,7 | 0,00% | 0,00% |
| Zinc | 650 | 1400 | 0,10% | 0,33% |



| | Tn/GW | | % masa | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| | PT | CRS | PT | CRS |
| Hierro | 650000 | 393000 | 98,49% | 91,38% |

Comparación exergetica de las plantas solares termoelectricas

| | Exergía [GJ/GW] | | % Exergía | |
|-----------|-----------------|----------|-----------|--------|
| | Trough | Tower | Trough | Tower |
| Aluminio | 471927,6 | 14668020 | 3,26% | 61,47% |
| Cromo | 10208 | 17168 | 0,07% | 0,07% |
| Cobre | 1046400 | 457800 | 7,23% | 1,92% |
| Manganeso | 31680 | 90288 | 0,22% | 0,38% |
| Molibdeno | 208782 | 58458,96 | 1,44% | 0,24% |
| Nickel | 501578,36 | 960469,2 | 3,46% | 4,02% |
| Plata | 112481,2 | 138438,4 | 0,78% | 0,58% |
| Titanio | 384,5 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| Vanadio | 2262,9 | 2024,7 | 0,02% | 0,01% |
| Zinc | 101744,5 | 219142 | 0,70% | 0,92% |



| | GJ/GW | | % Exergía | |
|--------|----------|---------|-----------|---------|
| | PT | CRS | PT | CRS |
| Hierro | 11992500 | 7250850 | 82,82 % | 30,39 % |

| Elemento | PT | CRS |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| Ag (GJ/GW) | 112,481 | 138,438 |
| Al (GJ/GW) | 472,046 | 14,671,700 |
| Cr (GJ/GW) | 10,208 | 17,168 |
| Cu (GJ/GW) | 1,046,400 | 457,800 |
| Fe (GJ/GW) | 11,992,500 | 7,250,850 |
| Mn (GJ/GW) | 31,680 | 90,288 |
| Mo (GJ/GW) | 208,782 | 58,459 |
| Ni (GJ/GW) | 501,575 | 960,462 |
| Ti (GJ/GW) | 385 | 0 |
| V (GJ/GW) | 2,382 | 2,382 |
| Zn (GJ/GW) | 101,745 | 249,142 |
| Total (GJ/MW) | 14,480,183 | 23,866,689 |

Estos valores están hallados con la cantidad de materiales en Tn de cada una de las tecnologías multiplicados en cada caso por el coste de exergético de cada material, teniendo como total el coste en exergía de cada una de las tecnologías estudiadas.



Stock in use en plantas solares termoelectricas

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Al | 5,03E+07 | 9,64E+07 | 1,48E+08 | 2,12E+08 | 2,81E+08 | 3,52E+08 | 4,31E+08 | 5,18E+08 | 6,13E+08 | 7,16E+08 | 8,26E+08 | 9,44E+08 |
| Cr | 1,06E+05 | 2,03E+05 | 3,10E+05 | 4,45E+05 | 5,90E+05 | 7,39E+05 | 9,05E+05 | 1,09E+06 | 1,29E+06 | 1,50E+06 | 1,74E+06 | 1,98E+06 |
| Cu | 2,14E+06 | 3,86E+06 | 4,29E+06 | 5,36E+06 | 5,79E+06 | 5,89E+06 | 6,60E+06 | 7,29E+06 | 7,96E+06 | 8,61E+06 | 9,25E+06 | 9,87E+06 |
| Fe | 1,26E+08 | 2,41E+08 | 3,69E+08 | 5,29E+08 | 7,02E+08 | 8,79E+08 | 1,08E+09 | 1,29E+09 | 1,53E+09 | 1,79E+09 | 2,06E+09 | 2,36E+09 |
| Mn | 4,52E+05 | 8,68E+05 | 1,33E+06 | 1,91E+06 | 2,53E+06 | 3,17E+06 | 3,87E+06 | 4,66E+06 | 5,51E+06 | 6,44E+06 | 7,43E+06 | 8,49E+06 |
| Mo | 1,07E+06 | 2,06E+06 | 3,16E+06 | 4,53E+06 | 6,00E+06 | 7,52E+06 | 9,20E+06 | 1,11E+07 | 1,31E+07 | 1,53E+07 | 1,77E+07 | 2,02E+07 |
| Ni | 5,59E+06 | 1,07E+07 | 1,64E+07 | 2,35E+07 | 3,12E+07 | 3,91E+07 | 4,79E+07 | 5,75E+07 | 6,81E+07 | 7,95E+07 | 9,18E+07 | 1,05E+08 |
| Ag | 8,70E+05 | 1,67E+06 | 2,56E+06 | 3,66E+06 | 4,86E+06 | 6,09E+06 | 7,45E+06 | 8,96E+06 | 1,06E+07 | 1,24E+07 | 1,43E+07 | 1,63E+07 |
| V | 8,12E+03 | 1,47E+04 | 1,63E+04 | 2,03E+04 | 2,20E+04 | 2,23E+04 | 2,50E+04 | 2,76E+04 | 3,02E+04 | 3,27E+04 | 3,51E+04 | 3,74E+04 |
| Tn | 7,73E+02 | 1,48E+03 | 2,27E+03 | 3,26E+03 | 4,32E+03 | 5,41E+03 | 6,62E+03 | 7,96E+03 | 9,42E+03 | 1,10E+04 | 1,27E+04 | 1,45E+04 |
| Zn | 1,22E+06 | 2,35E+06 | 3,60E+06 | 5,15E+06 | 6,84E+06 | 8,56E+06 | 1,05E+07 | 1,26E+07 | 1,49E+07 | 1,74E+07 | 2,01E+07 | 2,30E+07 |

| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,07E+09 | 1,20E+09 | 1,34E+09 | 1,49E+09 | 1,80E+09 | 1,96E+09 | 1,96E+09 | 2,13E+09 | 2,31E+09 | 2,49E+09 | 2,67E+09 | 2,86E+09 | 3,06E+09 | 3,26E+09 |
| 2,25E+06 | 2,52E+06 | 2,82E+06 | 3,12E+06 | 3,77E+06 | 4,12E+06 | 4,12E+06 | 4,48E+06 | 4,85E+06 | 5,23E+06 | 5,62E+06 | 6,02E+06 | 6,43E+06 | 6,85E+06 |
| 1,05E+07 | 1,13E+07 | 1,16E+07 | 1,22E+07 | 1,33E+07 | 1,38E+07 | 1,38E+07 | 1,45E+07 | 1,50E+07 | 1,53E+07 | 1,60E+07 | 1,63E+07 | 1,67E+07 | 1,89E+07 |
| 2,67E+09 | 3,00E+09 | 3,35E+09 | 3,71E+09 | 4,49E+09 | 4,90E+09 | 4,90E+09 | 5,32E+09 | 5,76E+09 | 6,21E+09 | 6,68E+09 | 7,16E+09 | 7,65E+09 | 8,15E+09 |
| 9,62E+06 | 1,08E+07 | 1,21E+07 | 1,34E+07 | 1,62E+07 | 1,76E+07 | 1,76E+07 | 1,92E+07 | 2,07E+07 | 2,24E+07 | 2,41E+07 | 2,58E+07 | 2,75E+07 | 2,93E+07 |
| 2,29E+07 | 2,57E+07 | 2,86E+07 | 3,18E+07 | 3,84E+07 | 4,19E+07 | 4,19E+07 | 4,55E+07 | 4,93E+07 | 5,32E+07 | 5,71E+07 | 6,12E+07 | 6,54E+07 | 6,97E+07 |
| 1,19E+08 | 1,34E+08 | 1,49E+08 | 1,65E+08 | 2,00E+08 | 2,18E+08 | 2,18E+08 | 2,37E+08 | 2,56E+08 | 2,76E+08 | 2,97E+08 | 3,18E+08 | 3,40E+08 | 3,63E+08 |
| 1,85E+07 | 2,08E+07 | 2,32E+07 | 2,57E+07 | 3,11E+07 | 3,39E+07 | 3,39E+07 | 3,69E+07 | 3,99E+07 | 4,30E+07 | 4,63E+07 | 4,96E+07 | 5,30E+07 | 5,64E+07 |
| 3,97E+04 | 4,27E+04 | 4,42E+04 | 4,63E+04 | 5,03E+04 | 5,23E+04 | 5,23E+04 | 5,51E+04 | 5,69E+04 | 5,81E+04 | 6,08E+04 | 6,19E+04 | 6,32E+04 | 7,18E+04 |
| 1,64E+04 | 1,85E+04 | 2,06E+04 | 2,28E+04 | 2,76E+04 | 3,01E+04 | 3,01E+04 | 3,28E+04 | 3,55E+04 | 3,82E+04 | 4,11E+04 | 4,40E+04 | 4,71E+04 | 5,01E+04 |
| 2,60E+07 | 2,92E+07 | 3,26E+07 | 3,62E+07 | 4,37E+07 | 4,77E+07 | 4,77E+07 | 5,19E+07 | 5,61E+07 | 6,06E+07 | 6,51E+07 | 6,98E+07 | 7,45E+07 | 7,94E+07 |





| 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3,47E+09 | 3,68E+09 | 3,89E+09 | 4,11E+09 | 4,33E+09 | 4,55E+09 | 4,78E+09 | 5,01E+09 | 5,24E+09 |
| 7,29E+06 | 7,73E+06 | 8,17E+06 | 8,63E+06 | 9,09E+06 | 9,56E+06 | 1,00E+07 | 1,05E+07 | 1,10E+07 |
| 2,10E+07 | 2,18E+07 | 2,32E+07 | 2,40E+07 | 2,44E+07 | 2,54E+07 | 2,63E+07 | 2,72E+07 | 2,81E+07 |
| 8,66E+09 | 9,18E+09 | 9,71E+09 | 1,03E+10 | 1,08E+10 | 1,14E+10 | 1,19E+10 | 1,25E+10 | 1,31E+10 |
| 3,12E+07 | 3,31E+07 | 3,50E+07 | 3,69E+07 | 3,89E+07 | 4,10E+07 | 4,30E+07 | 4,51E+07 | 4,72E+07 |
| 7,41E+07 | 7,86E+07 | 8,31E+07 | 8,78E+07 | 9,25E+07 | 9,73E+07 | 1,02E+08 | 1,07E+08 | 1,12E+08 |
| 3,85E+08 | 4,09E+08 | 4,32E+08 | 4,56E+08 | 4,81E+08 | 5,06E+08 | 5,31E+08 | 5,57E+08 | 5,83E+08 |
| 6,00E+07 | 6,36E+07 | 6,73E+07 | 7,11E+07 | 7,49E+07 | 7,88E+07 | 8,27E+07 | 8,67E+07 | 9,07E+07 |
| 7,98E+04 | 8,27E+04 | 8,80E+04 | 9,09E+04 | 9,24E+04 | 9,62E+04 | 9,98E+04 | 1,03E+05 | 1,07E+05 |
| 5,33E+04 | 5,65E+04 | 5,98E+04 | 6,31E+04 | 6,65E+04 | 7,00E+04 | 7,35E+04 | 7,70E+04 | 8,06E+04 |
| 8,44E+07 | 8,95E+07 | 9,47E+07 | 1,00E+08 | 1,05E+08 | 1,11E+08 | 1,16E+08 | 1,22E+08 | 1,28E+08 |

Previsión de escasez de materiales en plantas solares termoeléctrica –Demanda / Producción–

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ag | 0,2582% | 0,4684% | 0,5232% | 0,6586% | 0,7167% | 0,7346% | 0,8296% | 0,9246% | 1,0197% | 1,1150% | 1,2107% | 1,3069% |
| Al | 0,0108% | 0,0191% | 0,0208% | 0,0254% | 0,0269% | 0,0268% | 0,0295% | 0,0320% | 0,0343% | 0,0365% | 0,0386% | 0,0406% |
| Cr | 0,0500% | 0,0906% | 0,1013% | 0,1277% | 0,1393% | 0,1433% | 0,1625% | 0,1821% | 0,2021% | 0,2225% | 0,2436% | 0,2653% |
| Cu | 0,0471% | 0,0846% | 0,0936% | 0,1168% | 0,1260% | 0,1281% | 0,1435% | 0,1587% | 0,1737% | 0,1885% | 0,2033% | 0,2179% |
| Fe | 0,0561% | 0,1005% | 0,1109% | 0,1380% | 0,1485% | 0,1507% | 0,1684% | 0,1859% | 0,2032% | 0,2202% | 0,2372% | 0,2541% |
| Mn | 0,0814% | 0,1472% | 0,1638% | 0,2054% | 0,2227% | 0,2275% | 0,2560% | 0,2842% | 0,3123% | 0,3403% | 0,3681% | 0,3959% |
| Mo | 0,1776% | 0,3167% | 0,3479% | 0,4308% | 0,4613% | 0,4654% | 0,5174% | 0,5678% | 0,6167% | 0,6644% | 0,7109% | 0,7564% |
| Ni | 1,2715% | 2,2598% | 2,4735% | 3,0514% | 3,2546% | 3,2701% | 3,6201% | 3,9550% | 4,2760% | 4,5840% | 4,8799% | 5,1644% |
| V | 0,0104% | 0,0183% | 0,0198% | 0,0241% | 0,0254% | 0,0252% | 0,0275% | 0,0297% | 0,0317% | 0,0335% | 0,0352% | 0,0368% |
| Zn | 0,0337% | 0,0613% | 0,0688% | 0,0870% | 0,0952% | 0,0982% | 0,1116% | 0,1252% | 0,1391% | 0,1533% | 0,1679% | 0,1829% |
| Tn | 0,0010% | 0,0019% | 0,0020% | 0,0025% | 0,0027% | 0,0027% | 0,0030% | 0,0033% | 0,0035% | 0,0038% | 0,0040% | 0,0043% |





| 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,4037% | 1,5288% | 1,6010% | 1,7007% | 1,8756% | 1,9811% | 2,0121% | 2,1545% | 2,2616% | 2,3473% | 2,5037% | 2,5944% | 2,7014% | 3,1309% |
| 0,0424% | 0,0450% | 0,0459% | 0,0474% | 0,0509% | 0,0524% | 0,0518% | 0,0540% | 0,0553% | 0,0559% | 0,0580% | 0,0586% | 0,0595% | 0,0671% |
| 0,2878% | 0,3169% | 0,3358% | 0,3613% | 0,4039% | 0,4328% | 0,4465% | 0,4860% | 0,5191% | 0,5487% | 0,5966% | 0,6308% | 0,6707% | 0,7946% |
| 0,2326% | 0,2517% | 0,2620% | 0,2767% | 0,3035% | 0,3189% | 0,3222% | 0,3434% | 0,3589% | 0,3709% | 0,3940% | 0,4068% | 0,4221% | 0,4876% |
| 0,2709% | 0,2931% | 0,3050% | 0,3221% | 0,3534% | 0,3715% | 0,3757% | 0,4007% | 0,4192% | 0,4338% | 0,4616% | 0,4774% | 0,4963% | 0,5747% |
| 0,4236% | 0,4596% | 0,4796% | 0,5075% | 0,5576% | 0,5867% | 0,5936% | 0,6332% | 0,6621% | 0,6846% | 0,7274% | 0,7508% | 0,7787% | 0,8990% |
| 0,8011% | 0,8604% | 0,8889% | 0,9317% | 1,0141% | 1,0575% | 1,0606% | 1,1217% | 1,1633% | 1,1932% | 1,2581% | 1,2890% | 1,3274% | 1,5219% |
| 5,4383% | 5,8068% | 5,9620% | 6,2090% | 6,7128% | 6,9507% | 6,9201% | 7,2628% | 7,4722% | 7,6001% | 7,9438% | 8,0652% | 8,2271% | 9,3402% |
| 0,0382% | 0,0402% | 0,0407% | 0,0418% | 0,0446% | 0,0456% | 0,0447% | 0,0463% | 0,0470% | 0,0471% | 0,0486% | 0,0487% | 0,0490% | 0,0548% |
| 0,1983% | 0,2181% | 0,2308% | 0,2479% | 0,2766% | 0,2957% | 0,3042% | 0,3300% | 0,3511% | 0,3696% | 0,4001% | 0,4209% | 0,4452% | 0,5244% |
| 0,0045% | 0,0048% | 0,0049% | 0,0051% | 0,0055% | 0,0057% | 0,0057% | 0,0060% | 0,0061% | 0,0062% | 0,0065% | 0,0066% | 0,0067% | 0,0076% |

| 2042 | 2043 | 2044 | 2045 | 2046 | 2047 | 2048 | 2049 | 2050 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3,5474% | 3,7560% | 4,0851% | 4,3106% | 4,4827% | 4,7742% | 5,0734% | 5,3808% | 5,6967% |
| 0,0741% | 0,0765% | 0,0811% | 0,0834% | 0,0845% | 0,0878% | 0,0909% | 0,0940% | 0,0971% |
| 0,9212% | 0,9989% | 1,1137% | 1,2057% | 1,2877% | 1,4097% | 1,5413% | 1,6835% | 1,8372% |
| 0,5509% | 0,5817% | 0,6311% | 0,6645% | 0,6897% | 0,7334% | 0,7782% | 0,8244% | 0,8720% |
| 0,6508% | 0,6891% | 0,7498% | 0,7919% | 0,8247% | 0,8800% | 0,9374% | 0,9970% | 1,0591% |
| 1,0146% | 1,0700% | 1,1592% | 1,2184% | 1,2620% | 1,3387% | 1,4169% | 1,4967% | 1,5781% |
| 1,7063% | 1,7881% | 1,9254% | 2,0120% | 2,0725% | 2,1869% | 2,3032% | 2,4215% | 2,5420% |
| 10,3651% | 10,7468% | 11,4442% | 11,8216% | 12,0322% | 12,5399% | 13,0375% | 13,5252% | 14,0034% |
| 0,0600% | 0,0614% | 0,0645% | 0,0658% | 0,0661% | 0,0680% | 0,0698% | 0,0715% | 0,0730% |
| 0,6042% | 0,6509% | 0,7206% | 0,7744% | 0,8206% | 0,8910% | 0,9658% | 1,0454% | 1,1301% |
| 0,0085% | 0,0088% | 0,0093% | 0,0096% | 0,0098% | 0,0102% | 0,0106% | 0,0110% | 0,0114% |

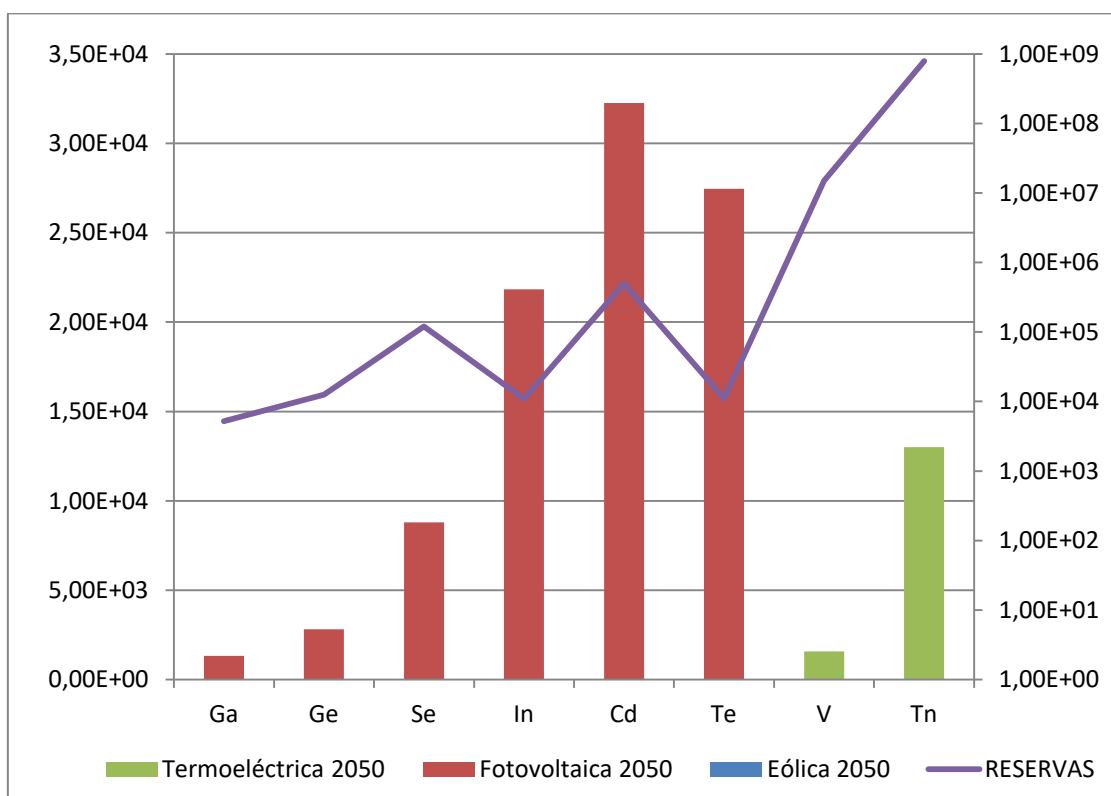
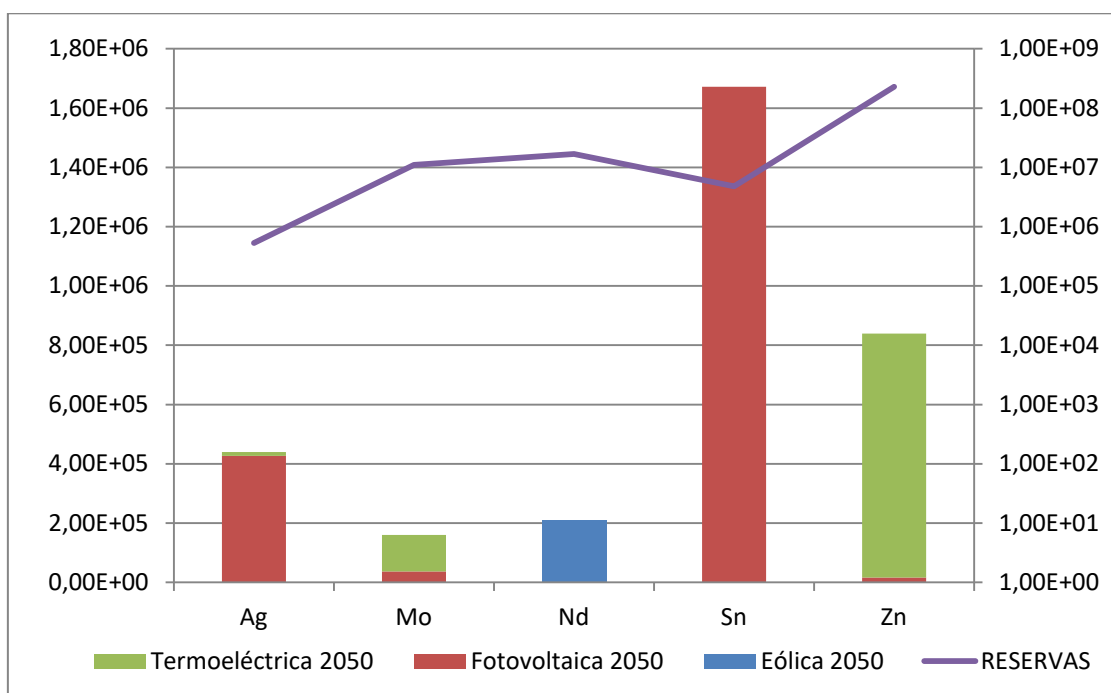


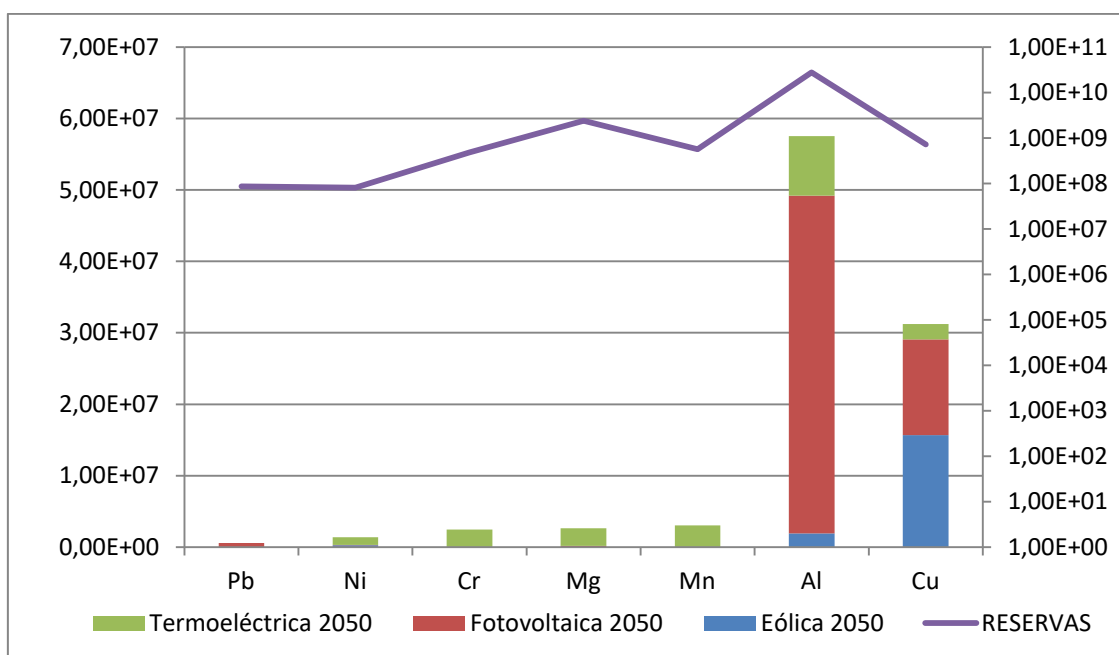


Anexo V: Conclusiones



Aportación de material por tecnología y reservas





Resumen de las 3 tecnologías con recursos y reservas

| Tn. | Reservas | Recursos | Producción | Demanda | Stock in use |
|-----------|----------|----------|------------|----------|--------------|
| Ag | 5,30E+05 | 1,31E+06 | 9,69E+03 | 1,66E+04 | 4,40E+05 |
| Al | 2,80E+10 | 7,50E+10 | 3,53E+08 | 2,03E+06 | 5,75E+07 |
| Cd | 5,00E+05 | 6,00E+06 | 5,52E+03 | 1,30E+03 | 2,43E+06 |
| Cr | 4,80E+08 | 1,20E+10 | 6,77E+06 | 1,24E+05 | 3,23E+04 |
| Cu | 7,20E+08 | 2,10E+09 | 1,11E+07 | 1,22E+06 | 3,12E+07 |
| Ga | 5,20E+03 | 1,00E+06 | 1,00E+00 | 5,33E+01 | 1,32E+03 |
| Ge | 1,25E+04 | 4,40E+05 | 1,41E+02 | 9,77E+01 | 2,80E+03 |
| In | 1,10E+04 | 4,71E+04 | 1,78E+01 | 7,32E+02 | 2,18E+04 |
| Mg | 2,40E+09 | 1,20E+10 | 1,43E+07 | 1,12E+05 | 2,63E+06 |
| Mn | 5,70E+08 | 1,03E+09 | 7,72E+06 | 1,22E+05 | 3,02E+06 |
| Mo | 1,10E+07 | 1,40E+07 | 2,08E+05 | 6,62E+03 | 1,60E+05 |
| Nd | 1,67E+07 | 9,96E+07 | 7,35E+04 | 9,61E+03 | 2,08E+05 |
| Ni | 8,10E+07 | 1,30E+08 | 3,62E+05 | 6,01E+04 | 1,39E+06 |
| Pb | 8,70E+07 | 2,00E+09 | 1,30E+06 | 1,51E+04 | 5,74E+05 |
| Sn | 4,80E+06 | 7,62E+07 | 7,13E+04 | 7,00E+04 | 1,67E+06 |
| Te | 1,11E+04 | 2,50E+04 | 1,12E+02 | 1,46E+03 | 2,75E+04 |
| Ti | 7,94E+08 | 2,00E+09 | 3,52E+06 | 4,00E+02 | 1,30E+04 |
| V | 1,50E+07 | 6,30E+07 | 1,38E+05 | 1,01E+02 | 1,58E+03 |
| Zn | 2,30E+08 | 1,90E+09 | 3,62E+06 | 4,16E+04 | 8,40E+05 |

