



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Requerimientos materiales y EROI de las tecnologías fotovoltaicas en la transición energética

Autor: D. Daniel Pulido Sánchez
Tutor: Luis Javier Miguel González
Cotutor: Íñigo Capellán Pérez

Valladolid, Mayo, 2022



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Requerimientos materiales y EROI de las tecnologías
fotovoltaicas en la transición energética**

Autor: D. Daniel Pulido Sánchez
Tutor: Luis Javier Miguel González
Cotutor: Íñigo Capellán Pérez

Valladolid, Mayo, 2022



Resumen

En la actualidad, estamos asistiendo a un cambio tecnológico en la obtención de energía eléctrica a medida que disminuyen las reservas de hidrocarburos y aumenta la conciencia medioambiental de la sociedad. Se espera que las tecnologías renovables sustituyan a las basadas en los combustibles fósiles, ya que se han concebido inicialmente como más respetuosas con el medio ambiente y eficientes energéticamente. Sin embargo, han surgido diversos problemas de carácter político [1], económico [2], de variabilidad y estacionalidad de la producción [3], de ocupación de tierras [1], [4], y, en el caso en el que se centra este trabajo, ha surgido el problema de la futura disponibilidad de los materiales necesarios para este cambio [5]–[7].

Para estimar qué materiales relacionados con la transición en el sector energético, y en específico con la tecnología solar fotovoltaica, podrían ser más críticos en el futuro a nivel global, y tras una amplia revisión bibliográfica, se realizará un análisis del EROI de esta tecnología, tanto de forma estática, como de forma dinámica (empleando el modelo de simulación de dinámica de sistemas MEDEAS-W), obteniendo posteriormente una estimación de su cuota de mercado y, por último, sus demandas minerales respecto a las reservas y recursos, buscando proponer posteriormente medidas alternativas para tratar de evitar el agotamiento mineral.

Palabras clave: -Energía solar fotovoltaica -Recursos -Minerales -Tasa de retorno energético -Desarrollo sostenible

Abstract

Today, we are witnessing the beginning of a technological shift in electricity generation as hydrocarbon reserves diminish and society's environmental awareness increases. Renewable technologies are expected to replace those based on fossil fuels, as they were initially conceived as more environmentally friendly and energy efficient. However, various problems have arisen, including political [1], economic [2], production variability and seasonality [3], land occupation [1], [4], and, in the case of this paper, the problem of the future availability of the materials necessary for this change [5]–[7].

In order to estimate which materials related to the transition in the energy sector, and specifically with the solar photovoltaic technology, could be most critical in the future at a global level and after an extensive literature review, an analysis of the EROI of this technology will be carried out, both statically and dynamically (using the system dynamics simulation model MEDEAS-W), subsequently obtaining an estimate of their market share and, finally, their mineral demands relative to reserves and resources, and then seeking to propose alternative measures to try to avoid mineral depletion.

Key words: -Solar photovoltaic energy -Resources -Minerals -EROI -Sustainable development



Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial



Requerimientos materiales y EROI
de las tecnologías fotovoltaicas en la transición energética



Agradecimientos

Tras la finalización de este TFM y echando la vista atrás me es de imperiosa necesidad realizar estos agradecimientos y devolver una pequeña parte de toda la ayuda que me han prestado para llegar hasta aquí y realizar este trabajo en forma de reconocimiento.

Quiero empezar por agradecer a Luis Javier la oportunidad que me otorgo hace unos años de realizar TFG en el grupo de investigación y las oportunidades que me ha ido proporcionando hasta el día de hoy, permitiéndome finalmente hacer un gran TFM.

Debo dar las gracias también a Fernando y Carlos por su inestimable ayuda, apoyo y sobre todo paciencia durante nuestras interminables reuniones.

No me olvido ni mucho menos de la persona que más me ha transmitido conocimientos y enseñanzas en los últimos años, Íñigo. Desde que realizamos el TFG no has parado de ayudarme, de transmitirme la motivación para adquirir nuevos conocimientos y en este TFM he podido observar y ser consciente de la evolución que he llevado a cabo desde que nos conocimos. Por lo tanto, para mí este TFM es gran parte obra tuya, gracias a tu ayuda, a tus ánimos, a tu trabajo y a todo lo que me has transmitido estos años.

Quiero dar las gracias a mis padres, Sebastián y Yolanda, por permitirme llegar hasta aquí y darme todas las facilidades posibles, transmitiéndome siempre amor y cariño, pero sin olvidarse de recordarme que las cosas no llegan solas y que hay que luchar por ellas con tesón y esfuerzo.

No puedo dejar de agradecer a mi hermano, Alejandro, los buenos ratos que me hace pasar sacándome siempre una sonrisa.

Y finalmente, quiero dar las gracias a mi pareja, Celia, por siempre estar a mi lado apoyándome y dándome ánimos para seguir adelante y conseguir todo lo que me proponga.



Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial



Requerimientos materiales y EROI
de las tecnologías fotovoltaicas en la transición energética



INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto, presentación del problema	1
1.1.1 Materiales críticos en las tecnologías renovables.....	4
1.1.2 Introducción a las tasas de retorno energético (EROI de la tecnología fotovoltaica)	7
1.2 Tecnología fotovoltaica, situación actual	8
1.3 Motivación del análisis, conclusión de la introducción	9
2. METODOLOGÍA	11
2.1 Introducción de la metodología, descripción de la metodología general.....	11
2.2 Índice metodológico.....	12
2.2.1 Implementaciones de este trabajo respecto a la bibliografía existente	13
2.3 Tecnología fotovoltaica, instalaciones, perspectiva de futuro y reciclaje	14
2.3.1 Principios de funcionamiento de la tecnología fotovoltaica	14
2.3.2 Componentes de un sistema solar fotovoltaico.....	15
2.3.2.1 Regulador de carga.....	15
2.3.2.2 Inversor.....	15
2.3.2.3 Transformador.....	16
2.3.2.4 Batería	16
2.3.2.5 Disposición de los paneles solares	18
2.3.2.6 Módulo fotovoltaico.....	19
2.3.3 Célula fotovoltaica.....	20
2.3.3.1 Tipos de células	21
2.3.3.1.1 Células basadas en el silicio.....	21
2.3.3.1.2 Paneles de película delgada	22
2.3.3.1.3 Perovskitas	22
2.3.3.1.4 Células orgánicas (OPV).....	23
2.3.3.1.5 Células fotovoltaicas multiunión	23
2.3.3.1.6 Evolución temporal de las eficiencias de las células fotovoltaicas	23
2.3.4 Situación actual y perspectiva de futuro de las tecnologías fotovoltaicas en el mercado	24
2.3.5 Reciclaje de los paneles, procesos empleados y tasas de reciclado	25
2.3.5.1 Revisión bibliográfica, reciclado de los paneles, tasas de reciclado	28
2.3.6 Tipos de instalaciones fotovoltaicas.....	29



2.3.6.1	Instalación en viviendas	29
2.3.6.2	Instalación en industrias y grandes edificios no residenciales.....	29
2.3.6.3	Instalación en plantas fotovoltaicas.....	30
2.3.6.4	Instalación en otros dispositivos	31
2.4	Parámetros técnicos e intensidades materiales de la tecnología fotovoltaica	31
2.4.1	Selección de instalaciones tipo representativas previas al estudio	32
2.4.2	Revisión bibliográfica, eficiencias energéticas de los paneles	32
2.4.2.1	Selección de las eficiencias energéticas de los paneles y parámetros técnicos	33
2.4.2.2	Evolución de las eficiencias en el análisis dinámico	34
2.4.3	Revisión bibliográfica, Células c-Si.....	34
2.4.3.1	Selección de intensidades materiales, células c-Si.....	35
2.4.3.2	Evolución de las intensidades materiales de las células C-Si	36
2.4.4	Revisión bibliográfica, Células CIGS.....	37
2.4.4.1	Selección de intensidades materiales, células CIGS.....	38
2.4.4.2	Evolución de las intensidades materiales de las células CIGS	38
2.4.5	Revisión bibliográfica, Células CdTe	38
2.4.5.1	Selección de intensidades materiales, células CdTe	39
2.4.5.2	Evolución de las intensidades materiales de las células CIGS.....	40
2.4.6	Intensidades materiales de la construcción de los paneles	40
2.4.7	Intensidades materiales de la estructura de montaje de los paneles.....	41
2.4.8	Intensidades materiales de los inversores	41
2.4.9	Intensidades materiales de los transformadores.....	42
2.4.10	Intensidades materiales de las conexiones.....	42
2.4.11	Intensidades materiales totales de la tecnología fotovoltaica.....	46
2.5	Disponibilidad de minerales: Recursos, Reservas y reciclado.....	48
2.6	Tasa de retorno energético (EROI)	50
2.6.1	Intensidad energética de los minerales	52
2.7	Dinámica de sistemas.....	53
2.7.1	Diagrama causal	54
2.7.2	Diagrama de flujos o Forrester	56
2.7.3	Fases del modelado.....	57
2.7.4	Programa empleado, VenSim.....	58
2.8	MEDEAS-W	60
2.8.1	Presentación del modelo MEDEAS-W	60



2.8.2	Factores del modelo relacionados con la energía y los requerimientos materiales	62
2.8.2.1	Modelización de la demanda energética en el modelo MEDEAS-World	62
2.8.2.2	Modelización de la disponibilidad energética en MEDEAS-World.....	62
2.8.2.3	Minerales en el modelo, análisis de viabilidad material del cambio de producción energética.....	63
2.8.2.4	Infraestructuras energéticas y EROI del sistema.....	64
2.8.2.5	Modelización de la reestructuración de la producción como resultado del cambio en la demanda.....	65
2.8.3	Modificaciones del modelo MEDEAS-W llevadas a cabo en este trabajo.....	66
2.8.3.1	Submódulo de requerimientos materiales de la tecnología fotovoltaica.....	66
2.8.3.2	Submódulo de uso del espacio.....	67
2.8.3.3	Submódulo de cálculo del EROI de la tecnología fotovoltaica.....	68
2.8.3.4	Submódulo de asignación de subtecnologías de la producción fotovoltaica.	70
2.9	Escenarios empleados en las simulaciones.....	73
3.	RESULTADOS, DISCUSIÓN, LIMITACIONES Y VÍAS DE TRABAJO FUTURO	79
3.1	Análisis estático, EROI	79
3.2	Análisis dinámico.	80
3.2.1	Evolución temporal de la generación fotovoltaica.....	81
3.2.2	Emisiones de CO ₂ debidas a la producción de electricidad.....	81
3.2.3	Uso de la tierra por parte de la producción fotovoltaica	82
3.2.4	Ratio real, instalaciones de suelo vs total	84
3.2.5	Ratio de reciclado, RC.....	85
3.2.6	CF, factor de capacidad real de las instalaciones fotovoltaicas	88
3.2.7	EROI, tasas de retorno energético obtenidas	88
3.2.8	MS, indicador de escasez mineral	92
3.2.9	Asignación de las subtecnologías fotovoltaicas en el mercado	96
3.2.10	Demanda mineral respecto a las reservas y recursos de la tecnología fotovoltaica	98
3.2.10.1	Demanda mineral respecto a las reservas	98
3.2.10.2	Demanda mineral respecto a los recursos.....	101
3.2.10.3	Discusión general y comparación con la demanda mineral obtenida por otros autores	104
3.2.11	Análisis de sensibilidad, velocidad de crecimiento de la potencia de generación fotovoltaica.....	105
3.3	Limitaciones y vías de trabajo futuro	107



4. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	109
4.1 Capacidad de producción de energía eléctrica fotovoltaica	109
4.2 Emisiones de CO₂, consecuencias de la producción de energía eléctrica mediante la fotovoltaica.....	109
4.3 Uso de la tierra por parte de las instalaciones fotovoltaicas.....	109
4.4 Ratios de reciclado	110
4.5 Factor de capacidad	111
4.6 Tasa de retorno energético.....	111
4.7 Cuota de mercado de las subtecnologías fotovoltaicas.....	112
4.8 Subtecnologías fotovoltaicas, Perspectivas de futuro.....	112
4.9 Requerimientos materiales de la tecnología fotovoltaica	113
4.10 Problemas principales de la generación eléctrica basada en la fuente de energía fotovoltaica y posibles soluciones o alternativas.....	113
5. BIBLIOGRAFÍA	117



Índice de Imágenes

Imagen 1: Emisiones de GHG a lo largo del tiempo	1
Imagen 2: Evolución temporal de la emisión de CO ₂ de la generación de electricidad y calor debido a la quema de combustibles (% del total de la quema de combustibles)	2
Imagen 3: Share (%) de la generación global de electricidad por fuente de energía	3
Imagen 4: Evolución de la capacidad instalada de solar fotovoltaica en el mundo (MW)	8
Imagen 5: Conexiones de un regulador en una instalación fotovoltaica	15
Imagen 6: Conexiones de un inversor en una instalación fotovoltaica	15
Imagen 7: Transformador de una instalación fotovoltaica	16
Imagen 8: Elementos de una batería de plomo-ácido	17
Imagen 9: Paneles fotovoltaicos sustentado por seguidor de un eje	18
Imagen 10: Paneles fotovoltaicos sustentados por un seguidor de dos ejes	19
Imagen 11: Elementos de un módulo fotovoltaico	19
Imagen 12: Celda fotovoltaica	20
Imagen 13: Curva característica de un panel solar fotovoltaico	21
Imagen 14: Evolución temporal de las eficiencias de los diferentes tipos de células fotovoltaicas	24
Imagen 15: Evolución de la producción según el tipo de panel fotovoltaico	24
Imagen 16: Evolución de la producción según el tipo de panel fotovoltaico de película fina	25
Imagen 17: Elementos de una instalación fotovoltaica en una vivienda unifamiliar	29
Imagen 18: Instalación fotovoltaica en nave industrial	29
Imagen 19: Instalación fotovoltaica de La Mula (494 MW)	30
Imagen 20: Huerto solar (<1MW)	31
Imagen 21: Panel solar en el techo de un TOYOTA prius	31
Imagen 22: Eficiencias de los diferentes tipos de paneles aplicadas por varios autores	33
Imagen 23: Mejoras en las eficiencias de los diferentes tipos de paneles respecto a las enunciadas por varios autores	34
Imagen 24: Elementos de los paneles c-Si enunciados por diferentes autores	35
Imagen 25: Evolución de las intensidades minerales de Si y de Sn estimadas	36
Imagen 26: Evolución estimada por la ITRPV de la demanda de plata por parte de los paneles de silicio	36
Imagen 27: Elementos de los paneles CIGS enunciados por diferentes autores	37
Imagen 28: Elementos de los paneles CdTe enunciados por diferentes autores	39
Imagen 29: Esquema básico de las interconexiones de una planta fotovoltaica	43
Imagen 30: Diferencias entre recursos y reservas	48
Imagen 31: Impresión humana de los sistemas	54
Imagen 32: Realidad de un sistema	54
Imagen 33: Relación positiva	55
Imagen 34: Relación negativa	55
Imagen 35: Ejemplo de sistema con bucles	55
Imagen 36: Comportamiento del bucle positivo respecto del tiempo	55



Imagen 37: Comportamiento del bucle negativo respecto del tiempo 56

Imagen 38: Elementos de los diagramas de flujos..... 56

Imagen 39: Interfaz de usuario del programa VenSim 59

Imagen 40: Interrelación de los módulos de MEDEAS..... 61

Imagen 41: submódulo de requerimientos minerales para las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM..... 66

Imagen 42: submódulo de requerimientos minerales para las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM, requerimientos finales por MW de instalación 67

Imagen 43: submódulo de uso del espacio para las instalaciones fotovoltaicas modificado en este TFM, cálculo de la densidad de potencia. 67

Imagen 44: submódulo de cálculo del EROI de las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM, obtención de la energía embebida total..... 68

Imagen 45: submódulo de cálculo del EROI de las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM, obtención del EROI por tipo de subtecnología 69

Imagen 46: submódulo de cálculo del EROI de las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM, obtención del EROI global 70

Imagen 47: Submódulo de asignación de subtecnologías de la producción fotovoltaica..... 71

Imagen 48: Indicador de escasez de minerales estimado dinámicamente en cada paso de tiempo 72

Imagen 49: Evolución temporal de la generación fotovoltaica en las simulaciones 81

Imagen 50: Emisiones de CO₂ anuales debidas a la producción de electricidad..... 82

Imagen 51: Superficie ocupada por instalaciones fotovoltaicas..... 83

Imagen 52: Superficie ahorrada por el uso de instalaciones fotovoltaicas de tejado 83

Imagen 53: Ratio real instalaciones de tejado vs total 84

Imagen 54: Ratio de reciclado RC de los minerales demandados por la fotovoltaica, Pt 1 ... 86

Imagen 55: Ratio de reciclado RC de los minerales demandados por la fotovoltaica, Pt 2 ... 87

Imagen 56: Factor de capacidad de las instalaciones fotovoltaicas 88

Imagen 57: EROI_{st} de las instalaciones fotovoltaicas de tejado..... 89

Imagen 58: EROI_{st} de las instalaciones fotovoltaicas de suelo..... 89

Imagen 59: EROI_{final} de las instalaciones fotovoltaicas de tejado 90

Imagen 60: EROI_{final} de las instalaciones fotovoltaicas de suelo..... 90

Imagen 61: EROIs globales de las instalaciones fotovoltaicas 91

Imagen 62: Indicador de escasez mineral MS, Pt 1..... 94

Imagen 63: Indicador de escasez mineral MS, Pt 2..... 95

Imagen 64: Porcentaje de mercado de cada tecnología, instalaciones de tejado 96

Imagen 65: Porcentaje de mercado de cada tecnología, instalaciones de suelo 97

Imagen 66: Análisis de sensibilidad, crecimiento de la potencia de generación fotovoltaica 106



Índice de tablas

Tabla 1: Revisión bibliográfica.....	6
Tabla 2: Índices de reciclado de los diferentes minerales que componen los paneles y procesos empleados según diferentes autores.....	28
Tabla 3: Eficiencia y potencia de los paneles empleados en la tecnología fotovoltaica	33
Tabla 4: Elementos de los paneles c-Si enunciados por un único autor	35
Tabla 5: Intensidades de las células C-Si seleccionadas para el análisis	35
Tabla 6: Elementos de los paneles CIGS enunciados por un único autor	38
Tabla 7: Intensidades de las células CIGS seleccionadas para el análisis.....	38
Tabla 8: Elementos de los paneles CdTe enunciados por un único autor	39
Tabla 9: Intensidades de las células CdTe seleccionadas para el análisis	39
Tabla 10: Intensidades materiales de la estructura de los paneles solares.....	40
Tabla 11: Intensidades materiales de la estructura de montaje de los paneles solares	41
Tabla 12: Requerimientos materiales de los inversores	42
Tabla 13: Requerimientos materiales de los transformadores.....	42
Tabla 14: Requerimientos materiales de las conexiones de los paneles solares	43
Tabla 15: Metros de los diferentes tipos de conexión por MW de potencia	45
Tabla 16: Masa de los componentes de las líneas por MW de potencia.....	46
Tabla 17: Intensidad material de la tecnología fotovoltaica.....	47
Tabla 18: Recursos, Reservas y ratios de reciclado de diversos minerales.....	49
Tabla 19: Energía incorporada en algunos de los materiales empleados en la tecnología fotovoltaica	53
Tabla 20: Resumen de los supuestos e inputs globales más relevantes para los escenarios simulados	74
Tabla 21: Resumen de los supuestos e inputs del transporte para los escenarios simulados	75
Tabla 22: Características de los escenarios propuestos.....	77
Tabla 23: Resultados intermedios del EROI estático.	79
Tabla 24: EROI estático de las tecnologías fotovoltaicas	79
Tabla 25: Demanda mineral respecto a las reservas de la tecnología fotovoltaica	99
Tabla 26: Demanda mineral respecto a los recursos de la tecnología fotovoltaica	102
Tabla 27: Demanda mineral respecto a las reservas de la tecnología fotovoltaica con distintos ritmos de adopción de la tecnología.....	107



Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial





Glosario de Acrónimos

- GEI**: Gases de efecto invernadero.
- RC**: Contenido reciclado.
- EOL-RR**: Ratio de reciclaje de fin de vida.
- BEV**: Vehículo eléctrico de baterías.
- TBC**: Tecnologías bajas en generación de carbono.
- TRE**: Tasa de retorno energético.
- EROI**: “Energy Return on Energy Investment”, término inglés de la tasa de retorno energético
- PV**: Tecnología fotovoltaica.
- MS**: Indicador de escasez mineral.
- RE**: Resto de la economía.
- GT**: Tecnologías renovables.
- CF**: Factor de capacidad.
- RES**: Energías renovables
- CED**: Demanda de energía acumulada



Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial





Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial





Universidad de Valladolid

Daniel Pulido Sánchez
Máster en Ingeniería Industrial

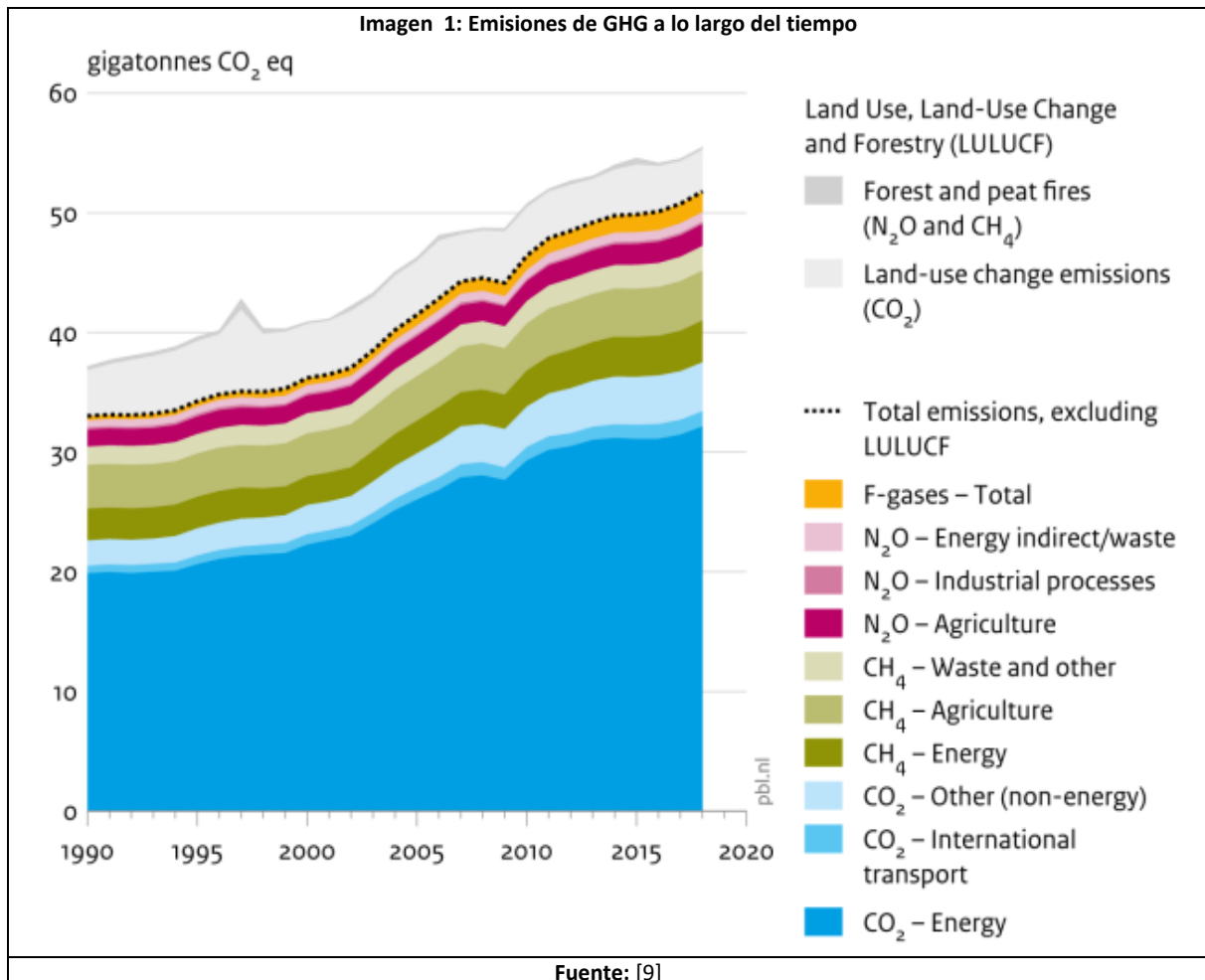


1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto, presentación del problema

Hoy, tras millones de años de evolución y avances científicos de diversa índole, nuestra economía cada vez demanda más energía. La fabricación de productos; la demanda de electricidad para el ocio y el trabajo; la climatización para el bienestar de las personas; las necesidades de transporte de mercancías y personas; la producción de víveres, o la extracción de materias primas, son acciones cada vez más demandadas. Todo esto no ha sido inocuo para el mundo en el que vivimos, estos procesos requieren mucha energía, y por lo tanto, emiten muchos contaminantes y gases de efecto invernadero [8], [9].

La emisión de estos gases no ha hecho más que aumentar con el paso de los años a pesar de la mayor eficiencia de los sistemas tecnológicos (Imagen 1). Esto ocurre principalmente por la creciente demanda de bienes y servicios en el mundo [10],[11].

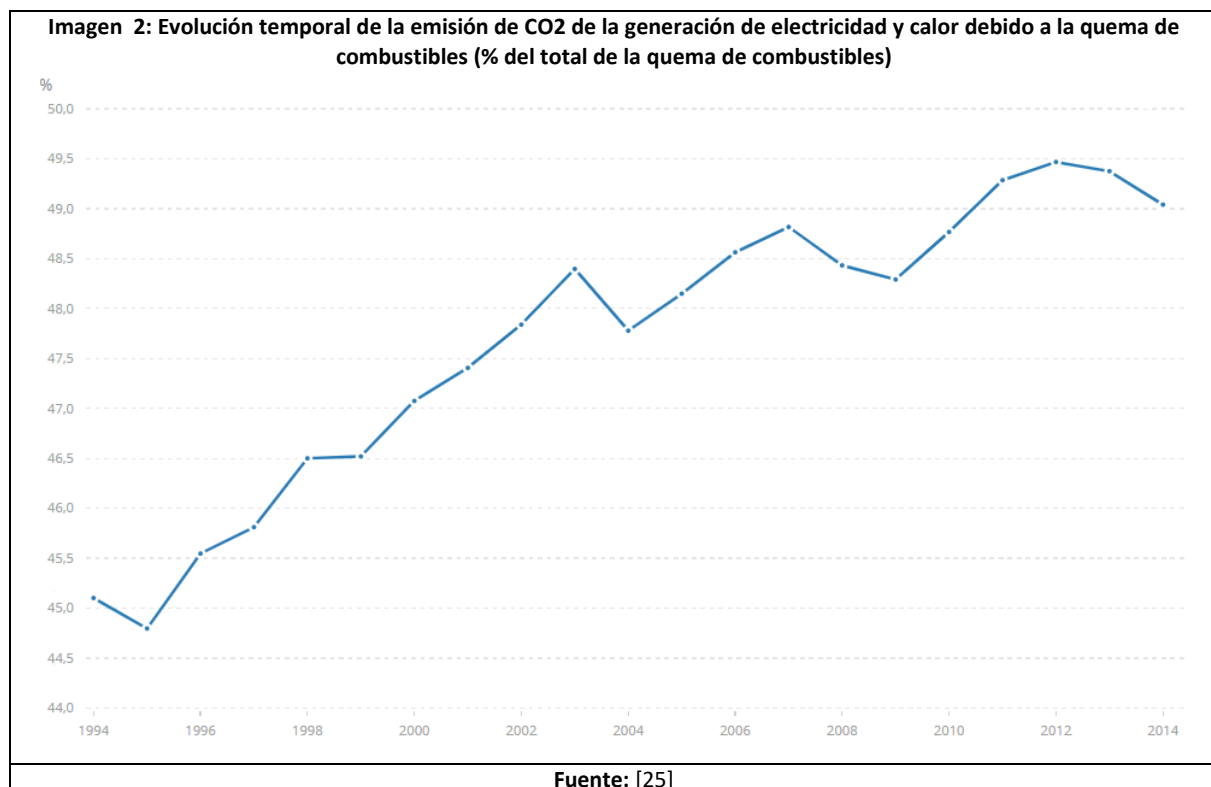


Estos problemas han hecho que los diferentes gobiernos y órganos legislativos busquen diferentes soluciones para iniciar la transición hacia una sociedad sostenible [12]. Es decir, una sociedad que respete y sea justa con el medio ambiente y con todos los seres vivos que habitan

el planeta y que no comprometa la vida de las generaciones futuras por los daños que se puedan causar a nuestro planeta en el presente.

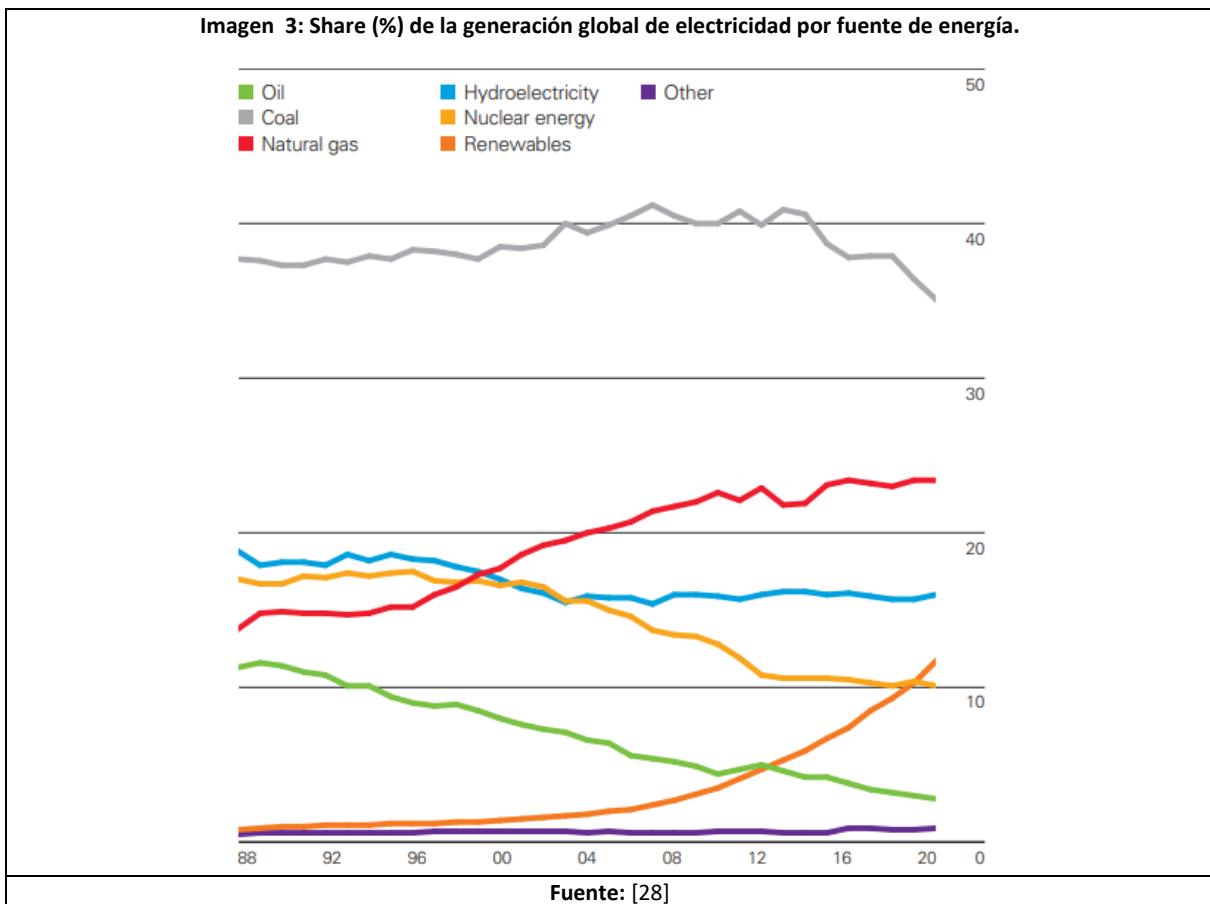
Una de las principales soluciones que se promueven hoy en día es la economía circular [13]. Diferentes organismos e instituciones, con el fin de gestionar los elementos críticos (elementos que pueden presentar problemas de agotamiento en un futuro próximo) han establecido diferentes políticas de gestión y recomendaciones de carácter circular [14]–[17]. Podemos definir estas políticas como estrategias que buscan reducir la incorporación de materiales vírgenes en los procesos productivos y aumentar el reciclaje o reutilización de los residuos resultantes de estos procesos, con ello, se conseguiría convertir los procesos productivos en diferentes bucles en los que ni entran materiales vírgenes ni salen sólo residuos. Con estas estrategias se conseguiría fabricar elementos extrayendo pocos recursos de nuestro planeta, produciendo pocos residuos y suponiendo además un gran ahorro de energía debido a las sinergias de reutilización y reciclaje de los bienes. Aunque también hay que mencionar que hay autores que tienen una opinión crítica de esta política [18].

Otra solución que se está aplicando, es la de promover el aumento de la eficiencia energética de los diferentes sistemas, se exige que los edificios sean energéticamente eficientes [19]–[21], se da al consumidor la clasificación del aparato según el gasto energético de este [22], se obliga a los vehículos a ser cada vez menos contaminantes [23], [24], se promueve la integración de las energías renovables en el hogar...



Dentro del ámbito de este problema global, en este trabajo abarcaremos el sector de la generación eléctrica. La generación de calor y electricidad produjo a lo largo del año 2014 el 50% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial provocadas por la quema de combustibles [25]. Estas emisiones dependen en gran medida del país, destacando

los países de la OCDE y los países ricos, que emiten la gran mayoría de los gases de efecto invernadero procedentes de la producción eléctrica [26]. En la actualidad, la generación eléctrica depende en gran medida de los combustibles basados en hidrocarburos (Imagen 3), utilizándose para ello alrededor del 50% de todos los combustibles fósiles demandados (como nos indican las emisiones anteriormente citadas [25]). El sector energético es también un sector clave en el comercio, los servicios y los procesos industriales. Por lo tanto, cualquier problema que afecte a este sector se convierte en un problema en todos los demás sectores, especialmente en una economía altamente globalizada. Las emisiones de GEI relacionadas con la producción de energía eléctrica siguen aumentando en la mayoría de los países, a pesar de la evolución de la eficiencia de los sistemas de generación y de la adopción de mejores políticas. IRENA ha estimado que, siguiendo las tendencias actuales, las emisiones de GEI procedentes de la generación de energía seguirían aumentando, alcanzando unas 34,8 Gt de CO₂eq/año en 2050 [27].



Este razonamiento, unido al intento de reducir la dependencia de los combustibles fósiles [28] que son externos al país (y que pueden agotarse) ha llevado a muchos gobiernos y órganos legislativos a intentar promover sistemas de generación más limpios que los actuales [24], [29], [30]. Han promovido los productos de alta eficiencia, evitando en lo posible el uso innecesario de la energía y, por último y desde hace ya algunos años, se está promoviendo la generación eléctrica renovable.

Por esas razones se está produciendo un cambio en los sistemas de generación eléctrica hacia una tecnología que no utilice combustibles fósiles o emita gases de efecto invernadero.

Aunque este cambio trae consigo unas nuevas tecnologías de producción eléctrica, a priori más respetuosas con el medio ambiente, estas tienen asociados algunos problemas [3], como el aumento de la desigualdad social que pueden favorecer estos sistemas al demandar gran cantidad de tierras que podrían destinarse a otros usos como el cultivo, poseen un EROI más reducido en relación a los sistemas de generación tradicionales, su variabilidad y estacionalidad son difíciles de gestionar, o en el ámbito en el que nos centraremos en este análisis, muchos de los materiales que la componen tienen elementos críticos [14], [31].

1.1.1 Materiales críticos en las tecnologías renovables

Las tecnologías renovables demandan minerales [6], aluminio, cobre, telurio, hierro, níquel, silicio, selenio, galio... que son escasos en nuestro planeta si miramos sus reservas, o cuya producción utiliza una gran cantidad de energía, que puede ser crítica para el avance de la tecnología, para la economía y también para nuestro planeta.

Estos materiales están presentes en el núcleo principal de estas tecnologías, pero también en la infraestructura que nos permite llevar la electricidad de un lugar a otro o en los posibles sistemas de almacenamiento de energía (baterías, por ejemplo) que se pueden incluir en estos sistemas. Además, en 2014 ya se demandaron más de 3100 kWh per cápita de electricidad (en continúa subida a lo largo de los años) [32], lo que puede traducirse en una enorme cantidad de materiales para fabricar los sistemas de producción de esta electricidad.

El problema inherente al empleo de materiales críticos, o que lo puedan ser en un futuro, de las tecnologías renovables no ha pasado desapercibido para las administraciones gubernamentales [14]. La UE indica que diversos materiales que componen la tecnología fotovoltaica (cuyo estudio, es el objetivo de este trabajo) pueden ser críticos en un futuro, como el galio, el selenio, el indio... A este problema, se añade el de la dependencia de otros territorios externos para la obtención de muchos minerales. En el caso de la tecnología fotovoltaica, la UE y otros autores enuncian una gran dependencia tanto a nivel de materias primas como a nivel de fabricación del país chino [14], [33], [34].

Además, a pesar del aumento en porcentaje de la cantidad de elementos que se reciclan cada año a nivel mundial, este no se está produciendo a un ritmo muy elevado, lo que se traduce en los escasos índices de reciclaje actuales de muchos minerales [35], [36]. Esto se debe en gran medida a la relativamente escasa investigación sobre nuevos procesos que permitan reciclar más materiales sin perder pureza, al diseño de productos sin pensar en su fase de reciclaje [18], [37], [38], a que algunas industrias rechazan el reciclaje por su complejidad técnica o por la inversión inicial necesaria (por ejemplo, para reciclar los paneles fotovoltaicos [39]–[42]), o a la falta de medios para llevarlo a cabo.

Además de los organismos gubernamentales, varios autores han sido pioneros en tratar de llamar la atención sobre el problema del agotamiento de los recursos minerales utilizados en diferentes tecnologías empleadas para reducir las emisiones de GEI y el uso de combustibles fósiles en las sociedades modernas, como los vehículos eléctricos o la tecnología fotovoltaica (Tabla 1). Como se muestra en la Tabla 1, la mayoría de los estudios se han centrado en un conjunto limitado de tecnologías de producción energética de carácter renovable y de



vehículos electrificados, los análisis estáticos dominan sobre los dinámicos, los requisitos materiales del resto de la economía rara vez se tienen en cuenta y ninguno ha estimado la energía producida sobre la energía invertida en la construcción y mantenimiento de las instalaciones de producción de energía eléctrica de carácter renovable (EROI, apartado 1.1.2).

Tabla 1: Revisión bibliográfica

Autores	Resto de la economía	Método modelado	Elementos incluidos en la evaluación	Escenarios	Minerales estudiados	EROI
Viebahn et al [43]	NO	Estático	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento eléctrico Red de transmisión de energía eléctrica Tecnologías renovables 	"Continuity roadmap"	<ul style="list-style-type: none"> Neodimio Disprosidio Indio Galio Selenio Cadmio Teluro 	NO
				"Upscaling roadmap"		
				"High temperature superconductor roadmap"		
K.Tokimatsu et al [7]	NO	Dinámico	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos Vehículos híbridos Vehículos pesados electrificados Ferrocarril electrificado Tecnologías renovables 	Objetivo 2°C (Todo renovables)	<ul style="list-style-type: none"> Silicio Plata Indio Galio Selenio Cadmio Teluro Cobre Nickel Aluminio Otros 	NO
				Objetivo 2°C (gas y renovables)		
				Objetivo 2°C (Carbón y nucleares)		
Zhou et al [44]	NO	Dinámico	<ul style="list-style-type: none"> Tecnologías PV 	ETP 2017, 2º Escenario (2DS)	<ul style="list-style-type: none"> Indio Germanio Galio Selenio Cadmio Teluro 	NO
A. Valero et al [6]	SÍ	Estático	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos Motores eléctricos Vehículos pesados electrificados Vehículos híbridos Tecnologías renovables 	Tendencias esperadas	<ul style="list-style-type: none"> Plata Cadmio Cobre Galio Germanio Indio Magnesio Molibdeno Selenio Estaño Teluro Zinc Nickel 	NO
De.Koning et al [5]	SÍ	Estático	<ul style="list-style-type: none"> Baterías de los vehículos eléctricos Motores eléctricos Vehículos pesados electrificados Vehículos híbridos Tecnologías renovables 	Business-as-usual (BAU) scenario, including efficiency improvements	<ul style="list-style-type: none"> Aluminio Cobre Indio Niquel Plomo Zinc 	NO
				Technological Scenario (TS)		
				Blue Map electricity supply (BMES) scenario of IEA		
				Rare Earth Metals (REM) scenario.		
A.Mangerber et al [45]	NO	Estático	<ul style="list-style-type: none"> Baterías de los vehículos eléctricos Motores eléctricos Vehículos pesados electrificados Vehículos híbridos Tecnologías renovables Vehículos de hidrogeno 	'Beyond 2 degrees' (B2D) Escenario de estudio de la perspectiva tecnológica de la energía de la IEA (2017a).	<ul style="list-style-type: none"> Cobalto Cobre Disprosidio Galio Indio Neodimio Nickel Platino Selenio Plata Teluro 	NO
V.Moreau et al [46]	SÍ	Estático	<ul style="list-style-type: none"> Baterías de los vehículos eléctricos Tecnologías renovables Biofuel 	IPCC	<ul style="list-style-type: none"> Aluminio Cobalto Cobre Indio Hierro Litio 	NO
				Ecofys and WWF		
				IEA ETP B2deg Scenario		
				IEA high ren		

				IRENA Global Energy Transition: 2050dREmap scenario	<ul style="list-style-type: none"> • Magnesio • Manganeso • Neodimio • Nickel • Paladio • Platino 	
Este trabajo	Sí	Dinámico	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías renovables • Red de transmisión de energía eléctrica • Baterías de los vehículos eléctricos • Vehículos eléctricos • Vehículos híbridos • Vehículos pesados electrificados • Ferrocarril • Motores eléctricos 	Tecnología actual	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminio • Cobre • Cadmio • Galio • Indio • Plata • Hierro • Plomo • Molibdeno • Manganeso • Magnesio • Níquel • Selenio • Titanio • Telurio • Vanadio • Zinc 	Sí
				Cont. De las tendencias actuales (suelo)		
				Cont. De las tendencias actuales (tejado)		
				Mejora tecnológica		
Fuente: Elaboración propia.						

1.1.2 Introducción a las tasas de retorno energético (EROI de la tecnología fotovoltaica)

El concepto de la tasa de retorno energética (EROI o TRE) ya ha sido nombrado en esta introducción, con el fin de entender mejor este concepto, hasta que se llegue a su propio apartado en este documento (apartado 2.6), se introducirá en este momento una breve explicación y su contexto bibliográfico. La tasa de retorno energética es la relación entre la energía producida y la energía invertida para construir y hacer funcionar durante toda su vida útil una la instalación de producción energética. Cuanto mayor sea el EROI de una tecnología de producción energética, mejor será su rendimiento tecnológico y menores serán los requisitos energéticos relativos para su construcción y funcionamiento. Este indicador es relevante desde una perspectiva más amplia del metabolismo energético, dado que las sociedades complejas requieren un alto rendimiento energético neto para ser viables [47]–[50].

El EROI estándar ($EROI_{st}$) tiene en cuenta toda la infraestructura de una planta de generación eléctrica, es decir desde el panel hasta llegar a la red eléctrica (panel, soportes, conexiones, inversor...). EL EROI final ($EROI_{final}$) tiene en cuenta la energía toda la infraestructura asociada desde el panel hasta llegar al usuario final (incluye la infraestructura final de red eléctrica que proporciona energía al usuario).

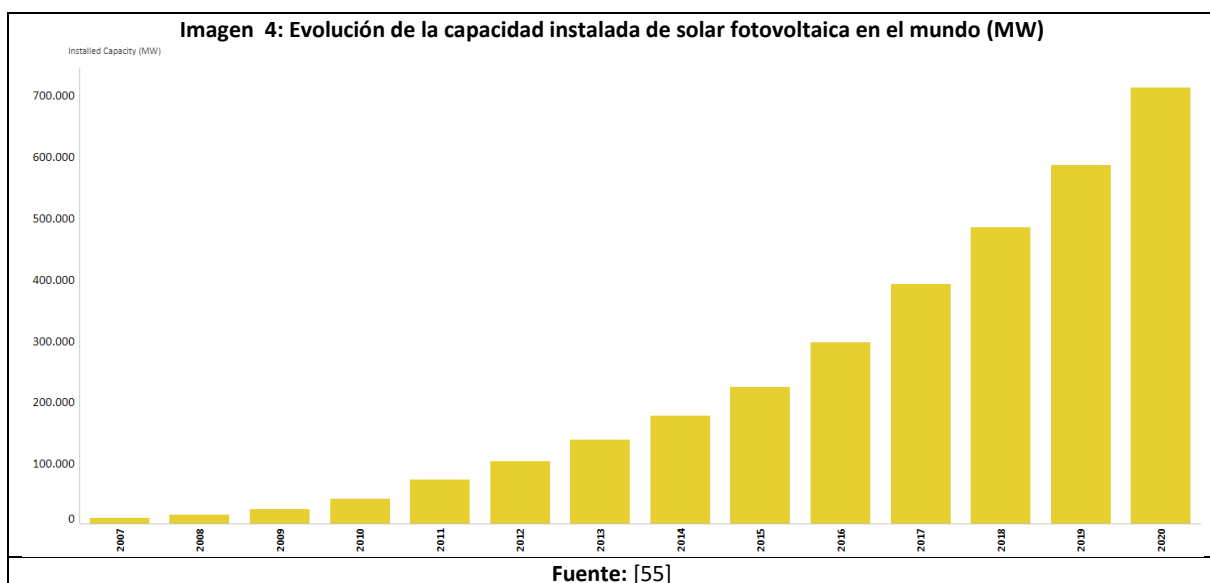
Hay que enunciar que este indicador presenta también algunas limitaciones. No tiene en cuenta el espacio ocupado por la instalación de generación energética, por lo que este factor se tiene que tener en cuenta de forma externa al comparar diferentes tecnologías de generación energética mediante su EROI. Tampoco tiene en cuenta la estacionalidad o la intermitencia de la producción energética. Por último, aunque no es una limitación en sí misma, para el cálculo fiel del EROI debemos conocer los materiales que componen una

tecnología, su energía embebida, los ratios de reciclado de los materiales... En definitiva, todos y cada uno de los procesos en los que se emplean energía y/o materiales para la puesta en marcha y el mantenimiento de la instalación, redundando en una gran dificultad si queremos calcular de forma precisa este ratio.

En el ámbito de la fotovoltaica, en la que se enfoca este trabajo, diversos autores se han centrado en la estimación del EROI de la tecnología fotovoltaica. Zhou et al [51] y Bhandari et al [52] obtienen el $EROI_{st}$ para los paneles de silicio y los de película fina. Raugei et al [53] obtiene el $EROI_{st}$ para una mezcla de varias tecnologías. De Castro et al [54] obtiene el $EROI_{st}$ y el $EROI_{final}$ para una mezcla de varias tecnologías fotovoltaicas, pero a diferencia de la demás bibliografía, este autor si tiene en cuenta las implicaciones energéticas de elementos exteriores a la planta de producción energética, como la construcción y mantenimiento de la red eléctrica exterior a la planta o el transporte de materiales.

1.2 Tecnología fotovoltaica, situación actual

En este trabajo nos centraremos en los diferentes tipos de tecnología fotovoltaica profundizando en sus demandas minerales, estimando su uso en el mercado, su EROI... Se ha elegido este tipo de generación energética debido a diversos factores. En primera instancia, es la tecnología de producción energética con un mayor crecimiento de potencia instalada anual actualmente [55]. En segundo lugar, es una tecnología que a priori podría presentar una gran demanda en el futuro, debido a que no solo permite la existencia de grandes plantas de generación energética, sino que permite la instalación de plantas de pequeño tamaño o de sistemas de generación en edificios y viviendas aprovechando su superficie de fachada y/o tejado. Este aspecto otorga una gran versatilidad a este tipo de generación permitiendo instalar sistemas de generación distribuida [56] o de autoconsumo [57], [58]. A continuación, enunciaremos la situación y demanda actual de esta tecnología con el fin de ver que magnitud alcanza (Imagen 4).





Como se puede ver en la Imagen 4 la demanda de producción de energía fotovoltaica no ha hecho más que aumentar a lo largo de los años, y se espera que esto siga sucediendo (siendo favorecida esta tendencia por el abaratamiento de la tecnología y el aumento de su eficiencia) y que las energías renovables y la fotovoltaica en particular sigan desplazando a los combustibles fósiles en cuanto a generación eléctrica se refiere [59]. Este aumento de capacidad instalada a lo largo del tiempo (alcanzando ya en 2019 la producción del 3% de la electricidad mundial [60]) se traduce en la producción de millones de placas fotovoltaicas de todo tipo, demandando con ello una gran cantidad de minerales (muchos de ellos críticos, como hemos comentado con anterioridad).

1.3 Motivación del análisis, conclusión de la introducción

Todos los aspectos comentados en esta introducción confluyen, llegando a la conclusión de que será necesario utilizar una gran cantidad de materiales vírgenes, muchos de ellos escasos [61], [62], difíciles de conseguir y caros [63], si queremos cambiar la generación eléctrica hacia un sistema renovable, ya que la demanda actual de electricidad se sitúa en valores de 1250 TWh anuales (y se espera que aumente notablemente debido a la transición energética y el cese de la utilización de combustibles fósiles) y no somos capaces de reciclar tanto como deberíamos.

Debido a este gran problema, y con el fin de dar alternativas viables para este cambio en la generación energética, a lo largo de este trabajo, se realizará un estudio, por un lado, respecto a la eficiencia energética, y por otro, de viabilidad en lo que confiere a la disponibilidad a lo largo del tiempo de todos los materiales empleados en el ámbito de la generación eléctrica fotovoltaica. Podemos citar por ejemplo, el cobre, o los diferentes materiales presentes en los paneles, así como los empleados en las infraestructuras que acarrea esta tecnología [6], como los transformadores, los inversores, etc.



2. METODOLOGÍA

2.1 Introducción de la metodología, descripción de la metodología general

A continuación, se enunciará la metodología escogida con el fin de ejecutar este análisis. Para llevar a cabo este estudio exhaustivo de las nuevas tecnologías de producción de energía eléctrica fotovoltaica se dividirá el análisis en dos partes principales:

1. Análisis estático: el punto de partida es la selección de las tecnologías pertinentes para un sistema de generación de electricidad fotovoltaico (apartado 2.3), seguido de la evaluación de sus requisitos materiales y factores de rendimiento técnico (apartado 2.1). El principal resultado del análisis estático es el cálculo del $EROI_{st}$ (estándar) y el $EROI_{final}$ (punto de uso) a lo largo de la vida útil de las subtecnologías de los paneles estudiados.

2. Análisis dinámico: tomando como punto de partida los datos recopilados en el análisis estático, así como los datos sobre la disponibilidad de materiales (apartado 2.5), se desarrolla un submódulo centrado en los requisitos de materiales de las tecnologías de generación de electricidad fotovoltaica y se integra en MEDEAS-World [64] (apartado 2.8.3) simulándose distintos escenarios (apartado 2.9) para el sector de la generación eléctrica mundial hasta 2050. Además, se desarrolla una función de asignación para asignar las cuotas de las subtecnologías de paneles fotovoltaicos tomando como referencia su EROI relativo, así como la escasez de materiales. También, se realizará un análisis de sensibilidad sobre la velocidad de instalación de potencia de la fuente de energía fotovoltaica, buscando conocer las distintas consecuencias de adoptar la tecnología fotovoltaica a distintos ritmos. Los principales resultados del análisis dinámico serán las emisiones de CO_2 por parte de la generación eléctrica, las consecuencias de variar el ritmo de crecimiento de la potencia fotovoltaica, la demanda de tierra por parte de la fotovoltaica, el factor de capacidad de las instalaciones fotovoltaicas, el cálculo del $EROI_{st}$ y el $EROI_{final}$ dinámicos para las subtecnologías de paneles estudiados, los ratios de reciclado RC (apartado 2.5), así como los porcentajes de demanda primaria acumulada frente a las reservas y los recursos actuales.

El empleo de esta metodología tiene grandes ventajas, en primer lugar, podemos ver las tendencias temporales del ámbito que queremos estudiar, en segundo lugar, podemos introducir políticas buscando cambios en los sistemas y poder así encontrar soluciones a los problemas y por último lugar, podemos obtener gran precisión al estar el modelo conformado en este TFM dentro de un modelo con gran complejidad como MEDEAS.

El modelo de sistemas dinámicos conformado en este TFM y enfocado a los materiales utilizados por la nueva generación de energía eléctrica fotovoltaica se integrará a futuro a su vez dentro del modelo WILLIAM, en el marco del proyecto LOCOMOTION [65] (este proyecto

H2020 coordinado por el GEEDS-UVa busca identificar los caminos más efectivos hacia una sociedad sostenible con bajas emisiones), completando la parte que corresponde a las nuevas tecnologías de generación energética, introduciendo más tipos de paneles solares y las nuevas infraestructuras necesarias para que este tipo de generación energética pueda funcionar.

2.2 Índice metodológico

A la hora de enumerar los diferentes pasos metodológicos del trabajo enunciados en el apartado anterior y verlos de forma más clara y concisa se pueden separar a su vez en función de la obtención; Anterior o por medio de la simulación del modelo MEDEAS-W modificado:

-Anterior a la simulación:

- Evaluar la situación actual de la generación energética para conocer la magnitud y el alcance de los problemas unidos al aumento de la generación fotovoltaica en un futuro próximo (apartado 1.2).
- Realizar una investigación exhaustiva para obtener información sobre las tecnologías de generación eléctrica fotovoltaica obteniendo datos que estimen cuáles son las tecnologías que destacarán en el futuro, cuál será su demanda, qué infraestructuras se necesitan para su implementación, cuáles son los materiales utilizados por las tecnologías y sus infraestructuras, y para finalizar cuánta energía debemos emplear en la obtención de estos materiales (apartado 2.3 y apartado 2.1).
- Obtener datos sobre la cantidad de reservas materiales presentes a nivel mundial de los materiales empleados en la generación eléctrica fotovoltaica, visualizar qué materiales se reciclan actualmente, en qué porcentaje y cómo puede variar esto en el futuro (apartado 2.5).
- Obtener el EROI estático de los diferentes tipos de tecnologías fotovoltaicas estudiadas (apartado 2.6).
- Identificar todas las variables presentes en el sistema para poder posteriormente fabricar un modelo completo y lo más preciso posible (apartado 2.7 y apartado 2.8).
- Integrar todos los datos en el modelo MEDEAS de la universidad de Valladolid, conformado en el programa VenSim, para simular la evolución temporal del sistema de generación eléctrica en un mundo completo (apartado 2.8).
- Modelar una función de asignación que permita al modelo escoger el porcentaje de mercado de cada subtecnología fotovoltaica de forma endógena teniendo en cuenta diversos factores (apartado 2.8.3.4).

- Establecer unos escenarios que nos permitan observar la influencia de diversas políticas y variables en los resultados obtenidos al final de las simulaciones. (apartado 2.9).

-Por medio de la simulación:

- Obtener la situación estimada de la fotovoltaica a lo largo de los años de la simulación con el fin de dar contexto a los demás resultados (apartado 3.2.1).
- Extraer las emisiones estimadas de CO₂ a lo largo de las simulaciones buscando estimar la efectividad de reducción de emisiones del empleo de la tecnología fotovoltaica (apartado 3.2.2).
- Observar la demanda de tierra de las instalaciones fotovoltaicas en los diferentes escenarios durante las simulaciones (apartado 3.2.3).
- Obtener la evolución temporal del EROI de la tecnología fotovoltaica (apartado 3.2.7).
- Adquirir la evolución temporal de las estimaciones de porcentajes de mercado de cada subtecnología fotovoltaica (apartado 3.2.9).
- Observar tras la simulación qué materiales pueden ser críticos (desabastecimiento) en el futuro y qué limitaciones puede tener la tecnología empleada a causa de esto (apartado 3.2.10).
- Extraer las conclusiones del análisis de sensibilidad realizado sobre la velocidad de instalación de potencia de generación fotovoltaica (apartado 3.2.11).
- Mostrar posibles alternativas o soluciones en el uso de materiales y del transporte para evitar el desabastecimiento de diversos materiales en un futuro y poder garantizar el uso de esta tecnología en el futuro (apartado 4).

2.2.1 Implementaciones de este trabajo respecto a la bibliografía existente

Tras indicar la metodología y, por lo tanto, como se ejecutará a grandes rasgos este análisis referente a los materiales y la energía necesarios para la implementación de la tecnología fotovoltaica, puede ser de gran utilidad enunciar las mejoras o aspectos en los que puede destacar este trabajo respecto a la bibliografía ya citada:

- (i) Se logra una alta fidelidad en la representación de los tipos de tecnologías de producción de energía eléctrica fotovoltaica y sus infraestructuras auxiliares necesarias, como los transformadores y el cableado.
- (ii) A través de una exhaustiva revisión bibliográfica que combina información de análisis de ciclo de vida, fabricantes y literatura gris, y que nos permite abarcar de

forma exhaustiva la mayoría de los componentes y materiales de las tecnologías fotovoltaicas relevantes.

- (iii) El cálculo del EROI estándar y final de las tecnologías fotovoltaicas de producción eléctrica, incluyendo las inversiones materiales y energéticas asociadas a los transformadores, inversores, infraestructuras y las redes adicionales.
- (iv) El desarrollo de una función de asignación dinámica para las subtecnologías de paneles solares de la tecnología fotovoltaica, teniendo en cuenta los cambios en el tiempo del EROI y la escasez de materiales de cada una de las tecnologías de paneles.
- (v) La implementación de todas estas características en un marco dinámico dentro del modelo de evaluación integrado MEDEAS-W [64], [66] que nos permite analizar diferentes estrategias de descarbonización teniendo en cuenta las retroalimentaciones entre los diferentes sectores económicos y energéticos y permitiendo contabilizar dinámicamente las existencias de materiales, las tasas de reciclaje objetivo, etc.
- (vi) Se incluye la demanda de materiales del resto de las TBC¹, de la movilidad electrificada, así como del resto de la economía. Este módulo se ha probado en MEDEAS-W, pero en un principio se está desarrollando para incluirlo en el modelo WILIAM, que está en fase de desarrollo (<https://www.locomotion-h2020.eu/>).

El enfoque desarrollado permite analizar la cantidad de materiales requeridos por la transición a los sistemas de generación eléctrica de tipo fotovoltaico, pero sobre todo nos permite explorar algunas cuestiones que se han destacado como críticas pero que todavía están poco estudiadas en la literatura, como cuáles son las posibilidades y el potencial de la sustitución de subtecnologías de paneles para evitar la futura escasez de materiales y cuál es el potencial de aumentar las tasas de reciclaje para reducir la extracción de materiales primarios.

2.3 Tecnología fotovoltaica, instalaciones, perspectiva de futuro y reciclaje

2.3.1 Principios de funcionamiento de la tecnología fotovoltaica

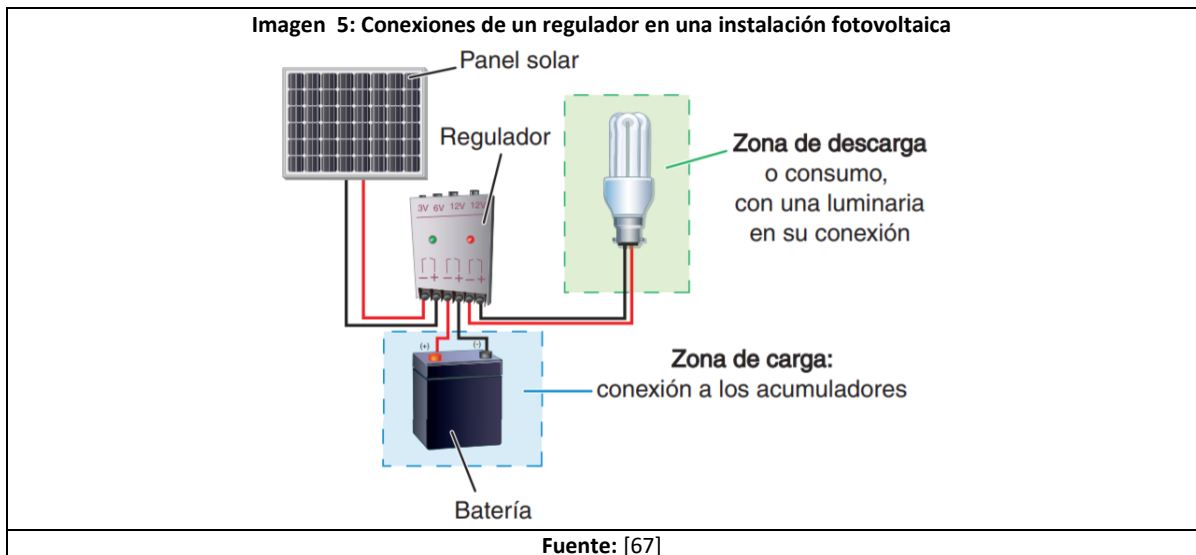
La tecnología fotovoltaica es la tecnología capaz de transformar de forma directa la luz solar en energía eléctrica. Para ello, se hace que la luz solar incida sobre las células fotovoltaicas que se encuentran en el interior de un panel. Hay distintos tipos de células solares compuestas de diferentes materiales que se traducen en distintas eficiencias y características (apartado 2.3.3). La irradiación de la luz solar y la eficiencia del panel, además de otros factores externos, como la suciedad de este último, determinarán la cantidad de energía que es capaz de entregar el panel en cada momento. La energía eléctrica que se obtiene del panel es continua y puede ser transformada a alterna si se necesita más adelante (inversor). A continuación, se

¹ Se utiliza el concepto estándar de "tecnologías de baja emisión de carbono" para hacer referencia a todas las tecnologías energéticas que suelen proponerse para mitigar las emisiones de GEI (renovables, almacenamiento eléctrico, nuclear, CAC, etc.). Este término se utiliza a efectos prácticos, independientemente de las opiniones de los autores de este artículo sobre su potencial para contribuir a la transición hacia un sistema energético sostenible.

enunciarán con más detalle todos los componentes de un sistema solar fotovoltaico, se profundizará en el funcionamiento de la célula solar y sus tipos, se evaluará la situación actual y las perspectivas de futuro de la tecnología, sus procesos de reciclado y finalmente se mostrarán los tipos de instalaciones básicas en los que se emplea esta tecnología.

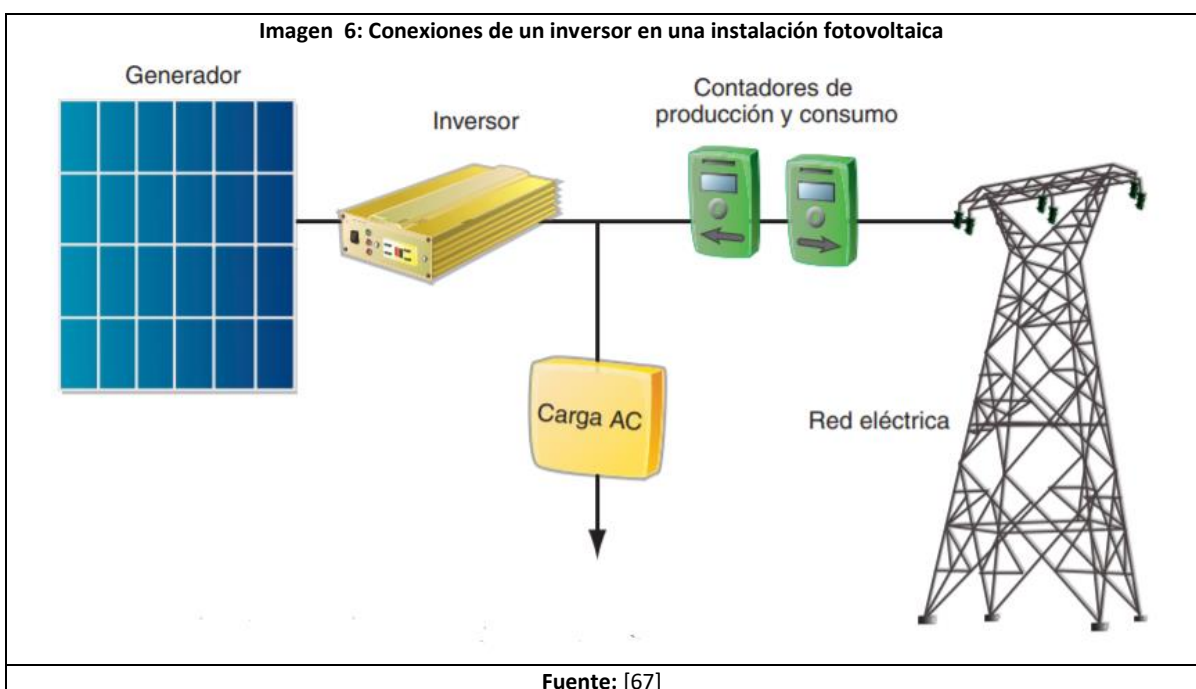
2.3.2 Componentes de un sistema solar fotovoltaico

2.3.2.1 Regulador de carga



Nexo de unión entre paneles y las baterías a las que protege de sobrecargas. Si tiene salida para elementos de consumo en continua también dispondrá de protección contra la descarga excesiva de la batería [67].

2.3.2.2 Inversor



Convierte la corriente continua del sistema en corriente alterna a 220V y 50Hz, similar a la red eléctrica, pudiendo alimentar los sistemas eléctricos de una vivienda o aparatos que trabajen con corriente alterna [67]. Además, aquellos de conexión a red, permite enviar la corriente hacia el sistema de transporte de electricidad (pasando previamente por un transformador en algunos casos).

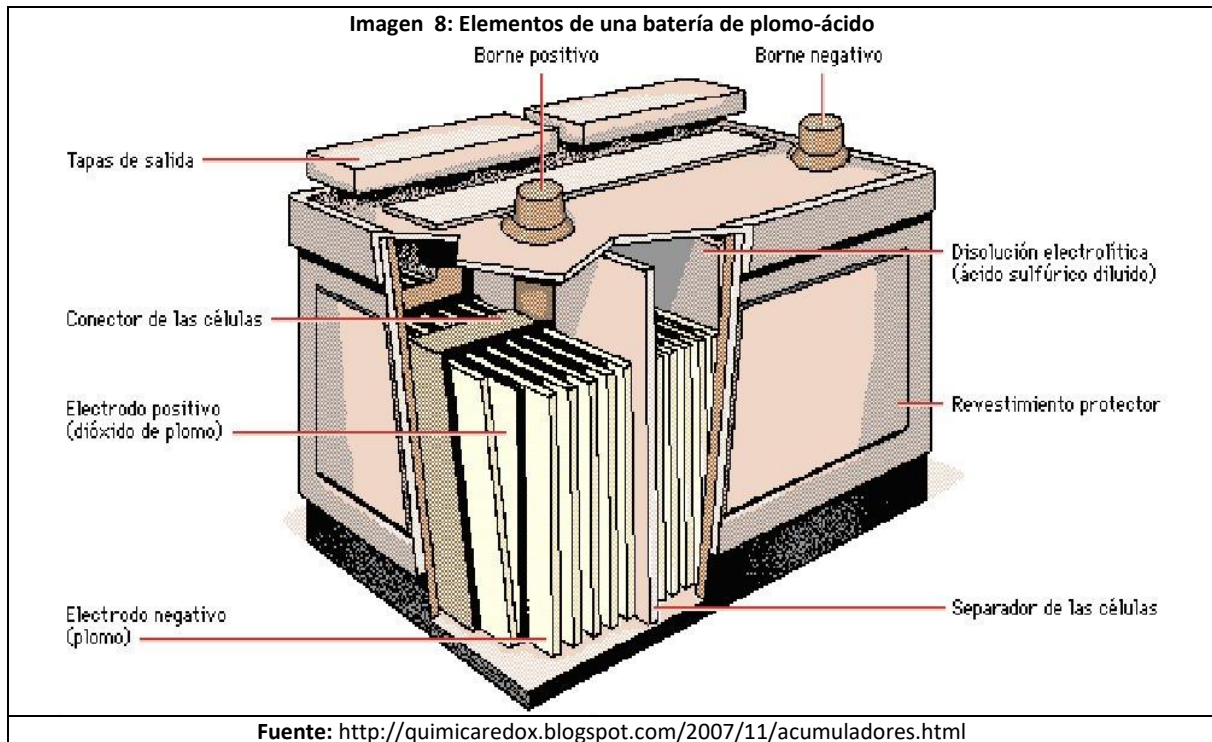
2.3.2.3 Transformador



Convierte la corriente alterna a 220V y 50Hz procedente del inversor, similar a la red eléctrica doméstica, a una tensión superior, permitiendo enviar la corriente hacia la red de transporte de electricidad de media o alta tensión.

2.3.2.4 Batería

Presente en instalaciones autónomas, acumula energía para la instalación y la proporciona en periodos sin luz. A su vez presenta diferentes elementos [68]–[70]:



-**Ánodo:** Compuesto de un óxido (de plomo en el caso de una batería plomo-ácido) junto con otros elementos. En la descarga de la batería el ánodo libera cationes y electrones. Estos elementos se encuentran dispuestos en forma de lámina.

-**Cátodo:** Compuesto de grafito, plomo, níquel... en función del tipo de batería empleado. En la descarga de la batería el cátodo recibe electrones y puede liberar aniones en función del tipo de batería empleado.

-**Separador:** Lámina que separa ánodo y cátodo para evitar un cortocircuito. Generalmente hecha de plástico perforado.

-**Electrolito:** Solvente orgánico en el que se introducen ánodo, cátodo y separador que actúa favoreciendo el intercambio de iones.

-**Sensores, conversores y reguladores:** Las baterías poseen diferentes dispositivos para monitorizar el estado de los componentes y así asegurar su seguridad y fiabilidad en la carga y la descarga.

Los materiales empleados en la composición exacta de estos elementos dependen del tipo de batería que se quiera construir, en función de las necesidades que se quieran cubrir con ella. Destacan en este sector las baterías Ni-cd y plomo ácido, ya que proporcionan un buen número de ciclos, un precio contenido, un buen valor de autodescarga y un buen precio [67]. El mayor inconveniente de estas baterías es la baja densidad energética, pero en esta aplicación esto no es problemático.

2.3.2.5 Disposición de los paneles solares

Los paneles solares instalados pueden estar introducido en una estructura simple, cuya única función es la de mantener sujeto el panel, como las que se suelen emplear usualmente en los tejados de las viviendas unifamiliares.

Aunque la búsqueda de un mayor factor de capacidad ha hecho que estos paneles puedan situarse en los llamados seguidores solares. Estos elementos son estructuras que permiten que los paneles se muevan pudiendo lograr una orientación hacia la luz solar más adecuada en cada momento. Existen dos tipos de seguidores en la actualidad con diferentes ventajas e inconvenientes:

Seguidor de un eje: Permite al panel moverse de este a oeste siguiendo al sol, lo que le permite captar más energía que un sistema sin seguidor solar. Estos sistemas son los seguidores menos costosos, son simples y se pueden adaptar a cubiertas, en contrapartida, son sistemas que captan menos energía que los seguidores de dos ejes ya que el seguimiento solar es menos preciso [71].



Seguidor de dos ejes: Este se mueve en dos direcciones, de norte a sur y de este a oeste, por lo tanto, cuentan con un seguimiento de la luz solar más preciso y efectivo. Este tipo de seguimiento permite maximizar la producción energética pero también posee desventajas como el mayor coste de adquisición y mantenimiento, la menor polivalencia y el mayor tamaño de estos sistemas [71].

Imagen 10: Paneles fotovoltaicos sustentados por un seguidor de dos ejes

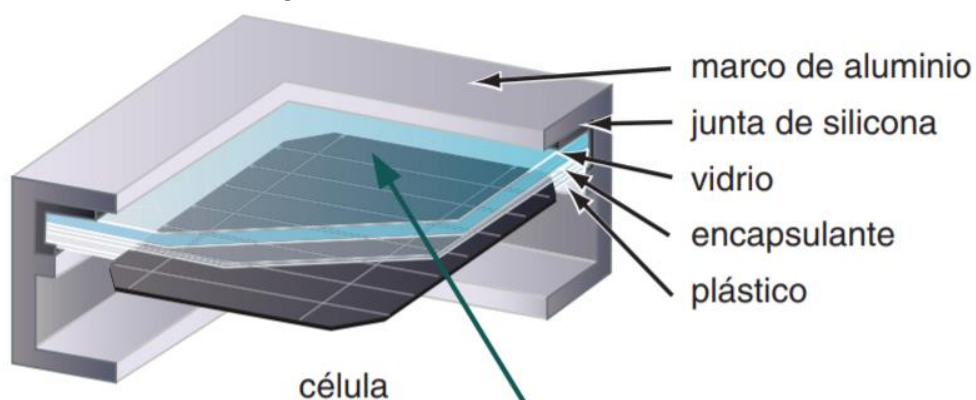
Fuente: <https://www.archiexpo.es/prod/ades/product-125833-1289155.html>

En definitiva, estos sistemas aumentan el rendimiento de una instalación a cambio de un mayor coste inicial, mantenimiento, complejidad de uso y espacio. La posibilidad de instalación de estos sistemas se evalúa mediante un análisis previo de carácter energético y económico. Estos sistemas suelen instalarse en instalaciones enfocadas a la producción energética de una potencia suficientemente alta [72], donde el beneficio a largo plazo relativo a la mayor energía generada compensa los costes monetarios de instalación y mantenimiento.

2.3.2.6 Módulo fotovoltaico

Elemento principal de la instalación, transforma la energía solar en energía eléctrica. Se conforma, por un lado de diversas células para conseguir la potencia y salida de tensión necesaria [67] y por otro, de diferentes elementos estructurales y de conexión [67], [73]:

Imagen 11: Elementos de un módulo fotovoltaico



Fuente: [67]

-Vidrio: Recubrimiento cuya función es la protección del panel frente a fenómenos atmosféricos.

-Encapsulado: Protege al módulo de la abrasión, vibraciones, la humedad y los rayos UV

-Conexiones: En primer lugar, se debe asegurar una conexión adecuada entre las células (en serie o paralelo) consiguiendo una tensión e intensidad de salida adecuadas. En segundo lugar, se dispone una caja de conexiones externa al panel con el fin de obtener de este la energía eléctrica.

-Marco: Permite la instalación sobre el soporte.

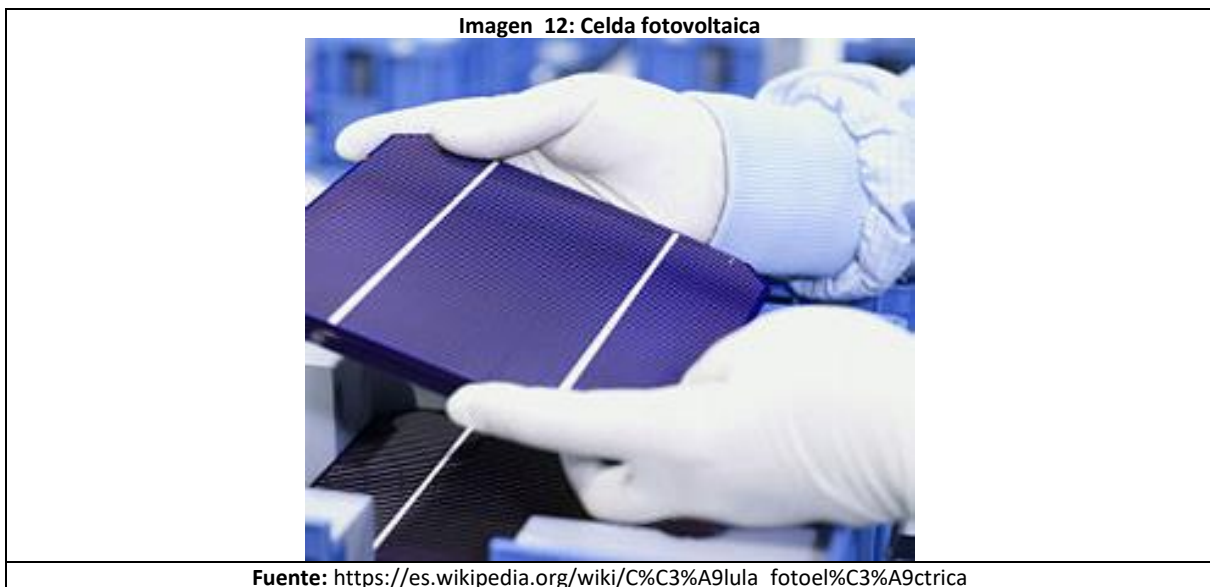
-Soporte: Proporciona una rigidez estructural adecuada, permitiendo la posterior instalación del módulo.

-Célula: Su información se muestra en el apartado siguiente (apartado 2.3.3).

2.3.3 Célula fotovoltaica

Elemento que convierte en electricidad los fotones provenientes de la luz solar (efecto fotovoltaico) [74]. La célula solar se comporta como un diodo siendo la parte expuesta a la radiación la N y la expuesta a la oscuridad la P.

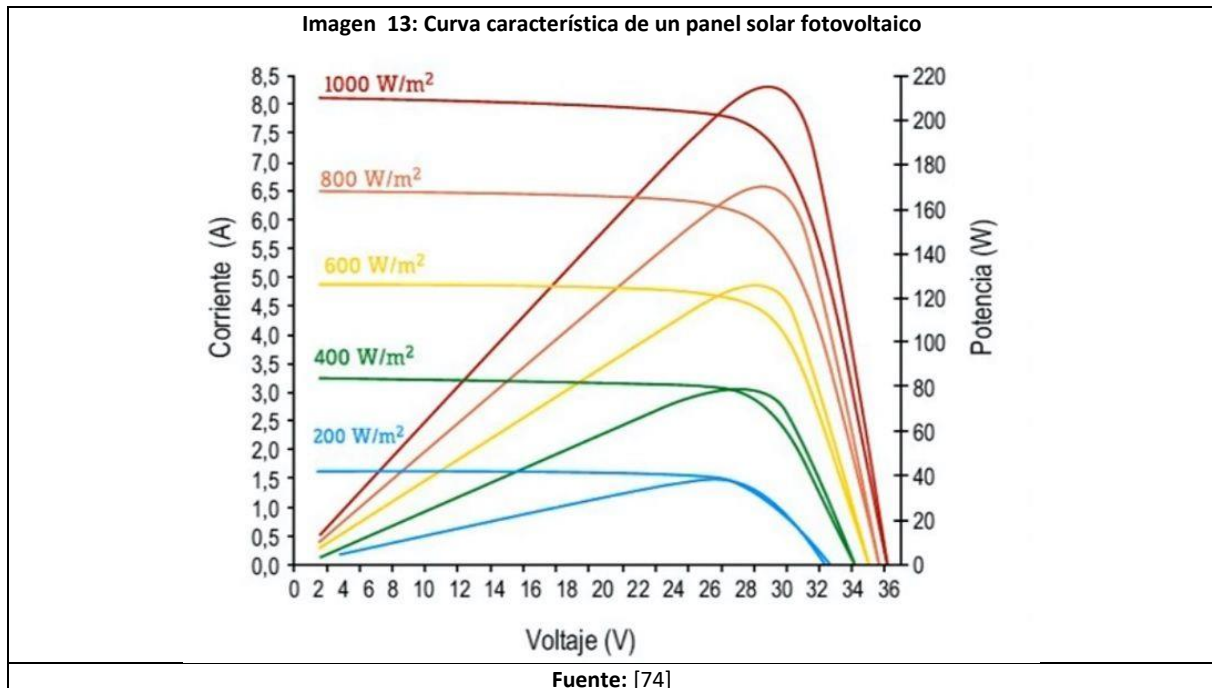
Los fotones de la radiación solar mueven los electrones del silicio de la parte N y estos electrones escapan por el conductor o la carga hacia la parte P, donde encontrarán huecos para unirse a ellos. La parte P ahora queda más negativa (llegaron electrones) y la N más positiva (se fueron electrones). Mientras le siga llegando luz a la parte N seguirán y por lo tanto saliendo electrones hacia la parte P, se seguirá produciendo corriente eléctrica. Debido a las buenas propiedades del silicio como semiconductor, es el mineral más empleado en la construcción de las células fotovoltaicas.



Parámetros principales de la célula solar [67], [74]:

- Corriente de iluminación: Corriente generada cuando incide la luz solar sobre la célula.
- Corriente de oscuridad: Debida a la recombinación de los pares electrón-hueco en el interior del semiconductor.

- Tensión de circuito abierto: Máxima tensión entre los extremos de la célula solar cuando no está conectada a ninguna carga.
- Corriente de cortocircuito: Máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar.
- Factor de forma: cociente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito.



Estas células se agrupan en serie o en paralelo en función de la tensión e intensidad requeridas en el diseño, obteniendo finalmente una potencia determinada. A continuación, se muestra una curva característica de un panel solar (Imagen 13) en función de la irradiancia a una determinada temperatura [74]. Esta curva nos permite conocer la potencia que nos puede dar un panel solar a una determinada temperatura en función de la irradiancia que este recibe y de su disposición eléctrica (condiciones exteriores de carga y tensión).

2.3.3.1 Tipos de células

Podemos encontrar en el mercado principalmente varios tipos de células [45], [75], [76]:

2.3.3.1.1 Células basadas en el silicio

Estas células se basan en el uso de Silicio de gran pureza con el que forman cristales. Esto hace que sean los paneles con mayor rendimiento, pero también los más costosos energéticamente y monetariamente [52], [75], [77]. Destacan actualmente en el mercado:

-Silicio Monocristalino (mono-Si): Células fabricadas a partir de lingotes de silicio de altísima pureza (>99,9%) mediante el método Czochralski o el método de zona flotante [78], [79]. Estas están compuestas por un único tipo de cristal de silicio con un alineamiento perfecto de todos los componentes del cristal. Son las células con mayor inversión energética y monetaria inicial pero también son las que más eficiencia y rendimiento presentan en su funcionamiento.

-Silicio Policristalino: Este tipo de célula [78], [77] también está compuesta fundamentalmente por silicio como la anterior, pero en este caso el método de fabricación es mucho más sencillo y barato (el silicio se funde y se vierte en moldes). Este método da lugar a células compuestas de múltiples cristales de silicio lo que provoca que cuya eficiencia y rendimiento sean peores a los de la célula monocristalina

2.3.3.1.2 Paneles de película delgada

Estos paneles [75], [77], [80] se fabrican depositando un material semiconductor sobre un sustrato similar al vidrio o al plástico (si se les quiere dotar de cierta flexibilidad). Su fabricación es monolítica lo que provoca que no se requiera el ensamble de varias células. Otra ventaja es la menor cantidad de material semiconductor respecto a los paneles de silicio cristalino, por otro lado, esto hace que estos paneles posean un rendimiento inferior. Son muy demandados en el ámbito doméstico debido a su relación rendimiento-precio y a sus características constructivas. Destacan actualmente en el mercado:

-Silicio Amorfo: Los átomos de silicio se depositan químicamente de forma amorfa sobre la superficie soporte, lo que permite conformar paneles con una cantidad reducida de silicio, y de paso obtener un valor de EROI alto [77]. En lo respectivo a sus desventajas, Poseen un problema de inestabilidad en su rendimiento respecto a los valores nominales, siendo muy sensibles a factores como la temperatura.

-GaAs: Estos paneles de arseniuro de galio [77] poseen una alta eficiencia (>30%) y un grosor reducido (1-2 μ m) debido por un lado a las grandes características del galio como semiconductor y por otro lado a la estructura cristalina de la célula (similar a la del diamante). Como desventajas estos paneles poseen Germanio monocristalino, un mineral caro y un proceso de fabricación muy costoso energética y monetariamente. Estas desventajas han trasladado esta tecnología hacia sectores muy específicos como el aeroespacial.

-CIGS: Los paneles de Indio cobre galio diseleniuro [34], [81], [82] compiten actualmente contra los paneles de telururo de cadmio con la ventaja de no poseer cadmio (que es un metal muy tóxico y nocivo para la salud humana y del medio ambiente), de contar con una mayor eficiencia y de presentar una mayor flexibilidad constructiva lo que permite su uso en vehículos por ejemplo. En contrapartida son susceptibles al daño por humedad.

-CdTe: Los paneles de telururo de cadmio [78], [79] son los paneles más delgados y baratos del mercado, pero también poseen una baja eficiencia y rendimiento. Estos paneles son los que menor huella de carbono presentan, por otro lado, poseen cadmio (metal de alta toxicidad y muy perjudicial para la vida animal y el medio ambiente) en su construcción lo cual hace vital su reciclado y tratamiento tras su periodo de vida útil.

2.3.3.1.3 Perovskitas

Actualmente están surgiendo nuevas células fotovoltaicas orgánicas en la búsqueda de una tecnología eficiente, barata, con menores residuos, más fácil de reciclar y con mejores características constructivas (peso, flexibilidad...). En esta búsqueda están destacando en la actualidad los materiales de estructura perovskita [83], [84]. Los materiales tipo perovskita utilizados para fabricar celdas solares fotovoltaicas se caracterizan por tener un catión

voluminoso orgánico o inorgánico como el metilamonio o el cesio, un catión metálico como el plomo y un anión haluro como el bromo o el yodo. Cabe destacar que el alto coeficiente de absorción de la perovskita permite que estas celdas se puedan considerar de capa fina (thin-film). Posee unas excelentes propiedades optoelectrónicas y su rendimiento en laboratorio es más elevado que las células de película fina (Imagen 14). Como inconvenientes nos encontramos con una tecnología totalmente nueva, que no se ha probado a gran escala, con un uso grande de sustancias tóxicas como el plomo, con unos costes de fabricación grandes en la actualidad y con un ciclo de vida muy bajo debido a la degradación de las sustancias orgánicas que las componen.

2.3.3.1.4 Células orgánicas (OPV)

Este tipo de células [85] son todavía relativamente nuevas. Existen 3 tipos, moleculares, de polímeros orgánicos e híbridas. Su proceso de fabricación es sencillo y se puede asimilar a la impresión de una capa semiconductor sobre un sustrato. Estas células apenas provocan un reducido impacto ambiental, pues son biodegradables y su proceso de fabricación es poco costoso energéticamente. Además, se adaptan a cualquier superficie (incluso transparente) y su sencilla instalación y transporte las hacen ideales para equipos portátiles. Como principales desventajas se pueden citar su rápida degradación y su poca estabilidad, lo que las está lastrando enormemente en el mercado al igual que las perovskitas.

2.3.3.1.5 Células fotovoltaicas multiunión

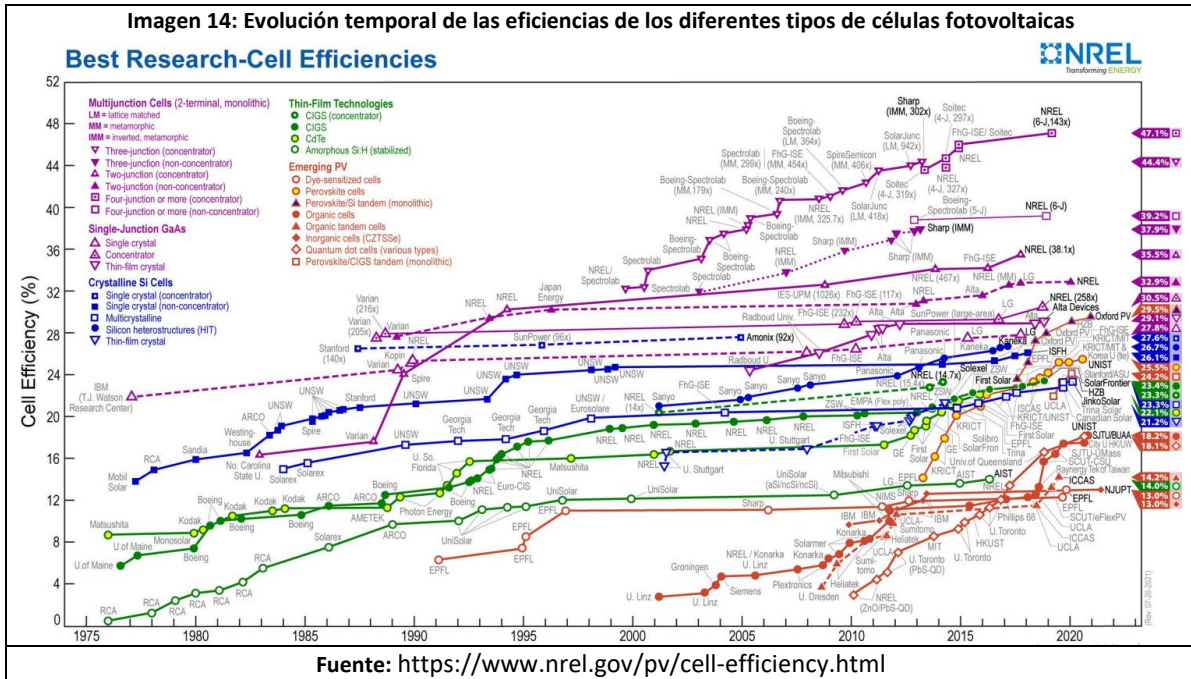
Una célula fotovoltaica multiunión [34], [86] cuenta con múltiples uniones p-n de diferentes materiales semiconductores (también llamadas tándem se basan en apilar diferentes tipos de células). Cada unión p-n de cada material, produce corriente eléctrica en respuesta a una diferente longitud de onda de la luz, lo que aumenta la eficiencia de conversión de la energía de la luz solar a energía eléctrica utilizable. Una célula simple solo produce corriente eléctrica a partir de luz solar de una única longitud de onda.

Las células comerciales en tándem actualmente obtienen un rendimiento superior al 30% con iluminación sin concentrar y llegan a obtener un 40% de rendimiento con luz solar concentrada. Sin embargo, este tipo de células consta de una mayor complejidad y precio de fabricación, lo que ha limitado su uso a funciones especiales, como su uso en el sector aeroespacial o en los concentradores fotovoltaicos.

2.3.3.1.6 Evolución temporal de las eficiencias de las células fotovoltaicas

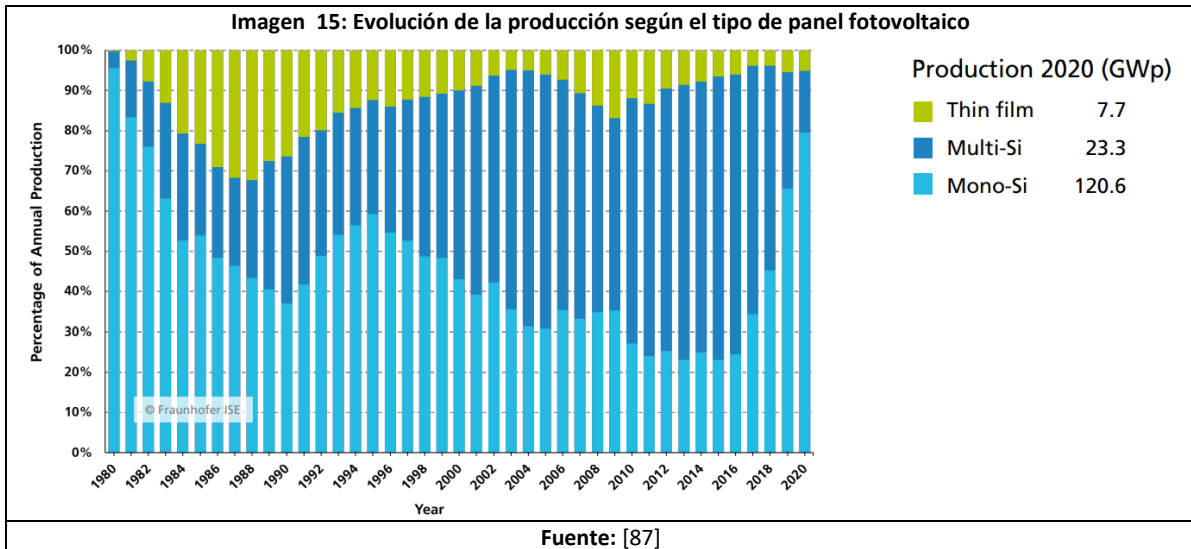
Tras la explicación relativa a los diferentes tipos de células y paneles se muestra una imagen (Imagen 14) que muestra la mejora de rendimiento a lo largo de los años de los diferentes tipos de células solares fotovoltaicas justificando lo explicado en cada uno de los apartados de las células. Las células orgánicas y las de silicio amorfo son las que menor eficiencia presentan con un 18% y un 14% respectivamente en 2021. Las células CIGS y CdTe poseen eficiencias similares con valores de 23,4% y 22,1% y son superadas ligeramente por las perovskitas, con unos valores entre el 24,2% y el 25,5%. Las células compuestas por silicio policristalino obtienen una eficiencia similar a los paneles CIGS tomando un valor de eficiencia de 23,3% y las células monocristalinas destacan sobre todas las comentadas ya, con una eficiencia que

alcanza el 26,7% en 2021. Las células multiunión o tándem son, lógicamente, las que mayor eficiencia obtienen, ya que se componen de distintos tipos de células superpuestas logrando eficiencias de hasta un 39,2%.



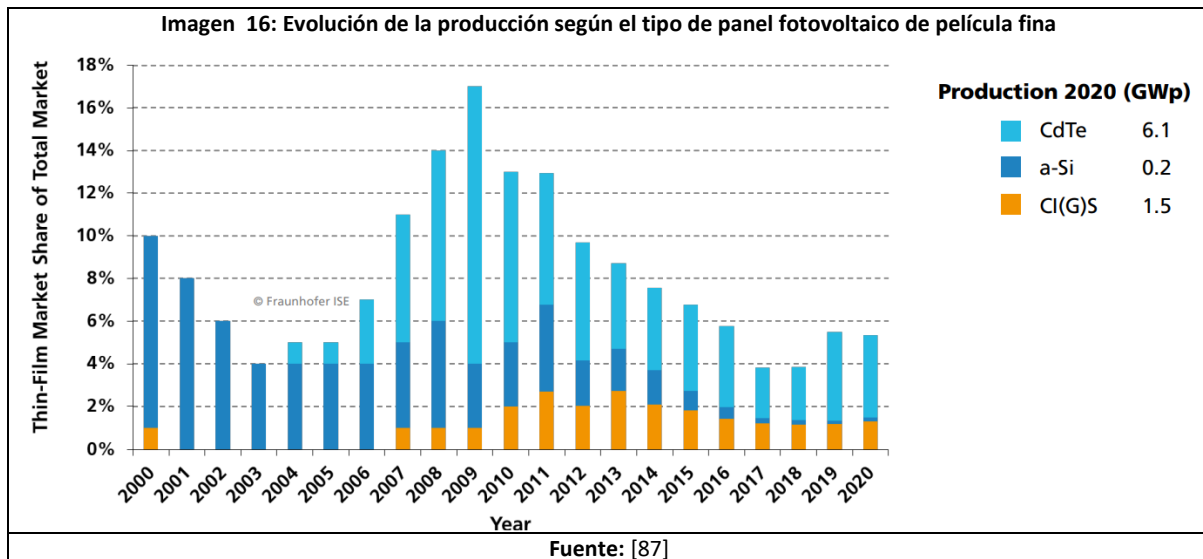
2.3.4 Situación actual y perspectiva de futuro de las tecnologías fotovoltaicas en el mercado

Tras explicar las características de los diferentes tipos de placas o células fotovoltaicas se enunciará a continuación la situación actual en el mercado, con el fin de conocer las células usadas realmente ahora y la evolución que podría tomar el mercado fotovoltaico en el futuro.



En la Imagen 15 se puede observar el porcentaje de producción mundial de los distintos grandes grupos de paneles fotovoltaicos [87]. Destacan notablemente el porcentaje de producción de los paneles basados en silicio cristalino, debido al abaratamiento de estos

últimos a lo largo de los años y a su gran eficiencia, lo que redunda finalmente, en un reducido tiempo de payback o de recuperación de la inversión [52], [75], [77].



En lo respectivo a los paneles de película delgada, solo tienen presencia representativa actualmente los paneles CdTe, los ClGS y los de silicio amorfo. Siendo los CdTe los más demandados actualmente y los de silicio amorfo los que poseen una demanda muy reducida [45], [87].

Varios autores e instituciones [43], [44], [87]–[89] han establecido estimaciones en lo respectivo a la evolución del mercado en un futuro próximo, en estas estimaciones destacan varios aspectos. En primer lugar, los paneles basados en silicio cristalino siguen dominando el mercado con porcentajes superiores al 85%. En segundo lugar, los paneles de película delgada poseen un porcentaje de mercado reducido y repartido entre los diferentes tipos de estos paneles (destacando la aparición del GaAs en alguna estimación [89], ya que se prevé una reducción en los costes de esta tecnología), aunque destacan especialmente las tecnologías CdTe y ClGS en detrimento de la demanda de la tecnología de silicio amorfo que será residual. Por último, la literatura, de forma general, no espera una producción de los paneles orgánicos o de perovskitas representativa en un futuro cercano [34], [44], [52], [87] debido a sus problemas y su temprano estado de desarrollo. Además, la falta de datos sobre los requerimientos materiales de estas tecnologías complica su estudio. Como excepción la IEA si ha planteado un escenario para 2040 con la presencia de perovskitas (estimando solo el plomo de esta tecnología debido a la falta de datos).

2.3.5 Reciclaje de los paneles, procesos empleados y tasas de reciclado

El reciclado de los paneles es una de las facetas que puede hacer aumentar la demanda de esta tecnología en el futuro, ya que según diversos autores es capaz de reducir tanto el payback time de esta tecnología, como su demanda de minerales primarios [39], [42], [90]–[93]. En general, es posible distinguir cuatro fases en el reciclado de los paneles solares [40], [91], [92]. El desmantelamiento, la delaminación, la separación y, por último, el purificado de los materiales obtenidos.

Desmantelamiento: corresponde a la acción de separar el marco (generalmente de aluminio) y el cableado externo del resto del panel. Este método suele llevarse a cabo de forma manual y/o con procesos mecánicos (trititación y separación mediante instrumentos físicos).

Delaminación: Separación del vidrio protector y la resina EVA de las células fotovoltaicas. Este paso es fundamental pues determina en gran medida la tasa de recuperación de los materiales.

Métodos [40]:

- **Desintegración Física:** Este método permite tener un gran control del manejo de los residuos, pero provoca el mezclado de algunos materiales con la resina, la destrucción de las células como conjunto y la degradación de algunos materiales
- **Disolución en disolvente:** Este proceso es capaz de eliminar fácilmente la resina separando el vidrio y además se puede reutilizar el disolvente. Sin embargo, requiere equipos costosos, es peligroso para la salud humana y requiere tiempos variables de reacción.
- **Disolución en ácido nítrico:** Disolución capaz de eliminar totalmente la resina y la capa metálica de la oblea, lo que permite recuperar la célula completa. En cambio, el uso de esta disolución provoca emisiones peligrosas y provoca defectos en la célula debido al ácido inorgánico.
- **Tratamiento térmico:** Este tratamiento elimina la resina y posibilita la recuperación completa de la célula, pero implica un consumo elevado de energía y unas emisiones peligrosas.
- **Irradiación ultrasónica:** Es utilizado como complemento en el tratamiento de disolución con el objetivo de acelerar el proceso a cambio de encarecer el proceso y de tener que encargarnos del tratamiento de la solución residual.
- **Radioterapia:** Este proceso elimina fácilmente la resina, en cambio, es lento y muy caro.

Separación: Separación de los distintos materiales que componen la célula solar, principalmente Silicio, cobre y plata.

Métodos [40]:

- **Proceso mecánico seco y/o húmedo:** Es un método no químico, sencillo que requiere una reducida cantidad de energía. Sin embargo, no es capaz de extraer los sólidos disueltos.
- **Decapado:** Este proceso es sencillo y eficaz, puede recuperar materiales de gran pureza a costa de una alta demanda energética (proceso a alta temperatura) y el empleo de productos químicos.
- **Erosión:** Es un tratamiento que no necesita productos químicos y permite la recuperación del vidrio. Por otro lado, requiere un proceso adicional de purificación.

- Chorro de vacío: Este método permite la eliminación de la capa de semiconductores sin necesidad de productos químicos y puede recuperar el vidrio, pero es un proceso relativamente largo y con emisión de diversas partículas metálicas.
- Tensioactivos: Permite la eliminación total de los metales del vidrio y los tensioactivos son reutilizables pero las emulsiones empleadas se deben adaptar a las diferentes tecnologías de las células y el tiempo de actuación depende del caso.
- Lixiviación: Este proceso elimina completamente el metal del vidrio y posibilita la extracción posterior de las soluciones metálicas. Sin embargo, cuenta con un uso elevado de productos químicos y un control complicado de las reacciones químicas.
- Flotación: Método relativamente sencillo con un uso reducido de productos químicos donde el material se separa en varias etapas de flotación.

Purificación: Purificación de algunos materiales con el fin de poder usarlos en aplicaciones específicas como la producción de nuevas placas fotovoltaicas.

Métodos [40], [91]:

- Hidrometalurgia: Es un procedimiento comercialmente aplicable con emisiones bajas y una fácil gestión del agua. Como desventajas cuenta con muchos pasos de separación y absorción (Complejidad alta) y el proceso químico debe adaptarse a las tecnologías de las células a reciclar. Además, aunque el agua sea fácil de gestionar en caso de accidente y vertido esta agua puede tener un alto carácter contaminante y tóxico.
- Pirometalurgia: Es un proceso industrialmente establecido donde la materia prima puede contener diferentes materiales (se puede estandarizar el proceso). Esta materia es sometida a altas temperaturas en hornos lo que provoca que algunos materiales se pierdan en la escoria, que aparezcan metales pesados y que sean necesarios una gran cantidad de energía y emisiones de gases contaminantes.

Los métodos enunciados pueden combinarse y debido a la juventud de esta tecnología no se ha establecido ningún estándar de reciclado de los paneles. Esto provoca que haya un gran número de procesos de reciclado distintos con diferentes ventajas e inconvenientes y otorga una gran dificultad para saber cuánto se está reciclando realmente, con que coste energético y cuántos minerales podemos recuperar en la actualidad.

Diversos autores coinciden en su estimación de que estos procesos pueden recuperar una cantidad de minerales elevada proveniente del reciclado de los paneles con porcentajes de recuperación superiores al 80% en peso [41], [42] (incluso en algunos procesos superior al 95%). Por otro lado, también enuncian que actualmente los métodos empleados comercialmente (que buscan por encima de todo la rentabilidad económica y la posibilidad

de estandarización) recuperan una baja cantidad de los minerales, no llegando a un porcentaje de recuperación del 30% [39], [40], [42].

2.3.5.1 Revisión bibliográfica, reciclado de los paneles, tasas de reciclado

Finalmente, tras explicar los diferentes procesos de reciclado, podemos enunciar las cifras exactas de recuperación de los diferentes minerales enunciadas por varios autores en la Tabla 2 (Los métodos enunciados en la tabla se refieren a las metodologías de reciclado expresados por las referencias y enumerados por su orden de aparición):

Tabla 2: Índices de reciclado de los diferentes minerales que componen los paneles y procesos empleados según diferentes autores

	Ardente et al [39] (%)		Duflou et al [42] (%)			Vasilis et al [94](%)	Gangwar et al [41](%)	Chowdhury et al [40] (%)
Método	1	2	3	4	5	6	4	5
Al	92	94	78,1	86	86	-	86	-
Vidrio	9	88	89,6	98	98	-	98	90
Acero	-	-	92,7	98	98	-	98	-
Cu	-	-	34,7	85	95	-	85	-
Ag	0	94	-	74	95	-	74	-
Pb	-	-	-	-	-	96	-	-
Cd	-	-	-	-	-	-	-	95
Te	-	-	-	-	-	80	-	95
Si	0	95	-	-	-	-	-	-
Método 1	Desintegración física							
Método 2	Desmantelamiento, disolución en ácido e hidrometalurgia							
Método 3	Desintegración física y proceso mecánico							
Método 4	Desmantelamiento, disolución en ácido, pirometalurgia e hidrometalurgia							
Método 5	Desmantelamiento, proceso físico, disolución en ácido, pirometalurgia e hidrometalurgia							
Método 6	Desintegración física, disolución en disolvente, hidrometalurgia							

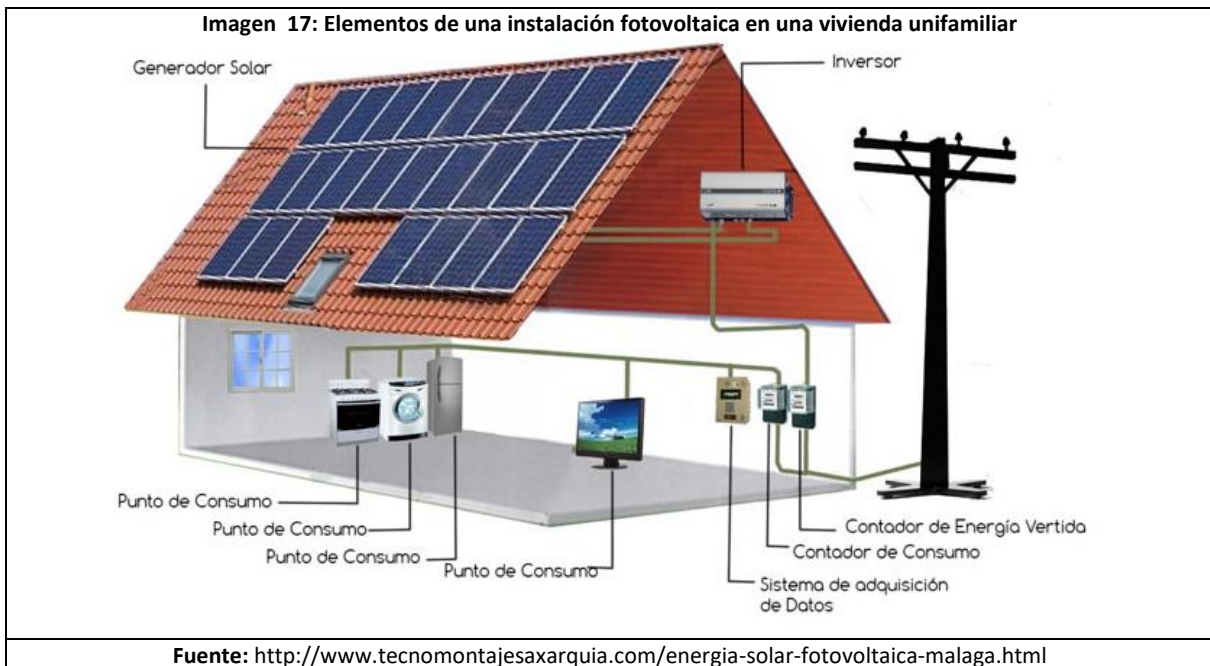
Fuente: Elaboración propia con datos de [39]–[42], [94].

Tras observar los datos de la tabla anterior podemos obtener diferentes conclusiones. Por un lado, técnicamente somos capaces de recuperar una gran cantidad de minerales de gran pureza en el reciclado de los paneles, pero por otro, comercialmente no interesa realizar estas recuperaciones tan profundas de minerales de los paneles en la actualidad por lo que se suele recurrir a procesos simples de desintegración y separación física (procesos mecánicos) [39], [40], [42]. El gasto de energía, materiales y mano de obra de los procesos de reciclado no permite a las empresas utilizar los procesos que reportan mayor recuperación de minerales y estas eligen procesos más estandarizados y simples, pero con menor recuperación mineral como la trituración y la pirometalurgia [42].

2.3.6 Tipos de instalaciones fotovoltaicas

2.3.6.1 Instalación en viviendas

En pocos años la instalación de paneles fotovoltaicos en viviendas a tomado gran importancia, en primer lugar, impulsado por diferentes normativas de obligatorio cumplimiento impuestas por diferentes órganos de gobierno [95]–[97] y, en segundo lugar, por el aumento de la rentabilidad a medio y largo plazo de los paneles fotovoltaicos [87] (han reducido su precio a lo largo del tiempo, aumentado su eficiencia y además se ha incrementado el precio de la electricidad).



2.3.6.2 Instalación en industrias y grandes edificios no residenciales

Al igual que en el sector residencial, en el sector industrial la instalación de paneles está aumentando a lo largo de los años, provocado por las diferentes normativas gubernamentales de construcción [95]–[98] y por la posibilidad gracias a esta tecnología de reducir la factura eléctrica y la dependencia exterior de muchas industrias.



2.3.6.3 *Instalación en plantas fotovoltaicas*

La necesidad de obtener una energía sin depender de los combustibles fósiles y sin emisión directa de gases de efecto invernadero y contaminantes, unida al abaratamiento y mejora de la eficiencia de las células solares [87] ha provocado el aumento exponencial de las plantas de generación eléctrica que emplean este tipo de tecnología en todo el mundo [59], [99]. En este contexto podemos encontrar dos tipos fundamentales de plantas fotovoltaicas:

- Plantas de gran potencia=>1MW:

Estas plantas se sitúan en puntos que garanticen una gran rentabilidad y eficiencia de funcionamiento de los paneles, logrando un precio de generación de la electricidad competitivo (aunque su mayor demanda de espacio equipara la generación por superficie [100] de instalaciones más pequeñas). Este tipo de instalaciones de gran potencia pueden contar con seguidores solares para aumentar su eficiencia. Estas plantas suelen demandar la construcción y mantenimiento de grandes infraestructuras de transporte de electricidad, carreteras, suministro de agua, etc... que deben ser tenidas en cuenta de cara a la rentabilidad energética y monetaria de la instalación. Estas grandes plantas suelen ser propiedad del estado y/o de grandes empresas de carácter privado.

Imagen 19: Instalación fotovoltaica de La Mula (494 MW)



Fuente: <https://autosolar.es/blog/noticias-nacionales/la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-europa-esta-en-espana>

- Plantas solares de pequeña potencia o huertos solares<1MW:

Este tipo de plantas de pequeño tamaño no suelen presentar eficiencias de producción tan altas como las plantas más grandes, debido entre otros factores a uso de sujeciones fijas para los paneles y, en muchas ocasiones, al aprovechamiento de tierras (en muchas ocasiones agrícolas) cuya irradiación puede no ser tan óptima como la que se puede dar en una gran planta. Pero, la menor necesidad de espacio de estas plantas permiten a este tipo de instalaciones poseer una generación por superficie (w/m^2) similar a las grandes instalaciones [100]. Además, aunque estas plantas demandan menos infraestructuras, emplean más materiales en algunos elementos por MW de potencia que las grandes plantas, ya que se ven perjudicadas por la relación kg/MW de muchos elementos como inversores, transformadores, etc... Estas instalaciones suelen pertenecer a particulares y/o empresas (incluso puede haber varios titulares que compartan gastos comunes de la instalación).

Imagen 20: Huerto solar (<1MW)

Fuente: <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/instalar-huerto-solar>

2.3.6.4 Instalación en otros dispositivos

Dispositivos como vehículos [101], cargadores o baterías móviles pueden montar actualmente paneles fotovoltaicos, buscando mediante esta tecnología aumentar su autonomía o conseguir alimentación sin depender de la red o de otros elementos.

Imagen 21: Panel solar en el techo de un TOYOTA prius

Fuente: <https://autosolar.es/blog/noticias-nacionales/la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-europa-esta-en-espana>

2.4 Parámetros técnicos e intensidades materiales de la tecnología fotovoltaica

Los paneles solares requieren de minerales para su fabricación, siendo alguno de ellos escaso en nuestro planeta, por eso es necesario tener en cuenta la composición y eficiencia de los paneles, tomando datos de varios autores que se mostrarán clasificados por tipo de célula solar y material. En este apartado se ejecutará una revisión bibliográfica con el fin de, posteriormente, seleccionar los valores más robustos de intensidades materiales y eficiencias. Una vez seleccionados estos valores (empleados en el análisis estático y como base del análisis dinámico), dependiendo del escenario escogido se implementarán tendencias de reducción de intensidades materiales o de mejora de la eficiencia a lo largo de años intentando imitar a la evolución temporal de la reducción de la intensidad material y con ello, estimar los datos más reales posibles de cara al análisis dinámico.

2.4.1 Selección de instalaciones tipo representativas previas al estudio

Para obtener las intensidades materiales de las tecnologías fotovoltaicas debemos seleccionar antes las instalaciones tipo en las que se basará este estudio. Estas instalaciones deben ser lo más representativas posible respecto a los sistemas que se instalan actualmente y en un futuro próximo, pero debemos tener en cuenta que no hay dos instalaciones fotovoltaicas iguales. En primer lugar, se tendrán en cuenta las tecnologías de silicio mono y policristalinas (en el apartado enfocado a las células se toman juntos ambos tipos de paneles de silicio debido a que los datos encontrados en la bibliografía no suelen distinguir entre ellos), CdTe y CIGS basándonos en las estimaciones futuras del mercado enunciadas en el apartado 2.3 de este documento.

Los tipos de instalaciones que se han elegido para la evaluación son dos:

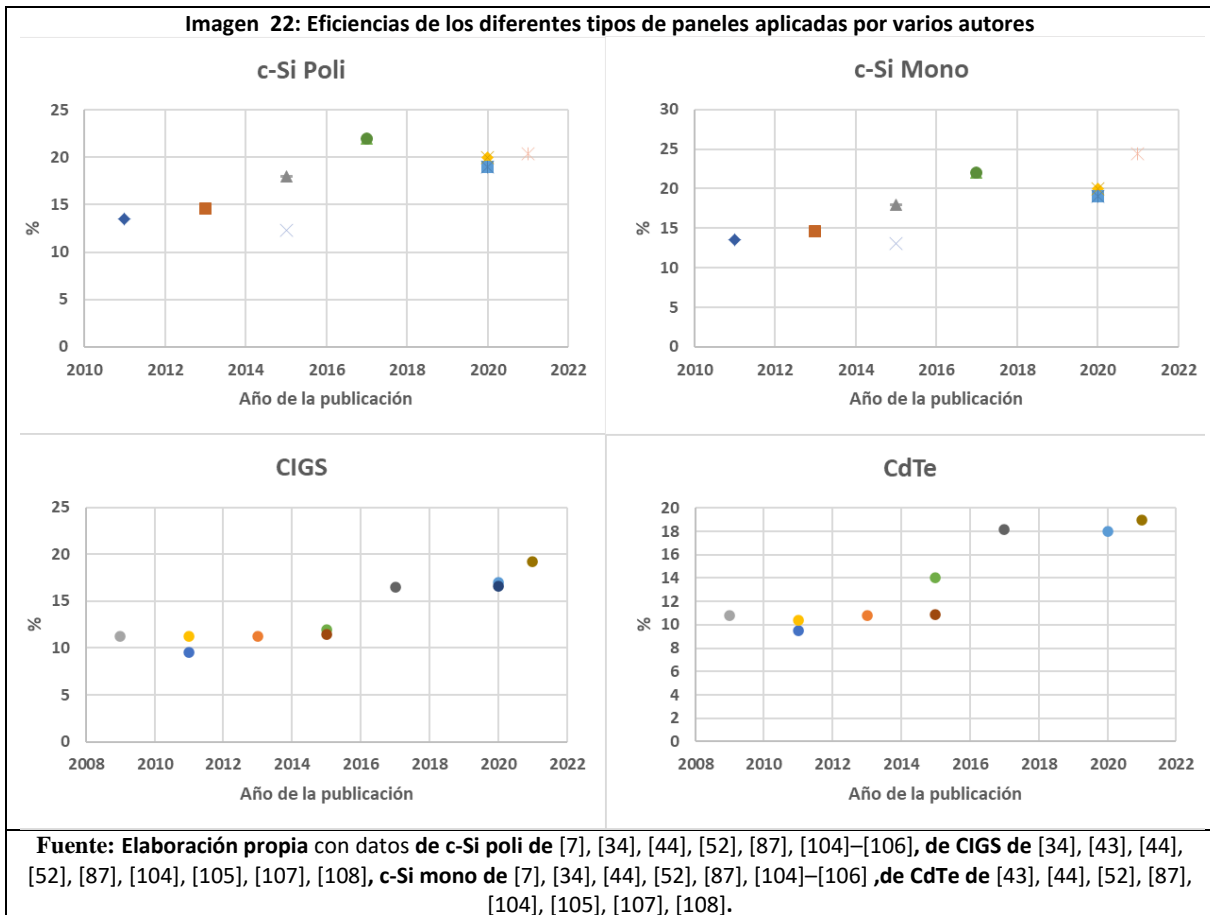
- I Instalaciones de suelo: Se han contemplado instalaciones de suelo de 1MW de potencia con paneles fijos. Ya que esta instalación, que cuenta con una potencia media, puede ser representativa de instalaciones más potentes pero también de instalaciones más pequeñas, como los huertos solares [100]. Se ha elegido una instalación con un inversor central de 1MW de potencia y un único transformador de 1 MVA de potencia [102].
- II Instalaciones de tejado: Se han escogido instalaciones fotovoltaicas de 2,5kW de potencia con paneles fijos, ya que, estas representan muy bien los sistemas que se suelen instalar en las viviendas unifamiliares y en edificios de pequeño tamaño [88]. Se ha escogido un sistema con un inversor de 2,5kW [88] y este tipo de instalaciones no cuentan con transformador, ya que ese trabajo lo ejecuta el inversor.

Se ha elegido como panel comercial base el SUN POWER Maxeon 5 [103], un panel monocristalino que cuenta con 2,12m², 450W de potencia y un 22,2% de eficiencia. Las especificaciones y parámetros técnicos de este panel nos servirán para obtener aspectos, como la superficie de cada tipo de panel por MW de potencia, con los que, a su vez, hallar las intensidades materiales de algunos elementos de la tecnología fotovoltaica (apartado 2.4.2.1).

2.4.2 Revisión bibliográfica, eficiencias energéticas de los paneles

En este apartado se muestran las eficiencias energéticas de los distintos tipos de paneles fotovoltaicos obtenidas de la bibliografía. Estos datos nos otorgan la posibilidad de conocer la eficiencia actual de los paneles y de estimar su posible evolución a lo largo del tiempo.

Como se puede observar en los gráficos (Imagen 22) todas las tecnologías muestran tendencias ascendentes en su eficiencia, siendo la tecnología basada en silicio cristalino la que presenta una mayor eficiencia y los paneles de película fina son los que presentan unos valores más reducidos.



En las gráficas se observa las eficiencias citadas por las diferentes referencias a lo largo de los años. Como se ha enunciado con anterioridad, como algunas referencias no indican el tipo exacto del panel de silicio, se han incluido los datos en ambas gráficas (mono y poli).

2.4.2.1 Selección de las eficiencias energéticas de los paneles y parámetros técnicos

Se ha elegido como eficiencias base finalmente las enunciadas por NREL [109], ya que en las gráficas se aprecia una clara tendencia temporal que nos indica que debemos escoger los paneles más recientes buscando la mayor exactitud. La eficiencia se usará para ver el número y los m² de paneles necesarios para llegar a una instalación de 1 MW de potencia (Tabla 3) en el análisis estático y como punto de partida del análisis dinámico.

Tabla 3: Eficiencia y potencia de los paneles empleados en la tecnología fotovoltaica

	c-Si Mono	c-Si poli	CdTe	CIGS
Eficiencias [109]	24,4%	20,4%	19%	19,2%
Potencia en el panel (W/panel)	495	413,85	385.45	389,51
Potencia por superficie de panel (W/m ²)	233,49	195,21	181,82	183,73
Superficie de panel por MW (m ² /MW)	4282,83	5122,60	5500,05	5442,76

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [103], [109].

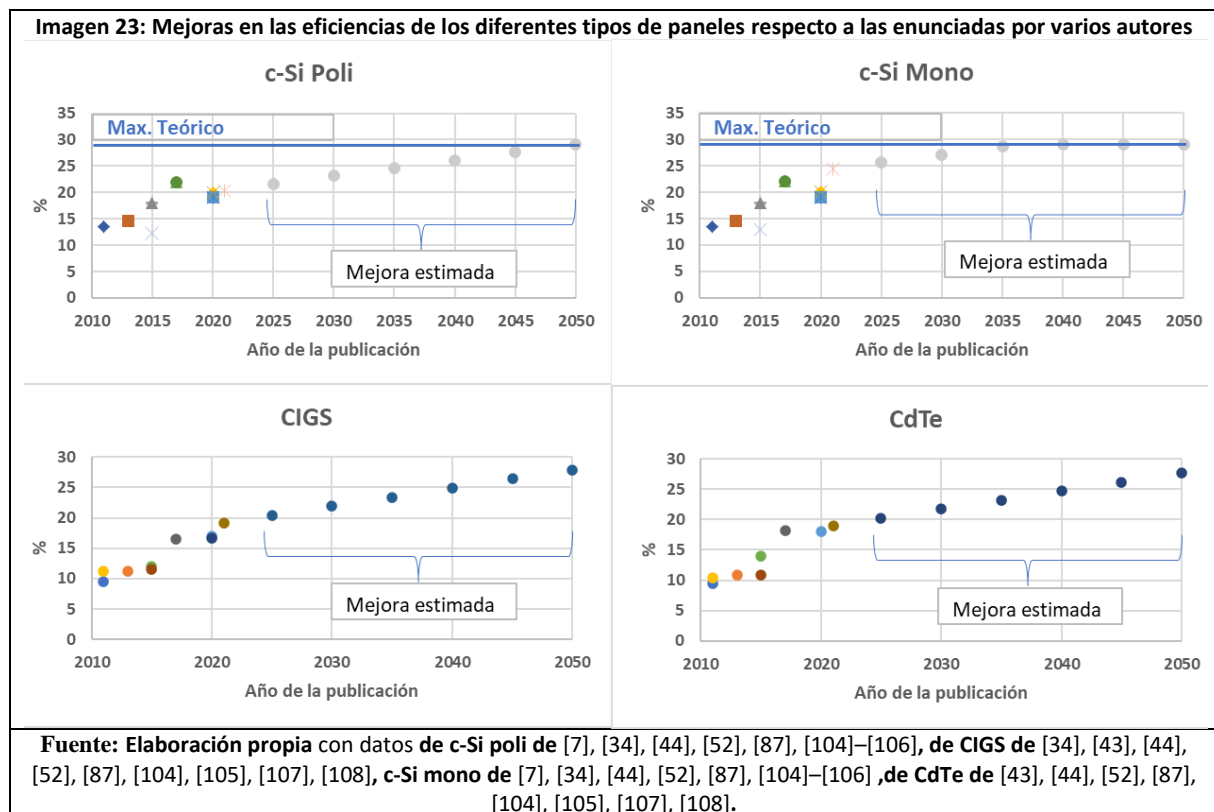
Se ha adaptado el panel comercial elegido (apartado 2.4.1) a los 24,4% de eficiencia escogidos aumentando su potencia de forma lineal con la eficiencia. Con la superficie del panel, se han hallado el resto de valores para el panel monocristalino. Para el resto de los paneles solo se

han variado estos valores de forma proporcional a la diferencia de la eficiencia con el panel de silicio monocristalino.

2.4.2.2 Evolución de las eficiencias en el análisis dinámico

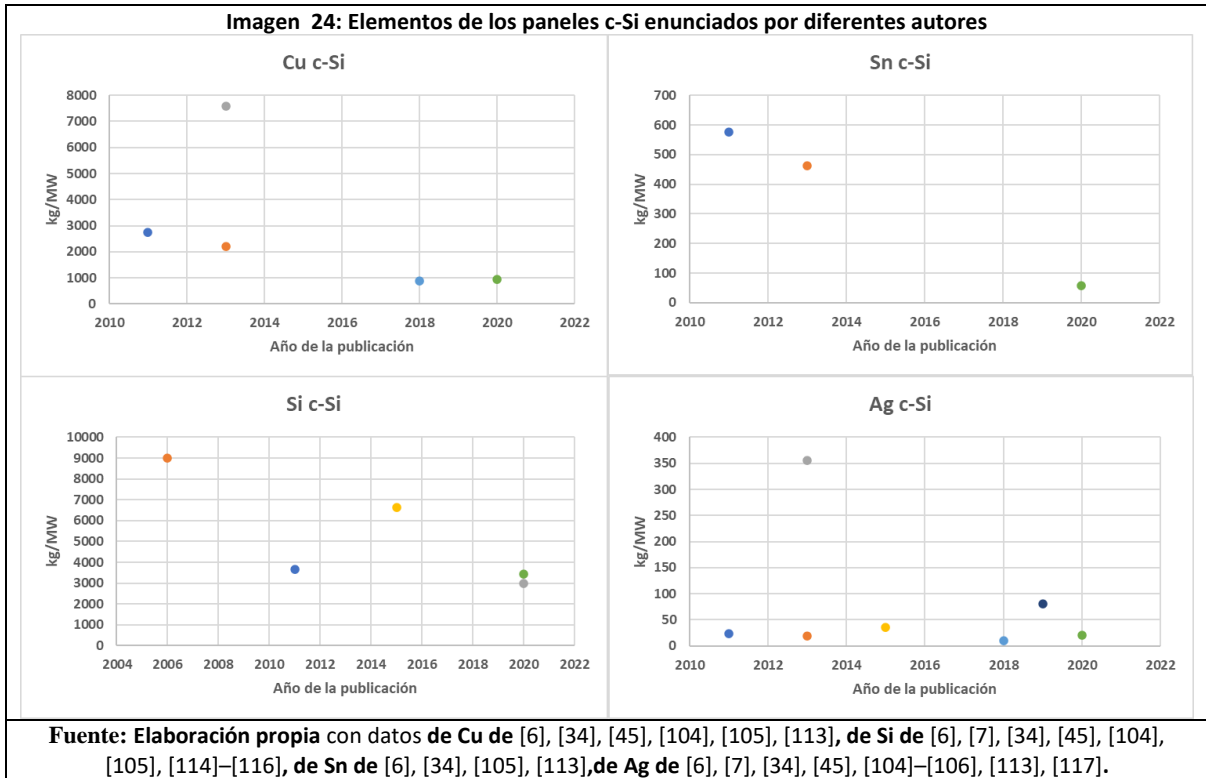
Como se ha citado en el apartado anterior, las eficiencias enunciadas en la Tabla 3 serán las eficiencias de partida de cara al análisis dinámico, ya que observando su evolución a lo largo del tiempo se ha optado por implementar una mejora de las eficiencias anual en algunos escenarios del modelo al igual que han hecho otros autores [34]. Se ha estimado un 0,3%/año de mejora esperada (Imagen 23) en la eficiencia de todas las tecnologías tras observar las tendencias de mejora de la eficiencia de años anteriores [110]. Aunque, la última fuente citada solo enuncia la evolución de la eficiencia para paneles de silicio, se asumirá una similar evolución para los paneles de película fina debido a la falta de datos.

Se debe enunciar también, que los paneles fotovoltaicos poseen una eficiencia máxima teórica, llamada límite de Shockley-Queisser [111]. Esta máxima eficiencia es del 29,1% en los paneles de silicio y del 33,7% en los paneles de película fina [112].



2.4.3 Revisión bibliográfica, Células c-Si

En este apartado enunciaremos los requerimientos materiales de las células compuestas de silicio cristalino. En primer lugar, se mostrará la evolución temporal de los requerimientos que se pueden obtener de varios autores Imagen 24 y, en segundo lugar, se muestran los requerimientos obtenidos de un único autor (Tabla 4):



Tras observar los requerimientos enunciados por diferentes autores se muestran los requerimientos expuestos por solo un autor (Tabla 4):

Tabla 4: Elementos de los paneles c-Si enunciados por un único autor

	Al	Ni	Pb	Mg
Gervais et al [34] (kg/MW)	184	-	62	-
Moss RL et al [105], [113] (kg/MW)	-	-	-	53,5
Elshaki et al [104] (kg/MW)	-	1,1	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos de [34], [105], [113], [117].

Una vez expuestos los requerimientos materiales se pueden observar dos cosas, en primer lugar, que la bibliografía no distingue entre paneles mono y policristalinos, y por otro, que a lo largo del tiempo, en general, hay una tendencia a reducir los requerimientos debido a la evolución tecnológica.

2.4.3.1 Selección de intensidades materiales, células c-Si

Tras observar los requerimientos enunciados por las diferentes referencias, se deben elegir los requerimientos (Tabla 5) para realizar el cálculo del EROI en el análisis estático y como punto de partida del análisis dinámico de este trabajo.

Tabla 5: Intensidades de las células C-Si seleccionadas para el análisis

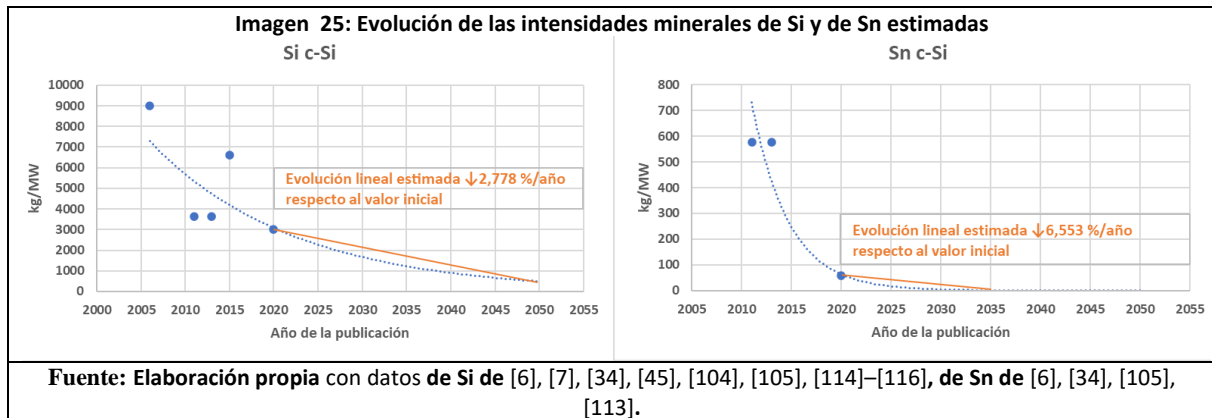
	Al [34]	Ag [34]	Cu [34]	Ni [104]	Si [116]	Sn [34]	Pb [34]	Mg [105], [113]
Intensidad material (kg/MW)	184	21	946	1,1	3000	59	62	53,5

Fuente: Elaboración propia con datos de [34], [104], [105], [113], [116].

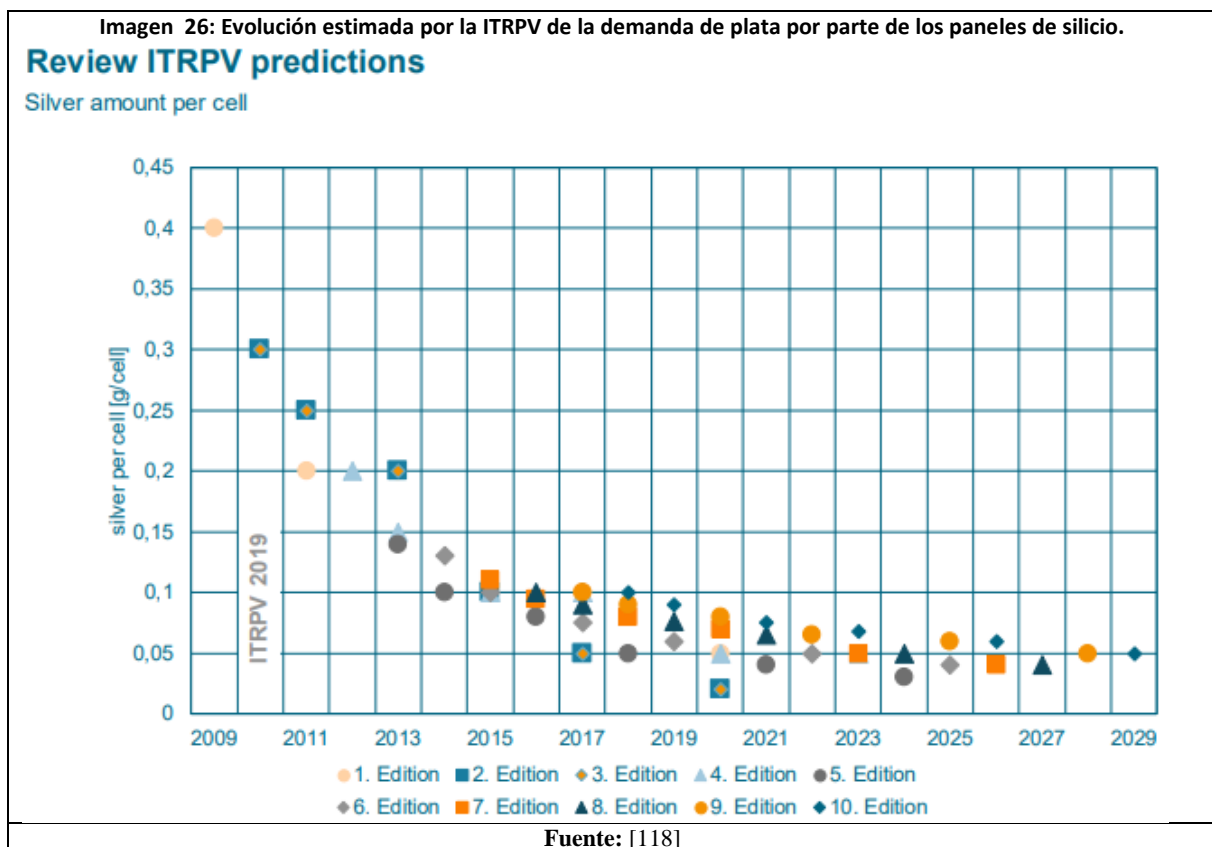
En este caso, observando las tendencias temporales de reducción de minerales, se ha optado por la elección de los requerimientos enunciados más recientemente.

2.4.3.2 Evolución de las intensidades materiales de las células C-Si

Como se ha citado en el apartado anterior, las intensidades enunciadas en la Tabla 5 serán las intensidades iniciales de cara al análisis dinámico, ya que observando su evolución a lo largo del tiempo (Imagen 25), se ha optado por implementar una estimación de la reducción de las intensidades materiales anual en el modelo, al igual que han hecho otros autores [34].



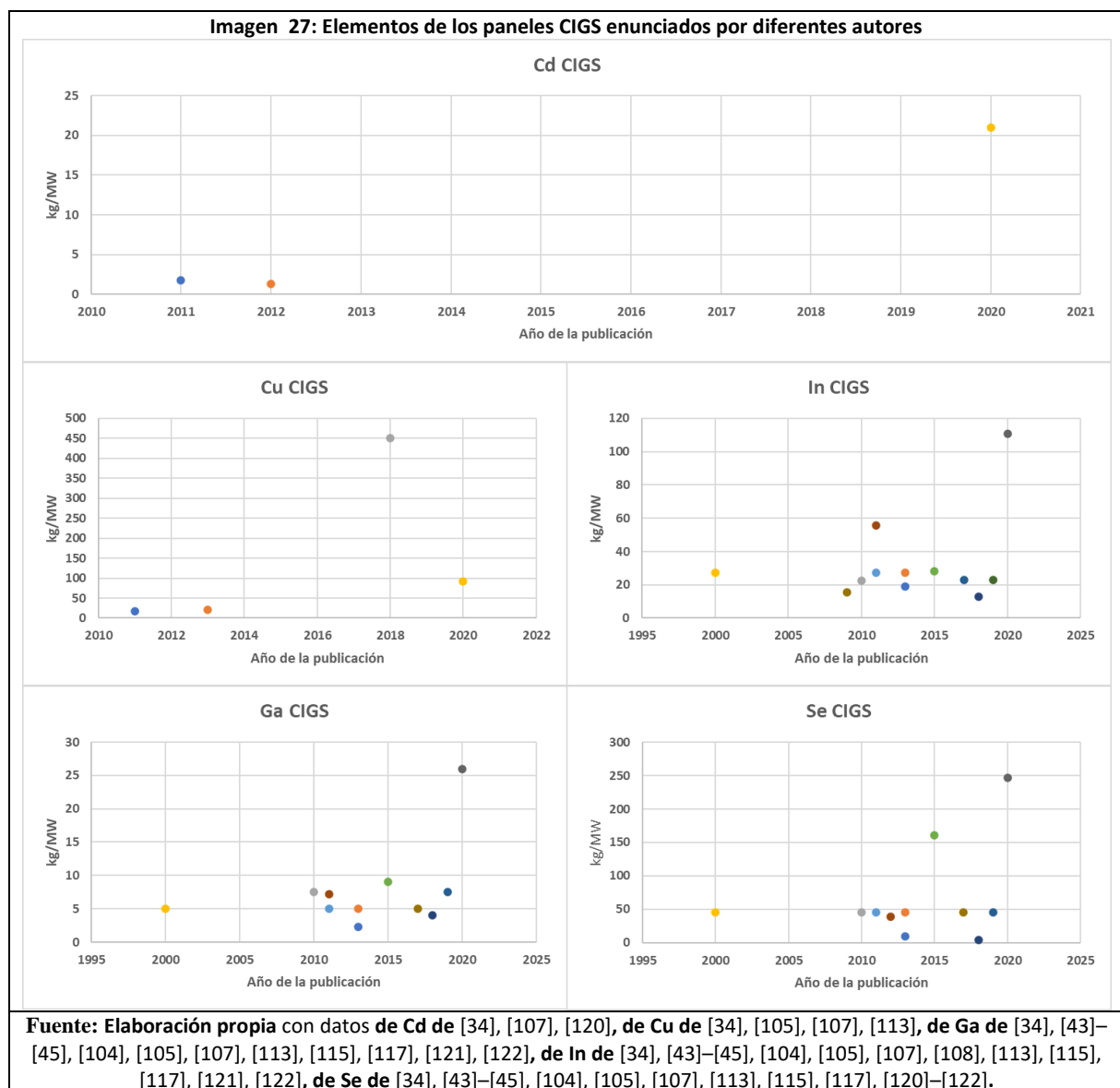
En nuestro caso, se han podido observar las tendencias de reducción en el silicio y el estaño que componen las células, aun así, tratando de estimar diferentes posibilidades de la reducción de intensidad material a lo largo del tiempo (como han hecho las referencias que también han implementado estas mejoras [34]), se han escogido diversos valores de reducción en la intensidad material de las células en función del escenario escogido en la simulación.



Es de reseñar la situación de la plata, que además de reducir su intensidad en las células de silicio de forma independiente, se ha buscado sustituirla por cobre [119]. Aun así, referencias como la ITRPV (Imagen 26) [118] no estiman ya una mejora significativa en las intensidades minerales de plata por parte de los paneles de silicio, por esta razón se presentan distintos escenarios con distintas propuestas de reducción de la intensidad material en el análisis dinámico, intentando reflejar numerosas posibilidades.

2.4.4 Revisión bibliográfica, Células CIGS

En este apartado, enunciaremos los requerimientos materiales de las células CIGS expuestos por la bibliografía. En primer lugar, se mostrará la evolución temporal de los requerimientos que se pueden obtener de varios autores (Imagen 27), y en segundo lugar, se muestran los requerimientos obtenidos de un número reducido de autores (Tabla 6):



Tras observar los requerimientos enunciados por diferentes autores se muestran los requerimientos expuestos por un número reducido de autores (Tabla 6):

Tabla 6: Elementos de los paneles CIGS enunciados por un único autor

	Mo	Zn	Sn
Candelise et al [107] (kg/MW)	94,3	85,8	-
Moss RL et al [105], [113] (kg/MW)	-	-	5,95

Fuente: Elaboración propia con datos de [105], [107], [113].

En esta ocasión se observa una gran dispersión en los datos obtenidos para este tipo de paneles.

2.4.4.1 Selección de intensidades materiales, células CIGS.

Tras observar los requerimientos enunciados por las diferentes referencias, se deben elegir los requerimientos (Tabla 7) para realizar el análisis del EROI y requerimientos materiales de este trabajo

Tabla 7: Intensidades de las células CIGS seleccionadas para el análisis

	Cu [34]	Ga [117]	Cd [34]	In [117]	Se [117]	Mo [107]	Zn [107]	Sn [105], [113]
Intensidad material (kg/MW)	92	7.5	21	23	45	94,3	85,8	5,95

Fuente: Elaboración propia con datos de [34], [105], [107], [113], [117].

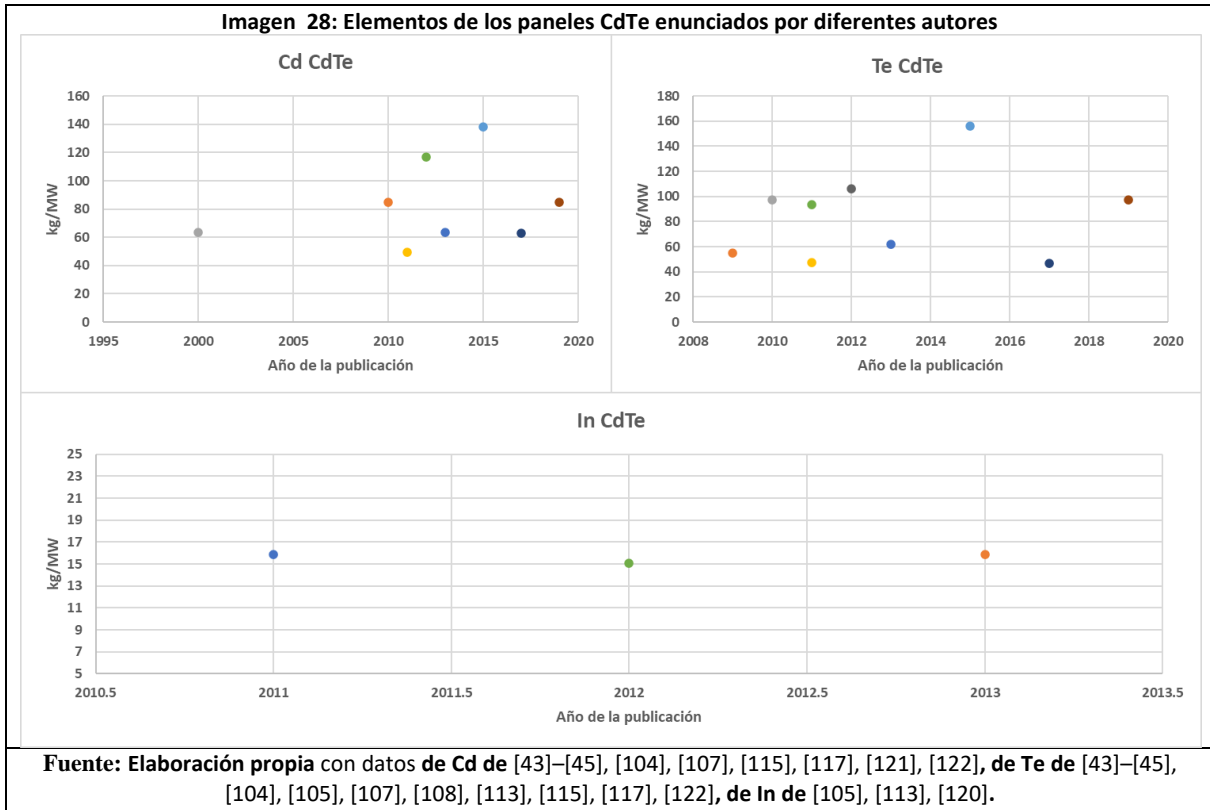
Se ha priorizado la elección de requerimientos enunciados lo más recientemente posible. Se ha tomado como referencia para el galio, el indio y el selenio a Elshaki et al [117] y no Gervais et al [34], porque los requerimientos enunciados por este último autor son muy dispares a los enunciados por la gran mayoría de la bibliografía.

2.4.4.2 Evolución de las intensidades materiales de las células CIGS

Como se ha citado en el apartado anterior, las eficiencias enunciadas en la Tabla 7 serán las intensidades iniciales de cara al análisis dinámico, ya que se ha optado por implementar una reducción de las intensidades materiales anual en el modelo al igual que han hecho otros autores [34] en función del escenario escogido en la simulación (tratando de estimar diferentes posibilidades de la reducción de la intensidad material a lo largo del tiempo). Como en la evolución temporal de las intensidades materiales (Imagen 27) no se pueden observar tendencias de reducción material (por lo menos a simple vista), se han escogido valores pequeños de reducción de 0%/año y 1,5%/año respecto al valor del año anterior en la intensidad material de las células, tras observar las referencias que también han implementado estas mejoras [34] y buscando reflejar numerosas posibilidades de reducción de la intensidad material.

2.4.5 Revisión bibliográfica, Células CdTe

En este apartado enunciaremos los requerimientos materiales de las células CdTe citados por la bibliografía. En primer lugar, se mostrará la evolución temporal de los requerimientos que se pueden obtener de varios autores (Imagen 28), y en segundo lugar, se muestran los requerimientos obtenidos de un número reducido de autores (Tabla 8):



Tras observar los requerimientos enunciados por diferentes autores se muestran los requerimientos expuestos por número reducido de autores (Tabla 8):

Tabla 8: Elementos de los paneles CdTe enunciados por un único autor

	Cu	Mo	Sn
Berger et al [123] (kg/MW)	42,8	-	-
Candélise et al [107] (kg/MW)	-	100,5	6,6
Moss RL et al [105], [113] (kg/MW)	-	21,4	-

Fuente: Elaboración propia con datos de [105], [107], [113], [123].

Una vez expuestos los requerimientos materiales se puede observar la alta dispersión que presentan los datos obtenidos de las referencias bibliográficas.

2.4.5.1 Selección de intensidades materiales, células CdTe

Tras observar los requerimientos enunciados por las diferentes referencias, se deben elegir los requerimientos (Tabla 9) para realizar el análisis del EROI y requerimientos materiales de este trabajo

Tabla 9: Intensidades de las células CdTe seleccionadas para el análisis

	Cu [123]	Cd [117]	In [105], [113]	Te [117]	Mo [105], [113]	Sn [107]
Intensidad material (kg/MW)	42,8	85	15,9	97,5	21,4	6,6

Fuente: Elaboración propia con datos de [105], [107], [113], [117], [123].

Se ha priorizado la elección de requerimientos enunciados lo más recientemente posible.

2.4.5.2 Evolución de las intensidades materiales de las células CIGS

Como se ha citado en el apartado anterior, las eficiencias enunciadas en la Tabla 7 serán las intensidades iniciales de cara al análisis dinámico, ya que se ha optado por implementar una reducción de las intensidades materiales anual en el modelo al igual que han hecho otros autores [34] en función del escenario escogido en la simulación (tratando de estimar diferentes posibilidades de la reducción de intensidad material). Como en la evolución temporal de las intensidades materiales (Imagen 28) no se pueden observar tendencias de reducción material (por lo menos a simple vista), se han escogido valores pequeños de reducción de 0%/año y 1,5%/año respecto al valor del año anterior en la intensidad material de las células, tras observar las referencias que también han implementado estas mejoras [34] y buscando reflejar numerosas posibilidades de reducción de la intensidad material.

2.4.6 Intensidades materiales de la construcción de los paneles

Además de las células, los paneles poseen otros elementos como la carcasa o el cristal que recubren estas primeras. La intensidad material de estos elementos que componen el panel junto a las células se puede ver a continuación en la Tabla 10. Las intensidades materiales de construcción de los paneles han sido obtenidas de Frischknecht R. et al. [88] salvo en el caso del aluminio, el titanio y el vanadio. Esta referencia enuncia las intensidades en kg/m² por lo que estas se han convertido a kg/MW con el empleo de la ec.1 usando los m² de panel por MW de potencia calculados en el apartado 2.4.2.1. En el caso del aluminio se han sumado las intensidades de Frischknecht R. et al. [88] y de E. Gervais et al [34]. El titanio y el vanadio han sido obtenidos de De Castro C. et al. [54].

$$Intensidad\ mineral\ panel_i \left(\frac{kg}{MW} \right) = Intensidad\ mineral\ panel_i \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot Superficie\ del\ panel_i \left(\frac{m^2}{MW} \right) \quad (1)$$

En este caso, se han podido separar las intensidades materiales entre paneles de silicio mono y policristalinos:

	c-Si Mono	c-Si Poli	CIGS	CdTe
Aluminio (Al) [34], [88] [kg/MW]	11356,3	13583	14431,9	11260
Estaño (Sn) [88] [kg/MW]	51,4	61,5	65,3	0
Vidrio [88] [kg/MW]	37731,7	45130,1	35296,3	46200,4
Magnesio [88] [kg/MW]	6655,5	7960,5	8458,1	0
Fibra de vidrio [88] [kg/MW]	1263,4	1511,2	217,7	594
Plásticos [88] [kg/MW]	6231,5	7453,4	9867,7	9971,6
Titanio (Ti) [54] [kg/MW]	6,3	6,3	6,3	6,3
Vanadio (V) [54] [kg/MW]	0,5	0,5	0,5	0,5

Fuente: Elaboración propia con datos de [34], [54], [88]

En el análisis dinámico, los posibles cambios en las eficiencias de los paneles de los diversos escenarios provocarán a su vez cambios en la *Superficie del panel*_i $\left(\frac{m^2}{MW} \right)$, por lo que estas intensidades materiales podrán variar a lo largo de las simulaciones del análisis dinámico.

2.4.7 Intensidades materiales de la estructura de montaje de los paneles

Como se ha enunciado anteriormente, además de los propios paneles una instalación fotovoltaica presenta otros elementos como la propia estructura de fijación y sujeción de los paneles. Estas estructuras (pocas veces tenida en cuenta por la bibliografía) poseen una gran cantidad de materiales que redundan además en la energía necesaria para la construcción y funcionamiento de una instalación fotovoltaica como se explicara más adelante (Sección 6). Los requerimientos de construcción de las estructuras de montaje de los paneles han sido obtenidos de Frischknecht R. et al. [88] salvo en el caso del cemento que ha sido obtenido de De Castro C. et al. [54]. Como se ha enunciado con anterioridad, la referencia [88] enuncia las intensidades en kg/m² por lo que estas se han convertido a kg/MW con el empleo de la ec.1 usando los m² de panel por MW de potencia calculados en el apartado 2.4.2.1. A continuación, se muestran los datos obtenidos (Tabla 11):

Tabla 11: Intensidades materiales de la estructura de montaje de los paneles solares

	c-Si Mono		c-Si Poli		CIGS		CdTe	
	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado
Hierro (Fe) [88] [kg/MW]	30879	8523	36934	10194	39242	10831	39655	10945
Cemento [54] [kg/MW]	75000	0	89706	0	95313	0	96316	0
Aluminio* (Al) [88] [kg/MW]	17046	11581	20388	13852	21662	14717	21890	14872
Acero inox [88] [kg/MW]	1058	278	1265	333	1344	354	1359	358
Zinc (Zn) [88] [kg/MW]	1135	0	1358	0	1442	0	1458	0

Fuente: Elaboración propia con datos de [54], [88]. * siguiendo la metodología de De Castro et al 2020 [54] se optará por una instalación de cemento y acero y se suprimirá este aluminio en los requerimientos finales, ya que este tipo de instalaciones sin aluminio son menos costosas energéticamente hablando.

Tras mostrar los datos se puede apreciar que la demanda mineral (con intensidades materiales que alcanzan los 96000 kg/MW en el caso del cemento o de 39000 kg/MW en el caso del hierro) de estas estructuras no se puede despreciar si se quiere realizar un análisis preciso desde el punto de vista material y energético. Aunque la referencia [88] indica la cantidad de aluminio enunciada en la tabla, siguiendo la metodología de De Castro et al 2020 [54] se optará por una instalación de cemento y acero y se suprimirá este aluminio en los requerimientos finales, ya que este tipo de instalaciones sin aluminio son menos costosas energéticamente hablando.

En el análisis dinámico, los posibles cambios en las eficiencias de los paneles de los diversos escenarios provocarán a su vez cambios en la *Superficie del panel_i* ($\frac{m^2}{MW}$), por lo que estas intensidades materiales podrán variar a lo largo de las simulaciones del análisis dinámico.

2.4.8 Intensidades materiales de los inversores

Ya se ha explicado con anterioridad que las instalaciones fotovoltaicas necesitan inversores para convertir la corriente continua que obtienen los paneles en corriente alterna. De esta

forma, la corriente alterna obtenida puede ser demandada por algún sistema de consumo o ser transportada a otro lugar. Los requerimientos materiales de estos sistemas enunciados por Tschümperlin et al [124] son (Tabla 12):

Tabla 12: Requerimientos materiales de los inversores

Inversor de potencia	2,5 kW	5 kW	10 kW	20 kW	Extrapolando ↓ resultados ↓	1 MW
Cu (kg)	1,9	3,1	4,9	7,9		113,2
Al (kg)	5	8	12,8	20,5		297,9
Acero (kg)	0,9	1,5	2,3	3,7		53,62
Plástico (kg)	2,2	3,6	5,7	9,2		131,1
Electrónica (kg)	1,5	2,5	3,9	6,4		89,36

Fuente: Elaboración propia con datos de [124].

Se han extrapolado los datos para obtener los requerimientos de un inversor de 1 MW (la referencia solo llega hasta 20kW) necesario en una planta fotovoltaica de 1MW (instalación de suelo). Hay que reseñar que, como se enuncio con anterioridad, para las instalaciones de tejado se emplean inversores de 2,5 kW y no es necesario un transformador, ya que el inversor hace este trabajo.

2.4.9 Intensidades materiales de los transformadores

Junto a los inversores necesitamos unos dispositivos que permitan elevar la tensión de la energía eléctrica producida a la tensión de la red si queremos que esta sea transportada a otro lugar. Los requerimientos materiales de estos sistemas son muy variables dependiendo de las especificaciones de la planta y de la red de transporte a la que este conectada, por lo tanto, se enunciarán valores basados en un transformador de la marca española Ormazábal (Tabla 13) [125] que pueden discernir de los reales en algunos casos:

Tabla 13: Requerimientos materiales de los transformadores

Transformador 1MVA	[kg/MW]
Núcleo de hierro [125]	1730
Bobinado de aluminio [125]	630
Aceite dieléctrico [125]	552
Acero	859
TOTAL [125]	3787

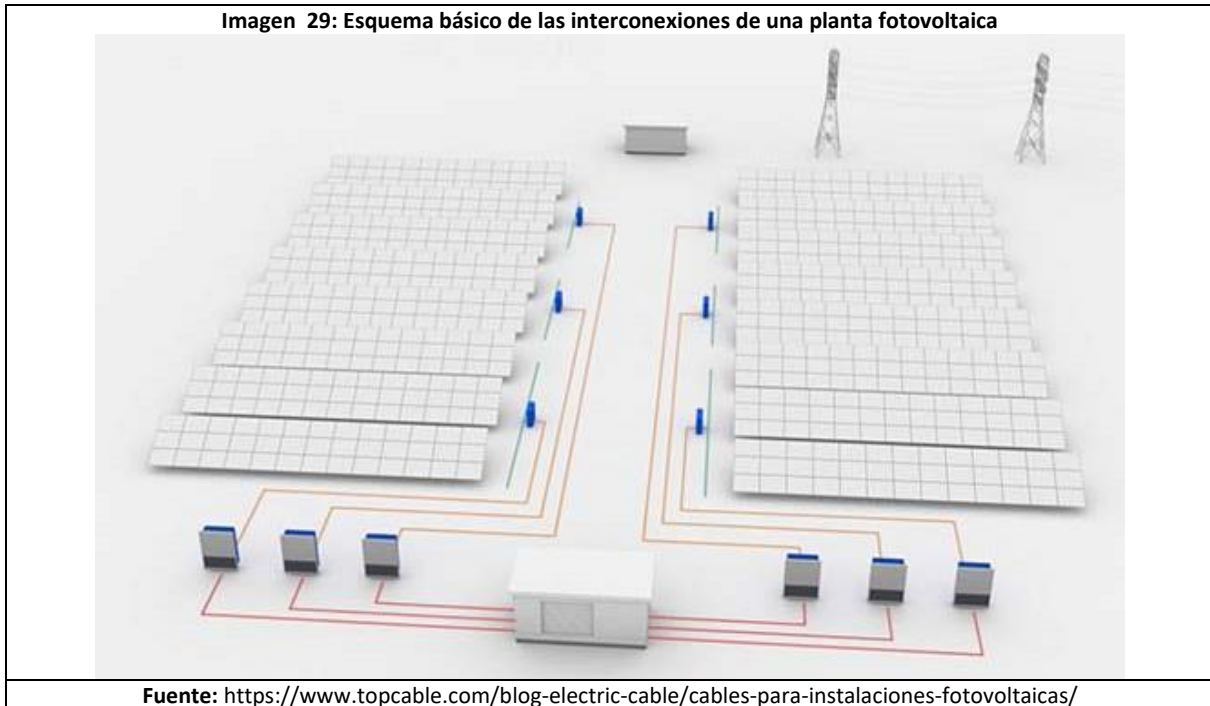
Fuente: Elaboración propia con datos de [125].

Como se ha enunciado con anterioridad, en nuestro caso, se ha elegido un transformador de 1MVA para una instalación fotovoltaica de 1MW (instalación de suelo). Se ha escogido un transformador elevador hasta 24kV de la marca Ormazabal [125]. Ante la falta de datos de la demanda de acero se ha estimado que la demanda es el resto de peso hasta llegar al peso total citado por Ormazabal.

2.4.10 Intensidades materiales de las conexiones

Los paneles fotovoltaicos necesitan estar conectados a los demás componentes de las instalaciones fotovoltaicas para poder proporcionar electricidad (Imagen 29). Para que la energía eléctrica pueda llegar desde el panel a la red y/o a la instalación, ya sea industrial o una vivienda necesitamos determinadas conexiones [126]. Podemos dividir las conexiones en

dos tipos, por un lado, las conexiones que permiten interconectar los sistemas de producción de energía eléctrica fotovoltaica con el fin obtener la energía, y por otro lado las conexiones para llevar esta energía a la red de transporte en el caso de que nuestro fin sea el de producción de energía o que nuestra energía generada supere a nuestra energía demandada y no la necesitemos acumular.



Estas conexiones dependen de la disposición, la situación y la potencia de la instalación dando lugar a la siguiente clasificación de su demanda mineral (Tabla 14):

Tabla 14: Requerimientos materiales de las conexiones de los paneles solares

Lugar de instalación	En viviendas, naves, edificios...		En instalaciones de producción energética	
	Viviendas unifamiliares, edificios pequeños...	Edificios de gran tamaño, naves industriales...	Desde panel a inversor	Desde inversor a transformador
Cu (kg/m)	0,054	0,089	0,143	0
Al (kg/m)	0	0	0	1,215
Acero Galvanizado (kg/m)	0	0	0	0,45
Acero (kg/m)	0	0	0	2,48
Cemento (kg/m)	0	0	0	180
PVC (kg/m)	0,15	0,24	0,39	11
Vida útil (años)	40			

Fuente: Elaboración propia con datos de [102], [126]–[129].

Se han considerado cables fotovoltaicos de 6 mm² para las instalaciones más pequeñas y de 10mm² para las instalaciones cuya potencia es superior pero cuya finalidad tampoco es la de producir energía. Finalmente, se ha escogido un cable fotovoltaico de 16 mm² para conectar los paneles e inversores de las instalaciones de producción de electricidad (huertos y parques solares). La consideración de estos tamaños ha sido tomada debido a dos factores



fundamentales. El primero, la experiencia visualizando el cableado que usualmente se emplea en estas instalaciones [102], [127]. El segundo, el cálculo de las secciones del cableado utilizando los criterios de caída de tensión y calentamiento del ICT-18 que nos indica que esos tamaños son adecuados para la mayoría de ese tipo de instalaciones [102], [127], [128].

En lo respectivo a la conexión de la instalación con la red de transporte (hasta el transformador) se han tomado como referencia los datos de [126], [129]. Se ha elegido como tubería de referencia una de dos tubos de 160 mm de diámetro insertada en un cubo de hormigón de 45 cm de lado y unos 5 cm de espesor, tomada de las instrucciones de la guía de baja y media tensión [70]. El peso del hormigón de esta última referencia se ha comparado con el peso del hormigón de Bumby et al [126] utilizando esta relación para aplicarla a los demás materiales.

Una vez enunciados los materiales empleados en las redes eléctricas y su cantidad debemos conocer cuantos metros de red por MW de potencia son necesarios para cada tipo de instalación.

En la tabla siguiente (Tabla 15) se enuncian los metros de cables estimados con la ayuda, por una parte, de los comentarios obtenidos de la fuente bibliográfica [130] y por otra, utilizando suposiciones fundadas por la experiencia (observando instalaciones existentes, aunque este es un valor sujeto a mucha variabilidad, por eso se emplean suposiciones). Estas longitudes han sido calculadas mediante el uso de los datos técnicos de los distintos tipos de paneles (ratio paneles/MW):

Tabla 15: Metros de los diferentes tipos de conexión por MW de potencia

	En viviendas, naves, edificios...		En instalaciones de producción energética	
	Viviendas unifamiliares, edificios pequeños...	Edificios de gran tamaño, naves industriales...	Desde panel a inversor	Desde inversor a transformador
C-Si mono				
<i>Comentarios</i>	Asumiendo 2 m por panel, y dado eso: 2020 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 3 m por panel, y dado eso: 2020 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 4 m por panel, y dado eso: 2020 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 0,25 m por panel, y dado eso: 2020 paneles/MW x 2m/panel
Longitud (m/MW)	4040	6060	8080	505
C-Si poli				
<i>Comentarios</i>	Asumiendo 2 m por panel, y dado eso: 2415 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 3 m por panel, y dado eso: 2415 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 4 m por panel, y dado eso: 2415 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 0,25 m por panel, y dado eso: 2415 paneles/MW x 2m/panel
Longitud (m/MW)	4830	7245	9660	603.75
CIGS				
<i>Comentarios</i>	Asumiendo 2 m por panel, y dado eso: 2564 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 3 m por panel, y dado eso: 2564 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 4 m por panel, y dado eso: 2564 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 0,25 m por panel, y dado eso: 2564 paneles/MW x 2m/panel
Longitud (m/MW)	5128	7692	10256	641
CdTe				
<i>Comentarios</i>	Asumiendo 2 m por panel, y dado eso: 2597 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 3 m por panel, y dado eso: 2597 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 4 m por panel, y dado eso: 2597 paneles/MW x 2m/panel	Asumiendo 0,25 m por panel, y dado eso: 2597 paneles/MW x 2m/panel
Longitud (m/MW)	5194	7791	10388	649.25

Fuente: Elaboración propia.

En las simulaciones del análisis dinámico los ratios de paneles/MW variarán con los cambios en las eficiencias de los paneles impuestos en los escenarios, y por lo tanto, variaran a lo largo del tiempo las intensidades materiales de las conexiones y los cableados.

Posteriormente con las longitudes y requerimientos ya obtenidos, podemos hallar la masa por MW de potencia de los diferentes materiales (Tabla 16) multiplicando los valores obtenidos en las tablas anteriores (ec.2):

$$Material \left[\frac{kg}{MW} \right] = Material [kg/m] \cdot Longitud \text{ de las conexiones } \left[\frac{m}{MW} \right] \quad (2)$$

Tabla 16: Masa de los componentes de las líneas por MW de potencia

Redes para la infraestructura de la fotovoltaica	En viviendas, naves, edificios...		En instalaciones de producción energética	
	Viviendas unifamiliares, edificios pequeños...	Edificios de gran tamaño, naves industriales...	Desde panel a inversor	Desde inversor a transformador
C-Si mono				
Cobre (kg/MW)	218,16	539,34	1155,44	0
Al (kg/MW)	0	0	0	613,58
Acero galvanizado (kg/MW)	0	0	0	227,25
Barra de acero... (kg/MW)	0	0	0	1252,4
Cemento (kg/MW)	0	0	0	90900
PVC (kg/MW)	606	1454,4	3151,2	5555
C-Si poli				
Cobre (kg/MW)	260,82	644,8	1381,38	0
Al (kg/MW)	0	0	0	733,56
Acero galvanizado (kg/MW)	0	0	0	271,69
Barra de acero... (kg/MW)	0	0	0	1497,3
Cemento (kg/MW)	0	0	0	108675
PVC (kg/MW)	724,5	1738,8	3767,4	6641,25
CIGS				
Cobre (kg/MW)	276,91	684,59	1466,61	0
Al (kg/MW)	0	0	0	778,82
Acero galvanizado (kg/MW)	0	0	0	288,45
Barra de acero... (kg/MW)	0	0	0	1589,68
Cemento (kg/MW)	0	0	0	115380
PVC (kg/MW)	769,2	1846,1	3999,84	7051
CdTe				
Cobre (kg/MW)	280,48	693,4	1485,48	0
Al (kg/MW)	0	0	0	788,84
Acero galvanizado (kg/MW)	0	0	0	292,16
Barra de acero... (kg/MW)	0	0	0	1610,14
Cemento (kg/MW)	0	0	0	116865
PVC (kg/MW)	779,1	1869,84	4051,32	7141,75

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha enunciado anteriormente, en el análisis dinámico la longitud de las conexiones podrá variar a lo largo de la simulación (debido a los cambios en las eficiencias de los paneles) lo que provocará cambios en las intensidades minerales de las conexiones. En aras de la simplicidad, y debido a la incertidumbre de conocer cuántos de los paneles destinados a viviendas o naves se podrían instalar en edificios pequeños, como las viviendas, o en edificios de mayor tamaño, se establecerá que un 50% de los paneles se instalan en edificios de pequeño tamaño y el otro 50% en edificios más grandes. Esta hipótesis se establece tanto para el análisis estático como para el dinámico.

2.4.11 Intensidades materiales totales de la tecnología fotovoltaica

En este apartado se enunciarán todos los requerimientos de la tecnología (previamente presentados) ya unidos por MW de potencia de la instalación (Tabla 17). Estas intensidades

materiales son las que se emplean en el análisis estático y como punto inicial del análisis dinámico, ya que la variación de la eficiencia y la reducción de algunas intensidades materiales a lo largo de las simulaciones provocan la variación de las intensidades materiales finales.

Tabla 17: Intensidad material de la tecnología fotovoltaica.

Material de construcción (kg/MW)	c-Si Mono		c-Si Poli		CIGS		CdTe	
	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado
Aluminio (Al)	13081,7	25121	15428,4	29618,5	16138,6	31149,1	12976,7	28132,1
Cadmio (Cd)	0	0	0	0	21	21	85	85
Cemento (ce)	165900	0	198380,9	0	210692,5	0	213180,8	0
Cobre (Cu)	2214,6	2084,8	2440,6	2158,8	1671,8	1332,8	1641,5	1289,7
Electrónica	89,4	600	89,4	600	89,4	600	89,4	600
Fibra de vidrio	1263,4	1263,4	1511,2	1511,2	217,7	217,7	594	594
Galio (Ga)	0	0	0	0	7,5	7,5	0	0
Vidrio	37731,7	37731,7	45130,1	45130,1	35296,3	35296,3	46200,4	46200,4
Grava * (carreteras, protecciones)	500000	0	500000	0	500000	0	500000	0
Indio (In)	0	0	0	0	23	23	15,9	15,9
Hierro (Fe) * Hierro y acero de bajo contenido en carbono)	35800	9089	42297,9	10800,4	44773,9	11452,9	45221,6	11569,7
Lubricante	552	0	552	0	552	0	552	0
Magnesio (Mg)	6709	6709	8014	8014	8458,1	8458,1	0	0
Manganeso * (Mn)	500	500	500	500	500	500	500	500
Molibdeno (Mo)	0	0	0	0	94,3	94,3	21,4	21,4
Níquel * (Ni)	85,7	23,4	102,3	27,7	107,5	28,3	108,7	28,6
Pintura *	150	0	150	0	150	0	150	0
Plomo (Pb)	62	62	62	62	0	0	0	0
Plásticos	15068,8	8141,7	17993,1	9565	21049,6	12055,37	21295,7	12176,1
Arena de sílice *	36702	36702	42252	42252	25897	25897	34083	34083
Plata (Ag)	21	21	21	21	0	0	0	0
Preparación del terreno * (movimientos de tierra...)	4500000	0	4500000	0	4500000	0	4500000	0
Selenio (Se)	0	0	0	0	45	45	0	0
Estaño (Sn)	110,4	110,4	120,5	120,5	71,3	71,3	6,6	6,6
Acero inoxidable	1057,9	278,4	1265,3	333	1344,4	353,8	1358,5	357,5
Teluro (Te)	0	0	0	0	0	0	97,5	97,5
Titanio (Ti)	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Vanadio (V)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zinc (Zn)	1134,9	0	1357,5	0	1528,1	85,8	1457,5	0
Total	5318242	128445	5377674	150721	5368736	127696	5379643	5377674

Fuente: Elaboración propia. * Se deben justificar algunos materiales que no se habían enunciado hasta ahora, con los que se ha buscado completar los posibles huecos presentes en la bibliografía que trataba de forma independiente cada aspecto de la tecnología:

-Hierro: Se ha añadido el 74% en peso del acero inox debido a su composición [131].

-Preparación de terreno y grava: Estos requerimientos han sido obtenidos de De Castro et al [54]. Aunque, a priori, no es un requerimiento material propiamente dicho, hay que tener en cuenta estos aspectos para el posterior análisis del EROI, ya que son trabajos que demandan energía.

-Arena de sílice: Se trata, en primer lugar, de los requerimientos de silicio de los paneles cristalinos a los que se les ha sumado (280%, [88]) las pérdidas materiales para obtener el propio silicio a partir de la arena de sílice. También se ha sumado un 73% en peso del vidrio [132] y un 60% en peso de la fibra de vidrio [133] debido a su composición.

-Níquel: Níquel que se encuentra en el interior del acero inoxidable (8%).

-Manganeso: Dato obtenido de De Castro et al [54].

-Pintura: Requerimiento obtenido de De Castro et al [54] (Solo para instalaciones de suelo).

Tras mostrar los requerimientos totales de las tecnologías fotovoltaicas a estudio, hay que indicar que las necesidades de material se incrementarán en un 10% con respecto a su composición final de cara a su análisis energético (EROI) y de demanda mineral, con el fin de tener en cuenta las pérdidas de material en los procesos de obtención y fabricación (Scrap rate).

2.5 Disponibilidad de minerales: Recursos, Reservas y reciclado.

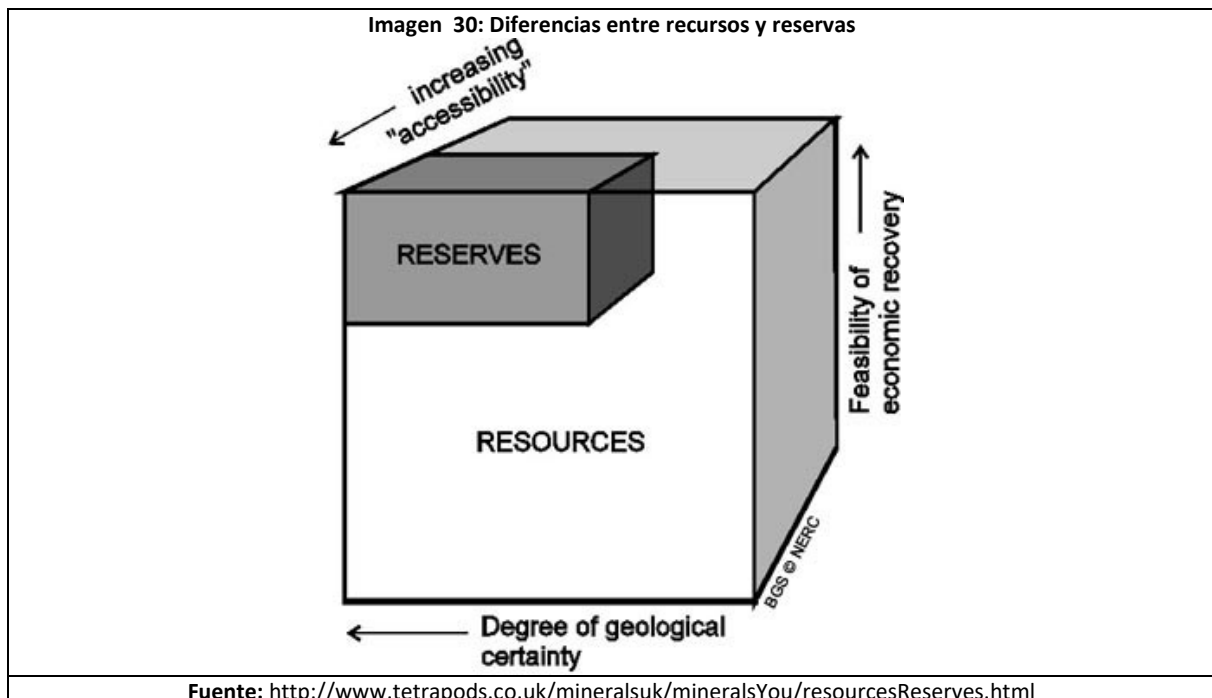
Como se ha enunciado en los apartados anteriores la obtención de los paneles, su cableado, sus infraestructuras...requieren de la utilización de una gran variedad de minerales, algunos de ellos escasos en nuestro planeta, otros muy costosos de conseguir hablando en términos energéticos y económicos, incluso alguno de ellos es obtenido con violaciones de los derechos humanos de por medio y con grandes conflictos sociales.

En este apartado indicaremos las reservas y recursos actuales de estos minerales [134], [135] y los ratios de reciclado mundiales.

Entendiendo por recursos y reservas lo siguiente (Imagen 30):

-Recursos: Es la cantidad total de un elemento determinado disponible en nuestro planeta en este caso.

-Reservas: Es la cantidad de un elemento determinado disponible en nuestro planeta que podemos obtener de forma factible tecnológica, legal y económicamente.



Y entendiendo por ratios de reciclado mundiales:

-Contenido reciclado (RC): El contenido reciclado es la fracción de metal reciclado (chatarra) presente en la fabricación actual de ese metal.

-Ratio de reciclaje de fin de vida (EOL-RR): El ratio de reciclaje de fin de vida nos indica que porcentaje de un metal determinado se recicla al final de la vida útil del producto en el que se encuentra, conservando sus propiedades físicas y químicas intactas.

Una vez explicados todos los términos podemos indicar los recursos, reservas y los ratios de reciclado mundiales de los diferentes minerales y materiales en la siguiente tabla (Tabla 18):

	Reservas (Mt) [134], [135]	Recursos (Mt) [134], [135]	RC ratio (/1) [35]	EOL ratio (/1) [35]
Aluminio (Al)	28000	75000	0,35	0,56
Cadmio (Cd)	0.5	6	0,5	0,15
Cemento *	-	-	≈0	≈0
Cobre (Cu)	720	2100	0,285	0,48
Galio (Ga)	0,0052	1	0,375	≈0
Indio (In)	0,011	0,0471	0,375	≈0
Electrónica*	-	-	0	0
Hierro (Fe)	160000	800000	0,4	0,71
Fibra de vidrio	-	-	0	0
Lubricante*	-	-	0	0
Magnesio (Mg)	2400	12000	0,33	0,39
Manganeso (Mn)	570	1030	0,37	0,53
Molibdeno (Mo)	11	14	0,33	0,3
Níquel (Ni)	81	130	0,35	0,6
Plomo (Pb)	87	2000	0,525	0,735
Plásticos*	≈∞	≈∞	≈0	≈0
Arena de sílice*	-	≈∞	≈0	≈0
Acero inoxidable [□]	-	-	0,4	0,71
Plata (Ag)	0,53	1,308	0,26	0,635
Selenio (Se)	0,12	315	≈0	≈0
Estaño (Sn)	4,8	76.2	0,22	0,75
Teluro (Te)	0,024	126	≈0	≈0
Titanio (Ti)	794	2000	0,52	0,91
Vanadio (V)	15	63	≈0	≈0
Zinc (Zn)	230	1900	0,225	0,395

Fuente: Elaboración propia con datos de [135] y de [35]. – Desconocimiento o falta de sentido práctico del dato. *Los materiales compuestos no poseen reservas o recursos como tal, dependen de su composición y proporciones. [□] En el caso del acero inoxidable se ha establecido unos ratios de reciclaje similares al hierro [54]. *En el caso de la arena de sílice no se disponen de datos de reservas.

Estos ratios de reciclado se emplearán tanto en el análisis estático como en el dinámico, ya que el modelo comprende una gran cantidad de tecnologías renovables (con muchas diferentes partes) y el consumo de minerales del resto de la economía, por lo tanto, se emplearán ratios globales de reciclado en lugar de los específicos de los paneles solares citados en el apartado 2.3.5 de este documento.

Se debe remarcar que en el análisis dinámico el ratio de reciclado RC se calculará de forma endógena a lo largo de las simulaciones, y el ratio presente en la tabla se empleará en el análisis estático.

Aunque vemos en la Tabla 18 que todavía disponemos de una gran cantidad de reservas minerales disponibles en nuestro planeta, el uso de diversas tecnologías que emplean estos minerales de forma intensiva (y los reducidos ratios de reciclado) nos pueden conducir hacia el agotamiento de estos en un corto periodo de tiempo, llevando todo ello hacia un punto de no retorno para diversas tecnologías como, la movilidad eléctrica, las energías renovables, las pantallas táctiles, la iluminación LED...pudiendo provocar a su vez graves problemas socioeconómicos y de muy diversa índole en todo el mundo.

2.6 Tasa de retorno energético (EROI)

Este apartado completará las explicaciones sobre el EROI ya empezadas en la introducción de este trabajo. El EROI es el indicador más popular para medir la proporción de energía excedente en relación con las inversiones energéticas necesarias. En resumen, se puede decir que el EROI es el rendimiento de la energía invertida en un sistema de producción energética [136], la relación entre la energía producida durante su vida útil y la energía consumida para producir esa energía a lo largo del tiempo (energía utilizada en su fabricación y funcionamiento).

Este indicador nos muestra un aspecto clave de esta tecnología, la eficiencia de la inversión energética en la producción eléctrica fotovoltaica. Este aspecto deriva finalmente en factores como el número de materiales que son necesarios para la construcción de las instalaciones y si son caros (energéticamente) de obtener, la dificultad energética para fabricar los paneles, o la energía empleada en construir y mantener la infraestructura necesaria para obtener electricidad a partir de estas últimas. En este trabajo se estimará y evaluará el EROI de diferentes tipos de paneles de forma estática, ejecutando un procedimiento análogo al realizado por Carlos de Castro et al [54] para hallar el EROI de diferentes fuentes de energía renovables y de forma dinámica, empleando el modelo MEDEAS-W.

Existen diferentes métodos para estimar el EROI de una tecnología, según diferentes criterios de selección de los límites del sistema:

$$EROI_{st} = \frac{\text{Energía emitida a nivel de planta}}{\sum EnU_{direct}^{st}} = \frac{\text{Capacidad de potencia} \cdot CF \cdot L \cdot (1 - OL)}{g \cdot (EnU^{Mr} + EnU^{New\ cap} + EnU^{Decom} + EnU^{Tra}) + SC} \quad (6)$$

$$EROI_{final} = \frac{\text{Energía emitida a nivel de consumidor}}{\sum EnU_{direct}^{final}} = \frac{\text{Capacidad de potencia} \cdot CF \cdot L \cdot (1 - OL) \cdot (1 - TDL)}{g \cdot (EnU^{Mr} + EnU^{New\ cap} + EnU^{Decom} + EnU^{O\&M} + EnU^{G\&s} + EnU^{Tra}) + SC \cdot (1 + TDL)} \quad (7)$$

Donde:

- Capacidad de potencia nominal considerada: 1 MW.

- CF: Factor de capacidad, la relación entre la cantidad de energía que es capaz de producir un panel en un uso real y la energía máxima que puede liberar en el mismo periodo. Siguiendo la metodología de De Castro et al [54] se ha escogido 14,2% para las instalaciones de suelo y un 11,36% para las instalaciones de tejado (un 20% menor debido a la menor optimización de este tipo de instalaciones) [137].
- L: Tiempo de vida útil de los paneles en segundos (25 años), basado en los valores que suele aportar la diferente bibliografía [6], [34], [52].
- OL: El coeficiente representa las pérdidas eléctricas fijas de la instalación; es la energía que se pierde por transmisión desde los paneles hasta la salida de la planta fotovoltaica, y la que se pierde por la degradación de los paneles y los sistemas de transmisión dentro de la planta. Siguiendo la metodología de De Castro et al se ha escogido 4,35% [54].
- SC: Este coeficiente muestra el autoconsumo de la instalación para hacer funcionar elementos como luces, cámaras, sistemas de control... Siguiendo la metodología de De Castro et al se ha escogido 1% [54].
- TDL: pérdidas provocadas por la distribución de la red eléctrica desde la salida de la planta fotovoltaica hasta el consumidor final. El consumo final de electricidad en 2015 fue de 1737 Mtep y la producción neta de electricidad de las centrales eléctricas fue de 1913 Mtep, por lo tanto, $TDL=1-1737/1913=0,092$ [54].
- g: Coeficiente de conversión de energía primaria en energía final equivalente. Se ha escogido un valor de $g=0,737/1$.
- $EnU_{New\ cap}$: Energía primaria utilizada (julios) para la fase de construcción de la nueva capacidad instalada (de la cuna a la puerta). La ecuación para obtenerla es la siguiente (ec. 3):
$$EnU_i = \left[\sum Intensidad\ Material_i \left(\frac{kg}{MW} \right) \cdot WECM_j (ratio\ de\ reciclado_j) \left(\frac{MJ}{kg} \right) \right] \cdot g \quad (3)$$

WECM, media ponderada teniendo en cuenta las tasas de reciclaje actuales.
- EnU_{Mr} : se añade una tasa de energía de fabricación. En el caso de los paneles se ha tomado la energía de fabricación de cada tecnología de la referencia [88] (empleando una $g=0,737$ en la conversión de energía eléctrica). En el caso de los demás componentes, se supone un porcentaje del 10% del $EnU_{New\ cap}$ (sin tener en cuenta el 10% de pérdidas de material) que se traduce en energía a utilizar en la fabricación [64].
- $EnU_{O\&M}$: energía primaria utilizada en la limpieza y mantenimiento (O&M) de la capacidad instalada a lo largo de su vida útil. Se ha empleado la misma metodología que De Castro et al 2020 [54] el 2% de los módulos son remplazados anualmente [88] y la vida útil del inversor es de 15 años por lo que $10/15$ [138] partes del inversor deben ser añadidas al ciclo de vida de los paneles.
- EnU_{Decom} : energía final utilizada (julios) para desmantelar las infraestructuras que han terminado su vida útil. Se asume el 10% de la $(EnU_{New\ cap} + EnU_{Mr})$ para todas las tecnologías que siguen [139] debido a la falta de datos globales relevantes.

- $EnU_{G\&S}$: energía primaria utilizada (julios) en la construcción y el mantenimiento de las redes, el almacenamiento y otras infraestructuras relacionadas necesarias para transportar y gestionar la electricidad hasta el punto de uso. Los valores son tomados de De Castro et al [54].

- EnU_{Tra} : energía primaria utilizada para el transporte de los materiales (gasóleo, fuel...) [140]–[142] empleando la metodología utilizada por De Castro et al [54].

En este trabajo, estimaremos el EROI estándar (ecuación 6) y el EROI final (ecuación 7). El EROI estándar tiene en cuenta toda la infraestructura de una planta de generación eléctrica, es decir desde el panel hasta llegar a la red eléctrica (panel, soportes, conexiones, inversor...). El EROI final tiene en cuenta la energía toda la infraestructura asociada desde el panel hasta llegar al usuario final (incluye la infraestructura final de red eléctrica que proporciona energía al usuario). Como avance, para el cálculo del EROI dinámico se ha implementado en el modelo un submódulo para el cálculo del EROI dinámico análogo a las ecuaciones utilizadas en el cálculo del EROI estático, con la ventaja, de que en el caso dinámico los coeficientes utilizados en las fórmulas pueden variar dinámicamente.

2.6.1 Intensidad energética de los minerales

La intensidad energética nos enuncia la cantidad energía que nos cuesta obtener un determinado elemento por unidad de masa. Esta característica también se denomina energía incorporada, proveniente del inglés “energy embodied”.

Estos datos de energía incorporada de cada material empleado en la tecnología fotovoltaica los podemos encontrar en la Tabla 19:

Tabla 19: Energía incorporada en algunos de los materiales empleados en la tecnología fotovoltaica

	Energía incorporada del elemento virgen (MJ/kg) [54], [143]	Energía incorporada del elemento reciclado (MJ/kg) [54], [143]	Ratio de reciclado actual RC (/1) [35]	Energía incorporada combinada (MJ/kg)
Aluminio (Al)	218	29	0,35	151,85
Galio (Ga)	218	73	0,38	163,5
Grava	0,08	0	0	0,08
Cemento	4,5	0	0	4,5
Cobre (Cu)	57	16,5	0,29	45,45
Hierro (Fe)	25	9,4	0,4	18,76
Cadmio (Cd)	264	88	0,35	176
Fibra de vidrio	28	0	0	28
Electrónica	2000	0	0	2000
Indio (In)	3320	1106,66	0,38	2490
Lubricante	100	0	0	100
Magnesio (Mg)	220	73,33	0,33	172
Manganeso (Mn)	57,6	19,2	0,37	43,4
Molibdeno (Mo)	378	126	0,33	295
Níquel (Ni)	164	54,66	0,35	126
Plata (Ag)	1580	526,66	0,26	1310
Plomo (Pb)	49	16,33	0,53	31,8
Plásticos	80,5	26,83	≈0	80,5
Preparación del terreno	0,45	0	0	0,45
Arena de silicio	0,1	0	≈0	0,1
Acero Inoxidable	56,7	11	0,4	38,4
Teluro (Te)	57	19	≈0	57
Selenio (Se)	22,8	7,6	≈0	22,7
Titanio (Ti)	400	258	0,52	326,2
Vanadio (V)	3710	1236,66	≈0	3710
Vidrio	23,5	0	0	23,5
Zinc (Zn)	72	9	0,23	57,8

Fuente: Elaboración propia con datos de [54] , [143] y [35].

Hay que remarcar que la energía incorporada combinada de la Tabla 19 se utiliza en el análisis estático, ya que en el análisis dinámico el ratio de reciclado se calcula de forma endógena y la energía incorporada combinada va cambiando a lo largo de las simulaciones.

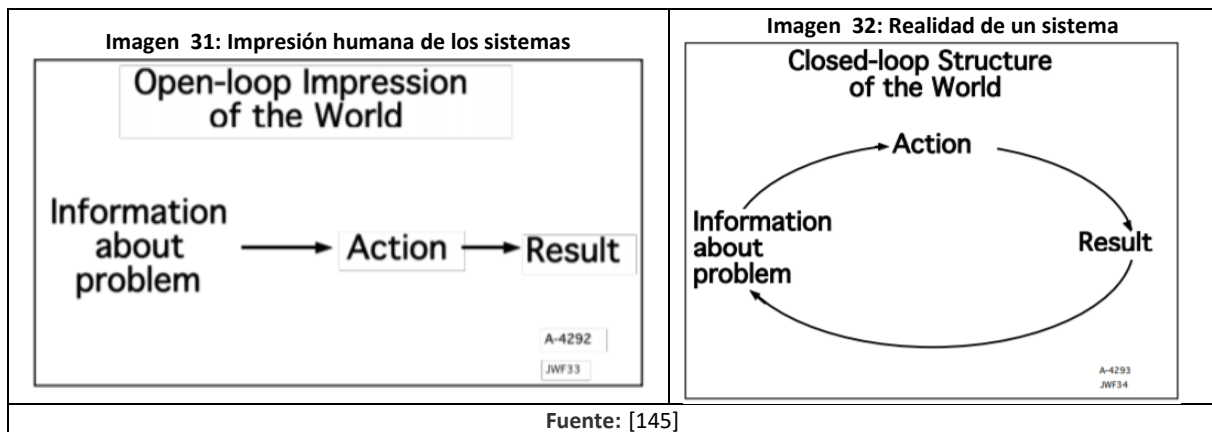
2.7 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas [144] es una herramienta utilizada para analizar y diseñar políticas mediante el modelado y simulación de sistemas. Esta herramienta utiliza datos para modelar las relaciones entre las partes de un determinado sistema y ver cómo estas relaciones influyen en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

La dinámica de sistemas se emplea en problemas dinámicos que surgen en sistemas complejos con múltiples relaciones. Es decir, sistemas con relaciones internas, relaciones externas, retroalimentaciones, acumulaciones, retrasos....

Esta herramienta se creó para mejorar la comprensión de los procesos industriales y su objetivo es el de vislumbrar qué causas estructurales provocan un determinado comportamiento de un sistema.

La utilidad de esta herramienta destaca a la hora de abordar problemas complejos, ya que los humanos solemos pensar en términos de relaciones causa-efecto (Imagen 31) suprimiendo las retroalimentaciones (Imagen 32), cuando estas, son básicas y muy importantes en el comportamiento de un determinado sistema [145].



Esta herramienta no destaca por su alta precisión en el resultado de la simulación de un modelo de gestión específico y, por lo tanto, no se utiliza para hacer modelos de predicción puros propiamente dicho. Donde destaca este instrumento, es en la precisión de la comparación de los distintos resultados obtenidos tras realizar cambios en diferentes aspectos del sistema, por lo que puede ser muy útil para ver qué diferencias provocan en los resultados de simulación de un sistema diferentes políticas aplicadas.

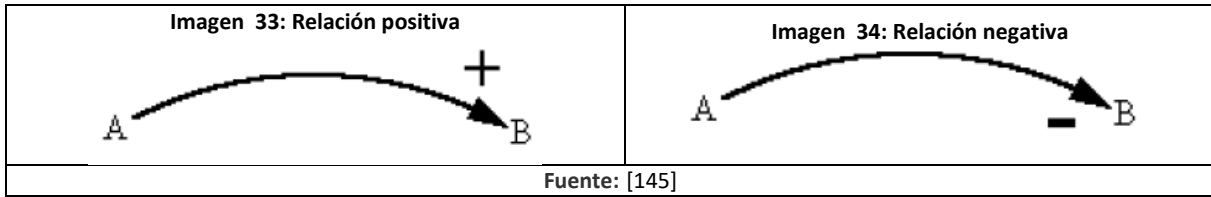
Para seguir explicando los fundamentos de la dinámica de sistemas es necesario explicar en qué consisten los diagramas causales y sus elementos:

2.7.1 Diagrama causal

“El Diagrama Causal es un diagrama que recoge los elementos clave del Sistema y las relaciones entre ellos”[144].

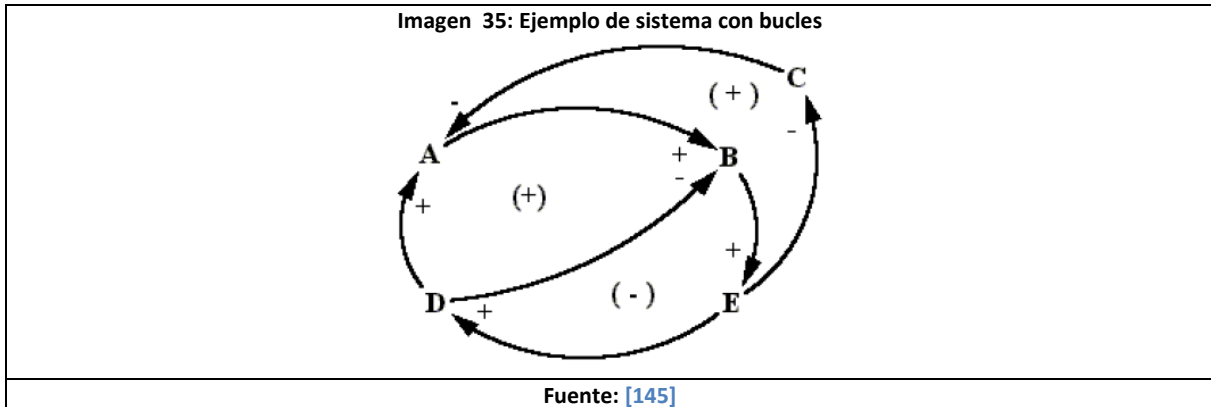
Una vez conocemos las variables del sistema y las relaciones entre ellas podemos representarlo gráficamente. En este diagrama las relaciones son representadas por flechas entre las variables del sistema involucradas en esta relación. Estas flechas se acompañan de in signo (+ o -) que indica la influencia ejercida de una variable sobre otra. Un signo “+” indica que la variable de origen provoca un cambio del mismo sentido en la variable de destino. El signo “-” simboliza un cambio de sentido contrario.

Por lo que cuando **un incremento de A, produce un incremento de B**, tendremos una relación **positiva** (Imagen 33). Y cuando **un incremento de A, produce una disminución de B**, tendremos una relación **negativa** (Imagen 34), lo representamos todo [145]:

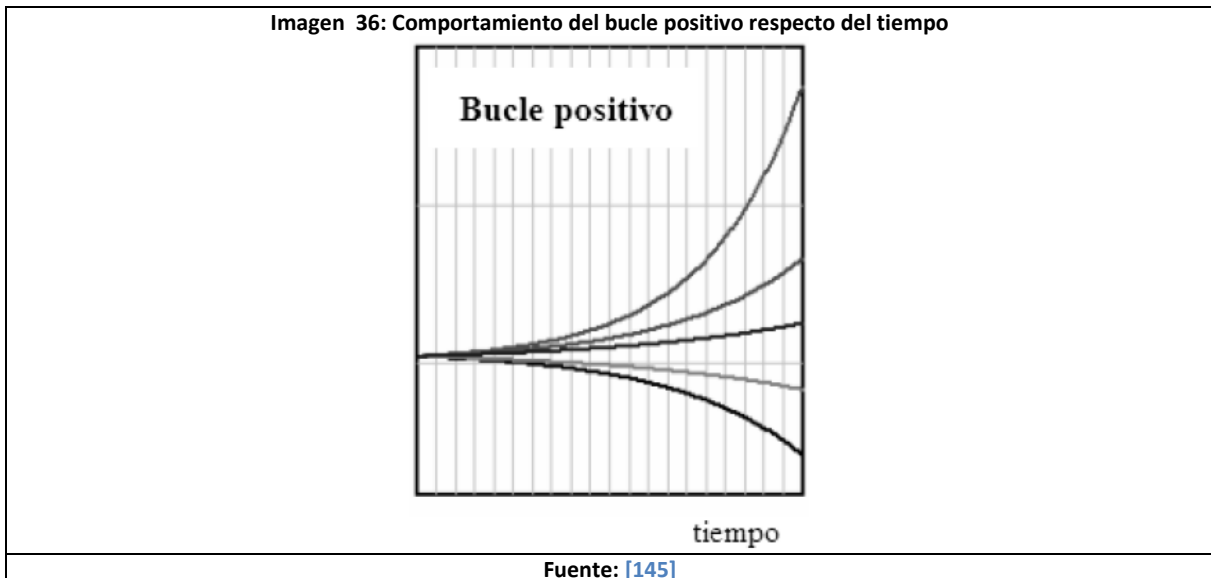


“Una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle, retroalimentación o feedback” [144].

El ejemplo claro de bucle sería el llenado de un vaso de agua, según aumenta el nivel de agua del vaso cuando lo estamos llenando, nosotros, reducimos la cantidad del agua vertida en el vaso con el fin de reducir la velocidad de llenado y no verter el agua al exceder la capacidad del vaso. El sistema estaría formado por nosotros, el vaso de agua y el grifo y todos estos elementos se interrelacionan entre si formando bucles como los presentes en la Imagen 35.

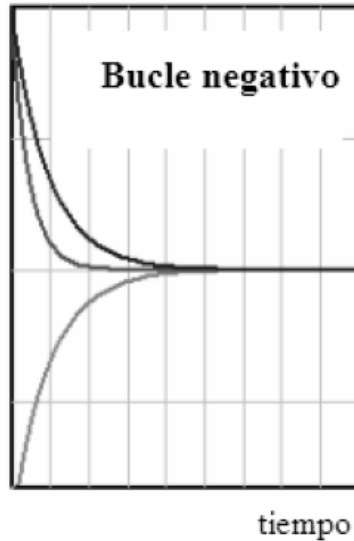


Los bucles son **positivos** (Imagen 36) cuando el número de relaciones negativas que lo componen es par y es negativo cuando es impar.



Los bucles **negativos** (Imagen 36) llevan al sistema a una situación estable, como con el vaso de agua del ejemplo, mientras que los positivos hacen el sistema inestable.

Imagen 37: Comportamiento del bucle negativo respecto del tiempo



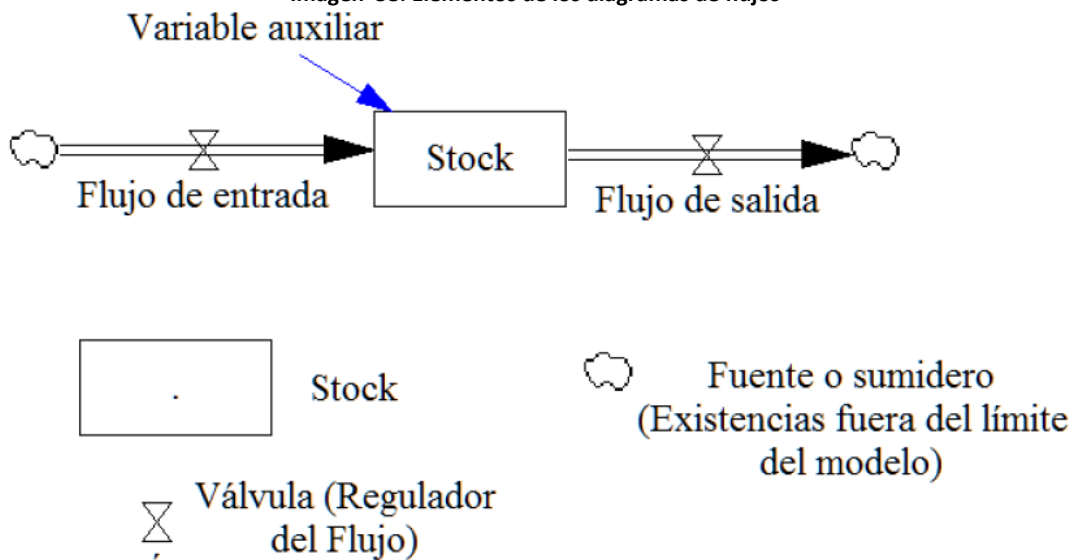
Fuente: [145]

En la realidad vemos (Imagen 37) como en el mismo sistema confluyen bucles negativos y positivos, en ese caso el comportamiento final dependerá del bucle dominante en un momento determinado.

2.7.2 Diagrama de flujos o Forrester

El diagrama de flujos o de Forrester es el diagrama característico de la dinámica de sistemas. Es la transcripción desde el diagrama causal a una terminología que permite la introducción de toda la información en un ordenador, posee varias partes [144], [146]:

Imagen 38: Elementos de los diagramas de flujos



Fuente: [146]

Los niveles o stocks: son elementos que nos muestran la situación del modelo a lo largo del tiempo, son variables dinámicas, presentan una acumulación y varían solo debido a otros elementos llamados flujos. Los niveles se representan por rectángulos, salvo si son inagotables, que son representados por nubes. Una fuente representa el stock desde el cual surge un flujo que se origina fuera del límite del modelo; los sumideros representan las

existencias que se salen del límite del modelo. Ambos tienen una capacidad infinita y nunca pueden restringir los flujos que soportan.

Los flujos: son elementos que pueden definirse como funciones temporales, recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Pueden ser positivos, incrementando el stock o negativos, disminuyéndolo. Se representan con una flecha con un símbolo de válvula.

Las variables auxiliares: comprenden el resto de variables o constantes del modelo. Son parámetros que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos y se relacionan entre ellas, con los stocks y los flujos.

Los retardos: Por último, queda por definir los retardos, que son funciones que simulan los retrasos que se producen en la transmisión de materiales, informaciones o un tiempo entre la realización de una acción y su efecto. Para simular los retrasos de material se utilizan funciones como DELAY y SMOOTH.

Resumiendo lo anterior podemos decir que la cantidad de material en una variable stock es la acumulación de los flujos de entrada de material menos los flujos de salida de materia, todo ello condicionado por las variables auxiliares (Imagen 38).

Si queremos representar la figura anterior de forma matemática correspondería a la siguiente ecuación integral (ec.4):

$$Stock(t) = \int [Flujo\ de\ entrada(s) - Flujo\ de\ salida(s)] + Stock(t_0) \quad (4)$$

Aunque no aparece en la figura podemos enunciar como se representa también matemáticamente un retardo puro (ec.5):

$$Salida(t) = Entrada(t - T), \text{ siendo "T" el retardo} \quad (5)$$

2.7.3 Fases del modelado

Un modelo es una representación de un sistema o de una realidad compleja. Aunque la construcción de un modelo dista de ser un proceso estandarizado, siempre posee distintas etapas [146]:

1) Descripción y articulación del problema: En primer lugar, debemos definir el problema que vamos a tratar, las variables claves del sistema y el horizonte temporal a considerar. En último lugar demos tener información sobre las tendencias temporales del comportamiento de las variables.

2) Formulación de una hipótesis o teoría sobre el comportamiento del sistema: En este apartado se realizan hipótesis que explican el comportamiento de las variables como resultado de las relaciones entre estas, consecuencia a su vez, de la estructura de realimentación. Se lleva a cabo el diagrama causal.

3) Formulación de un modelo de simulación: Se realiza con el fin de probar las hipótesis planteadas en el apartado anterior, por lo que también son necesarios los datos que establezcan las condiciones iniciales del modelo.

4) Análisis y test del modelo: Se testea el modelo con el fin de perfeccionarlo: Se les somete a diversas pruebas con condiciones extremas e incertidumbres.

5) Diseño y evaluación de las políticas de mejora: Por último, se diseñan los escenarios y políticas aplicables al sistema. A continuación, se evalúan los efectos de estas políticas y su interacción.

Para finalizar, se debe aclarar, que el proceso de modelado es un proceso iterativo, está lejos de ser una secuencia lineal de pasos. Los modelos pasan por una iteración constante y cuestionamiento continuo, buscando perfeccionar el modelo lo máximo posible.

2.7.4 Programa empleado, VenSim

El programa que usaremos en este trabajo es el software Vensim. Es una herramienta gráfica de modelado que permite programar, simular, analizar y optimizar modelos de sistemas dinámicos [146].

El programa proporciona la posibilidad de construir modelos a partir de diagramas, como los explicados anteriormente, por lo que las fórmulas introducidas y las variables representadas son las partes que forman el modelo. Además, es capaz de almacenar los datos que resultan de la simulación fuera del modelo permitiendo hacer un uso posterior de ellos.

En este trabajo se emplea la versión DSS (Decision Support System) de VenSim, que es la más completa de las disponibles. Las principales características del modelado en Vensim se presentan a continuación:

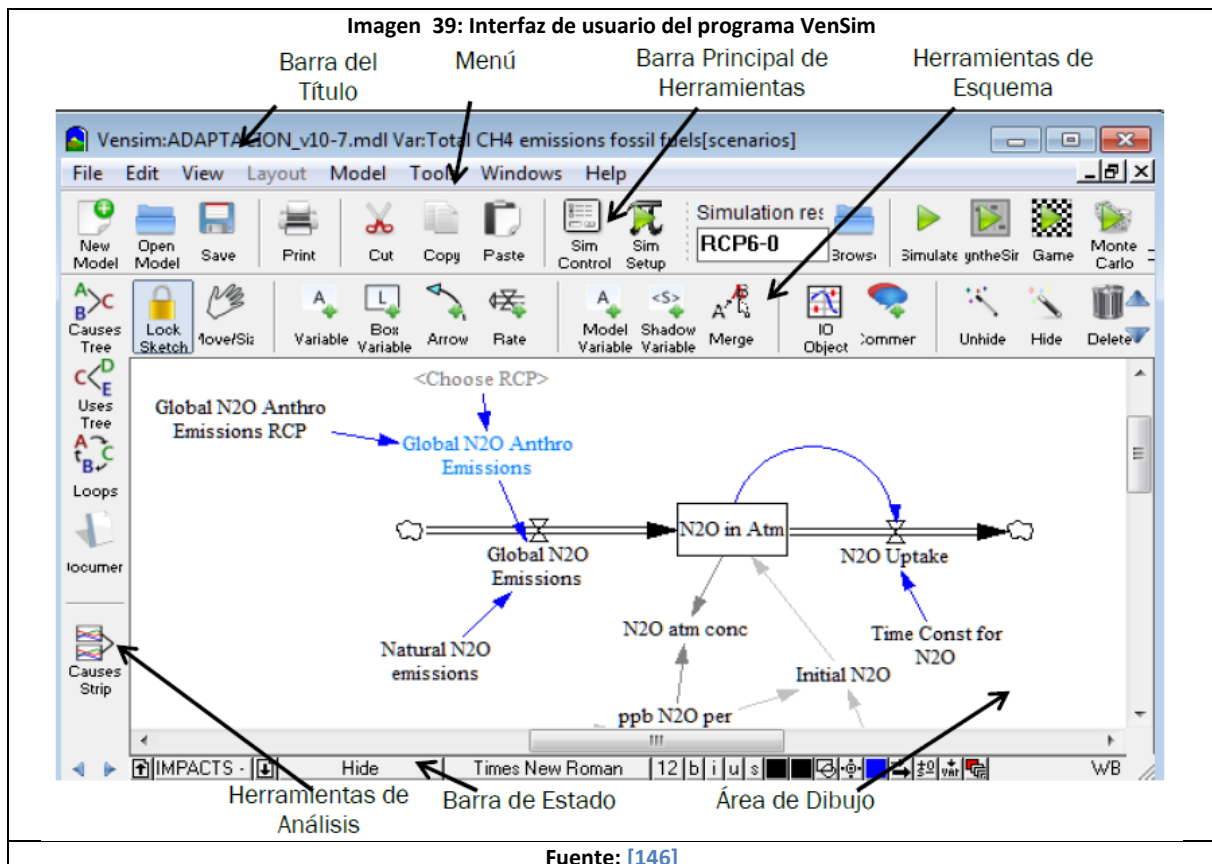
1) Interfaz del Usuario: Vensim posee una interfaz (Imagen 39) donde se encuentran las herramientas para el usuario que se utilizan para construir, ejecutar y analizar modelos. La ventana principal de Vensim es el “Workbench”, formado por los diferentes elementos que vemos en la Imagen 39.

2) Conceptos matemáticos: Vensim utiliza para el cálculo de stocks la ecuación integral, como la enunciada anteriormente (ec.4). Para esta cuestión Vensim ofrece varias opciones de integración:

- i. Euler. Lleva a cabo la integración de Euler. Es la solución más simple y rápida. Este es el método que se emplea en el presente trabajo.
- ii. Diff. Realiza la integración de Euler, pero almacena los valores de las variables auxiliares en un paso anterior. Se utiliza principalmente para las ecuaciones en diferencia.
- iii. RK4. Realiza la integración Runge-Kutta de cuarto orden. Se utiliza para la obtención de una respuesta precisa.

3) Secuencia computacional: Vensim utiliza la estructura causal para determinar la secuencia apropiada de cálculo. Los pasos que realiza para simular un modelo cambian según el método de integración. Para Euler son los siguientes:

- I. Preparación. Todas las Constantes toman los valores especificados para ellas y se procesan todos los cambios y las referencias de hojas de cálculo externas. El programa lee todos los datos, los valores cargados y las ecuaciones calculadas. Al final de esta etapa todas las Constantes tendrán valores asignados.
- II. Inicialización. Se calculan los valores iniciales de las variables “stock” o “niveles” en el modelo. En el proceso de cálculo de estos valores, puede ser necesario el cálculo del valor inicial de algunas variables auxiliares.
- III. Cálculo de variables auxiliares. Se calcula mirando su ecuación.
- IV. Almacenamiento de los resultados. Se almacenan los valores de las variables “stock” y las auxiliares que resultan de esas variables stock.
- V. Cálculo de la Tasa Neta. Se calcula la tasa neta de cambio para cada variable stock en el modelo.
- VI. Integración. Para la integración con Euler, los resultados del paso 5 se multiplican por el TIME STEP (definido al comienzo de crear el modelo) y se añaden a los valores de los niveles.
- VII. Continuación. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repiten hasta que el tiempo llega a FINAL TIME.



4) Ecuaciones: En VenSim se puede definir el modelo utilizando un conjunto de ecuaciones. En la ecuación se muestra cómo la variable depende de otras variables. Estas ecuaciones se

introducen en el modelo mediante el “Editor de ecuaciones”. En él, se pueden especificar las unidades de medida, el rango de valores mínimos y máximos esperados, un comentario con la descripción de la variable, y el grupo al que se desea asociar la variable.

5) Control de subíndices: Denominado “Subscript Control” en el programa, su utilidad reside en que posibilita tratar una variable como un vector, de tal forma, que se pueda agregar un valor diferente de la variable a cada posición del vector. Así se pueden agregar distintos valores de las variables, según los distintos escenarios o políticas empleados en el mismo modelo.

6) Análisis y Simulación: Una vez construido el modelo se puede analizar su estructura mediante los “Tree Diagrams” (a la izquierda en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Posteriormente, se realiza la simulación para ver el comportamiento dinámico del modelo.

Una vez simulado, se puede examinar su comportamiento empleando las herramientas de análisis, que pueden ser gráficas o tablas. Vensim permite almacenar y visualizar todo el comportamiento dinámico de las variables del modelo, incluso representar más de una prueba o experimento a la vez pudiendo así compararlos.

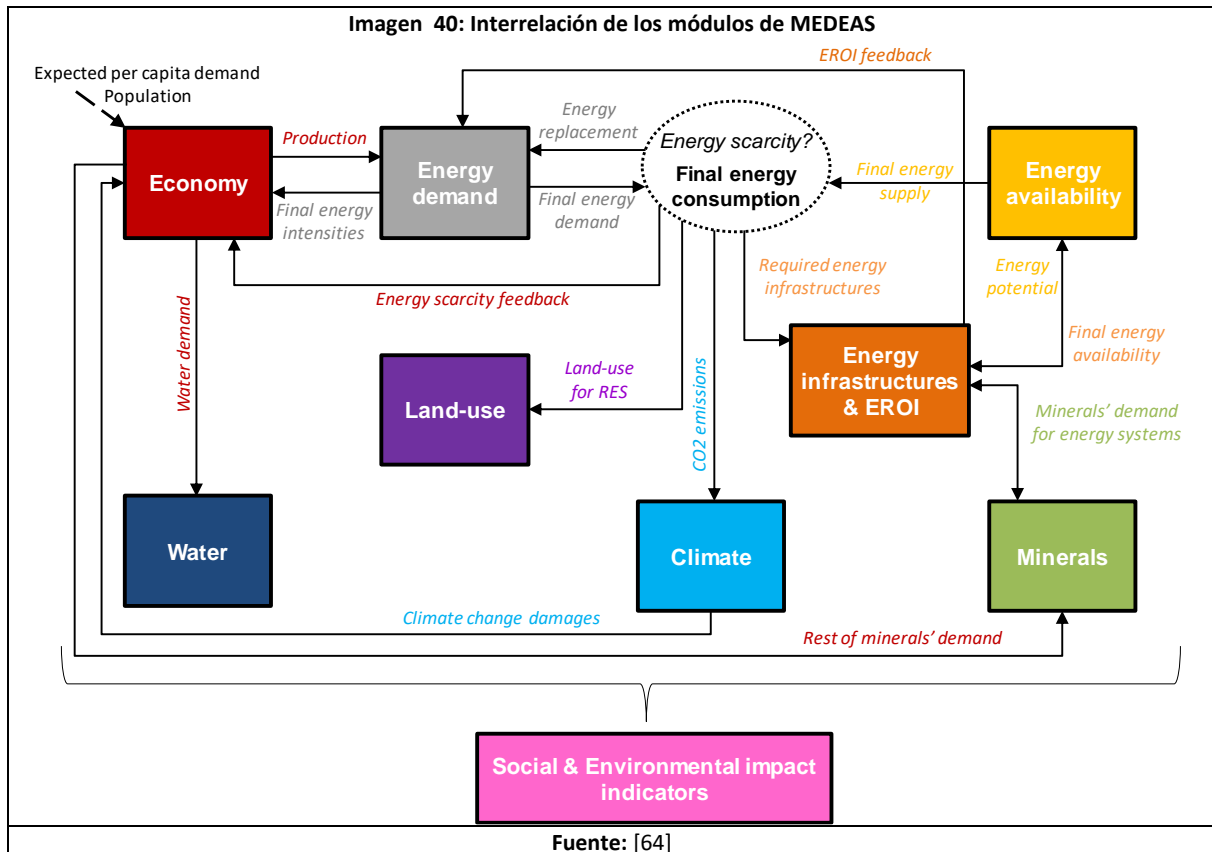
7) Importar datos externos: Vensim también permite importar datos externos, bien desde un archivo de texto o bien de una hoja de cálculo Excel (que será lo empleado en este trabajo). Para ello es necesario indicarlo en el editor de ecuaciones de la variable de interés con la función “GET XLS DATA”.

2.8 MEDEAS-W

2.8.1 Presentación del modelo MEDEAS-W

El modelo enfocado al análisis de los requerimientos materiales de la tecnología fotovoltaica hecho en este trabajo se plantea como una aportación a la familia de modelos MEDEAS [147] (aunque se integrará a futuro a su vez dentro del modelo WILIAM, en el marco del proyecto LOCOMOTION [65]) en la que colabora la Universidad de Valladolid a través del grupo de investigación de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas (GEEDS). La familia de modelos MEDEAS-W es un conjunto de modelos de sistemas dinámicos y recursivos de simulación de políticas desarrollado con el objetivo de ayudar en la toma de decisiones para lograr la transición a sistemas energéticos sostenibles centrándose en las restricciones biofísicas.

A los modelos MEDEAS se les suele asignar un marco temporal de simulación situado entre los años 1995 y 2050, aunque el horizonte de simulación puede ampliarse hasta 2100 cuando se centran en los análisis estratégicos de sostenibilidad a largo plazo. MEDEAS-W es la versión agregada mundial y está estructurada en nueve módulos principales (Imagen 40), **economía, demanda energética, disponibilidad energética, infraestructura energética y tasa de retorno, minerales, uso del terreno, agua, clima, y por último, impactos sociales y medioambientales.**



MEDEAS-W se basa en los principios de la economía biofísica y ecológica, que asumen que la disponibilidad de energía final actúa como un factor limitante del proceso económico. Las intensidades energéticas (definidas como la relación entre la energía final gastada por cada sector económico dividida por la producción económica de ese sector) evolucionan con el tiempo debido al progreso tecnológico. Además, la escasez de cada tipo de energía final estimula la sustitución de la energía inter-final; sin embargo, si estas sustituciones no son suficientes, el proceso económico se limita a la cantidad de energía final disponible. La economía se adapta a la energía final más limitante sigue la analogía ecosistémica (ley del mínimo de Liebig) de que el crecimiento no está dictado por los recursos totales disponibles, sino por el recurso más escaso.

La disponibilidad de minerales también se contempla en el marco. Se aplica un enfoque estilizado para estimar el consumo de minerales por la economía, dada la estrecha relación entre la actividad económica y el consumo de minerales en el actual sistema socioeconómico industrial. El MEDEAS-W compara la demanda primaria total de minerales que se extraen de las minas (tras contabilizar las tasas de reciclaje) con el nivel estimado de su disponibilidad geológica (reservas y recursos). De esta manera se calcula una estimación de la escasez de minerales, pero no limita las actividades económicas (al contrario de lo que ocurre con la escasez de energía) debido a la mucha menor solidez de la estimación de la demanda, así como de los datos sobre la disponibilidad de minerales.

2.8.2 Factores del modelo relacionados con la energía y los requerimientos materiales

MEDEAS-W posee varios aspectos relacionados con la energía y los requerimientos materiales, y ya que nuestro estudio está enfocado en un tipo de generación de energía eléctrica, se explicarán estos aspectos:

2.8.2.1 Modelización de la demanda energética en el modelo MEDEAS-World

La demanda energética se modela con gran detalle en MEDEAS-W [64], dada la detallada desagregación sectorial, se utiliza un novedoso método basado en la proyección descendente de la variación en el tiempo de las intensidades energéticas finales sectoriales para estimar la demanda energética final sectorial y de los hogares. La intensidad energética expresa la relación entre la energía utilizada en un proceso y su producción económica, y también se utiliza a menudo como una medida de la eficiencia energética.

El marco del MEDEAS considera 5 tipos de energías finales (sólidos, líquidos, gases electricidad y calor) y 35 sectores económicos, lo que permite calcular 35x5 intensidades energéticas sectoriales y 5 intensidades energéticas asociadas al consumo de los hogares. Por lo tanto, se manejan un total de 180 intensidades energéticas finales en el marco de MEDEAS. A excepción de los sectores de transporte interior que siguen un modelo ascendente que podría ampliarse eventualmente a otros sectores, la variación de la intensidad energética final de cada sector y de los hogares en el tiempo se modela con un enfoque descendente. El punto de partida para modelizar el comportamiento dinámico de las intensidades energéticas finales son los datos históricos disponibles, tomando como referencia los datos de las cuentas ambientales de la base de datos WIOD (1995-2009) y complementados con los balances de la AIE. Las tendencias de referencia suponen tasas de variación de las eficiencias energéticas finales vinculadas al cambio tecnológico y el crecimiento económico y se basan en el modelo propuesto por Schenk y Moll para explicar la tendencia histórica de la intensidad energética, teniendo en cuenta los límites biofísicos y termodinámicos en la sustitución de inputs. Se supone que las intensidades energéticas finales cambian con referencia a las tendencias de referencia debido a dos factores:

- (1) La variación de la intensidad energética debida a la mejora de la eficiencia energética, asociada a la tecnología utilizada en el consumo de cada sector y tipo de energía final.
- (2) La variación de la intensidad energética debida a la sustitución de un tipo de energía final por otro. En este caso, el tipo de energía que se sustituye disminuye su intensidad energética final y el tipo de energía que sustituye a la anterior aumenta su intensidad energética final. Se supone que las variaciones de las intensidades energéticas finales sectoriales se deben a dos factores principales, la escasez de un tipo de energía, factores sociopolíticos.

2.8.2.2 Modelización de la disponibilidad energética en MEDEAS-World

MEDEAS [64] presenta una gran desagregación en la representación de las fuentes y tecnologías energéticas. MEDEAS-W posee 25 fuentes de energía y tecnologías modeladas y 5 categorías de energía final.

El petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio son los principales recursos energéticos no renovables considerados en MEDEAS. La disponibilidad de los recursos energéticos no renovables en el MEDEAS depende de dos condicionantes: las existencias (recurso disponible en el suelo) y el flujo (tasa de extracción de este recurso). Para considerar la disponibilidad futura de los combustibles fósiles en el modelo, realizamos una revisión bibliográfica de los estudios que proporcionan curvas de agotamiento a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta tanto las existencias y el límite de flujo. Estas curvas representan niveles de extracción compatibles con las limitaciones geológicas en función del tiempo.

Las curvas de agotamiento, más que predicciones, representan perfiles máximos de perfiles de extracción para una fracción de la base de recursos que se estima que puede extraerse económicamente en el futuro teniendo en cuenta las limitaciones geológicas: la tasa real de consumo de recursos puede verse afectado por variables como la geopolítica, las condiciones económicas y el desarrollo tecnológico. Dado que la demanda se modela de forma endógena para cada recurso, estas curvas de agotamiento de los recursos, se transforman para incorporarlas al modelo dinámico, convirtiéndolas en curvas de producción máxima en función de los recursos restantes. El usuario del modelo es libre de seleccionar cualquier curva de agotamiento, introducir una nueva o incluso suponer que ninguna restricción relevante afectará a la oferta de cualquiera de los recursos en el periodo de simulación.

Se modelan nueve tipos de fuentes de energía renovable para la generación de electricidad hidroeléctrica, solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, eólica terrestre, eólica marina geotérmica, biomasa, oceánica y biogás; mientras que para el calor se consideran 4 fuentes de calor: solar, biomasa, geotérmica y biogás.

La selección de nuevas TBC aún no competitivas modeladas en MEDEAS toma como referencia el principio de precaución, que es el enfoque más sólido en contextos de incertidumbre como el que caracteriza el cambio climático y la crisis de la sostenibilidad. Se han aplicado dos criterios:

- (1) Dada la necesidad de actuar urgentemente para estabilizar el clima y revertir las tendencias insostenibles actuales, centrarse en aquellas tecnologías que están actualmente disponibles y que han demostrado ser comerciales. De hecho, se ha demostrado que las nuevas tecnologías y sistemas energéticos de energía tardan varias décadas en difundirse en la economía.
- (2) Garantizar que el balance energético neto de las tecnologías consideradas sea positivo, es decir, que la tecnología sea un contribuyente energético neto "razonable" para la sociedad.

2.8.2.3 *Minerales en el modelo, análisis de viabilidad material del cambio de producción energética.*

El módulo de minerales de MEDEAS permite evaluar los efectos potenciales que el agotamiento de los minerales puede ejercer sobre la futura transición energética y obtener el

EROI de un conjunto de TBC endógenamente. La demanda de minerales en MEDEAS-W se divide en dos categorías:

(1) Minerales demandados por 6 tecnologías renovables clave para la transición hacia sistemas energéticos totalmente basados en las fuentes de energía renovables (solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, eólica terrestre, eólica marina, baterías para vehículos eléctricos y redes eléctricas). En este trabajo se completará la fuente solar fotovoltaica introduciendo las nuevas tecnologías que se encuentran en el mercado e imponiendo un sistema que es capaz de estimar como se demandarán estas tecnologías en función de diferentes factores como se explicará más adelante.

(2) Minerales demandados por el resto de la economía. Esta división es necesaria para hacer frente al hecho de que los datos relativos al consumo de minerales a nivel mundial son generalmente de baja calidad (falta de datos robustos y detalles sectoriales, etc.). Dada la falta de datos sobre la demanda de materiales asociada a los sectores se aplicó un enfoque estilizado para estimar la futura demanda de minerales por parte del resto de la economía, asumiendo una dependencia lineal con el PIB. Los datos históricos sobre el PIB y la extracción de minerales para el periodo 1994-2015 se aplicaron para estimar los parámetros de las regresiones, obteniendo correlaciones aceptables en la mayoría de los casos.

Para cada una de las fuentes de energía renovable clave, se seleccionó una tecnología representativa, teniendo en cuenta el rendimiento actual y el previsto, y evitando las que tienen más probabilidades de verse afectadas por la escasez de minerales en el futuro. Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica para identificar la intensidad de material (kg/MW) de cada tecnología representativa, incluidos los relacionados con los requisitos adicionales de la red, para un total de 62 materiales, de los cuales 23 son minerales. Los criterios de selección se basaron en la consideración de todos los materiales relevantes para estimar la energía incorporada para la estimación del EROI, con minerales críticos potenciales ya identificados en la literatura.

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura, complementada con diferentes estimaciones, para cotejar los datos más sólidos y precisos sobre las necesidades de material de cada tecnología. Dada la incertidumbre existente sobre la futura disponibilidad de minerales, MEDEAS compara la demanda primaria acumulada de minerales (después de tener en cuenta las tasas de reciclaje) con el nivel actual estimado de su disponibilidad geológica (reservas y recursos) para una detección cualitativa de los riesgos para el futuro suministro de minerales.

2.8.2.4 *Infraestructuras energéticas y EROI del sistema.*

MEDEAS se centra en la representación de las infraestructuras relacionadas con la generación de electricidad y calor mediante energías renovables, como parques eólicos, sistemas solares, líneas eléctricas adicionales, etc., mientras que la capacidad de producción eléctrica de las centrales eléctricas de combustibles fósiles se encuentra implícita en el modelo. Esta elección se hace por simplicidad, ya que la transición energética consistirá principalmente en cambiar las segundas y habilitar las primeras. En MEDEAS, las tecnologías de generación renovables

tienen prioridad en la satisfacción de la demanda de electricidad. Las infraestructuras relacionadas con las energías renovables se representan como reservas de potencia con una vida útil determinada y su despliegue, limitado por el potencial del recurso, depende por un lado, de una función de asignación que tiene en cuenta factores como la configuración del mix (es decir, la gestión de la intermitencia de las renovables variables) o el EROI de cada tecnología [148] (apartados 2.4.5 y 2.4.6 de la referencia), y por otro, de la elección exógena del usuario, que puede escoger un ritmo de crecimiento de potencia deseado para cada tipo de energía renovable (este factor será objeto de un análisis de sensibilidad en este estudio, apartado 3.2.11).

Explicando en mayor profundidad la función de asignación, esta, compara el $EROI_{st}$ de cada tecnología (calculado de forma dinámica a lo largo del tiempo por el modelo de forma endógena), dando prioridad a la instalación de las tecnologías que presenten un $EROI_{st}$ más elevado en relación al $EROI_{st}$ de producción eléctrica total mediante energías renovables de ese momento.

La intermitencia de las renovables es considerada, teniendo en cuenta factores como la necesidad de poseer sobrecapacidad de generación y el almacenamiento energético en función de la penetración de tecnologías de energías renovables variables. Los desequilibrios físicos entre la oferta y la demanda en el mercado impulsan los de la energía final, mientras que las tecnologías renovables tienen prioridad sobre los combustibles fósiles. Los desplazamientos de energía también impulsan sustituciones a nivel de fuentes primarias de energía, sujetas a limitaciones tecnológicas y dinámicas. La energía neta disponible, y no la primaria, es el factor relevante para la sociedad. Reconociendo las dificultades de calcular límites amplios para el EROI, se da un primer paso conservador que se centra en el cálculo dinámico del EROI del sistema a partir de un enfoque estándar ($EROI_{st}$ del sistema), cuya metodología se explicará más adelante.

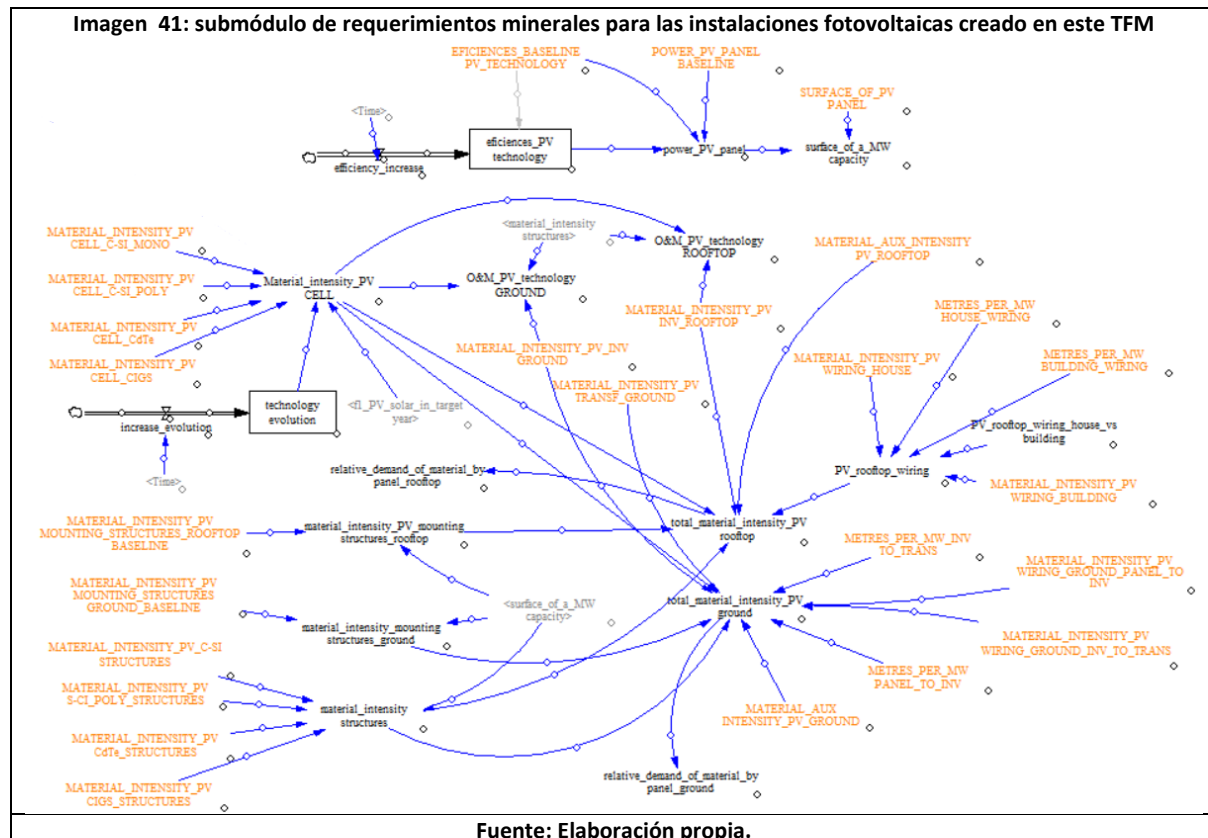
2.8.2.5 Modelización de la reestructuración de la producción como resultado del cambio en la demanda

Las políticas orientadas a la demanda implican una reestructuración de la producción de los diversos sectores [64]. Por ejemplo: si se sustituyen los automóviles privados por bicicletas electrónicas, los sectores económicos relacionados con la fabricación y el mantenimiento de vehículos deben sufrir una contracción, ya que los nuevos vehículos requieren una actividad económica mucho menor para su fabricación y mantenimiento. Si la sustitución de los automóviles privados se hace por medios no motorizados, como el caminar, la producción relacionada con los vehículos sustituidos desaparece por completo. El marco de insumo-producto permite captar las consecuencias de este cambio estructural para el conjunto de la economía. El acoplamiento con el resto del modelo MEDEAS permite calcular el cambio asociado en el uso de la energía y las emisiones.

2.8.3 Modificaciones del modelo MEDEAS-W llevadas a cabo en este trabajo

2.8.3.1 Submódulo de requerimientos materiales de la tecnología fotovoltaica

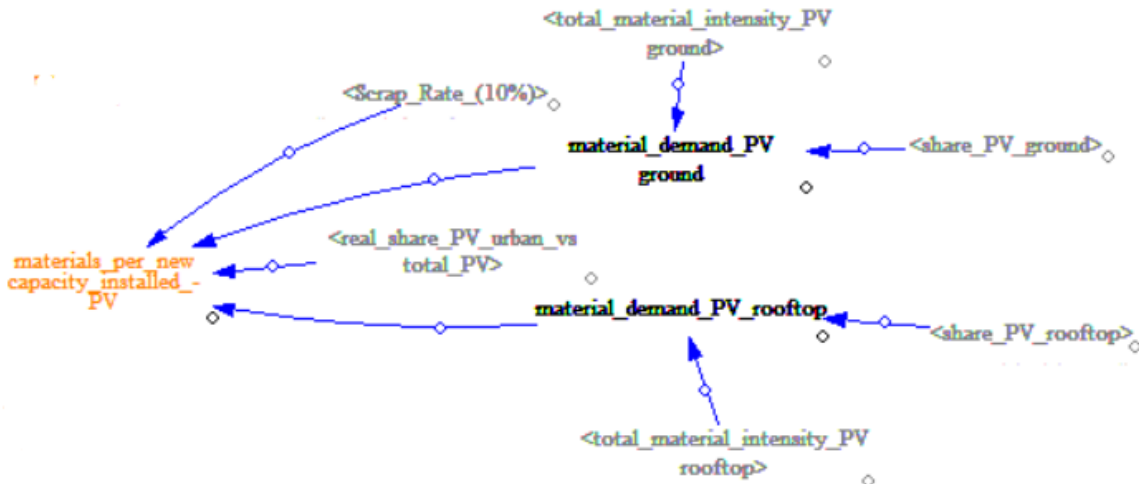
Previamente a la realización de este trabajo el modelo MEDEAS-W tenía en cuenta la tecnología fotovoltaica como una tecnología única. En este TFM, se ha aumentado la precisión del modelo en lo respectivo al estudio de la demanda mineral de la tecnología fotovoltaica, diversificando las subtecnologías de los paneles solares (C-Si mono, C-Si poli, CdTe y CIGS) y teniendo en cuenta a su vez si las instalaciones están situadas a nivel de suelo o de tejado.



El modelo MEDEAS-W ahora es capaz de considerar más aspectos de la tecnología fotovoltaica, calculando la demanda material final teniendo en cuenta el ratio de reciclado (apartado 3.2.10), el porcentaje dinámico de mercado de cada tipo de panel (apartado 3.2.9), el porcentaje dinámico de instalaciones en tejado respecto a las de suelo (apartado 3.2.4) y la posible mejora tecnológica o de eficiencia de los paneles (Imagen 41 e Imagen 42).

Las mejoras tecnológicas y de eficiencias de los paneles pueden ser escogidas por el usuario en función de los escenarios que se propongan (apartado 2.9). Lo mismo ocurre con el porcentaje de instalaciones en tejado respecto a las de suelo, pero con una diferencia, el modelo es capaz de limitar nuestra elección si encuentra que ya no hay tejados disponibles para instalar fotovoltaica.

Imagen 42: submódulo de requerimientos minerales para las instalaciones fotovoltaicas creado en este TFM, requerimientos finales por MW de instalación

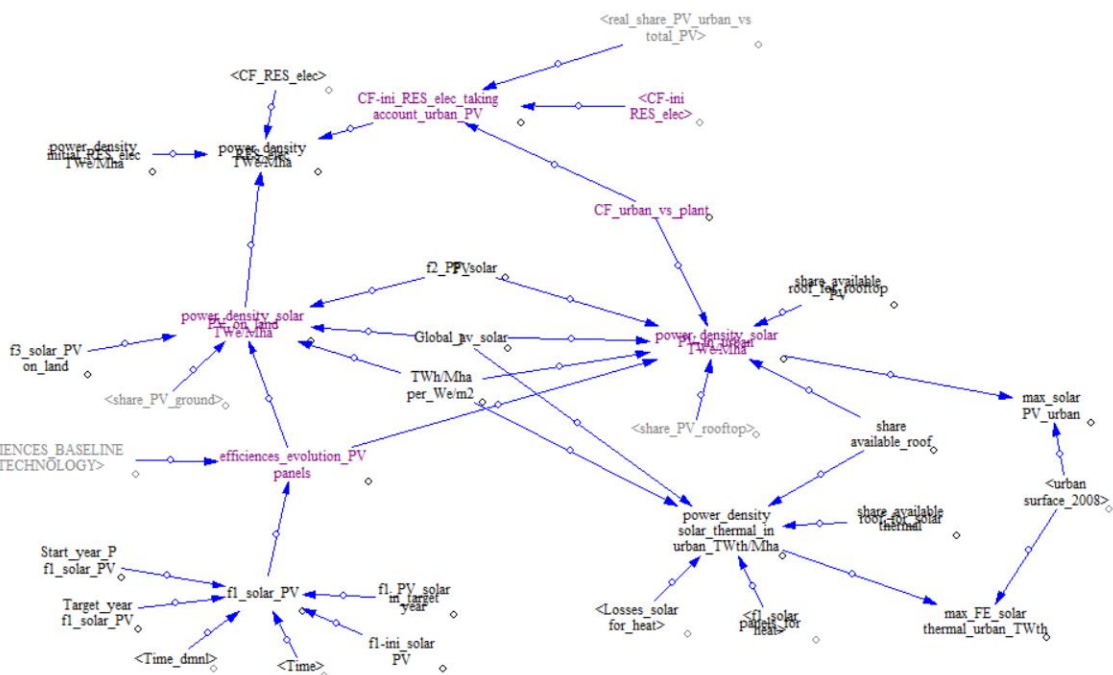


Fuente: Elaboración propia.

2.8.3.2 Submódulo de uso del espacio

En el apartado anterior ya se han indicado algunos aspectos relacionados con el uso del espacio por parte de la tecnología fotovoltaica. El modelo ya podía tener en cuenta el espacio que demandaba la tecnología fotovoltaica antes de la realización de este estudio, pero ahora lo hace de forma más precisa (Imagen 43). La introducción de las diferentes tecnologías fotovoltaicas permite tener en cuenta el espacio que ocupa cada una de ellas debido a sus diferentes eficiencias. También, la posibilidad de aumentar la eficiencia nos permite ahora conocer qué pasará con el uso de la tierra en función del empleo de unas tecnologías más o menos eficientes. Anteriormente, el modelo tampoco distinguía entre el factor de capacidad de las instalaciones de suelo o las instalaciones de tejado.

Imagen 43: submódulo de uso del espacio para las instalaciones fotovoltaicas modificado en este TFM, cálculo de la densidad de potencia.



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la densidad de potencia de las instalaciones de suelo, el modelo tiene en cuenta la eficiencia de los paneles, la irradiación media global (con valor igual a 168 W/m² [149]), un ratio de rendimiento (con valor igual a 0,67/1 [150]), un ratio de la superficie real de producción eléctrica de los paneles respecto a la ocupación de terreno total de una planta fotovoltaica (con valor igual a 0,23/1 [137]), y por último, la variación dinámica del factor de capacidad (ec.6).

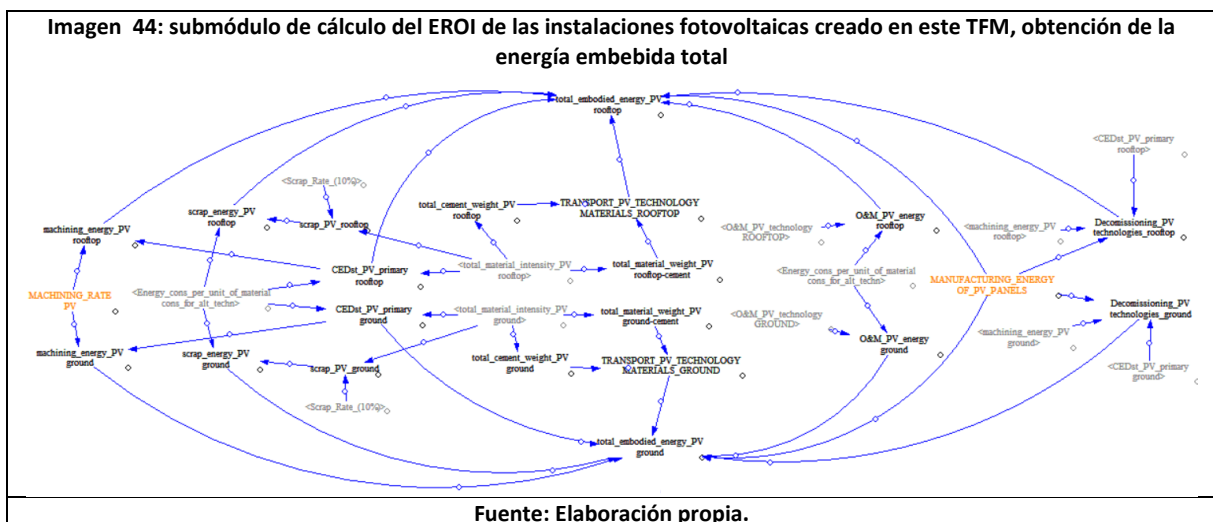
$$Dens.potencia \left(\frac{TW}{MHa} \right) = Irradiación_{med.global} \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot conversión \left(\frac{TW \cdot m^2}{MHa \cdot W} \right) \cdot Ratio_{rend} \cdot Ratio_{sup} \cdot \frac{dCF}{dt} \quad (6)$$

Para el cálculo de la densidad de potencia de las instalaciones de tejado (ec.7), el modelo tiene en cuenta la eficiencia de los paneles, el ratio de superficie urbana disponible donde se puedan colocar paneles respecto al total de la superficie urbana (ratio de valor 0,025), cuanta de esta superficie se puede destinar a la fotovoltaica y no a la térmica (ratio de valor igual a 0,5) y finalmente, el usuario escoge en función de los escenarios a simular (apartado 2.9) el porcentaje deseado de producción fotovoltaica urbana respecto a la producción total. Este último aspecto está limitado por la cantidad de espacio urbano disponible, si el modelo demanda más energía mediante fotovoltaica y no quedan suficientes espacios urbanos, incumplirá el deseo del usuario instalando más en suelo.

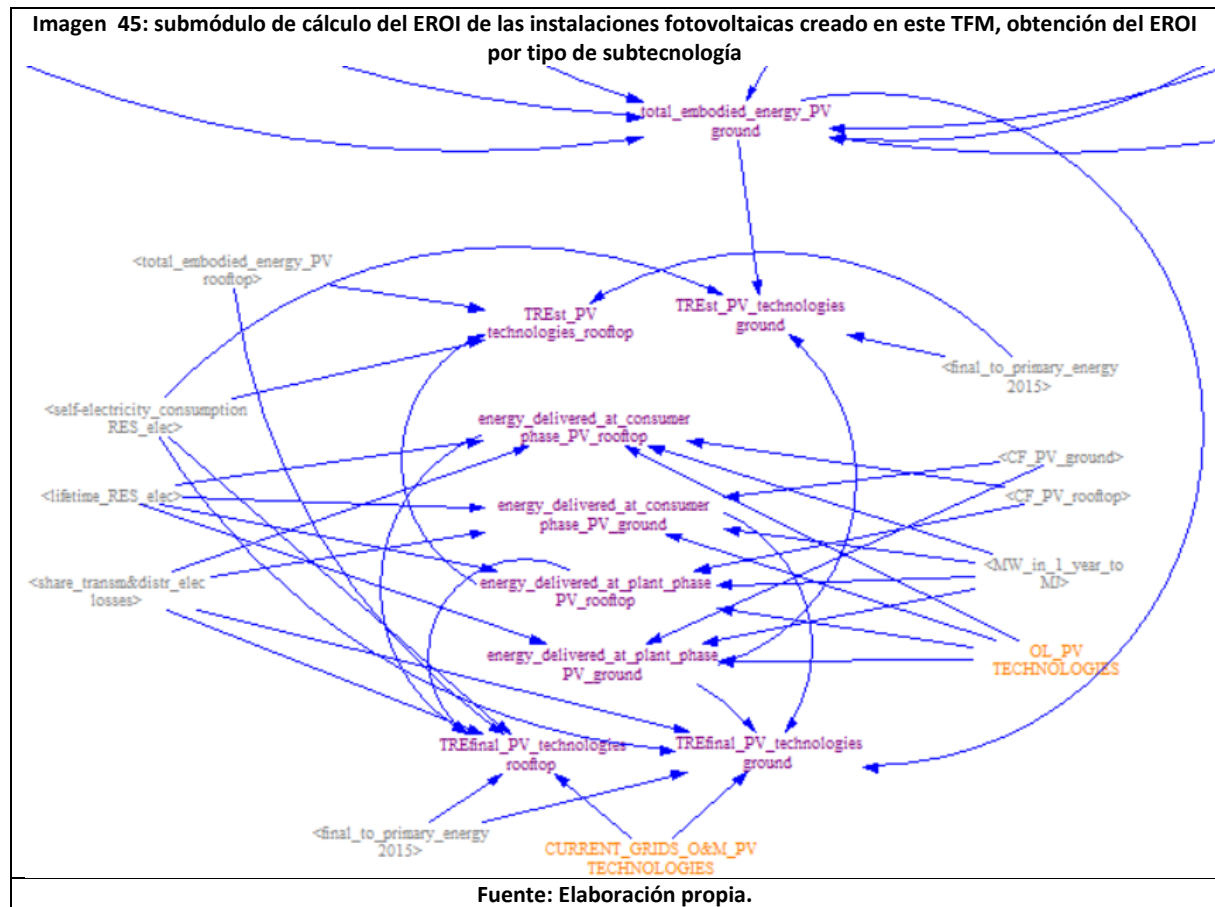
$$Dens.potencia \left(\frac{TW}{MHa} \right) = Irradiación_{med.global} \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot conversión \left(\frac{TW \cdot m^2}{MHa \cdot W} \right) \cdot Ratio_{rend} \cdot Ratio_{sup} \cdot Ratio_{pv} \cdot \frac{dCF}{dt} \quad (7)$$

2.8.3.3 Submódulo de cálculo del EROI de la tecnología fotovoltaica

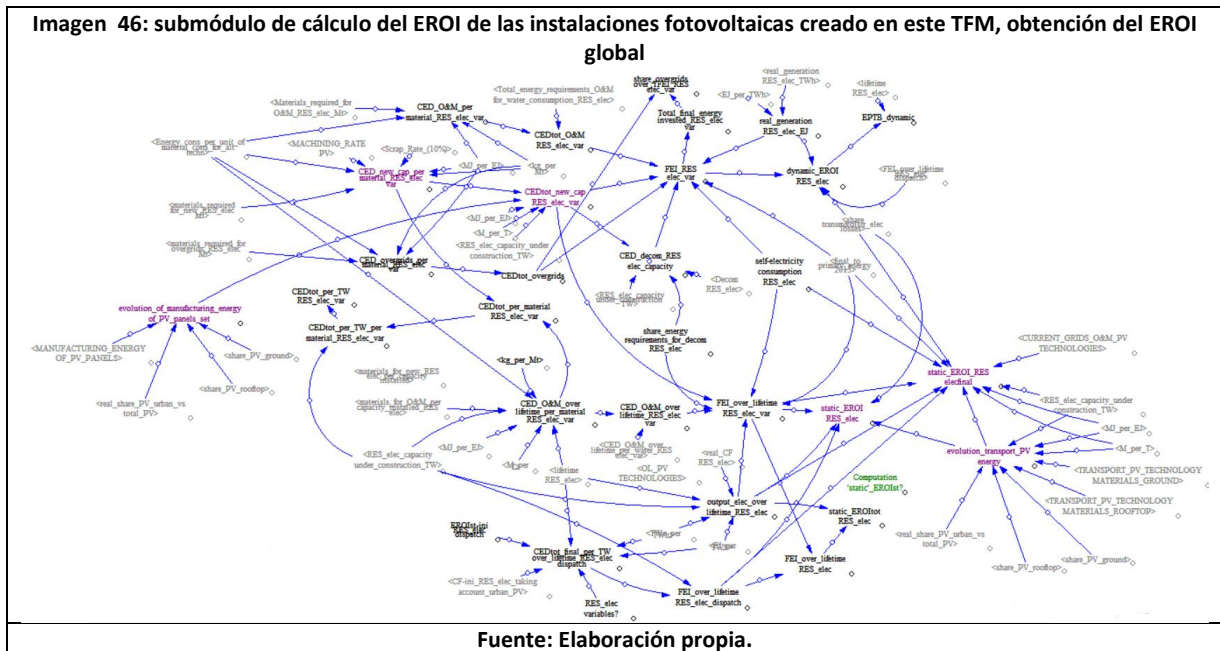
El modelo ahora es capaz de calcular el EROI de las diferentes tecnologías de producción fotovoltaica de forma análoga a lo expuesto por las ecuaciones (6)-(7) y explicado en el apartado 2.6, pero de forma dinámica (Imagen 44 e Imagen 45). A diferencia del cálculo puramente estático del EROI, el modelo es capaz de ir variando de forma endógena la intensidad energética de los materiales (según varían dinámicamente los ratios de reciclado), los factores de capacidad, las pérdidas de energía en la distribución (TDL) y los requerimientos materiales (al variar de forma dinámica las eficiencias y la evolución tecnológica).



Además de obtener los EROIs dinámicos por tipo de tecnología que acabamos de comentar, el modelo es capaz de obtener unos EROIs globales para todo el conjunto de la tecnología fotovoltaica (Imagen 46).



Hay que reseñar el por qué el factor de capacidad cambia a lo largo del tiempo dinámicamente respecto al análisis estático, ya que a priori no es algo intuitivo o sobre lo que tengamos intención de actuar. Esto sucede debido a la capacidad del modelo de detectar la sobreproducción eléctrica, esto, unido a la intermitencia característica de las tecnologías renovables, hace que en muchas ocasiones no se demande realmente toda la electricidad que pueden producir las instalaciones, reduciendo su factor de capacidad.

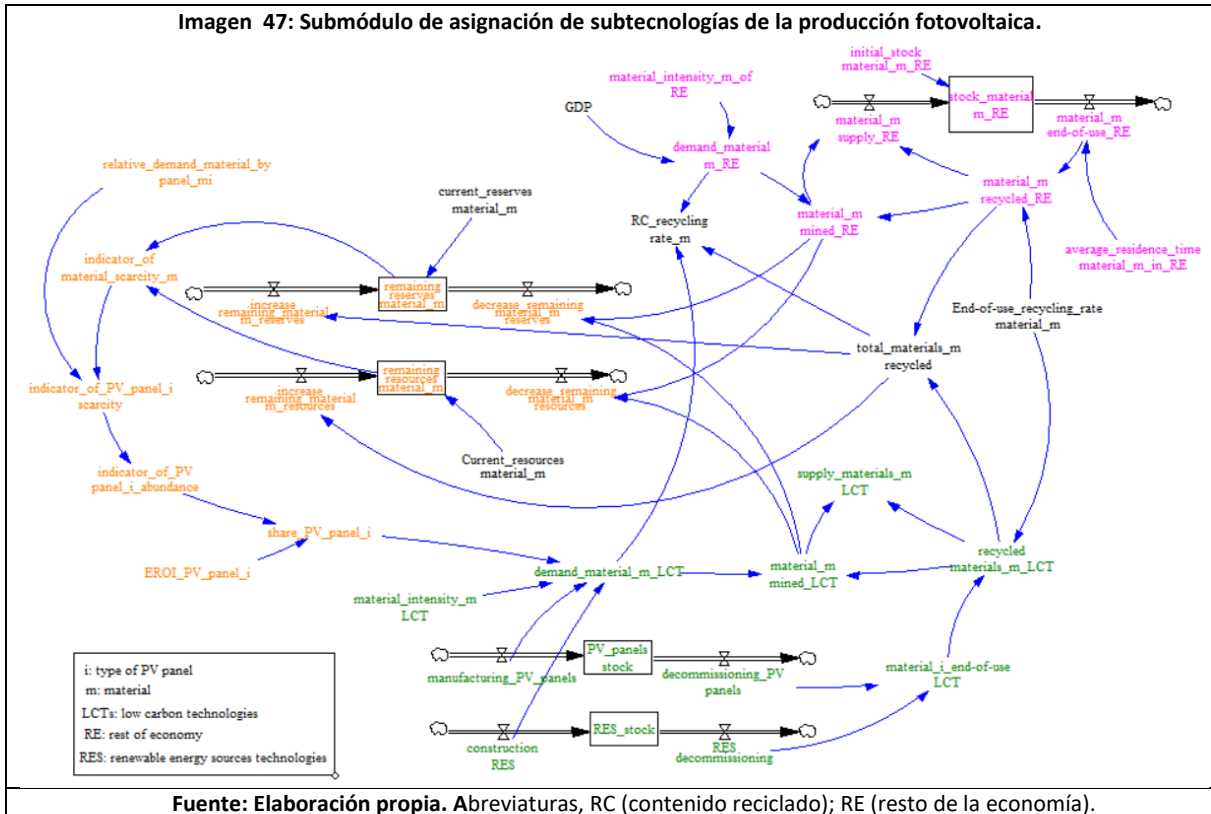


2.8.3.4 Submódulo de asignación de subtecnologías de la producción fotovoltaica.

La elección de los paneles por parte del modelo se ha modelado en base a 2 criterios principales, según lo escrito por varios autores [63], [151], en primer lugar, la situación de la demanda de minerales de los respectivos tipos de paneles con respecto a los recursos y reservas restantes. En segundo lugar, se dará prioridad a la demanda de paneles con un mejor EROI, aumentando así la eficiencia global del sistema de producción fotovoltaica. Hay que enunciar que hasta el año 2020 el porcentaje de cada subtecnología de los paneles en el mercado ha sido obtenido de datos históricos [116]. Después de esta breve introducción, se discutirán más específicamente los diferentes elementos añadidos al modelo y su papel en el sistema de selección de subtecnologías.

En primer lugar, se representa una simplificación del submódulo añadido al modelo para que el sistema pueda elegir los paneles fotovoltaicos (Imagen 47).

Como se puede ver en la imagen, el sistema se divide en tres subsistemas principales, cada uno de un color diferente junto con algunas variables comunes a los 3 sistemas (en negro); el subsistema verde se ocupa de la demanda y el reciclaje de minerales de las baterías de los vehículos eléctricos y de las tecnologías de energía renovable de MEDEAS-W (solar, eólica y fotovoltaica); el subsistema púrpura se ocupa de la demanda y las existencias de minerales del resto de la economía y, por último, el subsistema naranja representa la asignación dinámica de los paneles fotovoltaicos teniendo como entradas principales el EROI de los diferentes tipos de tecnologías, la demanda de minerales de cada panel y la demanda de minerales acumulada con respecto a las reservas y recursos de los otro subsistemas anteriores



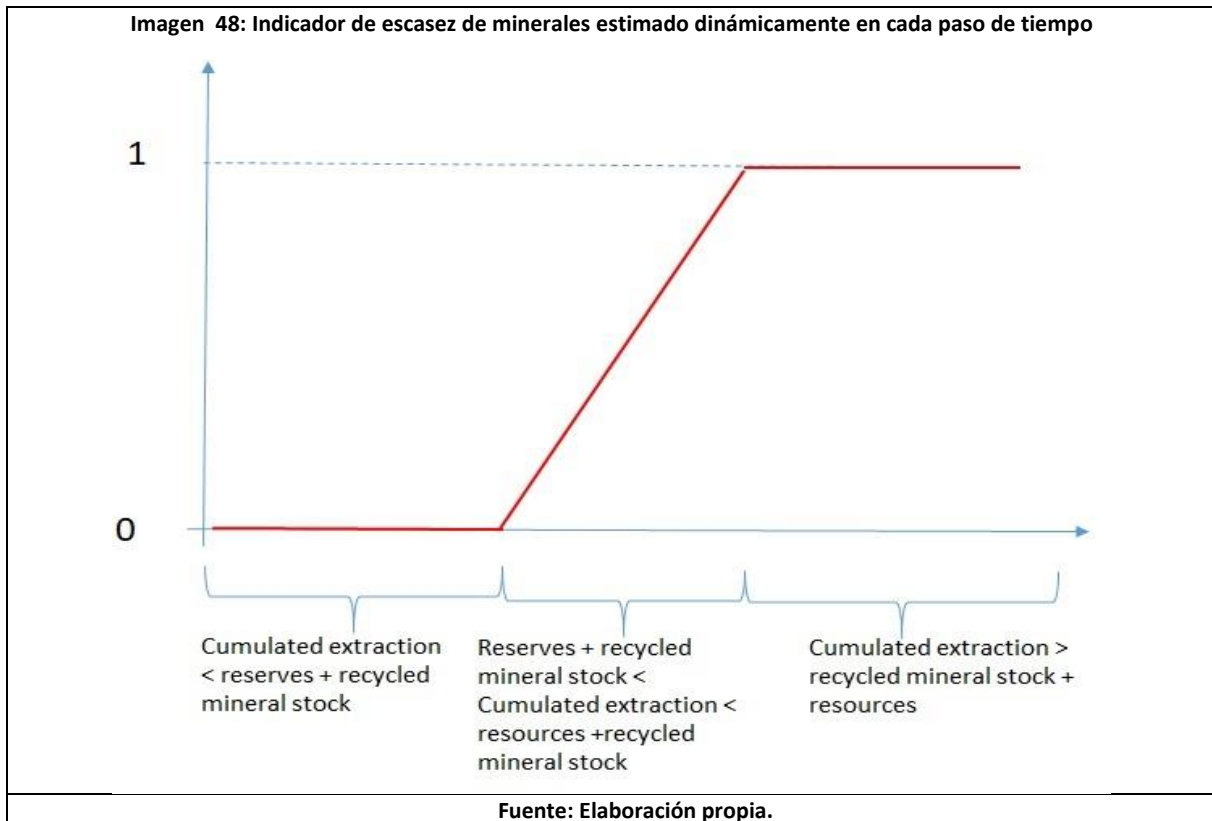
Estos subsistemas observados en la Imagen 47 se explicarán con más detalle a continuación:

Subsistema de energías renovables: Este subsistema, en primer lugar, recibe la demanda de mineral de las baterías y de las tecnologías que componen las energías renovables. En segundo lugar, gracias al ratio de reciclaje EOL y a la suma de estas tecnologías que llegan al final de su vida útil, es capaz de obtener la cantidad de mineral m_{LCT} que se recicla al final de la vida útil de todos estos elementos.

Subsistema del resto de la economía: En este caso, recibe la demanda de minerales del resto de la economía. Además, obtiene la suma de los minerales que salen del resto de la economía, a medida que los diferentes sistemas llegan al final de su vida útil, pudiendo finalmente, junto con el ratio de reciclaje, obtener la cantidad de mineral del resto de la economía que se recicla. En este subsistema también se encuentra el stock de los diferentes minerales del resto de la economía, cuyo valor inicial es tomado del modelo WORLD7 [152].

La obtención de la cantidad de minerales reciclados a partir del ratio EOL y demandados, tanto por las tecnologías renovables y vehículos eléctricos, como por el resto de la economía nos permite hallar el ratio de reciclado RC de forma endógena, como se había enunciado con anterioridad ($RC_i = \frac{\text{Mineral}_i \text{ reciclado al final de la vida útil}}{\text{Mineral}_i \text{ demandado}}$).

Subsistema "Share PV panels": Este subsistema proyecta la cuota de las subtecnologías de los paneles, en primer lugar, compara la demanda de mineral extraído acumulado de los subsistemas verde y morado con la suma de las reservas minerales y el stock de minerales reciclados. De esta manera se puede extraer un indicador de escasez por mineral que toma la forma que se puede ver en la imagen siguiente (Imagen 48).



Una vez obtenido el indicador de escasez de cada mineral, se obtiene la demanda relativa de material de cada panel (ec.8). Este último elemento se obtiene dividiendo la demanda de minerales de cada panel entre la demanda de minerales de todos los paneles. El indicador de escasez de minerales y la demanda relativa de cada tecnología se unen para formar un indicador de escasez para cada panel (ec.9).

$$\text{Demanda relativa de mineral}_j \text{ por panel}_i = \frac{\text{Mineral}_j \text{ que compone el panel}_i}{\sum_{i=1}^4 (\text{Mineral}_j \text{ que compone el panel}_i)} \quad (8)$$

$$\text{Indicador de escasez de panel}_i = \frac{\sum_{j=1}^{64} (\text{Indicador de escasez de mineral}_j \cdot \text{Demanda relativa de mineral}_j \text{ por panel}_i)}{\sum_{j=1}^{64} (\text{Indicador de escasez de mineral}_j)} \quad (9)$$

Una vez obtenido el indicador de escasez del panel, lo transformamos en un indicador de abundancia, ya que la función que estima la cuota de las tecnologías necesita como entrada un indicador de abundancia (Ec.10).

$$\text{Indicador de abundancia}_i = \frac{(1 - \text{Indicador de escasez de panel}_i)}{(4 - \sum_{i=1}^4 \text{Indicador de escasez de panel}_i)} \quad (10)$$

Por último, obtenemos el porcentaje de demanda de las tecnologías a partir del indicador de abundancia, el EROI de los paneles y, por último, el peso de la inercia de las diferentes tecnologías en el mercado. Este porcentaje se obtiene con las siguientes funciones (Ec.11 y Ec.12) [153], elegidas por su buena representación de la evolución de la cuota de mercado de productos con poca inercia como son los productos tecnológicos [154], en nuestro caso, paneles:

$$\alpha_i = \text{Inercia del panel en el mercado} \quad (11)$$

$$S_i = \frac{\alpha_i \cdot (EROI(t)_{final,i} \cdot \text{Indicador de Abundancia}(t)_i)^\beta}{\sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot (EROI(t)_{final,i} \cdot \text{Indicador de Abundancia}(t)_i)^\beta} \quad (12)$$

Donde, α_i , es el peso de la inercia de cada subtecnología de panel en el mercado; Este factor nos permite favorecer o perjudicar la tendencia de una determinada tecnología atendiendo a factores exógenos no tenidos en cuenta por el EROI o el indicador de abundancia. Por ejemplo, se podría perjudicar a los paneles de película fina por demandar más espacio para la misma producción energética, o por emplear minerales muy perjudiciales para el medio, como el cadmio. Aun así, en este análisis se ha escogido que todas las tecnologías posean el mismo valor de inercia en el mercado para evitar añadir una mayor complejidad que además nos dificulte entender el porqué de los resultados obtenidos finalmente; Además, se ha establecido un valor similar de β para todos los paneles, ya que este valor también controla la inercia del cambio en el mercado de unas tecnologías respecto a otras.

Tras establecer la cuota de mercado de cada subtecnología en cada instante de la simulación, el modelo obtiene de forma dinámica todas las infraestructuras implicadas en la producción eléctrica fotovoltaica. A continuación, obtiene la cantidad de materias primas necesarias sumando los materiales utilizados en las infraestructuras y paneles a lo largo del tiempo teniendo en cuenta los ratios de reciclado (habiendo realizado el cálculo del ratio de reciclado RC a cada paso de tiempo a partir de los ratios EOL establecidos) y, finalmente, las compara con los recursos y materias primas disponibles en nuestro planeta.

2.9 Escenarios empleados en las simulaciones

En este apartado trataremos todos los aspectos referentes a cada uno de los escenarios y políticas empleados en las simulaciones del modelo. Se recuerda que se está realizando un análisis a nivel mundial cuyas simulaciones serán ejecutadas hasta el año 2050. Pero, antes de profundizar en las características de cada uno de los escenarios, se deben enunciar los supuestos e inputs generales empleados en todos los escenarios (Tabla 20).

Tabla 20: Resumen de los supuestos e inputs globales más relevantes para los escenarios simulados
<p>Crecimiento de la población: SSP2 (estabilización en 10,000 millones de personas en 2100) PIBpc previsto: dependiente del escenario Cuota de mano de obra objetivo (2050) 52% Matriz A: constante (2009) Mejoras en la eficiencia (intensidad energética final): tendencias por sector/hogares y combustible, Estimación propia. ¿Programa global de forestación? No Capacidad nuclear instalada: constante en los niveles actuales</p>
<p>Índices de reciclaje de materiales (19 materiales): Tasas de reciclaje actuales (EOL) dependientes del escenario</p>
<p>Crecimiento deseado anual de la capacidad de las fuentes de energía renovable para la electricidad (a partir del año 2020)/ Potencial</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hidroeléctrica 3.8%/ 1TW - Geotérmica 4.2% / 0,3 TW - Potencial compartido de bioenergía para calor, líquidos y electricidad 7,8% - Oceánica 20% / 0,05TW - Eólica terrestre 20% / 1TW - Eólica en alta mar 20% / 0,25TW - Solar fotovoltaica compartida en suelo + tejado Según escenario %/ 100 MHa - Concentración solar en función del suelo urbano disponible <p>Almacenamiento hidroeléctrico por bombeo 15% / 0,25TW Capacidad objetivo de las fuentes de energía renovable para el calor (2050) (comercial y no comercial) 4,4TW Bioenergía</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tierras marginales: 386 MHa (Field et al., 2008) - Tierras de cultivo de 2ª generación +11%/año - Tierras de cultivo de 3ª generación (empezando en 2025) 11%/año - Residuos (empezando en 2025) 20%/año, 11 EJ/año
<p>Curvas de agotamiento de las energías no renovables</p> <ul style="list-style-type: none"> - Petróleo [155] - Gas [155] - Carbón [156] - Uranio (EWG, 2013)
<p>Interruptores</p> <ul style="list-style-type: none"> -Impactos del cambio climático: no activado -Retroalimentación del EROI: activado -Retroalimentación de los límites de la energía: activado -Sustituciones energéticas Inter-final: activado
<p>Fuente: Elaboración propia.</p>

Se debe reseñar que todas las fuentes de energía renovable coexisten y crecen a partir de 2020 de forma notable como se ha expuesto en la tabla anterior. Esto, será importante para entender los posibles problemas de intermitencia y sobreproducción energética que se tratarán en los resultados de este mismo documento.

También, se deben enunciar los supuestos e inputs enfocados al transporte (Tabla 21), ya que pueden afectar en gran medida a la demanda de energía eléctrica, por ejemplo. En este trabajo, se emplearán las mismas hipótesis de transporte que enuncia Ignacio de Blas en su escenario “tendencias EV esperadas” [157].

Tabla 21: Resumen de los supuestos e inputs del transporte para los escenarios simulados

			Presente (2015)	Tendencias EV esperadas (2050)
Vehículos de uso doméstico	4-ruedas	Combustible líquido	65.00%	15.00%
		Eléctricos	0.50%	35.00%
		Híbridos	0.10%	10.00%
		Gas	1.20%	6.00%
	2-ruedas	Combustible líquido	23.70%	6.80%
		Eléctricos	9.50%	27.20%
	Sustitutos adicionales	Bicicleta eléctrica	0.00%	0.00%
Sin motor		0.00%	0.00%	
Vehículos pesados de transporte terrestre	Combustible líquido		99.80%	99.80%
	Híbridos		0.10%	0.10%
	Gas		0.10%	0.10%
Vehículos ligeros de transporte terrestre	Combustible líquido		98.90%	23.00%
	Eléctricos		0.10%	53.00%
	Híbridos		0.10%	15.00%
	Gas		0.90%	9.00%
Buses	Combustible líquido		100.00%	23.00%
	Eléctricos		0.00%	53.00%
	Híbridos		0.00%	15.00%
	Gas		0.00%	9.00%
Trenes	Combustible líquido		50.00%	50.00%
	Eléctricos		50.00%	50.00%
Uso de las baterías de los vehículos eléctricos para el almacenamiento del sistema eléctrico *			0%	0%
			Tendencias históricas (1979-2014)	Tendencias EV esperadas
Gestión de la demanda de los hogares (Porcentaje frente a la Demanda de los hogares en 2020)	Transporte terrestre		0%	0%
	Transporte marítimo			
	Transporte aéreo			

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, tras enunciar los principales supuestos e inputs generales que afectan a todas las simulaciones, se enuncia la descripción de los diferentes escenarios. Los escenarios escogidos son:

-Escenario 1, tecnología actual: Este escenario trata de mostrar los efectos que podrían darse de ocurrir un estancamiento en la mejora de la tecnología fotovoltaica. El aumento de la eficiencia y la reducción de intensidad material de la tecnología con el tiempo son nulos en este escenario. Además, se mantienen los ratios de reciclado actuales en toda la simulación. Se establece, por último, el deseo de conseguir un ratio de reparto entre instalaciones de tejado y de suelo del 50%.

-Escenario 2, continuación de las tendencias actuales (suelo): Este escenario, intenta exponer las posibles consecuencias de imponer la estimación de las evoluciones temporales de las tendencias actuales en el progreso de la tecnología fotovoltaica, en este caso, mostrando prioridad por la instalación de sistemas de suelo. Se aumenta la eficiencia de los paneles y se

reduce la intensidad material de algunos de los minerales que componen las células de silicio a lo largo del tiempo. Además, se aumentan un 50% los ratios de reciclado actuales para el año 2050 (estableciendo una relación lineal desde los ratios actuales en 2020), estableciendo unos máximos del ratio de reciclado del 85% y unos mínimos del 15%.

-Escenario 3, continuación de las tendencias actuales (tejado): Este escenario, intenta enseñar las posibles consecuencias de imponer la estimación de las evoluciones temporales de las tendencias actuales en el progreso de la tecnología fotovoltaica, en este caso, mostrando prioridad por la instalación de sistemas de tejado. Se aumenta la eficiencia de los paneles y se reduce la intensidad material de algunos de los minerales que componen las células de silicio a lo largo del tiempo. Además, se aumentan un 50% los ratios de reciclado actuales para el año 2050 (estableciendo una relación lineal desde los ratios actuales en 2020), estableciendo unos máximos del ratio de reciclado del 85% y unos mínimos del 15%.

-Escenario 4, mejora tecnológica: Este escenario trata de mostrar los posibles resultados y consecuencias de un gran avance en la evolución de la tecnología fotovoltaica. Se aumenta la eficiencia de los paneles y se reducen los requerimientos minerales de las células de todas las subtecnologías a lo largo del tiempo. Además, se duplican los ratios de reciclado actuales para el año 2050 (estableciendo una relación lineal desde los ratios actuales en 2020), estableciendo unos máximos del ratio de reciclado del 85% y unos mínimos del 30%. Se establece también el deseo de conseguir un ratio de reparto entre instalaciones de tejado y de suelo del 50%.

En la Tabla 22 se pueden observar las principales características de los escenarios empleados. Hay que reseñar que los ratios de reciclado expuestos son los establecidos para todo el modelo de forma global y no solo para la tecnología fotovoltaica. También, hay que aclarar que en el caso de los materiales o minerales no expuestos en la Tabla 22 pero que si son demandados por la tecnología fotovoltaica (Tabla 17), como el cemento o el vidrio, se ha tomado su valor de EOL expuesto en la Tabla 18 constante en todos los escenarios.

Aunque en todos los escenarios se ha mantenido un ritmo de crecimiento deseado similar (obtenido de la estimación lineal a partir de la evolución de la capacidad de energía fotovoltaica instalada en años previos (2014-2020) [55], [158]), como se ha enunciado con anterioridad en la metodología, se realizará un análisis de sensibilidad sobre esta variable y, en este caso, utilizaremos el escenario de mejora tecnológica para llevarlo a cabo. Se simulará este escenario con 3 ratios de incrementos deseados (apartado 2.8.2.5) de potencia fotovoltaica diferentes (32%, 26,2% y 20%) y así poder observar las consecuencias de diferentes velocidades de adopción de esta tecnología.

Tabla 22: Características de los escenarios propuestos

		Tecnología actual	Continuación de las tendencias actuales (suelo)	Continuación de las tendencias actuales (Tejado)	Mejora tecnológica
Ratio deseado de PV urbano vs total (%)		50	25	75	50
Incremento deseado de potencia de la fotovoltaica (%/año)		26,2 [55], [158]*	26,2 [55], [158]*	26,2 [55], [158]*	26,2 [55], [158]*
Aumento de la eficiencia (%/año incorporado al valor inicial)	C-SI mono	0	0,3*	0,3*	0,4
	C-SI poli	0	0,3*	0,3*	0,4
	CdTe	0	0,3*	0,3*	0,4
	CIGS	0	0,3*	0,3*	0,4
Reducción de la intensidad material de las células (%/año respecto al valor inicial)	C-SI mono	0	0 / 2,78/6,55 [□]	0 / 2,78/6,55 [□]	3 / 2,78/6,55 [°]
	C-SI poli	0	0 / 2,78/6,55 [□]	0 / 2,78/6,55 [□]	3 / 2,78/6,55 [°]
	CdTe	0	0	0	1,5
	CIGS	0	0	0	1,5
PIBpc estimado [54]		1,4%/año	1,4%/año	1,4%/año	1,4%/año
Ratio de reciclado EOL (%)	Aluminio (Al)	56	84	84	85
	Cadmio (Cd)	15	22,5	22,5	30
	Cobre (Cu)	48	72	72	85
	Galio (Ga)	≈0	15	15	30
	Indio (In)	≈0	15	15	30
	Hierro (Fe)	71	85	85	85
	Acero Inox	71	85	85	85
	Manganeso (Mn)	53	79,5	79,5	85
	Molibdeno (Mo)	30	45	45	60
	Níquel (Ni)	60	85	85	85
	Estaño (Sn)	75	85	85	85
	Telurio (Te)	≈0	15	15	30
	Vanadio (V)	≈0	15	15	30
	Selenio (Se)	≈0	15	15	30
Zinc (Zn)	39,5	59,25	59,25	80	

Fuente: Elaboración propia. *Estimación lineal a partir de la evolución de la capacidad de energía fotovoltaica instalada (2014-2020). *Estimaciones de eficiencia obtenidas en el apartado 2.4.2.2, ratios constantes hasta 2050 o hasta que se alcance el máximo teórico de la tecnología. [□] Se toma un índice de reducción del 2,78% anual respecto a su valor inicial hasta 2050 para el silicio, del 6,55% anual respecto a su valor inicial hasta 2035 para el estaño y del 0% para el resto de minerales (Apartado 2.4.3.2). [°] Se toma un índice de reducción del 2,78% anual respecto a su valor inicial hasta 2050 para el silicio, del 6,55% anual respecto a su valor inicial hasta 2035 para el estaño y del 3% para el resto de minerales.



3. RESULTADOS, DISCUSIÓN, LIMITACIONES Y VÍAS DE TRABAJO FUTURO

A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos en este trabajo. Se empezará por el análisis estático y después se expondrán los resultados del análisis dinámico.

3.1 Análisis estático, EROI

Empezaremos recopilando y mostrando en forma de tabla (Tabla 23) los coeficientes y variables que componen nuestra ecuación del EROI. De esta forma, se puede observar qué variables pueden influir más en el resultado y como puede variar el valor de cada aspecto en función de la tecnología de panel.

Tabla 23: Resultados intermedios del EROI estático.

	CF	Potencia	L	OL	TDL	g	EnU ^{Mr}	EnU ^{New cap}	EnU ^{Decom}	EnU ^{Tra}	EnU ^{O&M}	EnU ^{G&S}
	/1	(MW·s/año)	Años	%	%	/1	MJ/MW	MJ/MW	MJ/MW	MJ/MW	MJ/MW	MJ/MW
C-Si mono Suelo	0,142	3,15E+07	25	4,35	9,2	0,737	7,35E+06	8,52E+06	1,59E+06	2,68E+06	2,59E+05	1,15E+07
C-Si mono Tejado	0,114						7,22E+06	7,17E+06	1,44E+06	1,09E+06	1,17E+06	
C-Si poli Suelo	0,142						4,74E+06	9,70E+06	1,44E+06	2,98E+06	2,76E+05	
C-Si poli Tejado	0,114						4,71E+06	9,35E+06	1,41E+06	1,28E+06	1,19E+06	
CIGS Suelo	0,142						2,29E+06	1,02E+07	1,25E+06	2,83E+06	2,74E+05	
CIGS Tejado	0,114						2,23E+06	9,62E+06	1,19E+06	1,09E+06	1,19E+06	
CdTe Suelo	0,142						1,72E+06	8,50E+06	1,02E+06	2,90E+06	2,44E+05	
CdTe Tejado	0,114						1,66E+06	7,94E+06	9,60E+05	1,16E+06	1,15E+06	

Fuente: Elaboración propia. CF, OL, TDL, L, EnU^{G&S} obtenidos de De Castro et al [54].

La contribución del procesamiento de los materiales para fabricar los paneles (EnU^{New cap}) es el mayor componente del denominador (EROI_{st}), con entre 7170 GJ/MW para el panel mono cristalino y 10200 GJ/MW para el panel CIGS, seguido por la energía de fabricación de los paneles (EnU_{Mr}), cuyo valor se encuentra dependiendo del panel y su situación entre 1660 GJ/MW y 7350 GJ/MW. En el caso del EROI_{final} el elemento que más destaca es el EnU^{G&S} con un valor de 11500 GJ/MW. El transporte de materias y la retirada de materiales después de la vida útil también son variables destacables en el cálculo del EROI con valores superiores a los 1090 GJ/MW en todos los casos.

Tras mostrar los resultados intermedios y los coeficientes escogidos se enuncian los resultados finales del EROI de cada una de las tecnologías y disposiciones (Tabla 24), para posteriormente discutir estos valores y compararlos con la diferente bibliografía.

Tabla 24: EROI estático de las tecnologías fotovoltaicas

	c-Si mono		c-Si poli		CIGS		CdTe	
	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado	Suelo	Tejado
EROI _{st} (/1)	6,4	5,8	6,7	5,8	7,5	6,7	8,7	7,8
EROI _{final} (/1)	3,8	3,3	4	3,3	4,3	3,6	4,7	4

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados nos encontramos con valores de $EROI_{st}$ entre 5,8/1 y 8,7/1 y de $EROI_{final}$ situados entre 3,3/1 y 4,7/1. Se puede ver claramente como las pérdidas de energía fuera de la instalación son importantes obteniendo $EROI_{final}$ bastantes reducidos si las comparamos con los $EROI_{st}$.

Las tecnologías de película fina (CIGS y CdTe) destacan sobre las tecnologías de silicio, pero claro, este análisis no tiene en cuenta el mayor espacio que necesitan las tecnologías de película fina al poseer menor eficiencia y potencia. En cuanto a su disposición, se puede observar que las instalaciones de suelo obtienen un mayor EROI, debido a que poseen un mayor factor de capacidad, a pesar de que en este tipo de instalaciones es necesario incluir infraestructuras más grandes y costosas materialmente respecto a las instalaciones de tejado (se aprovecha la estructura del edificio).

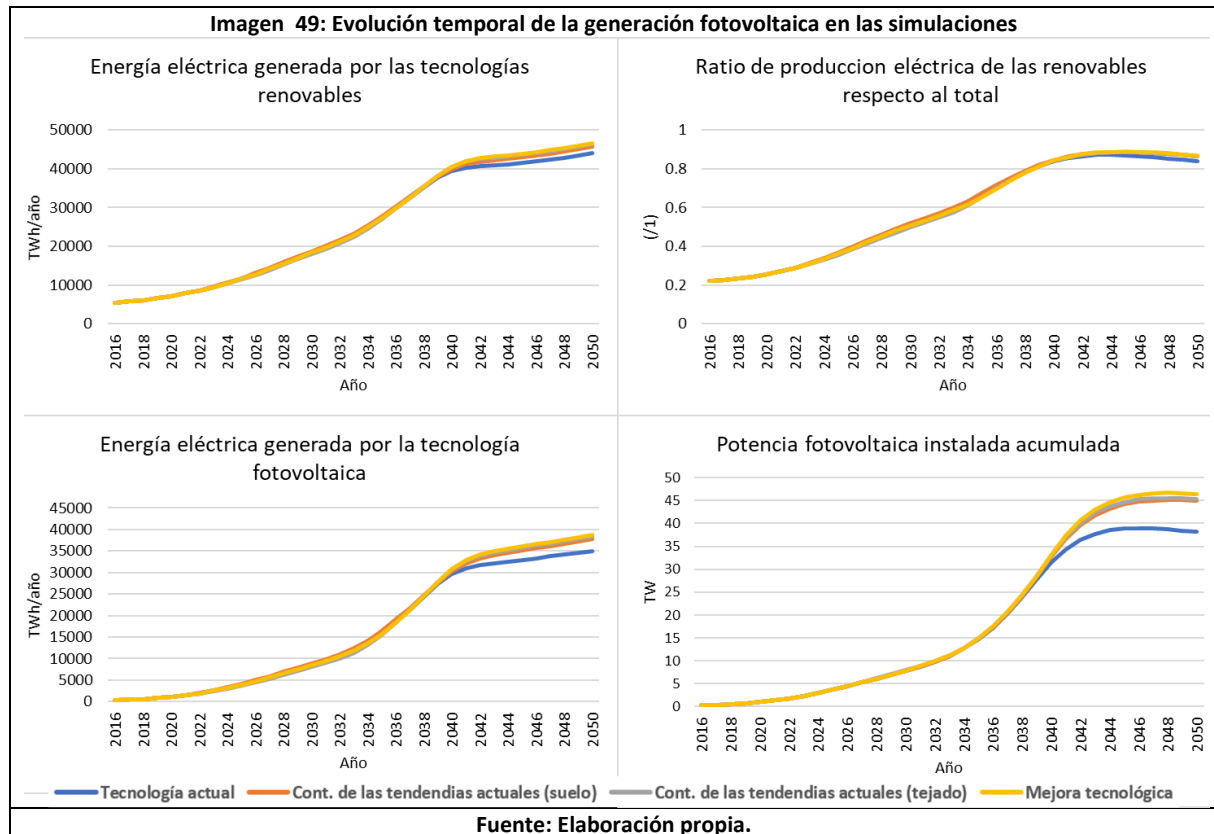
Respecto a la bibliografía, De Castro et al [54] obtiene un $EROI_{st}$ de 7,8 y un $EROI_{final}$ de 3,5/1 para una mezcla de varias tecnologías fotovoltaicas empleando una metodología similar a la empleada en este trabajo (por eso obtiene un valor situado entre los obtenidos en este trabajo), pero unos menores requerimientos energéticos en la fabricación de los paneles le otorgan resultados ligeramente superiores. Zhou et al [51] obtiene en su meta-análisis una $EROI_{st}$ situado entre 2/1 y 15/1 para los paneles de silicio y situado entre 5/1 y 15/1 para los paneles de película fina en función del autor original de la energía embebida de la tecnología fotovoltaica. Estos valores más altos que los obtenidos en este estudio se consiguen empleando un CF superior al empleado en este trabajo (15%), no teniendo en cuenta el transporte de materiales, el mantenimiento o la retirada de la tecnología tras su vida útil. Bhandari et al [52] obtiene en su meta-análisis un $EROI_{st}$ con un valor medio de 8,7/1 para los paneles de mono-silicio, de 11,7/1 para los paneles de poli-silicio y de 34,2/1 y 19,9/1 para CIGS y CdTe respectivamente. En este caso, y a pesar de otorgar peores eficiencias a los paneles y de poseer una $EnU^{New\ cap}$ superior (entre un 0% y un 60%) producto de la mayor antigüedad de los datos, la referencia obtiene valores superiores a los expuestos por este trabajo, debido a la mayor vida útil otorgada a los paneles (30 años), a no tener en cuenta el transporte de materiales, el mantenimiento o la retirada de la tecnología tras su vida útil. Raugei et al [53] obtiene un $EROI_{st}$ para la mezcla de subtecnologías fotovoltaicas instaladas en suiza que toma valores situados entre el 9,1/1 y el 9,7/1. Esta referencia, destaca por la reducida energía embebida total que otorga a la tecnología fotovoltaica ($EnU=7E+06$ MJ/MW) y también por el reducido CF que estima, situado en torno al 9%. Hay que reseñar tras analizar a los diferentes autores, que sus EROI son en su mayoría más altos, ya que no han considerado algunos elementos de construcción de paneles, el transporte de los materiales, el mantenimiento de las instalaciones, etc.

3.2 Análisis dinámico.

En este apartado se mostrarán los resultados dinámicos fruto de las simulaciones llevadas a cabo en el modelo MEDEAS-W modificado en este TFM.

3.2.1 Evolución temporal de la generación fotovoltaica

En primer lugar, se la situación de la tecnología fotovoltaica durante las simulaciones. La energía generada por la fotovoltaica y la potencia instalada, como es lógico, afecta a todos los demás apartados demandando menor o mayor cantidad de minerales o emitiendo menor o mayor cantidad de gases de efecto invernadero, por ejemplo. A continuación, se presenta la evolución temporal de la energía generada por las tecnologías renovables, su porcentaje respecto al total de la generación, la energía generada por la tecnología fotovoltaica y, por último, la potencia de generación fotovoltaica instalada (Imagen 49).

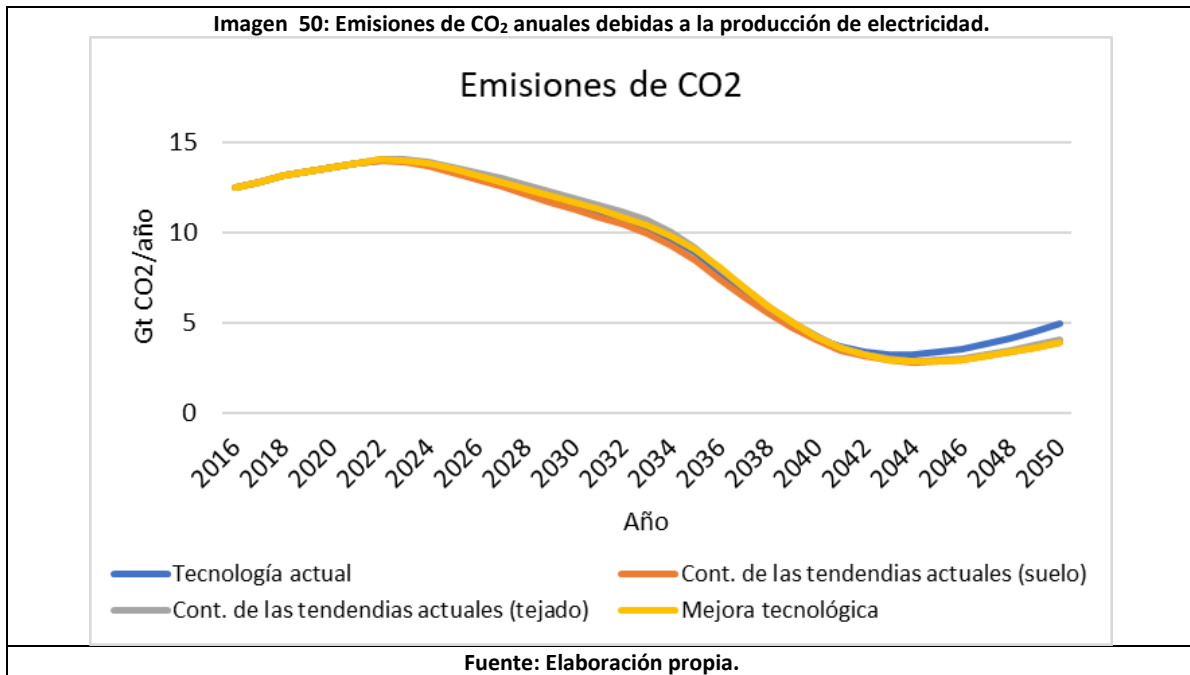


Lo primero a comentar sobre estos resultados es la subida rápida de la generación y la potencia fotovoltaica, tal y como fijamos en los escenarios propuestos. Otra tendencia interesante producida por los escenarios de continuación de las tendencias actuales y mejora tecnológica, que llegan al año 2050 con una mayor potencia instalada debido a la menor demanda material y mejor eficiencia de generación lo que finalmente radica en un mayor EROI.

De estos resultados también se puede extraer la conclusión de que en nuestras simulaciones la fuente de energía fotovoltaica tomaría una gran importancia a lo largo de los años, siendo la fuente de energía que mayor cantidad de energía eléctrica genera.

3.2.2 Emisiones de CO₂ debidas a la producción de electricidad

Este trabajo se ha centrado en la tecnología de producción de energía renovable fotovoltaica, por lo tanto, puede ser de gran interés ver los efectos de los escenarios impuestos en las simulaciones del modelo en las emisiones finales de CO₂.

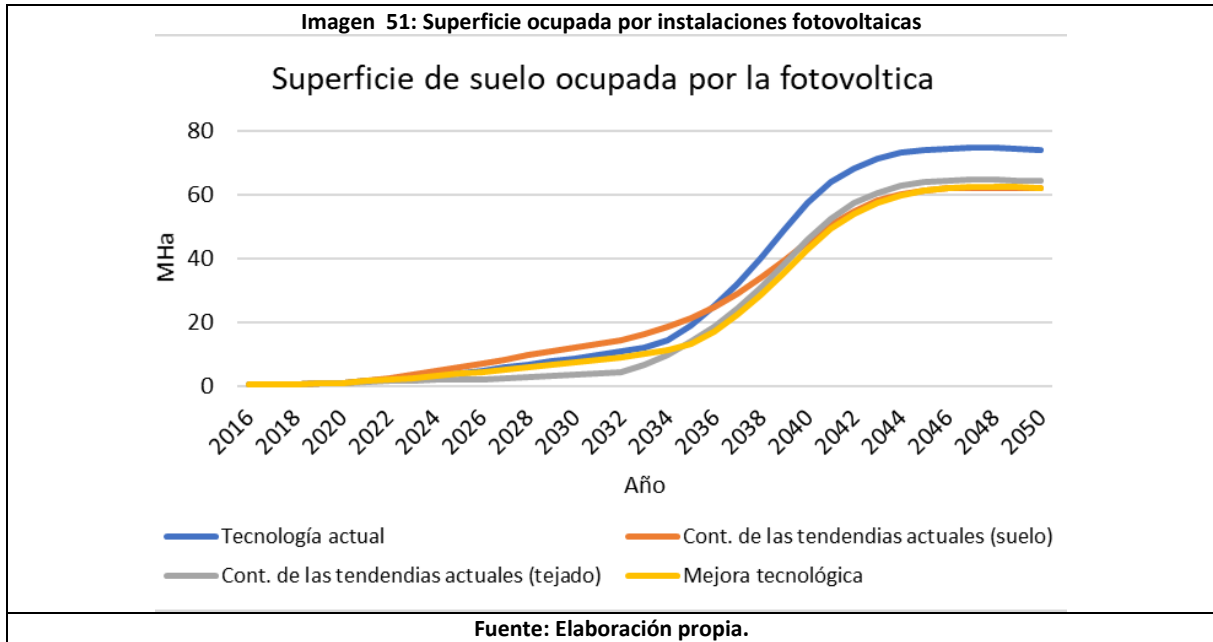


En los resultados obtenidos (Imagen 50) se pueden observar algunas tendencias. Los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica presentan unas emisiones similares (de unas 4,4 Gt CO₂ en 2050), emitiendo una ligera menor cantidad de CO₂ que el escenario de tecnología actual en 2050 (5 Gt). Esto ha ocurrido debido, por un lado, a las mejoras de eficiencia ratios de reciclado y reducción de la intensidad material, y por otro, a que el modelo ha instalado más potencia de energía renovable, y en específico, de fotovoltaica en los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica debido a su mejora en el EROI.

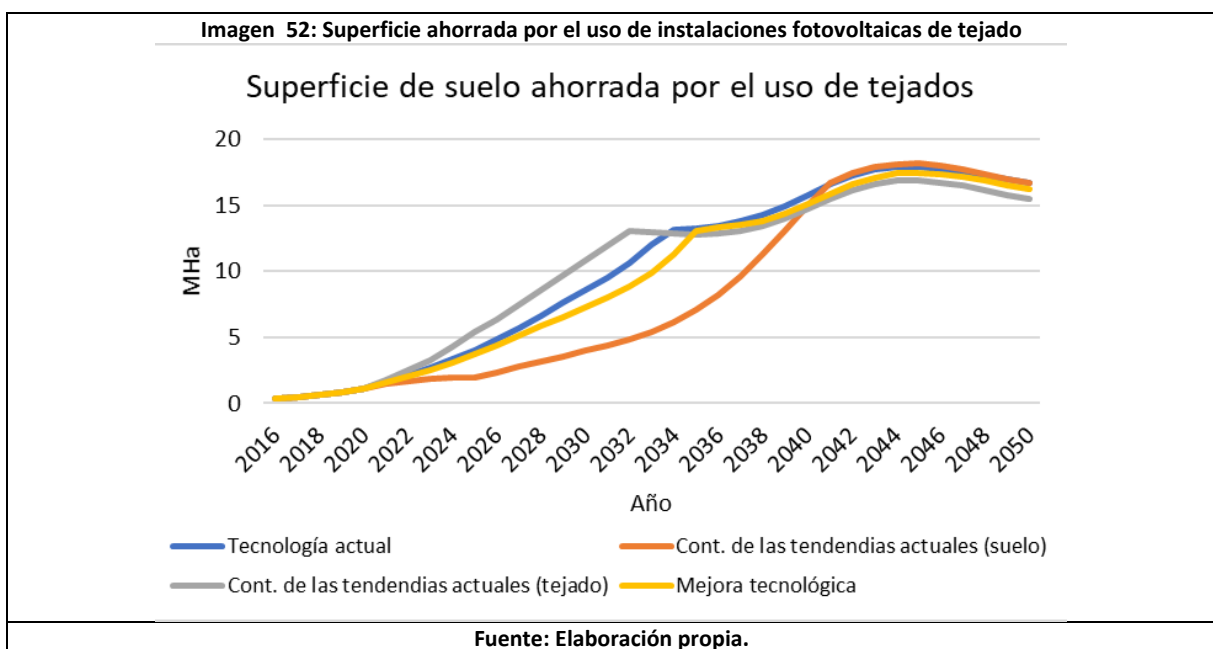
Se debe destacar como el aumento del empleo de las renovables consigue reducir las emisiones de CO₂ de la producción eléctrica mundial a lo largo de la simulación, desde un valor de emisiones de 14 Gt de CO₂ en el año 2023, hasta un valor de 3 Gt de CO₂ en el año 2044 sufriendo un pequeño aumento de las emisiones a partir del año 2045 de la simulación (llegando a 5 Gt de emisiones de CO₂). Este pequeño aumento es debido a la reducción del ratio de producción de energía eléctrica de las renovables frente a las tecnologías basadas en combustibles fósiles.

3.2.3 Uso de la tierra por parte de la producción fotovoltaica

Uno de los grandes inconvenientes de la tecnología de generación fotovoltaica es su necesidad de espacio. En este apartado se enunciará la cantidad de espacio de suelo necesario para la generación fotovoltaica y el ahorro de superficie que supone el uso de instalaciones de tejado en cada escenario.



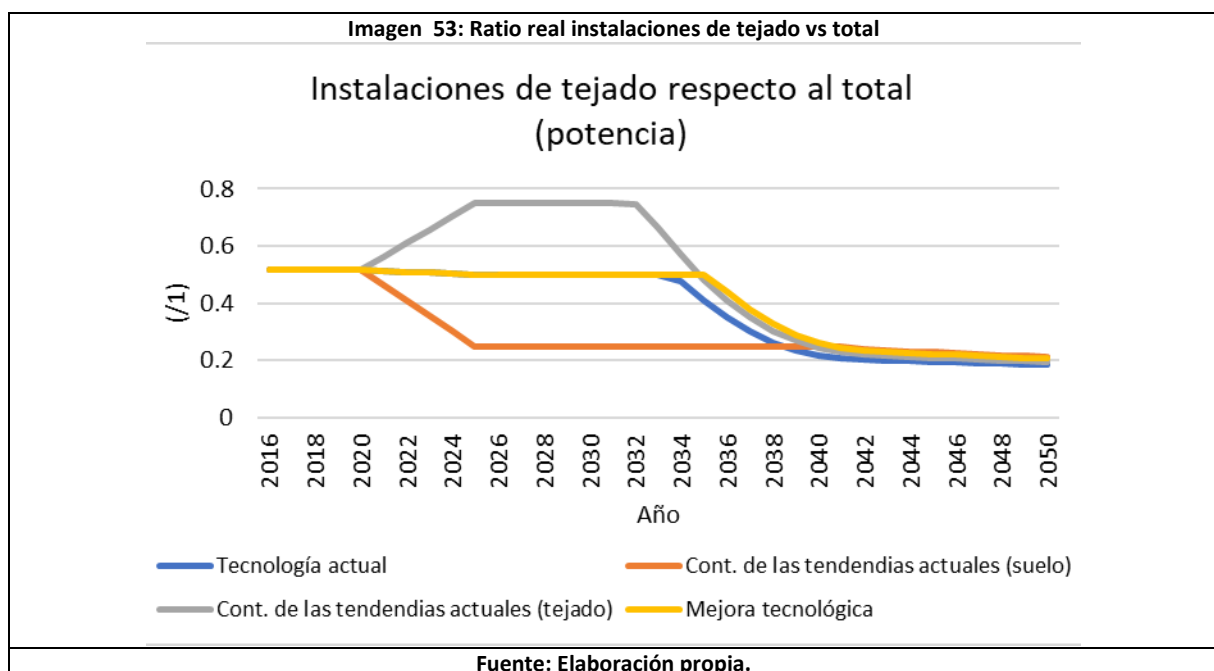
Se puede observar en la Imagen 51 que el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza las instalaciones de suelo y el escenario de tecnología actual son, en los primeros años de simulación, los que más superficie de suelo necesitan. En el caso del escenario de tendencias actuales provocado por su prioridad por instalaciones de suelo, y en el caso del escenario de evolución tecnológica por su nula mejora de la eficiencia impuesta en los escenarios. El escenario de tecnología actual es el que más superficie de suelo acaba demandando en el año 2050, superando las 74 MHa. El escenario de mejora tecnológica sitúa su demanda final de tierras en 62 MHa y los escenarios de continuación de las tendencias actuales cuya demanda final de tierras es similar demandan alrededor de 64 MHa en 2050 (hay que tener presente que los escenarios de continuación de las tendencias y mejora tecnológica instalan mayor potencia).



Los resultados mostrados en la Imagen 52 muestran la superficie ahorrada por el uso de instalaciones de tejado a lo largo de cada año hasta llegar al 2050. El escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza las instalaciones de suelo es el que menos superficie ahorra hasta el año 2040 (cuando agota la superficie de tejados disponible), como es lógico. La mejora en la eficiencia y la preferencia por las instalaciones de tejado permite que el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza este tipo de instalaciones sea el que más superficie ahorran durante la simulación hasta el año 2032 (cuando agota la superficie de tejados disponible). El escenario de tecnología actual ahorra una cantidad de suelo similar a los demás escenarios a partir del año 2040 de la simulación, pero es el escenario que más cantidad absoluta de suelo demanda (Imagen 51). En el año 2050 todos los escenarios han ahorrado una cantidad similar de superficie (en torno a las 18 MHa) debido a la limitación de espacio en los tejados para producir una gran cantidad de energía mediante la fotovoltaica.

3.2.4 Ratio real, instalaciones de suelo vs total

Anteriormente, ya se ha indicado que el usuario introduce su deseo de distribución de las instalaciones fotovoltaicas, eso sí, con la limitación de que el modelo se saltará esta intención para preservar la cantidad de generación que demanda todo el sistema. Por eso, en este apartado se puede observar el valor real de este ratio a lo largo de los años Imagen 53 y estimar cuando la superficie de tejados disponible ha sido una limitación durante las simulaciones.



En la Imagen 53 se puede observar que dependiendo del escenario a partir del año 2032 la poca superficie de tejados disponible es una limitación para la suficiente generación de energía eléctrica mediante fotovoltaica. Esta limitación llega antes para los escenarios que cuentan con una prioridad alta por las instalaciones de tejado (cont. De las tendencias actuales (tejado)) o que poseen una menor eficiencia en sus sistemas (Tecnología actual). A partir del año 2042 por tanto, todos los escenarios poseen un ratio situado en el 0,2/1.

3.2.5 Ratio de reciclado, RC

El ratio RC que representa al contenido de material reciclado de los productos es de gran importancia desde el punto de vista de los materiales. Cuanto mayor sea este ratio, menor cantidad de materiales deberemos obtener de nuestro planeta agotando con ello sus reservas y recursos. Hay que enunciar que solo se mostrarán los resultados referentes a los minerales principalmente por dos razones. En primer lugar, evitar la doble contabilidad, por ejemplo, en el caso del hierro y el acero. En segundo lugar, todos los materiales compuestos enunciados en la Tabla 17 (que trata las intensidades materiales de la tecnología fotovoltaica) no se reciclan, salvo en el caso del acero. Dentro de los minerales también se ha suprimido la arena de sílice, ya que no se recicla en la actualidad y se carecen de datos de reservas o recursos, planteando un gran interrogante sobre este mineral. También la demás bibliografía suprime este mineral en sus análisis por las mismas razones.

En los gráficos siguientes (Imagen 54 e Imagen 55) se puede apreciar como en muchos de los minerales se produce al principio una tendencia estable o de ligera subida que precede a una bajada destacable del ratio debido al aumento de la demanda, lo que no permite introducir relativamente hablando demasiado contenido reciclado, el sistema se encuentra con mucha demanda de algunos minerales de los que apenas hay cantidad reciclada. Tras esto, el ratio suele subir debido a la estabilización o descenso de la demanda y ayudado en algunos escenarios por el aumento del ratio de reciclado EOL lo que permite tener más minerales reciclados para introducir en los nuevos productos. Estos efectos se pueden ver en todos los escenarios. El escenario de tecnología actual obtiene los peores ratios RC debido a su nula mejora en los ratios de reciclado EOL. Donde mayor ratio se consigue obtener de cara al año final de la simulación (2050) es en el escenario de evolución tecnológica debido a su mayor ratio EOL y su menor demanda material por parte de la fotovoltaica, fruto de las mejoras tecnológicas y de eficiencia. Los escenarios de continuación de las tendencias actuales obtienen unos ratios situados entre los otros dos escenarios, ya que sí que mejoran sus ratios del reciclado EOL, pero en menor cantidad que el escenarios de mejora tecnológica.

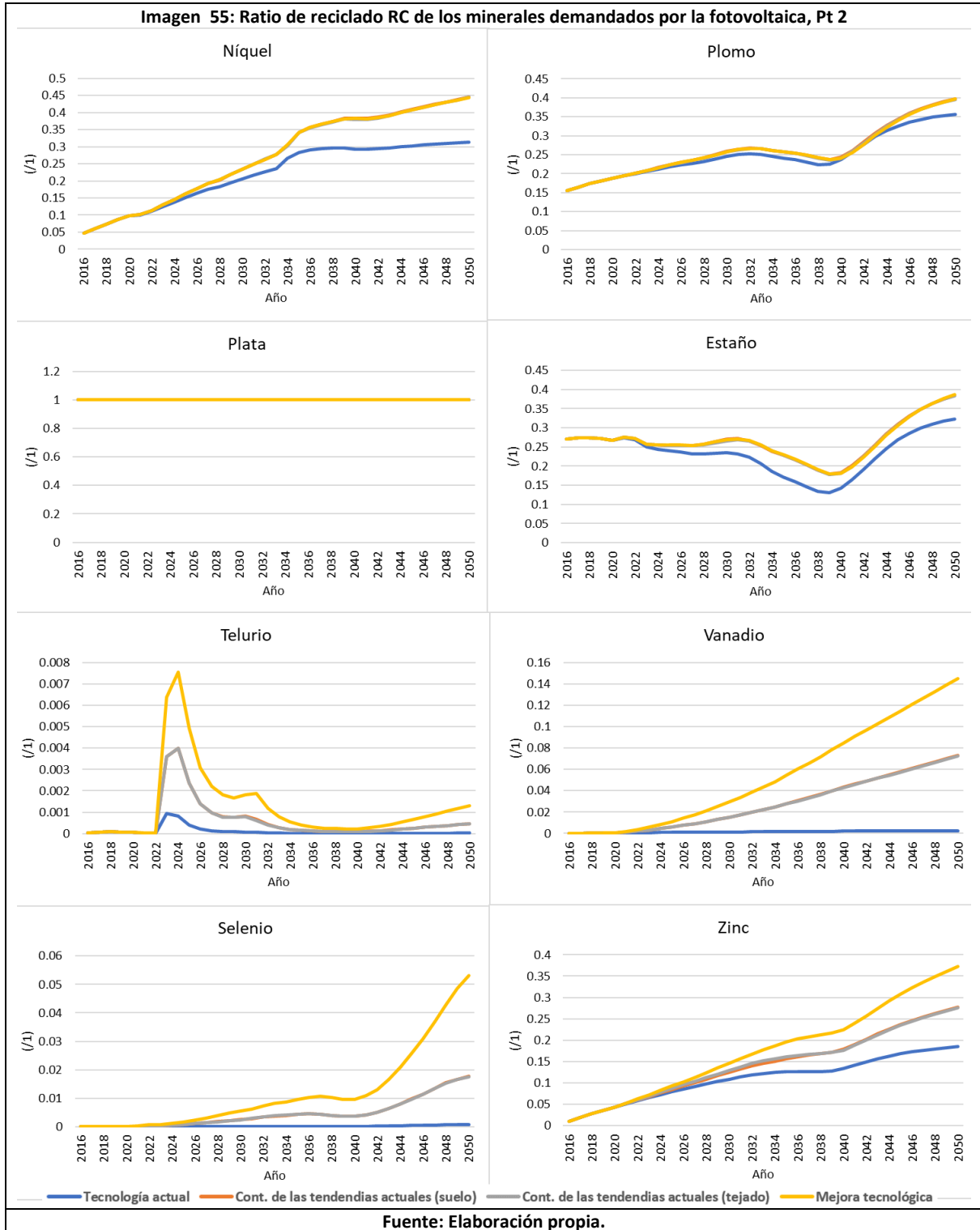
Si nos centramos en los minerales de forma individual, destacan los ratios en el año 2050 del aluminio, con valores situados entre el 23% y el 35%; del cobre, con valores situados entre el 23% y el 41%; del molibdeno, con valores situados entre el 15% y el 32%; del manganeso, con valores situados entre el 30% y el 51%; del plomo, con valores situados entre el 35% y el 40%; del níquel, con valores situados entre el 30% y 45%; del estaño, con valores situados entre el 32% y 39%; del hierro, titanio y la plata, con valores del 100%, y , finalmente, del zinc, con valores situados entre el 17 y el 37%. Aunque son valores altos a priori, hay que reseñar que en casi todos los casos los valores están bastante alejados de igualar el valor de su ratio EOL para el año 2050.

Imagen 54: Ratio de reciclado RC de los minerales demandados por la fotovoltaica, Pt 1



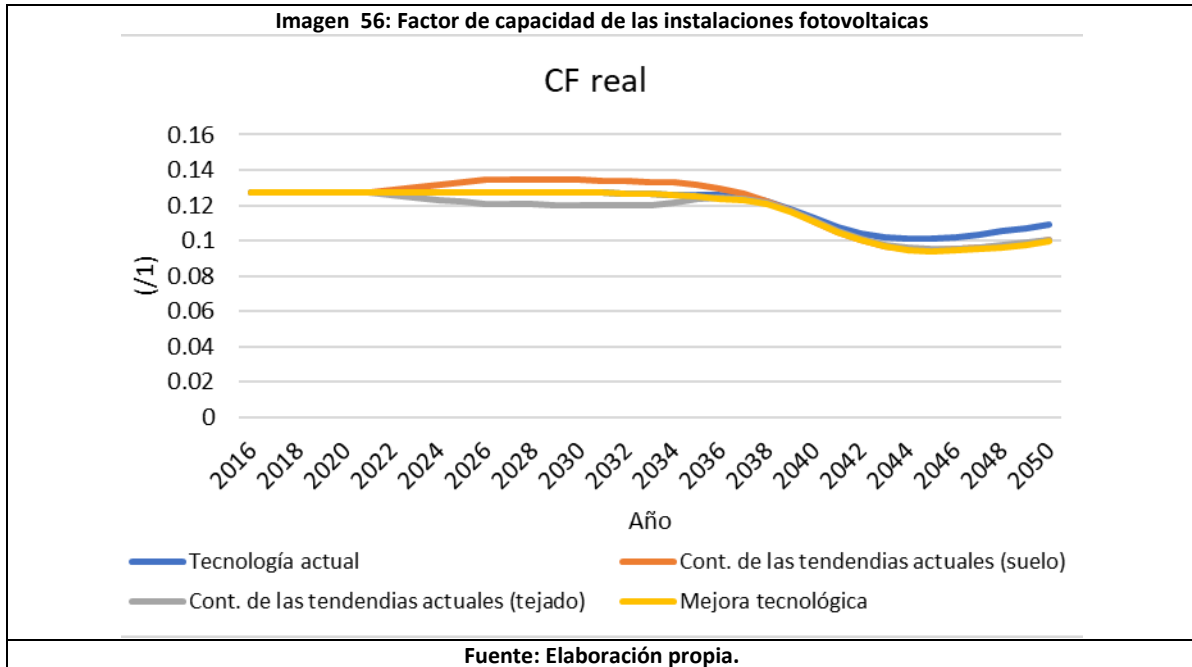
Fuente: Elaboración propia.

Además, los demás minerales no llegan al 16% de contenido reciclado en ningún escenario para el año 2050. El vanadio obtiene valores situados entre el 0% y el 15%, el cadmio entre el 3% y el 9%, el galio entre el 0% y el 8%, el magnesio entre el 4% y el 9%, el selenio entre el 0% y el 6% y finalmente el telurio no obtiene ni el 1% en el mejor de los escenarios. Como se ha enunciado anteriormente, todos los casos los valores están bastante alejados de igualar el valor de su ratio EOL para el año 2050.



3.2.6 CF, factor de capacidad real de las instalaciones fotovoltaicas

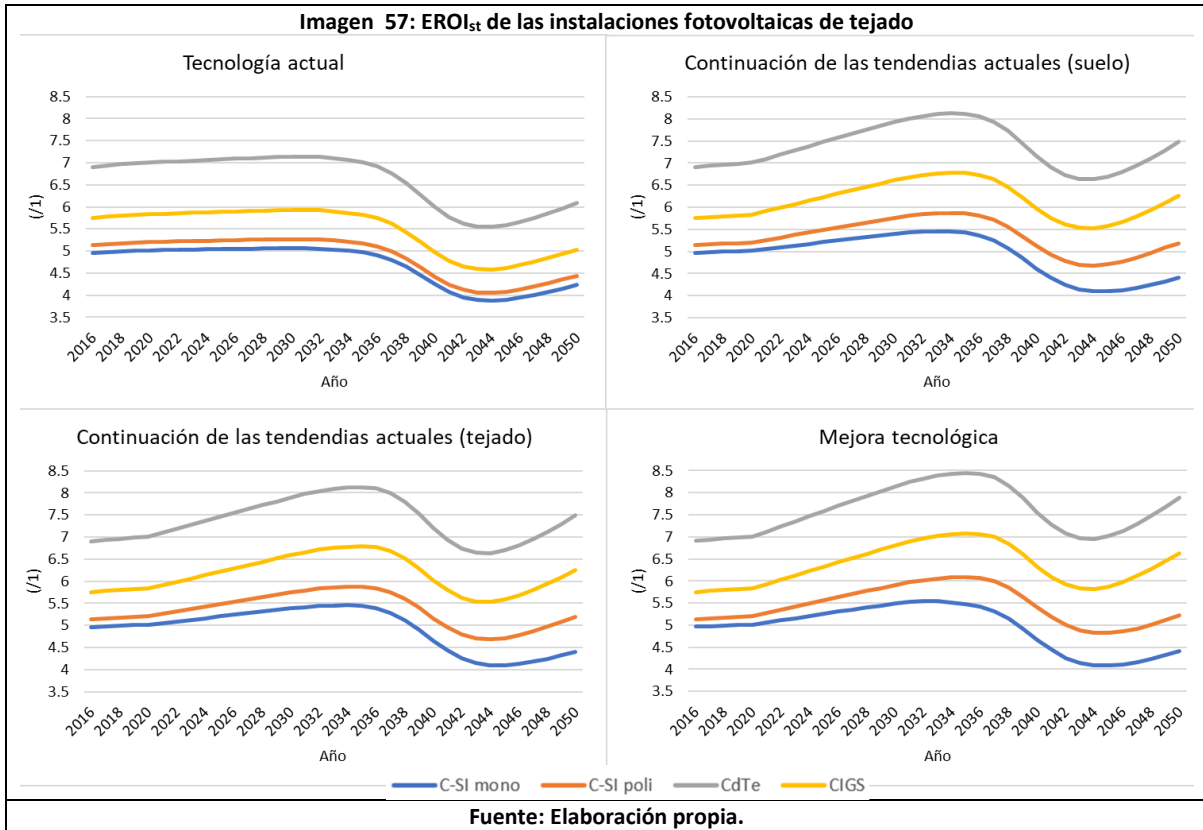
En apartados anteriores ya se han citado las dependencias del factor de capacidad, como el cambio en la eficiencia o la intermitencia propia de las energías renovables pueden hacer cambiar a este factor a lo largo de las simulaciones. En la Imagen 56 se enuncia el CF de todo el conjunto de las instalaciones fotovoltaicas (suelo y techo) en todos los escenarios.



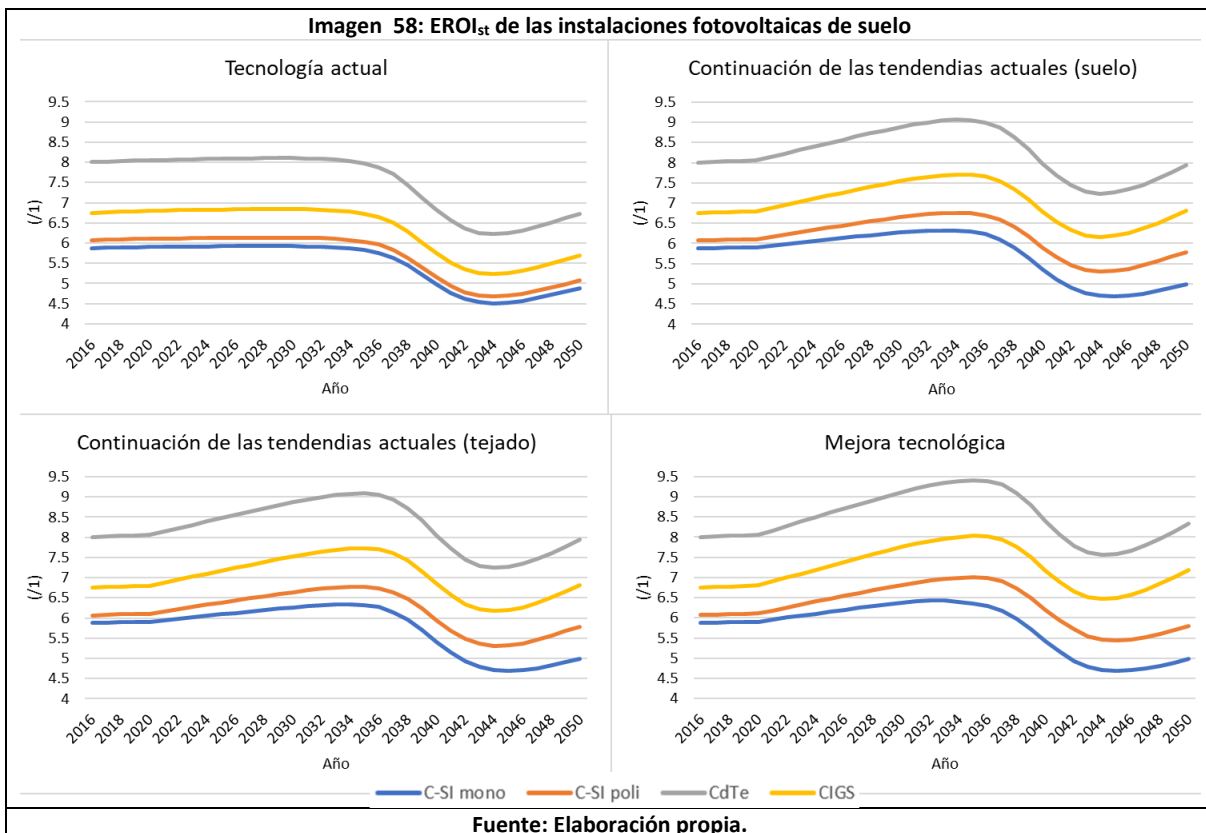
Lo primero que se puede observar, es el mayor CF (13%) del escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza el suelo durante algunos años (hasta el año 2038, en el que el espacio urbano o de tejados limita la instalación de este tipo de sistemas). Al contrario, ocurre con el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza la instalación de sistemas de tejado, con un CF del 12%. Todos los escenarios sufren una reducción paulatina del factor de capacidad a partir del año 2036 debido a la sobreproducción eléctrica provocada por la intermitencia propia de las renovables [159]. Si escogemos las capacidades de las energías renovables para asegurar el suministro energético en el peor de los casos (poco sol y sin viento, por ejemplo) en la mayoría de las ocasiones se producirá más energía de la necesaria. En el caso de los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica, su mayor instalación de potencia fotovoltaica hace que acusen más los efectos de la intermitencia, siendo los escenarios que peor CF obtienen para el año 2050 (en torno al 10%).

3.2.7 EROI, tasas de retorno energético obtenidas

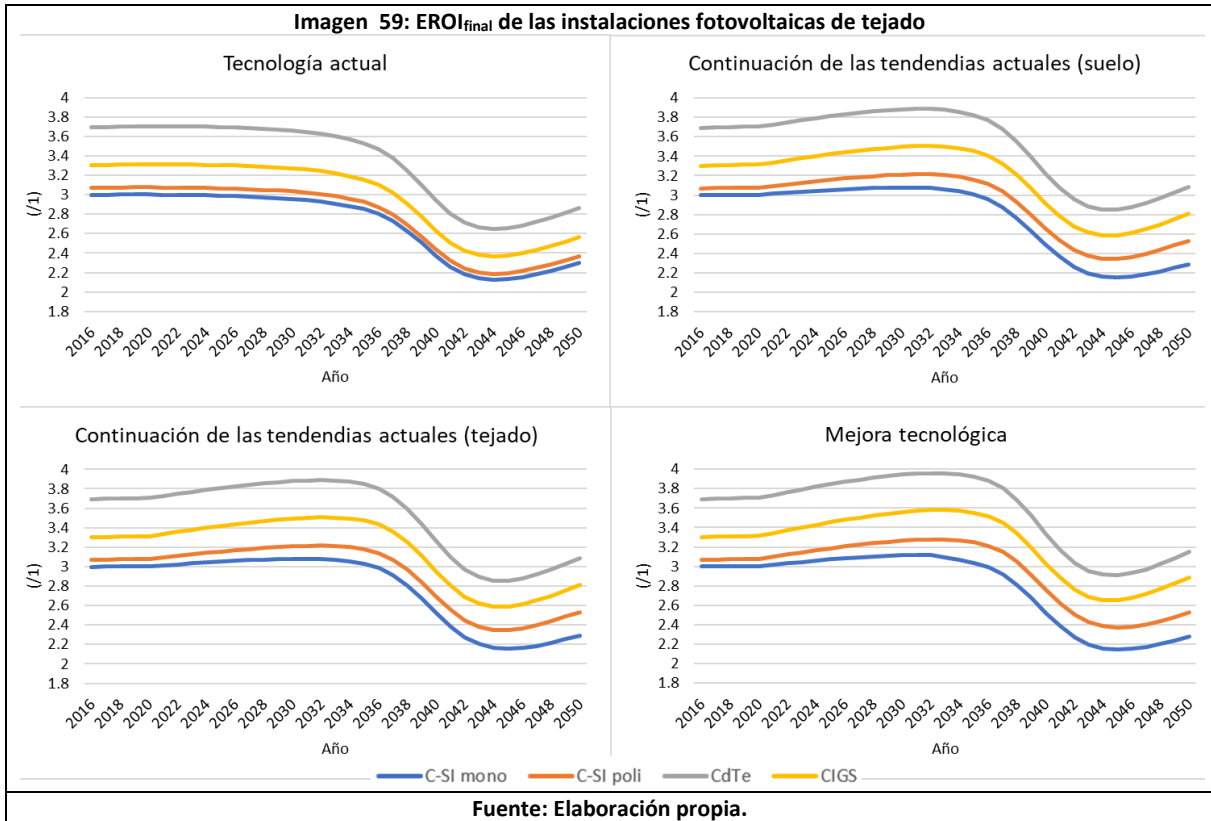
En este apartado se enunciarán, en primer lugar, los EROI obtenidos específicamente para cada disposición y subtecnología fotovoltaica y, en segundo lugar, se mostrarán los EROI de todo el conjunto de la fotovoltaica. Primero, se muestran los EROI_{st} para todas las subtecnologías en disposición de tejado (Imagen 57):



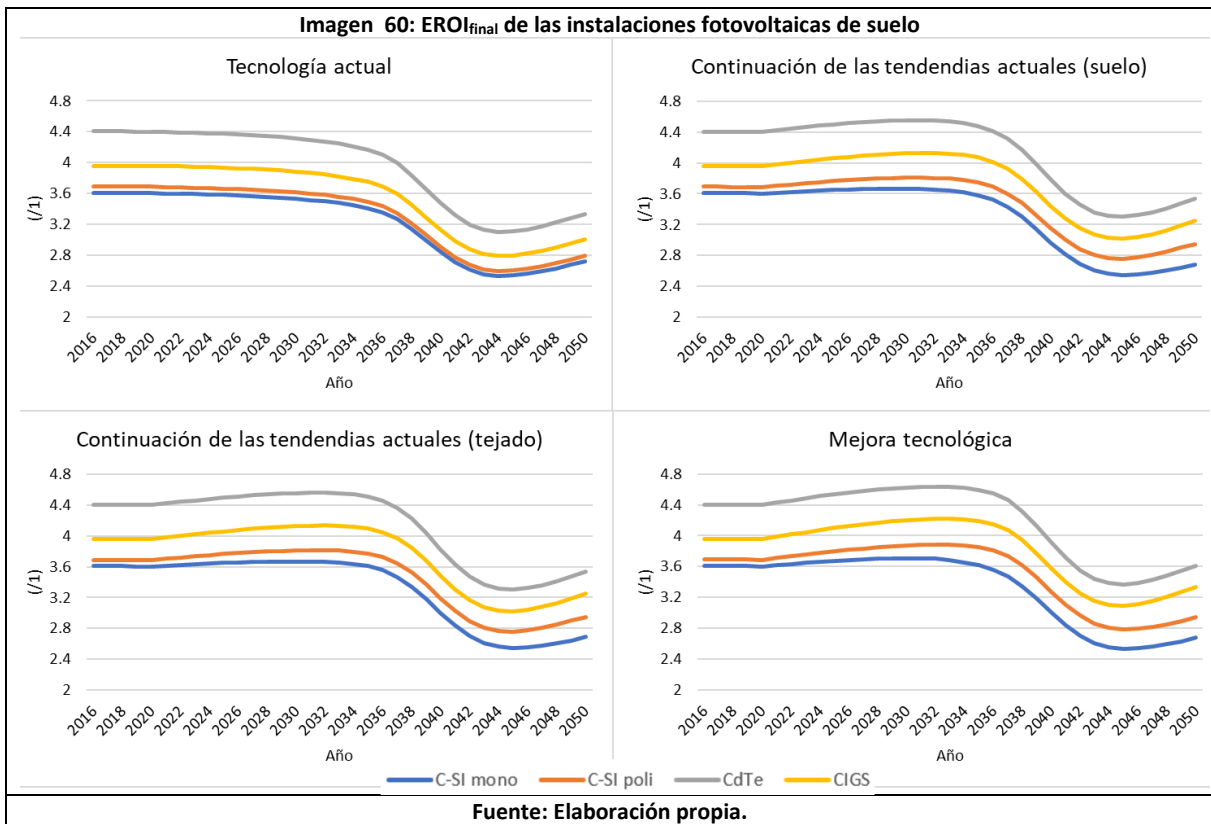
Ahora, se muestran los resultados de EROI_{st} para sus homólogos de suelo (Imagen 58).



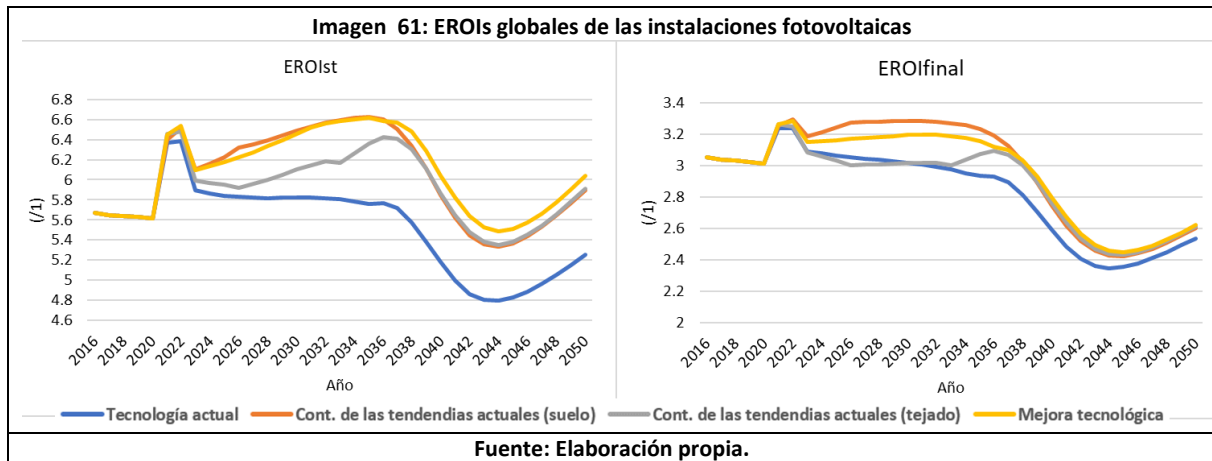
Una vez enunciados los EROI_{st} de cada subtecnología y disposición, se muestran los EROI_{final}. En este caso, comenzaremos como en la ocasión anterior enunciando los resultados de la disposición de tejado (Imagen 59).



Ahora, se muestran los resultados de EROI_{final} para sus homólogas de suelo (Imagen 60).



Una vez mostrados todos los EROI específicos, se pueden mostrar los EROI globales de todo el sistema fotovoltaico instalado durante la simulación de los escenarios (Imagen 61).



Tras mostrar todos los resultados, podemos discutirlos y compararlos con los obtenidos en el análisis estático y por la demás bibliografía. Encontramos, en este caso, unos resultados ligeramente más reducidos que en el análisis estático (fruto del menor ratio de reciclado RC y del menor CF) con valores de $EROI_{st}$ entre 3,8/1 y 9,5/1 y de $EROI_{final}$ situados entre 2,1/1 y 4,7/1. Se puede ver claramente como las pérdidas de energía fuera de la instalación son importantes obteniendo $EROI_{final}$ bastantes reducidos si las comparamos con las $EROI_{st}$. Se observa también de forma clara, la gran influencia de la bajada del CF en las tendencias adoptadas por los EROIs a lo largo de las simulaciones.

Respecto a los escenarios, los resultados obtenidos en el escenario de tecnología actual se ven perjudicados por la nula mejora tecnológica y de eficiencia de la tecnología. Los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica se ven perjudicados por su reducido CF respecto al escenario de tecnología actual, por lo que, a pesar de presentar grandes avances en eficiencia y demanda mineral no consiguen obtener EROIs mucho mayores a este último al final de la simulación. Aun así, estos escenarios obtienen los mejores valores de EROIs, consiguiendo resultados muy similares entre sí en el año 2050 de la simulación (ligeramente superiores en el escenario de mejora tecnológica).

En el inicio de la simulación (y hasta el agotamiento de las superficies de tejado), el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza las instalaciones de tejado presenta unos EROIs intermedios, situados entre los escenarios de tecnología actual y mejora tecnológica (Imagen 61), debido al menor EROI de las instalaciones de tejado. Lo contrario ocurre con el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza las instalaciones de suelo, que al inicio de la simulación y hasta el año 2036 obtiene los mejores EROIs (Imagen 61) fruto de los superiores EROIs de este tipo de instalaciones.

Las tecnologías de película fina (CIGS y CdTe) destacan sobre las tecnologías de silicio, pero claro, este análisis no tiene en cuenta de forma directa el mayor espacio que necesitan las tecnologías de película fina al poseer menor eficiencia y potencia. En cuanto a su disposición se puede observar que las instalaciones de tejado obtienen un menor EROI, ya que, a pesar de que no es necesario incluir infraestructuras tan grandes y costosas materialmente como en las grandes instalaciones de suelo (se aprovecha la estructura del edificio), estas poseen un menor factor de capacidad.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos por la bibliografía, buscando autores que enuncien evoluciones temporales del EROI de la fotovoltaica, nos encontramos con Görig and Breyer [160], que dan valores de $EROI_{st}$ por regiones para los años 2010 y 2020, estiman un valor medio de $EROI_{st}$ superior a 15/1 para el año 2010 y que supera los 30/1 para el año 2020, ya que extrapolan las tendencias de reducción de demanda de energía acumulada (CED) de años anteriores linealmente (lo cual provoca que en 2020 la CED tenga un valor muy reducido en torno a un 50% menor a nuestro $EnU^{Newcap}+EnU^{Mr}$), no tienen en cuenta la posible sobreproducción de la fotovoltaica con altas penetraciones de energías renovables, el posible descenso de los ratios de reciclado mineral (RC), tampoco a la energía empleada en el transporte de las materias, en el mantenimiento de las instalaciones o las pérdidas de autoconsumo de las plantas y además, otorgan una mayor vida útil a los paneles (30 años). Louwen et al [161], no exponen directamente valores de EROI, pero sí de EPBT ($EPBT = \frac{\text{Tiempo de vida}}{TRE}$) de los paneles de silicio cristalino (presentando una clara tendencia descendente) desde el año 1985 hasta el 2015. Estos, aunque toman una CED para una potencia instalada de 1 MW de valor similar a nuestro $EnU^{Newcap}+EnU^{Mr}$ toman suposiciones similares a Görig y Breyer no teniendo en cuenta todas las energías, elementos como el posible descenso de los ratios de reciclado (RC) o todos los materiales implicadas realmente en la fotovoltaica, obteniendo valores de EROI para 2015 situados en torno a 25/1. Steffen et al [162] muestran una subida del EROI a lo largo de los años llegando a valores situados sobre el 15/1 en el año 2040, aunque hay que enunciar que en este estudio solo se extrapolan los datos de EROI históricos. Se pueden realizar también comparaciones con los otros autores ya expuestos en el análisis estático (apartado 3.1), pero para evitar duplicidades simplemente se enuncia la misma conclusión en la que llegamos en aquel apartado; los EROIs expuestos por los diferentes autores [51]–[53] son algo más altos que las que se han obtenido en este análisis, ya que la mayoría de la bibliografía no ha considerado algunos elementos de construcción de paneles, estructuras, cableados, preparación del terreno, tampoco algunas pérdidas energéticas, o la energía empleada en el transporte y mantenimiento de los paneles y tampoco los posibles cambios en los ratios de reciclado.

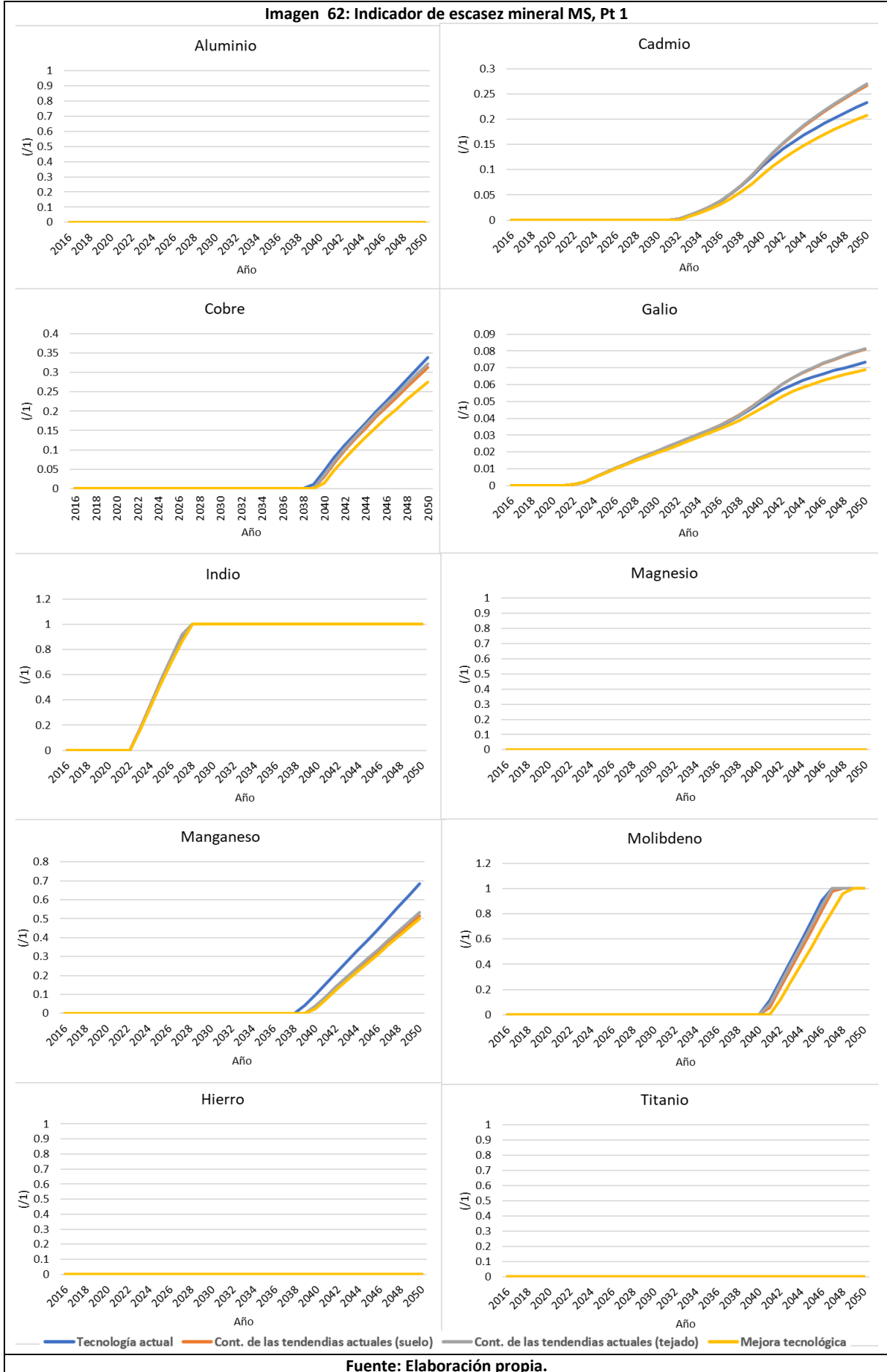
3.2.8 MS, indicador de escasez mineral

Para poder observar y entender todas las tendencias que puede mostrar la asignación endógena del porcentaje de mercado de las subtecnologías de paneles debemos enunciar los resultados del EROI y también el indicador de escasez mineral de los principales materiales que componen los paneles. Aunque ya se ha explicado en el apartado 2.8.3.4, se debe recordar que, si el indicador de escasez de un determinado mineral es mayor que 0, la demanda mineral global ha superado sus reservas sumadas a la cantidad de mineral reciclado disponible, y si es igual a 1, significa que ha superado sus recursos sumados a la cantidad de mineral reciclado disponible. A continuación, se enuncian los resultados en la Imagen 62 e Imagen 63. Hay que enunciar que solo se mostrarán los resultados referentes a los minerales principalmente por tres razones. En primer lugar, evitar la doble contabilidad, por ejemplo, en el caso del hierro y el acero. En segundo lugar, evitar la complejidad de calcular indicadores de escasez de materiales compuestos de varios minerales en una proporción variable, como la fibra de

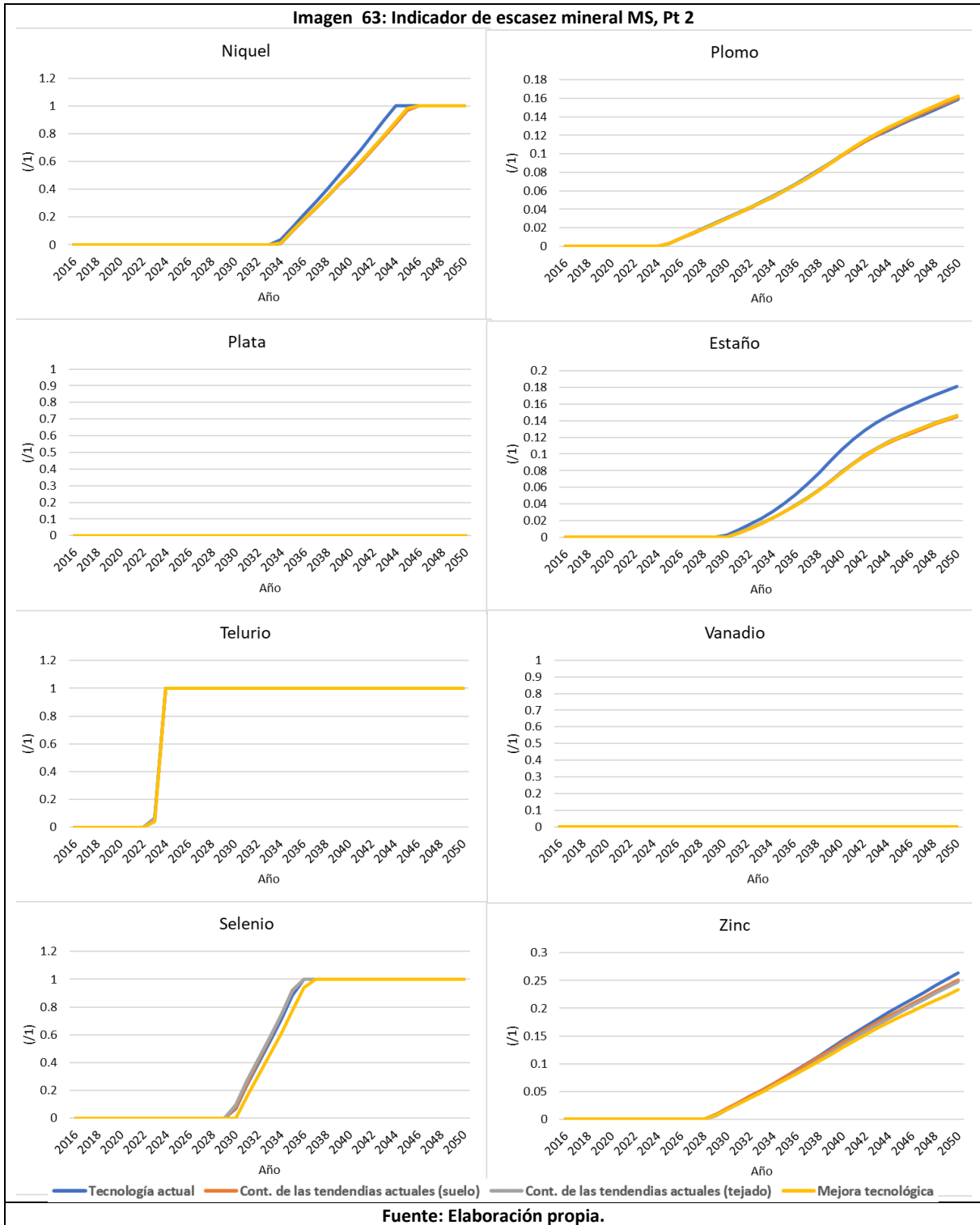


vidrio. Por último, los materiales compuestos no tienen reservas y recursos como tal, y en muchas ocasiones pueden ser obtenidos de diferentes minerales primarios y en diferentes proporciones, como es el caso del cemento. Dentro de los minerales también se ha suprimido la arena de sílice, ya que se carecen de datos de reservas o recursos, planteando un gran interrogante sobre el silicio. También la demás bibliografía suprime este mineral en sus análisis por las mismas razones.

Imagen 62: Indicador de escasez mineral MS, Pt 1



Fuente: Elaboración propia.



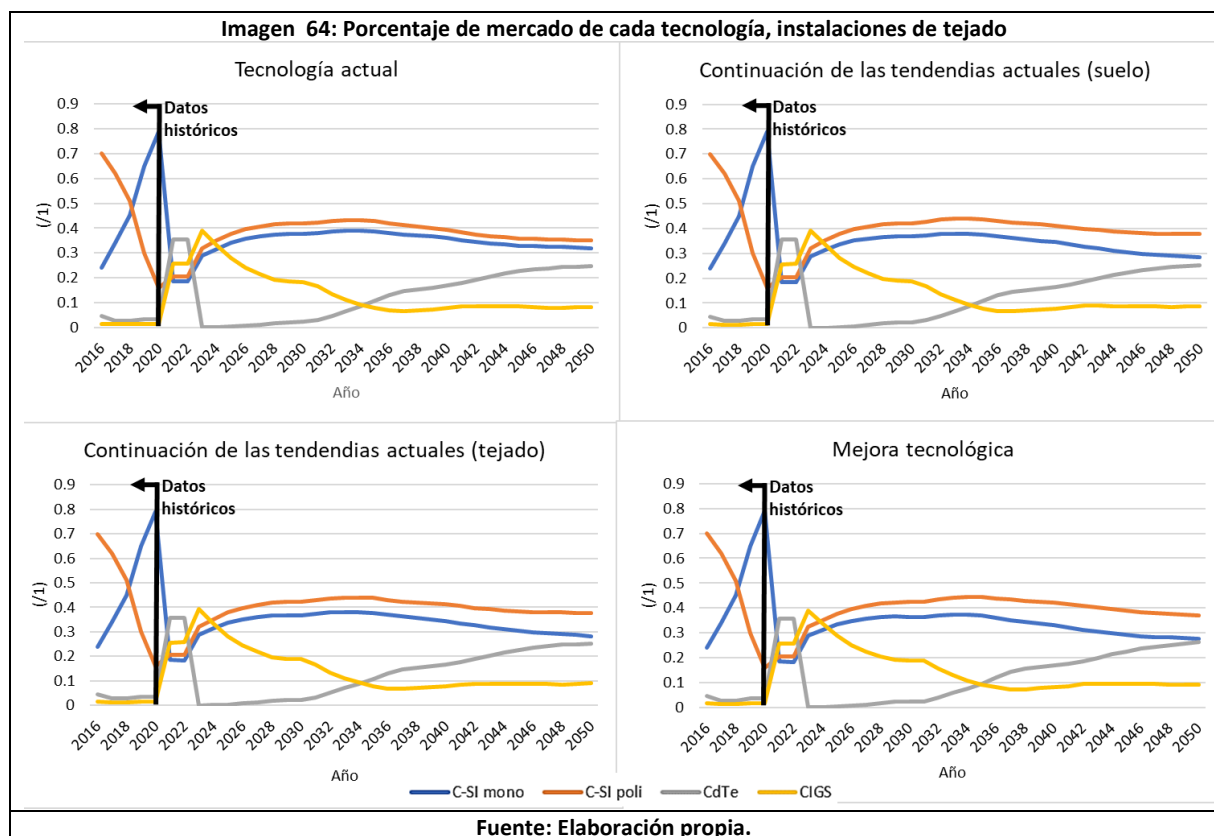
Aunque, más adelante se profundizará en la demanda mineral por parte de la fotovoltaica y el resto de la economía, se pueden encontrar varios aspectos de importancia en los resultados del indicador de escasez mineral. Respecto a los escenarios podemos ver en primera instancia que no hay grandes diferencias entre ellos, pero si se pueden apreciar tres tendencias. En primer lugar, el escenario de tecnología actual es el escenario que más minerales demandaría de forma global, al poseer los menores ratios de reciclado y no contar con reducción de intensidades minerales. En segundo lugar, el escenario de mejora tecnológica debido al mayor ratio de reciclado impuesto en este escenario hace que sea el que menores MS obtendría casi

todos los casos, llegando a 2050 con unas curvas que transmiten un aumento del indicador de escasez más paulatino respecto a los demás escenarios. En tercer lugar, en el caso de algunos minerales como el cadmio y el galio, los escenarios de continuación de las tendencias no son capaces de contrarrestar la mayor demanda mineral (al instalar mayor potencia fotovoltaica) con unos mayores ratios de reciclado respecto al escenario de tecnología actual, obteniendo unos MS superiores.

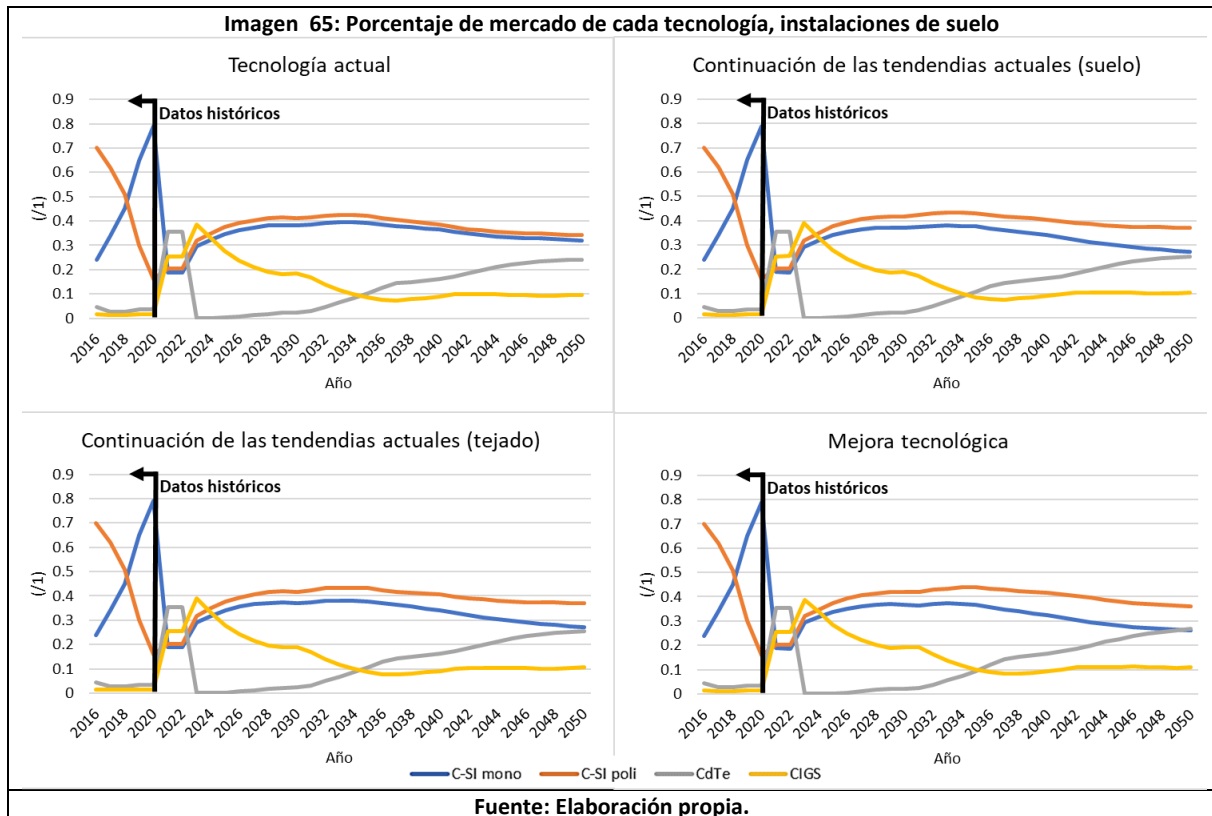
Desde el punto de vista de los minerales se puede observar como la plata, el aluminio, el hierro, el titanio, el vanadio y el magnesio no agotarían sus reservas antes del 2050 mientras que el molibdeno, el indio, el telurio, el selenio y el níquel agotarían sus recursos antes del año 2050. El resto de minerales agotarían sus reservas antes del año 2050 pero no sus recursos.

3.2.9 Asignación de las subtecnologías fotovoltaicas en el mercado

Una vez ya enunciado los resultados de las variables de las que depende se pueden mostrar los resultados del submódulo de asignación de las subtecnologías fotovoltaicas. Se mostrarán por separado los porcentajes de mercado de tejado (Imagen 64) y de suelo (Imagen 65).



Aunque los porcentajes de mercado en las instalaciones de suelo o de tejado son parecidos, no son iguales, ya que los requerimientos materiales y energéticos de los dos tipos de instalaciones varían.



La distribución de los porcentajes de mercado de las tecnologías nos puede indicar ciertas tendencias. Se ha enunciado anteriormente que antes del 2020 la distribución responde a la representación de los datos históricos, a partir de este año, las subtecnologías de Silicio reducen su elevado porcentaje de mercado, pero siguen manteniendo en conjunto un porcentaje de mercado superior al 60% durante toda la simulación, llegando al 2050 tomando valores situados entre el 27% y el 39% para cada una de las tecnologías. Esta tendencia es provocada por equilibrio que caracteriza a estas subtecnologías que poseen un EROI lo suficientemente elevado y unos requerimientos materiales contenidos y de minerales menos escasos que en el caso de las tecnologías de película fina.

La subtecnología CdTe que cuenta con el mayor EROI, eleva de forma notable su porcentaje de mercado en el principio de los años 2020s, pero solo durante un leve periodo de tiempo, antes de ver descender sus datos debido a la prematura escasez del telurio. Tras esta caída, antes del 2030 sigue manteniendo un porcentaje de mercado muy reducido debido a sus requerimientos materiales, ya que cuentan con minerales con un alto índice de escasez como el telurio o el Cadmio. Más adelante en las simulaciones, superando el año 2040, donde cada vez más minerales sufren escasez (y en mayor medida), el peso relativo del EROI en la elección del porcentaje de mercado aumenta, otorgando a esta subtecnología un porcentaje de mercado levemente inferior a las tecnologías de silicio (entre el 22% y el 27%).

Por último, el caso de la subtecnología CIGS es el opuesto a la tecnología CdTe. En los primeros años de simulación esta subtecnología aprovecha su relativamente buen EROI para acercarse a las tecnologías de silicio, pero a lo largo de la simulación sus requerimientos de minerales como el galio, el indio, el cadmio o el molibdeno hacen que esta descienda en porcentaje de mercado alcanzando valores situados alrededor del 10% en 2050.



3.2.10 Demanda mineral respecto a las reservas y recursos de la tecnología fotovoltaica

Finalmente, se han obtenido las demandas minerales de cada aspecto de la tecnología fotovoltaica respecto a las reservas y recursos. También, se mostrará la demanda mineral del resto de la economía (sin tener en cuenta la demanda de los vehículos electrificados ni de las demás tecnologías de producción eléctrica renovables) con el fin de ver los requerimientos minerales con mayor perspectiva. Respecto a anteriores apartados, solo se mostrará la demanda de los minerales cuyos requerimientos por parte de la tecnología fotovoltaica sean significativos ($>0,5\%$ respecto a sus reservas en el año 2050).

3.2.10.1 *Demanda mineral respecto a las reservas*

A continuación, se muestra en forma de tabla (Tabla 25) los requerimientos minerales más destacados de cada uno de los aspectos que componen la tecnología fotovoltaica. Aunque, el indicador de escasez mineral ya nos ha dado algunas pistas sobre la demanda mineral en este apartado se han enunciado de forma exacta los requerimientos minerales respecto a las reservas.

Tabla 25: Demanda mineral respecto a las reservas de la tecnología fotovoltaica

		Tecnología actual	Cont. de las tendencias actuales (suelo)	Cont. de las tendencias actuales (tejado)	Mejora tecnológica
Requerimientos de aluminio de la fotovoltaica	Células	0.03%	0.03%	0.03%	0.01%
	inversores y transformadores	0.26%	0.27%	0.30%	0.30%
	Cableado	0.10%	0.09%	0.08%	0.08%
	Estructuras de sujeción	0.87%	0.61%	0.94%	0.83%
	Estructura del panel	2.58%	2.26%	2.29%	2.24%
Resto de la economía		11.41%	10.93%	11.07%	11.05%
TOTAL		15.25%	14.19%	14.72%	14.51%
Requerimientos de cadmio de la fotovoltaica	Células	184.90%	223.10%	225.60%	161.07%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		167.95%	167.46%	167.79%	165.97%
TOTAL		354.92%	391.48%	394.71%	327.54%
Requerimientos de cobre de la fotovoltaica	Células	5.54%	5.85%	5.93%	2.75%
	inversores y transformadores	2.42%	2.25%	2.92%	2.68%
	Cableado	7.91%	7.25%	6.56%	6.30%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		102.72%	97.68%	98.49%	94.94%
TOTAL		118.59%	113.04%	113.90%	106.67%
Requerimientos de Galio de la fotovoltaica	Células	1047.51%	1202.22%	1207.55%	972.76%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		443.01%	440.03%	440.04%	435.40%
TOTAL		1490.52%	1642.25%	1647.59%	1408.16%
Requerimientos de indio de la fotovoltaica	Células	2869.05%	3404.57%	3432.44%	2613.88%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		108.75%	108.67%	108.67%	108.53%
TOTAL		2977.80%	3513.24%	3541.11%	2722.41%
Requerimientos de magnesio de la fotovoltaica	Células	0.11%	0.12%	0.13%	0.06%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	17.73%	16.41%	16.56%	16.18%
Resto de la economía		2.67%	2.66%	2.69%	2.67%
TOTAL		20.51%	19.19%	19.37%	18.91%
Requerimientos de manganeso de la fotovoltaica	Células	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	4.26%	3.49%	3.53%	3.36%
Resto de la economía		146.30%	133.49%	134.92%	132.34%
TOTAL		150.56%	136.97%	138.46%	135.70%
Requerimientos de molibdeno de la fotovoltaica	Células	7.11%	7.93%	8.00%	6.04%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		135.29%	131.22%	132.45%	127.53%
TOTAL		142.40%	139.14%	140.45%	133.57%

Requerimientos de níquel de la fotovoltaica	Células	0.05%	0.05%	0.05%	0.03%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	4.50%	4.00%	3.52%	3.60%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		140.18%	130.71%	131.88%	132.00%
TOTAL		144.72%	134.77%	135.45%	135.63%
Requerimientos de plomo de la fotovoltaica	Células	2.69%	2.96%	3.00%	1.44%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		354.56%	349.47%	352.57%	353.02%
TOTAL		357.25%	352.43%	355.57%	354.46%
Requerimientos de estaño de la fotovoltaica	Células	51.74%	7.56%	7.65%	6.40%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	55.81%	49.07%	49.62%	48.71%
Resto de la economía		186.04%	178.50%	179.35%	179.30%
TOTAL		293.59%	235.14%	236.62%	234.42%
Requerimientos de telurio de la fotovoltaica	Células	3793.95%	4637.85%	4694.43%	3324.70%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		21.68%	21.67%	21.67%	21.65%
TOTAL		3815.63%	4659.52%	4716.09%	3346.36%
Requerimientos de Selenio de la fotovoltaica	Células	272.44%	313.64%	315.02%	254.74%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		62.17%	61.91%	61.91%	61.49%
TOTAL		334.60%	375.55%	376.94%	316.23%
Requerimientos de zinc de la fotovoltaica	Células	0.24%	0.26%	0.26%	0.21%
	inversores y transformadores	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	22.53%	21.76%	18.00%	17.63%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		263.55%	254.51%	256.01%	245.90%
TOTAL		286.33%	276.54%	274.28%	263.74%

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados obtenidos, se puede observar cómo las células llegarían a demandar una cantidad destacable respecto a las reservas de cobre (2,7%-6%), molibdeno (6%-8%), plomo (1,4%-3%) y estaño (6,4%-51,8%), llegando a requerir una cantidad superior a las reservas de Galio (972%-1208%), Cadmio (161%-226%), indio (2613%-3433%), telurio (3324%-4695%) y selenio (254%-316%). La comparación de estos requerimientos con la cantidad de minerales demandados por parte del resto de la economía puede ser de gran utilidad para observar la situación con mayor perspectiva. Todos estos minerales citados serían más demandados respecto a sus reservas por las células que por el resto de la economía, salvo el cobre con unos requerimientos por parte del resto de la economía respecto a sus reservas situados entre el 95% y el 103%, el molibdeno, con valores situados entre 127% y 136%, el plomo con valores situados entre el 349% y el 355%, o el estaño, con valores situados entre el 179% y el 187%. El galio presenta una demanda por parte del resto de la economía con valores situados entre

el 435% y el 444%; el cadmio, presenta valores de demanda situados entre el 165% y el 168%; el indio cuenta con una demanda con valores situados entre el 108% y el 109%; el telurio presenta unos requerimientos con valores situados entre el 21% y el 22%, y finalmente, el selenio que cuenta unos requerimientos situados entre el 61% y el 63% respecto a las reservas.

Las estructuras de sujeción y de composición del panel llegarían a demandar una cantidad destacable respecto a las reservas de aluminio (2,8%-3,5%), magnesio (16,1%-17,8%), manganeso (3,3%-4,3%), níquel (3,6%-4,5%), estaño (48,7%-55,9%) y zinc (17,6%-22,6%). Aunque en este caso, la demanda por parte del resto de la economía del aluminio (11%-12%), manganeso (132,3%-146,3%), níquel (130,7%-140,2%), estaño (178,5%-186,1%) y zinc (245,9%-263,6%) es mucho más elevada respectivamente. Solo el magnesio llegaría a ser demandado en una mayor cantidad por parte de las estructuras (16,1%-17,8%) que por parte del resto de la economía (2,6%-2,7%).

El cableado, los inversores y transformadores demandan entre el 0,3% y el 0,4% de las reservas de aluminio, pero los requerimientos a destacar por parte de este aspecto de la tecnología fotovoltaica es su demanda de cobre, tomando valores situados entre el 9% y el 10,3% de las reservas de cobre.

3.2.10.2 Demanda mineral respecto a los recursos

A continuación, se muestra en forma de tabla (Tabla 26) los requerimientos minerales más destacados de cada uno de los aspectos que componen la tecnología fotovoltaica.

Tabla 26: Demanda mineral respecto a los recursos de la tecnología fotovoltaica

		Tecnología actual	Cont. de las tendencias actuales (suelo)	Cont. de las tendencias actuales (tejado)	Mejora tecnológica
Requerimientos de aluminio de la fotovoltaica	Células	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
	inversores y	0.10%	0.10%	0.11%	0.11%
	Cableado	0.04%	0.04%	0.03%	0.03%
	Estructuras de sujeción	0.32%	0.23%	0.35%	0.31%
	Estructura del panel	0.96%	0.84%	0.86%	0.84%
Resto de la economía		4.26%	4.08%	4.13%	4.12%
TOTAL		5.69%	5.30%	5.50%	5.42%
Requerimientos de cadmio de la fotovoltaica	Células	15.41%	18.59%	18.80%	13.42%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		13.99%	13.95%	13.98%	13.83%
TOTAL		29.40%	32.55%	32.78%	27.25%
Requerimientos de cobre de la fotovoltaica	Células	1.90%	2.01%	2.03%	0.94%
	inversores y	0.83%	0.77%	1.00%	0.92%
	Cableado	2.71%	2.49%	2.25%	2.16%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		35.22%	33.49%	33.77%	32.55%
TOTAL		40.66%	38.75%	39.05%	36.57%
Requerimientos de Galio de la fotovoltaica	Células	5.48%	6.27%	6.30%	5.07%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		2.30%	2.29%	2.29%	2.26%
TOTAL		7.78%	8.56%	8.59%	7.33%
Requerimientos de indio de la fotovoltaica	Células	670.05%	795.12%	801.63%	610.46%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		25.40%	25.38%	25.38%	25.35%
TOTAL		695.45%	820.50%	827.01%	635.81%
Requerimientos de magnesio de la fotovoltaica	Células	0.02%	0.02%	0.03%	0.01%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	3.55%	3.28%	3.31%	3.24%
Resto de la economía		0.53%	0.53%	0.54%	0.53%
TOTAL		4.10%	3.84%	3.87%	3.78%
Requerimientos de manganeso de la fotovoltaica	Células	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	2.36%	1.93%	1.96%	1.86%
Resto de la economía		80.96%	73.87%	74.67%	73.24%
TOTAL		83.32%	75.80%	76.62%	75.09%
Requerimientos de molibdeno de la fotovoltaica	Células	5.59%	6.23%	6.28%	4.75%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		106.30%	103.10%	104.07%	100.20%
TOTAL		111.88%	109.33%	110.35%	104.95%

Requerimientos materiales y EROI

de las tecnologías fotovoltaicas en la transición energética

Requerimientos de níquel de la fotovoltaica	Células	0.03%	0.03%	0.03%	0.02%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	2.80%	2.49%	2.19%	2.24%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		87.34%	81.44%	82.17%	82.25%
TOTAL		90.17%	83.97%	84.39%	84.50%
Requerimientos de plomo de la fotovoltaica	Células	0.12%	0.13%	0.13%	0.06%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		15.42%	15.20%	15.34%	15.36%
TOTAL		15.54%	15.33%	15.47%	15.42%
Requerimientos de estaño de la fotovoltaica	Células	3.26%	0.48%	0.48%	0.40%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	3.52%	3.09%	3.13%	3.07%
Resto de la economía		11.72%	11.24%	11.30%	11.29%
TOTAL		18.49%	14.81%	14.91%	14.77%
Requerimientos de telurio de la fotovoltaica	Células	2276.37%	2782.71%	2816.66%	1994.82%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		13.01%	13.00%	13.00%	12.99%
TOTAL		2289.38%	2795.71%	2829.66%	2007.81%
Requerimientos de selenio de la fotovoltaica	Células	163.46%	188.18%	189.01%	152.85%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		37.30%	37.15%	37.15%	36.89%
TOTAL		200.76%	225.33%	226.16%	189.74%
Requerimientos de zinc de la fotovoltaica	Células	0.03%	0.03%	0.03%	0.02%
	inversores y	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Cableado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	Estructuras de sujeción	2.73%	2.63%	2.18%	2.13%
	Estructura del panel	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Resto de la economía		31.90%	30.81%	30.99%	29.77%
TOTAL		34.66%	33.48%	33.20%	31.93%

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados obtenidos, se puede observar cómo las células llegarían a demandar una proporción ínfima respecto a los recursos de plomo ($\approx 0,1\%$), una cantidad destacable de cobre ($0,9\%-2,1\%$), molibdeno ($4,7\%-6,3\%$), Galio ($5\%-6,3\%$), Cadmio ($13,4\%-18,8\%$) y estaño ($0,4\%-3,3\%$), llegando a requerir una cantidad superior a los recursos de indio ($610\%-802\%$), telurio ($1994\%-2817\%$) y selenio ($152\%-190\%$). La comparación de estos requerimientos con la cantidad de minerales demandados por parte del resto de la economía puede ser de gran utilidad para observar la situación con mayor perspectiva. Todos los minerales citados serían más demandados respecto a sus recursos por las células que por el resto de la economía, salvo el cobre, con unos requerimientos por parte del resto de la economía respecto a sus reservas situados entre el $32,6\%$ y el $35,2\%$, el molibdeno, con valores situados entre $100,2\%$ y $106,3\%$, el plomo, con valores situados entre el $15,3\%$ y el $15,4\%$ o el estaño, con valores situados entre el $11,2\%$ y el $11,8\%$. El galio presenta una demanda por parte del resto de la economía con

valores situados entre el 2,2% y el 2,3%; el cadmio, presenta valores de demanda situados entre el 13,8% y el 14%; el indio cuenta con una demanda con valores situados entre el 25,3% y el 25,4%; el telurio presenta unos requerimientos del 13%, y finalmente, el selenio que cuenta unos requerimientos situados entre el 36,8% y el 37,3% respecto a las reservas.

Las estructuras de sujeción y de composición del panel llegarían a demandar una cantidad destacable respecto a los recursos de aluminio (1%-1,4%), magnesio (3,2%-3,6%), manganeso (1,8%-2,4%), níquel (2,1%-2,8%), estaño (3%-3,6%) y zinc (2,1%-2,8%). Aunque en este caso, la demanda por parte del resto de la economía del aluminio (4%-4,3%), manganeso (73,2%-81%), níquel (82,2%-87,4%), estaño (11,2%-11,8%) y zinc (29,7%-31,9%) es mucho más elevada respectivamente. Solo el magnesio llegaría a ser demandado en una mayor cantidad por parte de las estructuras (3,2%-3,6%) que por parte del resto de la economía (0,5%).

El cableado, los inversores y transformadores demandan entre el 0,1% y el 0,2% de los recursos de aluminio, pero los requerimientos a destacar por parte de este aspecto de la tecnología fotovoltaica es su demanda de cobre, tomando valores situados entre el 3,1% y el 3,6% de los recursos de cobre.

3.2.10.3 Discusión general y comparación con la demanda mineral obtenida por otros autores

Respecto a la demanda obtenida desde el punto de vista de los escenarios impuestos, el escenario de estancamiento es el escenario con mayor demanda mineral, ya que no posee mejoras de los ratios de reciclado ni de carácter tecnológico. Los escenarios de tendencias actuales, consiguen demandar menor cantidad de minerales que el primer escenario, pero solo por un reducido margen a pesar de las mejoras tecnológicas y de reciclado que poseen estos escenarios. Esto ha sucedido debido a la mayor cantidad de tecnología fotovoltaica instalada en los escenarios que extrapolan las tendencias.

El escenario de evolución tecnológica destaca por ser el que menor demanda mineral presenta, además de ser el que menores emisiones de CO₂ posee. Esto, muestra la importancia de los índices de reciclado y de la mejora tecnológica, aspectos que permiten reducir en gran medida la demanda de extracción de los minerales.

Desde el punto de vista de los diferentes elementos de la tecnología fotovoltaica, como se ha comentado respectivamente en cada apartado, se puede observar como las células y las estructuras que conforman y sujetan los paneles demandan una gran cantidad de minerales respecto a las reservas y recursos llegando a agotar estos últimos en varias ocasiones.

Si nos fijamos en la tecnología fotovoltaica de forma global, se puede indicar que el selenio, telurio e indio presentarían una demanda capaz de agotar sus recursos, destacando sobre los demás. El selenio presentaría una demanda por parte de la tecnología fotovoltaica para el año 2050 situada entre el 140% y el 180% sobre sus recursos, el telurio entre el 2693% y el 3712% y finalmente el indio entre el 681% y el 906%. También, minerales como el magnesio (15%-17,8%), manganeso (3,3%-3,9%) galio (894%-1148%), cobre (13,4%-14,3%), plomo (1,4%-2,2%), cadmio (203,9%-283%), molibdeno (5,8%-7,9%), níquel (3,3%-4,3%), estaño (4,7%-

5,5%) y zinc (16,8%-21,6%) poseen una importante demanda respecto a sus reservas, pero no agotan sus recursos como los minerales anteriormente citados.

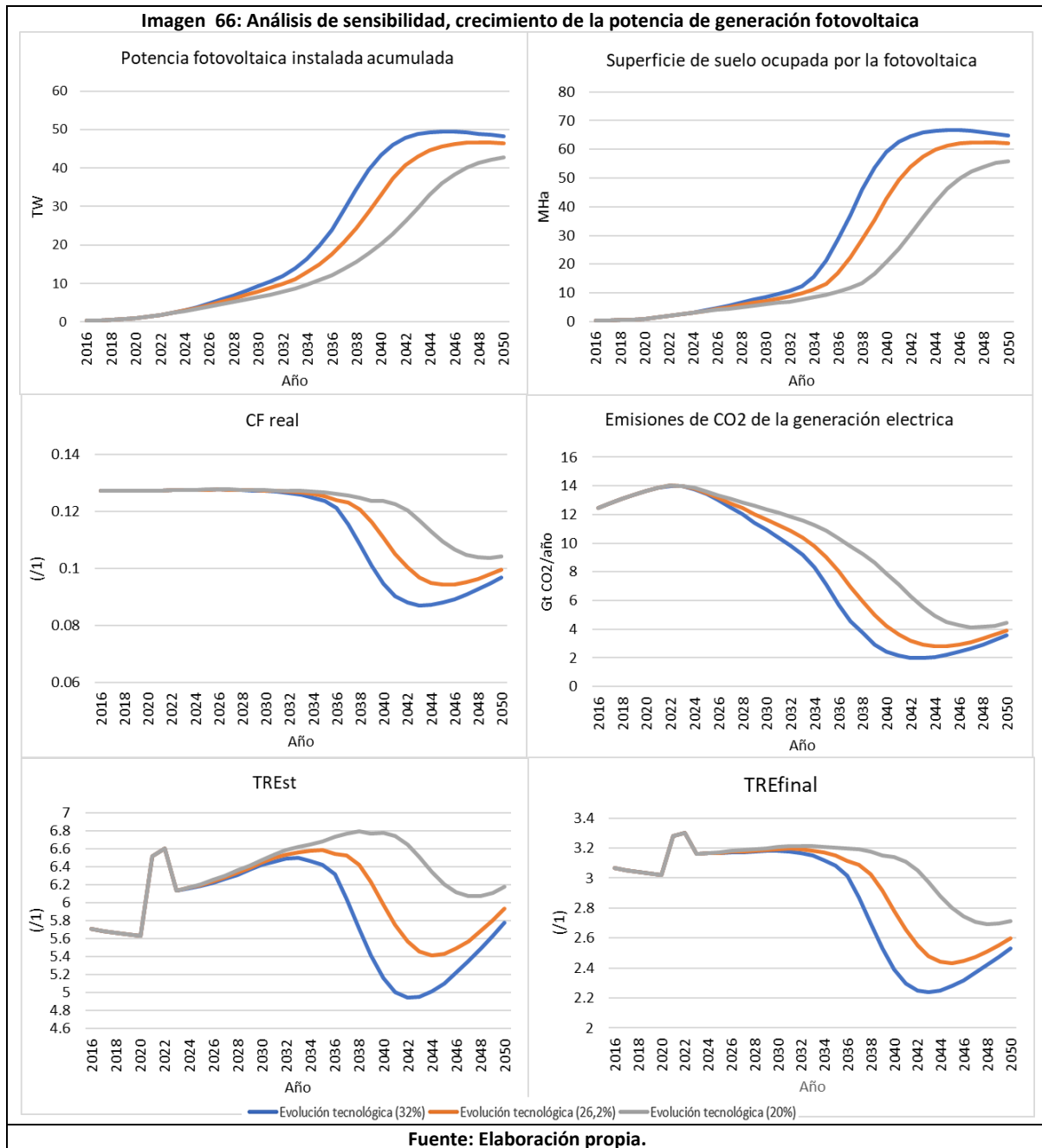
Si nos observamos lo que enuncian otros autores, Moreau et al [46] estima que la adopción de las energías renovables puede provocar que el cadmio, níquel, estaño y zinc pueden agotar sus reservas antes del 2050. De Koning et al [5], estima que será necesario que aumenten las reservas de cobre, indio o zinc para que el transporte electrificado y las tecnologías productoras de electricidad no provoquen el desabastecimiento de estos minerales. De Castro et al [54] enuncia los requerimientos de las tecnologías alternativas respecto a las reservas para el año 2050, obteniendo unas demandas de estaño con valores que alcanzan el 300%; de indio con valores que alcanzan el 900%; de Telurio con valores que alcanzan el 1200%; de galio con valores que alcanzan el 120%; de manganeso con valores que alcanzan el 50% y finalmente, de cobre con valores que alcanzan el 25%. Viebahn et al [43] estima que se necesitarán más del 8% de las reservas de indio, del 0,6% de las reservas de selenio y del 0,2% de las reservas de telurio para desplegar totalmente la tecnología fotovoltaica solo el Alemania.

Valero et al [6] estima una demanda mineral por parte de la tecnología fotovoltaica respecto a las reservas del 176% para el indio, del 0,3% para el molibdeno, del 5% para el cadmio, del 25,6% para el galio, del 2% para el cobre, del 10% para el selenio, del 42% para el estaño, del 350% para el telurio y menor al 0,1% para el magnesio, níquel y zinc. Tokimatsu et al [7] obtiene unas demandas acumuladas por parte de la tecnología fotovoltaica para el año 2050 del 100% del galio, del 10000% el indio, del 1200% del selenio, del 150% del cadmio y del 8500% del telurio respecto a sus reservas. Mangerber et al [45] considera unos requerimientos minerales por parte del transporte electrificado y de las energías renovables para el año 2060 que alcanzan el 16% de las reservas de cobre, el 162% de las reservas de galio, el 59% de las reservas de indio, el 110% de las reservas de níquel, el 86% de las reservas de selenio y el 202% de las reservas de Telurio.

Por lo tanto, se puede observar como también la bibliografía ha estimado posibles problemas en la disponibilidad futura de muchos de los minerales también estudiados en este trabajo. Coincidiendo en que los minerales que más problemas pueden poseer por causa de la fotovoltaica podrían ser el galio, el indio, el selenio, el cadmio y el telurio.

3.2.11 Análisis de sensibilidad, velocidad de crecimiento de la potencia de generación fotovoltaica

En este apartado se muestran las consecuencias más destacables de imponer distintos ritmos (20%, 26,2%, 32%) de crecimiento de la potencia de la generación fotovoltaica en el escenario de mejora tecnológica. En la Imagen 66, se pueden observar las diferencias de emisiones, superficie de suelo ocupada, potencia instalada fotovoltaica acumulada, factor de capacidad y de EROIs.



Observando los resultados obtenidos (Imagen 66) se pueden comentar diversas tendencias. El primer efecto producido, es la mayor potencia instalada a lo largo de la simulación al aumentar la velocidad de crecimiento de la fotovoltaica. Su mayor ritmo de crecimiento también permite reducir de forma notable las emisiones de CO₂ de la generación eléctrica a partir del año 2026 de la simulación hasta el año 2050, donde las diferencias son ya reducidas debido a la similar potencia fotovoltaica instalada acumulada. En lo respectivo a la demanda de suelo, los resultados son opuestos a las emisiones, donde el mayor ritmo de crecimiento acaba demandando una mayor cantidad de suelo a partir del año 2026. El CF se ve reducido al aumentar la velocidad de crecimiento de la instalación de fotovoltaica, debido a sufrir con anterioridad y en mayor intensidad los problemas asociados a la intermitencia y sobreproducción propia de las energías renovables, lo que acaba provocando a su vez unos EROIs más reducidos.

También debemos mostrar resultados de demanda mineral (Tabla 27), ya que pueden extraerse algunas conclusiones de gran importancia.

Tabla 27: Demanda mineral respecto a las reservas de la tecnología fotovoltaica con distintos ritmos de adopción de la tecnología

		Escenario de Mejora tecnológica		
		32% aumento potencia/año	26,2% aumento potencia/año	20% aumento potencia/año
Requerimientos de la fotovoltaica	Aluminio (Al)	3,81%	3,47%	2,95%
	Cadmio (Cd)	172,50%	161,07%	142,64%
	Cobre (Cu)	14,09%	11,73%	10,28%
	Galio (Ga)	1032,91%	972,76%	866,96%
	Indio (In)	2783,55%	2613,88%	2327,85%
	Magnesio (Mg)	17,89%	16,25%	13,69%
	Manganeso (Mn)	3,72%	3,36%	2,80%
	Molibdeno (Mo)	6,45%	6,02%	5,31%
	Níquel (Ni)	4,05%	3,62%	2,97%
	Plomo (Pb)	1,72%	1,44%	1,08%
	Estaño (Sn)	62,34%	55,15%	45,18%
	Telurio (Te)	3558%	3324,7%	2950,88%
	Selenio (Se)	270,33%	254,74%	227,26%
	Zinc (Zn)	20,23%	17,82%	14,27%

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias de demanda obtenidas según el ritmo de crecimiento deseado son importantes, aumentando la demanda junto al ritmo de crecimiento. Esto se produce por dos factores, por un lado, debido a la mayor potencia instalada y por otro, debido a que, en las simulaciones con mayor velocidad de crecimiento, se instalan mayor cantidad de paneles que cuentan con peores eficiencias y mayores intensidades minerales.

3.3 Limitaciones y vías de trabajo futuro

Tras mostrar los resultados del trabajo y su respectiva discusión hay que enumerar las diferentes limitaciones propias de un estudio de esta índole. En primer lugar, en el mundo real las reservas y recursos varían dinámicamente a lo largo del tiempo, por ejemplo, al encontrar nuevos yacimientos o, al contrario, al revelarse algunas estimaciones como demasiado exageradas inducidas por la especulación. Las suposiciones llevadas a cabo en este trabajo, como las instalaciones tipo establecidas o la longitud de cableado escogida no son una limitación propiamente, pero son generalizaciones fruto de la necesidad de sintetizar y agrupar todos los tipologías y sistemas de instalaciones fotovoltaicas, por lo que se debe tener presente que muchas de las instalaciones reales pueden ser algo diferentes a las escogidas en este trabajo. Otra limitación ha sido la falta de datos exactos sobre el silicio o sobre la sustitución de minerales, lo que no ha permitido completar el análisis de todos los materiales implicados en la tecnología fotovoltaica o evaluar las consecuencias exactas y las limitaciones de la sustitución mineral. Los resultados del ratio de contenido reciclado (RC) del 100% obtenidos para algunos minerales como la plata o el hierro pueden estar algo alejados de la



realidad, siendo esto debido a que los datos de stock inicial de estos materiales en la economía (heredados de versiones anteriores del modelo) poseen cierta incertidumbre, al igual que el tiempo considerado que pasan en uso hasta el final de su vida útil (dato también heredado de anteriores versiones del modelo, estableciendo un tiempo de 40 años).

La función de asignación empleada en este trabajo para la elección del porcentaje de mercado de subtecnologías fotovoltaicas tiene en cuenta el EROI y la escasez y empleo de materiales, dejando de lado algunos factores como, los precios, la rentabilidad económica de explotación de una instalación, las políticas, la regionalización, lo perjudicial que pueden ser algunos materiales empleados en los paneles para el medio ambiente... También, la limitación temporal de un trabajo de este tipo no ha permitido explorar un gran número de diferentes escenarios o someter a un análisis de influencia o de incertidumbre a algunas variables como la longitud del cableado, por ejemplo. Por último, indicar que estas limitaciones pueden abrir líneas de trabajo futuras y de ampliación de este trabajo, como la exploración de nuevos escenarios, o completar el análisis con la obtención de nuevos datos disponibles sobre el silicio y las nuevas subtecnologías fotovoltaicas.

4. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

Se conformó este TFM con el fin de observar cómo afectaría la transición a formas de generación energética renovable a nivel mundial en las próximas décadas (horizonte 2050), enfocándonos en la tecnología fotovoltaica, a los recursos minerales del planeta y tomar conciencia de las implicaciones y consecuencias de este cambio. Hemos obtenido una gran cantidad de información sobre las tecnologías empleadas en la producción de energía fotovoltaica, tanto de los propios paneles como en las infraestructuras necesarias para hacerlos funcionar. Esta información nos ha proporcionado los datos que nos muestran cuantos recursos emplean estas tecnologías. Estos datos introducidos después en el modelo MEDEAS-W modificado nos han permitido conocer el EROI de las subtecnologías fotovoltaicas y cuál es el posible futuro de los minerales empleados en la electrificación con la imposición de diferentes escenarios o políticas. Como consecuencia de todo esto podemos llegar a ciertas conclusiones, que buscando una mayor comprensión por parte del lector se dividirán en subapartados.

4.1 Capacidad de producción de energía eléctrica fotovoltaica

La primera conclusión que podemos obtener, es que la mejor tasa de retorno energética de la tecnología fotovoltaica empleada en los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica provocan que el modelo instale una mayor capacidad de producción de energía fotovoltaica (llegando a instalar 46 TW de potencia para el año 2046) en detrimento de otras formas de generación de energía eléctrica.

4.2 Emisiones de CO₂, consecuencias de la producción de energía eléctrica mediante la fotovoltaica

En lo respectivo a las emisiones, se observa como el incremento y predominancia de las formas de generación eléctrica renovables permiten reducir las emisiones de CO₂ de la producción de electricidad desde las 14 Gt de CO₂ anuales emitidas en 2022 hasta las 3,6 Gt emitidas en 2042. También se ha podido observar que el aumento más veloz de la potencia fotovoltaica instalada a nivel mundial en el escenario de mejora tecnológica nos permite evitar la emisión de hasta 2 Gt anuales de CO₂ en la producción de electricidad (Imagen 66). El escenario de tecnología actual es el que más emisiones posee al final de las simulaciones, debido a ser el que menor potencia fotovoltaica instala y a la menor evolución tecnológica y ratios de reciclado respecto a los demás escenarios.

4.3 Uso de la tierra por parte de las instalaciones fotovoltaicas

Se ha conseguido estimar que la tecnología fotovoltaica podría ocupar cerca de 74 MHa de suelo del planeta (sin contabilizar la superficies de tejados ocupadas) para el año 2050 (Imagen 51), esta superficie es 1,5 veces la superficie de España, por lo que la eficiencia de la tecnología así como dónde se localicen las plantas serán críticos en el diseño de futuros sostenibles para esta tecnología. Se ha observado en los resultados como un aumento de la eficiencia permite

instalar mayor potencia de generación ocupando el mismo terreno o incluso una menor cantidad. También, se ha observado que los tejados y/o las superficies de los edificios pueden permitirnos ahorrar hasta 18 MHa de terrenos de suelo, a costa de poseer un menor factor de capacidad en su generación.

Las diferencias entre los escenarios de continuación de las tendencias actuales se muestran con claridad en los resultados, ahorrando una mayor cantidad de tierras a medio plazo el escenario que presenta la prioridad por las instalaciones en los tejados. Eso sí, hay que tener presente el empleo de los tejados puede permitirnos ahorrar una gran cantidad de tierras a corto y medio plazo, pero las simulaciones muestran una tendencia clara al acercarse al horizonte de simulación del año 2050. Si queremos alcanzar una gran cantidad de potencia mediante fotovoltaica emplear solo superficie de tejados sería una gran limitante, por lo tanto, para generar la energía necesaria durante los últimos años de las simulaciones se debe instalar una gran cantidad sistemas en suelo, ya que la superficie potencial de los tejados está llena y la prioridad por instalar este tipo de instalaciones no puede ser respetada con el fin de producir energía suficiente.

Priorizar la instalación de tecnologías de tejado presenta además un inconveniente, su menor factor de capacidad (Imagen 56), que provoca que tengamos que instalar una mayor potencia para conseguir una similar generación durante los primeros años de simulación.

El escenario de mejora tecnológica consigue ser junto al escenario de continuación de las tendencias actuales de suelo el escenario que menos terreno demanda a pesar de ser el que mayor potencia instala debido a sus mejoras de eficiencia. El escenario de tecnología actual sufre la situación opuesta siendo el escenario con mayor requerimiento de terreno a pesar de ser el que menor potencia instalada fotovoltaica posee.

Por último, se han observado los efectos de alterar el ritmo de instalación de potencia fotovoltaica (Imagen 66), demandando mayor cantidad de terreno cuanto mayor sea la velocidad de crecimiento de la potencia instalada. Esto es debido, por un lado, a la situación lógica de que una mayor demanda de instalaciones se traducirá en una demanda mayor de terreno, pero también, a que una instalación más prematura emplearía paneles y tecnologías menos avanzadas y con menores eficiencias.

4.4 Ratios de reciclado

Se ha observado también, como unos ratios de reciclado superiores pueden permitirnos instalar superiores potencias de generación energética demandando una menor cantidad de minerales, tal y como sucedería en el escenario de mejora tecnológica. Esto, unido a la mejora tecnológica puede hacer de la fotovoltaica un sistema de generación que cada vez requiera menores demandas minerales, mejorando con ello su EROI. Esto se ejemplifica en los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica, donde se logra mejorar en hasta un 22% el $EROI_{st}$ y en hasta un 9% el $EROI_{final}$.

Durante las simulaciones se ha obtenido la evolución temporal del ratio de reciclado RC (Imagen 54 e Imagen 55) obteniendo en el año 2050, en el caso del aluminio, valores situados

entre el 24% y el 36%; en el cobre, valores situados entre el 24% y el 41%; en el molibdeno, valores situados entre el 15% y el 32%; en el manganeso, valores situados entre el 30% y el 51%; en el plomo, valores situados entre el 35% y el 40%; en el níquel, valores situados entre el 30% y 45%; en el estaño, valores situados entre el 32% y 39%; en el hierro, titanio y la plata, valores del 100%, en el vanadio valores situados entre el 0% y el 15%, en el cadmio valores situados entre el 3% y el 9%, en el galio valores situados entre el 0% y el 8%, en el magnesio valores situados entre el 4% y el 9%, en el selenio valores situados entre el 0% y el 6%, en el zinc, valores situados entre el 18% y el 37% y, finalmente, en el telurio y en el indio no se obtiene ni el 1% en el mejor de los escenarios. Se puede observar que a pesar de aumentar el ratio EOL, en muchas ocasiones a lo largo de las simulaciones el aumento de la demanda provoca una reducción del ratio RC lo que provoca que en casi todos los casos los valores están bastante alejados de alcanzar el valor de su ratio EOL para el año 2050.

4.5 Factor de capacidad

El factor de capacidad global (Imagen 56) de la tecnología fotovoltaica es mayor en el escenario de continuación de las tendencias actuales que prioriza las instalaciones de suelo durante algunos años (hasta que el espacio de tejados limita la instalación de este tipo de sistemas), alcanzando un valor del 13,4%. Al contrario, ocurre con el escenario de tendencias actuales que da prioridad a las instalaciones de tejado, que obtiene un valor del 12,7%. Todos los escenarios sufren una reducción paulatina del factor de capacidad a partir del año 2036 debido a la intermitencia de las renovables. Esta intermitencia acaba provocando una sobreproducción eléctrica notable (al concurrir grandes potencias de tecnologías fotovoltaicas, de concentración solar, eólicas o mareomotrices instaladas) que no es aprovechada, por lo que el factor de capacidad de la tecnología desciende. En el caso de aumentar la velocidad de instalación de potencia fotovoltaica los efectos de la intermitencia son más notables, obteniendo un peor CF a partir del año 2030 de la simulación (con un valor no alcanza ni el 10% en el año 2050). En este contexto hay bibliografía que nos indica como podríamos emplear la energía sobrante (paliando el descenso del CF) y además aprovecharnos de algunas ventajas de la sobreproducción eléctrica [163].

4.6 Tasa de retorno energético

En lo respectivo al EROI de la tecnología fotovoltaica (Imagen 57, Imagen 58, Imagen 59, Imagen 60 e Imagen 61) se han obtenido unos valores de $EROI_{st}$ entre 3,8/1 y 9,5/1 y de $EROI_{final}$ situados entre 2,1/1 y 4,7/1. Estos resultados nos indican la importancia de las pérdidas de energía fuera de la instalación y la gran influencia del CF sobre el EROI de una tecnología.

Los resultados de EROI obtenidos en el escenario de tecnología actual se ven perjudicados por la nula mejora tecnológica y de eficiencia de la tecnología. Los escenarios de continuación de las tendencias actuales y de mejora tecnológica se ven perjudicados en mayor medida por su reducido CF respecto al escenario de tecnología actual, a pesar de esto logran obtener los valores más altos al presentar grandes avances en eficiencia y demanda mineral, destacando

entre ellos el escenario de mejora tecnológica. Si nos entramos en los escenarios de continuación de las tendencias, el que posee la prioridad por las instalaciones de suelo destaca, ya que este tipo de instalación cuenta con un CF más alto.

El aumento del ritmo de crecimiento de la potencia fotovoltaica instalada provoca una reducción del EROI de la tecnología fotovoltaica, al hacer más notable los problemas relacionados con la intermitencia propia de las renovables y, por tanto, reducir su CF como se ha enunciado con anterioridad.

También se debe indicar que las tecnologías de película fina (CIGS y CdTe) poseen un mayor EROI que las tecnologías de silicio, pero a costa de demandar una mayor cantidad de espacio (al poseer menor eficiencia).

4.7 Cuota de mercado de las subtecnologías fotovoltaicas

En cuanto a la estimación de la distribución de los porcentajes de mercado de las subtecnologías, los resultados obtenidos (Imagen 64 e Imagen 65), nos indican algunas tendencias. Las subtecnologías de Silicio siguen manteniendo en conjunto un porcentaje de mercado superior al 60% durante toda la simulación, llegando al 2050 tomando valores situados entre el 27% y el 39% para cada una de las tecnologías. Esta tendencia es provocada por las características de estas subtecnologías que poseen un EROI lo suficientemente elevado y demandan minerales más abundantes, es decir que cuentan con mayores reservas y recursos respecto a los demandados por las subtecnologías de película fina.

La subtecnología CdTe que cuenta con el mayor EROI, destaca durante un leve periodo de tiempo, antes de ver descender sus datos debido a la escasez de telurio a partir del año 2024. Tras esta caída, su porcentaje de mercado va creciendo paulatinamente a lo largo de los años, ya que cada vez más minerales sufren escasez y, por tanto, el peso del EROI en la elección del porcentaje de mercado aumenta, otorgando a esta subtecnología un porcentaje de mercado levemente inferior a las tecnologías de silicio (entre el 22% y el 27%).

Por último, el caso de la subtecnología CIGS es el opuesto a la tecnología CdTe. En los primeros años de simulación esta subtecnología aprovecha su relativamente buen EROI para acercarse a las tecnologías de silicio, pero a lo largo de la simulación sus requerimientos de minerales como el galio, el indio o el cadmio hacen que esta descienda en porcentaje de mercado alcanzando valores situados alrededor del 10% en 2050.

4.8 Subtecnologías fotovoltaicas, Perspectivas de futuro

Las tecnologías de silicio parece que seguirán destacando en el futuro respecto a las tecnologías de película fina debido a varios factores, ya que a pesar de contar con un EROI ligeramente inferior respecto a los paneles CIGS o CdTe cuentan con diversas ventajas. Poseen una mayor eficiencia, lo que se traduce en una menor necesidad de espacio y una mayor rentabilidad económica de la instalación, demandan minerales más abundantes respecto a sus reservas y recursos, se han observado tendencias de reducción de la intensidad material

en este tipo de paneles (lo que los puede hacer todavía una mejor opción en el futuro) y por último, no poseen minerales tan perjudiciales para el medio ambiente respecto a los paneles de película fina, como el cadmio en el caso de los paneles CdTe.

4.9 Requerimientos materiales de la tecnología fotovoltaica

Atendiendo ahora a los requerimientos materiales (Tabla 25 y Tabla 26), los paneles más equilibrados desde el punto de vista material y energético son los que conforman las tecnologías de silicio, esto, unido a que, por un lado, son los que menor espacio requieren al poseer la mayor eficiencia de todas las tecnologías y por otro, son los únicos que en la actualidad muestran tendencias de mejora tecnológica (reduciendo su intensidad material). A pesar de esto, las tecnologías de silicio presentan dos problemas fundamentales, en primer lugar, son los paneles que más variedad de materiales con posibilidades de escasez en el futuro emplean. En segundo lugar, emplean una cantidad destacable de silicio, material muy demandado en la actualidad, lo que está provocando grandes problemas de cuello de botella en su cadena de suministro. Aun así, se ha encontrado a lo largo de las simulaciones que todas las subtecnologías de paneles demandarían gran cantidad de materias hasta el año 2050 respecto a sus reservas y recursos, el selenio presentaría una demanda situada entre el 152% y el 190% de sus recursos, el telurio entre el 1994% y el 2817% y el indio entre el 610% y el 802%. También, minerales como el magnesio (16%-18%), manganeso (3%-5%) galio (972%-1208%), cobre (2%-6%), plomo (1%-3%), cadmio (161%-226%), molibdeno (6%-8%), níquel (3%-5%), estaño (55%-108%) y zinc (17%-23%) poseerían una importante demanda respecto a sus reservas.

También la infraestructura necesaria para poner en funcionamiento los paneles fotovoltaicos (Inversores y cableados) puede demandar casi un 11% de las reservas totales de cobre y hasta un 0,4% de las reservas de aluminio.

Por último, se ha observado como las variaciones de demanda mineral obtenidas según el ritmo de crecimiento deseado son importantes, aumentando la demanda junto al ritmo de crecimiento. Esto ocurre debido a la mayor potencia instalada y a que, en las simulaciones con mayor velocidad de crecimiento, se instalan mayor cantidad de paneles con peores eficiencias y mayores intensidades minerales

4.10 Problemas principales de la generación eléctrica basada en la fuente de energía fotovoltaica y posibles soluciones o alternativas

Todo lo citado hasta ahora en estas conclusiones acaba redundando en tres problemas principales. En primer lugar, este trabajo se sitúa en el contexto de que la intermitencia propia de las energías renovables acaba provocando una bajada notable de la eficiencia de la generación de energía fotovoltaica, desperdiciando energía por el camino. En segundo lugar, al igual que concluye la literatura [137], nuestros resultados muestran que la tecnología fotovoltaica ocupa un gran espacio y la superficie disponible en edificios no será suficiente para suplir toda la potencia necesaria si queremos basar nuestra generación energética en

sistemas renovables. Estas dos primeras conclusiones otorgan una gran importancia a la eficiencia de los paneles, ya que si esta eficiencia aumenta lo haría consigo el CF y se reduciría el espacio requerido para una instalación de forma proporcional. El último problema referente a la tecnología fotovoltaica es su demanda material, como hemos observado en los resultados de este trabajo los requerimientos de esta tecnología puede reducir significativamente e incluso agotar las reservas y recursos de una gran variedad de minerales. La reducción de intensidad material y los ratios de reciclado toman gran importancia para este problema, pues será necesaria la reducción de la demanda de la tecnología si queremos emplear la tecnología fotovoltaica como uno de los principales pilares de la generación eléctrica, y estos dos aspectos pueden ser gran parte de la solución. La mejora tecnológica puede reducir la cantidad de minerales para una misma cantidad de energía generada, y el aumento de reciclado, puede permitirnos recuperar una gran cantidad de los minerales ya empleados en diferentes sistemas. Se debe remarcar también como una conclusión de este trabajo la incertidumbre que rodea a la mejora tecnológica de los paneles fotovoltaicos, tanto en lo que respecta a la reducción de intensidades materiales, como a la sustitución de minerales críticos y sus consecuencias en el futuro [118].

Una vez resumidos los principales problemas de la tecnología fotovoltaica encontrados y discutidos en este trabajo se expondrán algunas alternativas con el fin de buscar algunas soluciones de diversa índole. La primera alternativa que podría llevarse a cabo según la bibliografía es la de paliar los efectos de la intermitencia de las fuentes de energía renovable, empleado almacenamientos energéticos o una combinación mixta de renovables [137], o paradójicamente, mediante la sobreproducción, pudiendo conseguir según la literatura, una energía más barata, estable y con menor necesidad de almacenamiento [163] utilizando la energía sobrante para la producción de vectores energéticos más limpios que los combustibles fósiles, como el H_2 [159] (evitando así el desperdicio de energía y una reducción tan acusada del CF). Con estas medidas, la bibliografía indica que podríamos reducir la cantidad de energía desaprovechada y producir de paso, combustibles más limpios [137], [159], [163], pero, a costa de un inconveniente, ya que habría que analizar en profundidad las implicaciones materiales y energéticas que conlleva la instalación de grandes almacenamientos energéticos, o la sobreinstalación de potencia de las tecnologías renovables [137] y producción de otros vectores energéticos como el H_2 [164], [165]. Una segunda alternativa es la de aumentar los ratios de reciclado con los que poder reducir la demanda sobre los recursos naturales. También, se pueden establecer políticas que obliguen a los fabricantes de paneles a reciclar estos últimos cuando lleguen al final de su ciclo de vida, estableciendo una especie de sistema circular en la producción de los paneles. La tercera alternativa trata de impulsar a los fabricantes a mejorar la demanda mineral y la eficiencia de sus paneles, al igual que se hace con otros elementos como lo vehículos. Es decir, imponer políticas que obliguen a aumentar la eficiencia tecnológica y reducir las demandas minerales si los fabricantes quieren seguir vendiendo paneles. Por último, la alternativa más importante, es la reducción de la demanda energética.



La reducción de la demanda de energía eléctrica [166], [167] puede ser conseguida mediante el empleo de sistemas que consuman energía con mayor eficiencia, pero también mediante el simple cambio de nuestras costumbres. Impulsar políticas [168] que aboguen por la reducción de la demanda energética de los hogares y las industrias, como hacer que el precio de la electricidad sea mucho mayor superado un umbral de consumo por persona, o conceder bonificaciones a las industrias que reduzcan su demanda energética aumentando su eficiencia. Por último, hay que indicar que estas políticas o cambios para favorecer la reducción de la demanda eléctrica pueden provocar el llamado efecto rebote [169], [170]. Este efecto nos enuncia de forma resumida que el ahorro de energía eléctrica y, por tanto, el ahorro monetario en el que se traduce puede ser invertido en acciones que empleen mayor cantidad de energía que la que se ha ahorrado en primer lugar. Por esta razón toma gran importancia nuestro comportamiento [171], [172], y puede explicar por qué el cambio de las estructuras socioeconómicas [173], como por ejemplo, la adopción de un sistema económico de estado estacionario [174], [175] podrían ser una alternativa viable al crecimiento económico continuo en el que nos encontramos. Este sistema podría traer consigo, la estabilización de la demanda energética de los hogares y de las industrias intentando con ello reducir la presión sobre los recursos de nuestro planeta.

Todas las alternativas enunciadas podrían ayudarnos a llevar a cabo una adecuada transición a un modelo de generación energética renovable, porque como se ha enunciado en este trabajo, hasta una situación de una gran mejora de la tecnología podría traer consigo un agotamiento prematuro de una gran variedad de minerales. Hay que pensar que de nada sirve cambiar nuestra tecnología de generación eléctrica para reducir las emisiones de CO₂ si en el camino agotamos nuestros recursos, porque ¿Qué haríamos si se agotasen estos recursos?, ¿Qué pasaría con todos los elementos tecnológicos que los emplean?, ¿tendríamos que retroceder a producir la mayoría de nuestra energía eléctrica con combustibles fósiles, sujetos también a limitaciones geológicas [176]?

Nos tenemos que hacer todas estas preguntas y actuar en consecuencia, sino volveremos al punto de partida habiendo gastado nuestros minerales en el camino, reduciendo nuestras alternativas y no habiendo resuelto nada.



5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Capellán-Pérez, Á. Campos-Celador, y J. Terés-Zubiaga, «Renewable Energy Cooperatives as an instrument towards the energy transition in Spain», *Energy Policy*, vol. 123, pp. 215-229, dic. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.08.064.
- [2] S. Avila, Y. Deniau, A. H. Sorman, y J. McCarthy, «(Counter)mapping renewables: Space, justice, and politics of wind and solar power in Mexico», *Environ. Plan. E Nat. Space*, p. 251484862110606, dic. 2021, doi: 10.1177/25148486211060657.
- [3] N. M. Haegel *et al.*, «Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges», *Science*, vol. 356, n.º 6334, pp. 141-143, abr. 2017, doi: 10.1126/science.aal1288.
- [4] R. R. Hernandez *et al.*, «Environmental impacts of utility-scale solar energy», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 766-779, ene. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.041.
- [5] A. de Koning, R. Kleijn, G. Huppel, B. Sprecher, G. van Engelen, y A. Tukker, «Metal supply constraints for a low-carbon economy?», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 129, pp. 202-208, feb. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.040.
- [6] A. Valero, A. Valero, G. Calvo, y A. Ortego, «Material bottlenecks in the future development of green technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 178-200, oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.041.
- [7] K. Tokimatsu *et al.*, «Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2 °C target», *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 494-509, dic. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.151.
- [8] IPCC, «Summary for policymakers». [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- [9] J. G. Olivier, K. Schure, J. Peters, y others, «Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions», *PBL Neth. Environ. Assess. Agency*, vol. 5, pp. 1-11, 2017.
- [10] K. Feng, S. J. Davis, L. Sun, y K. Hubacek, «Drivers of the US CO2 emissions 1997–2013», *Nat. Commun.*, vol. 6, n.º 1, p. 7714, nov. 2015, doi: 10.1038/ncomms8714.
- [11] T. Parrique *et al.*, «Decoupling debunked - Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability». [En línea]. Disponible en: <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>
- [12] European Commission, «Next steps for a sustainable European future». [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2016%3A739%3AFIN>
- [13] European Commission, «La UE apuesta fuerte por la economía circular», *Web de la Unión Europea*. https://ec.europa.eu/spain/news/20190218_%20The-EU-is-strongly-committed-to-circular-economy_es
- [14] European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs., «Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study.», 2020. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081> (accedido 25 de diciembre de 2020).
- [15] European Commission, «Critical raw materials», 2020. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- [16] OECD, «The Circular Economy in Cities and Regions», 2019. <https://www.oecd.org/cfe/regionaldevelopment/Circular-economy-brochure.pdf>
- [17] NREL, «A Circular Economy for Lithium-Ion Batteries Used in Mobile and Stationary Energy Storage: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations», marzo de 2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77035.pdf>
- [18] M. Giampietro y S. O. Funtowicz, «From elite folk science to the policy legend of the circular economy», *Environ. Sci. Policy*, vol. 109, pp. 64-72, jul. 2020, doi: 10.1016/j.envsci.2020.04.012.
- [19] European Union, «DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings», *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32010L0031>

- [20] Australia Government, «Commercial buildings, Government energy efficiency programs». <https://www.energy.gov.au/government-priorities/energy-productivity-and-energy-efficiency/commercial-buildings>
- [21] US Department of energy, «AN ASSESSMENT OF ENERGY TECHNOLOGIES AND RESEARCH OPPORTUNITIES, Increasing Efficiency of Building Systems and Technologies». [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter5.pdf>
- [22] European Commission, «In focus: A new generation of EU energy labels», *European commission official web*. https://ec.europa.eu/info/news/focus-new-generation-eu-energy-labels-2020-aug-13_en
- [23] European Union, «REGULATION (EC) No 715/2007 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information», *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32007R0715>
- [24] EPA, «The Plain English Guide to the Clean Air Act». [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/peg.pdf>
- [25] Banco Mundial, «Emisiones de CO2 originadas por la generacion de electricidad y calor (% del total de la quema de combustible)», *Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.CO2.ETOT.ZS?end=2014&start=1994>
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change y O. Edenhofer, Eds., *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.
- [27] IRENA, «TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL». 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_ES.pdf?la=en&hash=A5492C2AAC7D8E7A7CBF71A460649A8DEDB48A82
- [28] bp, «Statistical Review of World Energy 2021 | 70th edition». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [29] European Commission, «Directiva 2018/2001 del parlamento europeo». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557>
- [30] «El Transporte Urbano y Metropolitano en España», p. 399.
- [31] European Commission, «COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS». 3 de septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>
- [32] Banco Mundial, «Consumo de energía eléctrica per cápita», *Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>
- [33] Dolf Gielen, Martina Lyons, Francisco Boshell, y Peter Chawah, «Critical minerals and materials: supply bottlenecks and risks need international cooperation», *energypost.eu*, 25 de febrero de 2022. <https://energypost.eu/critical-minerals-and-materials-supply-bottlenecks-and-risks-need-international-cooperation/>
- [34] E. Gervais, S. Shammugam, L. Friedrich, y T. Schlegl, «Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics – Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, p. 110589, mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110589.
- [35] «Metal recycling: opportunities, limits, infrastructure: this is report 2b of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP», 2013. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8423>
- [36] H. E. Melin, «State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries», p. 57.

- [37] J. B. Dunn, L. Gaines, J. Sullivan, y M. Q. Wang, «Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, n.º 22, pp. 12704-12710, nov. 2012, doi: 10.1021/es302420z.
- [38] H. Hao, Q. Qiao, Z. Liu, y F. Zhao, «Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 114-125, jul. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.02.005.
- [39] F. Ardente, C. E. L. Latunussa, y G. A. Blengini, «Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling», *Waste Manag.*, vol. 91, pp. 156-167, may 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.059.
- [40] Md. S. Chowdhury *et al.*, «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling», *Energy Strategy Rev.*, vol. 27, p. 100431, ene. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- [41] P. Gangwar, N. M. Kumar, A. K. Singh, A. Jayakumar, y M. Mathew, «Solar photovoltaic tree and its end-of-life management using thermal and chemical treatments for material recovery», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 14, p. 100474, sep. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100474.
- [42] J. R. Duflou, J. R. Peeters, D. Altamirano, E. Bracquene, y W. Dewulf, «Demufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery», *CIRP Ann.*, vol. 67, n.º 1, pp. 29-32, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.053.
- [43] 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, sep. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.070.
- [44] Y. Zhou *et al.*, «Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050», *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121599, ago. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121599.
- [45] A. Månberger y B. Stenqvist, «Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development», *Energy Policy*, vol. 119, pp. 226-241, ago. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.04.056.
- [46] V. Moreau, P. Dos Reis, y F. Vuille, «Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System», *Resources*, vol. 8, n.º 1, p. 29, ene. 2019, doi: 10.3390/resources8010029.
- [47] M. Carbajales-Dale, C. J. Barnhart, y S. M. Benson, «Can we afford storage? A dynamic net energy analysis of renewable electricity generation supported by energy storage», *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, n.º 5, p. 1538, 2014, doi: 10.1039/c3ee42125b.
- [48] M. Carbajales-Dale, C. J. Barnhart, A. R. Brandt, y S. M. Benson, «A better currency for investing in a sustainable future», *Nat. Clim. Change*, vol. 4, n.º 7, pp. 524-527, jul. 2014, doi: 10.1038/nclimate2285.
- [49] I. Capellán-Pérez, C. de Castro, y L. J. Miguel González, «Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies», *Energy Strategy Rev.*, vol. 26, p. 100399, nov. 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.100399.
- [50] C. A. S. Hall, J. G. Lambert, y S. B. Balogh, «EROI of different fuels and the implications for society», *Energy Policy*, vol. 64, pp. 141-152, ene. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.05.049.
- [51] Z. Zhou y M. Carbajales-Dale, «Assessing the photovoltaic technology landscape: efficiency and energy return on investment (EROI)», *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, n.º 3, pp. 603-608, 2018, doi: 10.1039/C7EE01806A.
- [52] K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, y D. S. Apul, «Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 133-141, jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.
- [53] M. Raugei *et al.*, «Energy Return on Energy Invested (EROEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response», *Energy Policy*, vol. 102, pp. 377-384, mar. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.042.
- [54] C. de Castro y I. Capellán-Pérez, «Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies», *Energies*, vol. 13, n.º 12, p. 3036, jun. 2020, doi: 10.3390/en13123036.

- [55] IRENA, «IRENA, statistics time series», *IRENA*, 2021. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- [56] J. Domínguez, J. Amador, y A. Martín, «Energías renovables y generación distribuida», *Curr. Trends Energy Sustain. 2017 Ed.*, p. 17, 2017.
- [57] C. Espejo-Marín y A. E. Aparicio-Guerrero, «La Producción de Electricidad con Energía Solar Fotovoltaica en España en el Siglo XXI.», *Rev. Estud. Andal.*, n.º 39, pp. 66-93, 2020, doi: 10.12795/rea.2020.i39.04.
- [58] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, y J. Palm, «Photovoltaic self-consumption in buildings: A review», *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 80-94, mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [59] UNEF y GEAR, «EL DESARROLLO ACTUAL DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA». 2018.
- [60] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations*. OECD, 2017. doi: 10.1787/energy_tech-2017-en.
- [61] T. Watari, K. Nansai, y K. Nakajima, «Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 155, p. 104669, abr. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104669.
- [62] S. van den Brink, R. Kleijn, B. Sprecher, y A. Tukker, «Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 156, p. 104743, may 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104743.
- [63] A. Leader, G. Gaustad, y C. Babbitt, «The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies», *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, n.º 2, p. 8, jun. 2019, doi: 10.1007/s40243-019-0146-z.
- [64] I. Capellán-Pérez *et al.*, «MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints», *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, n.º 3, pp. 986-1017, 2020, doi: 10.1039/C9EE02627D.
- [65] Uv. UVa, AEA, UOL, CRES, CARTIF, y EBB, «LOCOMOTION», *LOCOMOTION*. <https://www.locomotion-h2020.eu/>
- [66] J. Solé *et al.*, «Modelling the renewable transition: Scenarios and pathways for a decarbonized future using pymedeas, a new open-source energy systems model», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 132, p. 110105, oct. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110105.
- [67] T. Díaz Corcobado, G. Carmona Rubio, y V. Benlloch Ramos, *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Aravaca (Madrid): McGraw-Hill/Interamericana de España, 2018.
- [68] Déborah García Bello, «Así funcionan las baterías de litio», *Cuaderno de cultura científica*, 20 de febrero de 2020. <https://culturacientifica.com/2020/02/20/asi-funcionan-las-baterias-de-litio/>
- [69] Jungheinrich, «Cómo funciona una batería de litio y cuál es su estructura», *Guía-Profi*, 23 de junio de 2021. <https://www.jungheinrich-profishop.es/es/guia-profi/como-funciona-una-bateria-de-litio/>
- [70] FQS battery, «Partes de las baterías», 2021. <https://fqsbattery.com/partes-de-las-baterias/>
- [71] Sotysolar, «Seguidores solares: todo lo que necesitas saber», 10 de octubre de 2020. <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>
- [72] REUTERS EVENTS RENEWABLES, «PV to overtake wind in US corporate deals; Bifacial boom to double tracker market share», *REUTERS EVENTS RENEWABLES*, 4 de septiembre de 2019. <https://www.reutersevents.com/renewables/pv-insider/pv-overtake-wind-us-corporate-deals-bifacial-boom-double-tracker-market-share>
- [73] Menna, «Cómo funciona un panel solar», 2020. <https://como-funciona.co/un-panel-solar/>
- [74] Ernesto Rodríguez, «PANELES SOLARES», *AREATECNOLOGÍA*. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>
- [75] Oriol Planas, «Tipos de paneles fotovoltaicos», *ENERGÍA SOLAR*, 28 de marzo de 2020. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/tipos-de-paneles-fotovoltaicos>
- [76] Raúl Germán Cordero, «Tipos de Paneles Solares», *SUNFIELDS EUROPE*, 2021. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/tipos/>

- [77] S. Martín Álvarez, «Estudio de las células y paneles de una instalación fotovoltaica», info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/36784>
- [78] N. A. Ludin *et al.*, «Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, pp. 11-28, nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.048.
- [79] CARLOS ANDRES GUZMAN NIÑO, «ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE PANELES SOLARES SEGÚN LOS MATERIALES UTILIZADOS Y LOS COMPONENTES TÓXICOS GENERADOS». 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7038/1/632575-2017-II-GA.pdf>
- [80] Daniel Burgess, «thin-film solar cell», *Britannica*, 23 de enero de 2020. <https://www.britannica.com/technology/thin-film-solar-cell>
- [81] DS New Energy, «Tecnología de células solares CIGS», *DS New Energy*, 25 de febrero de 2019.
- [82] Gavin D.J. Harper, «CIGS solar cell», *Britannica*, 22 de mayo de 2016. <https://www.britannica.com/technology/CIGS-solar-cell>
- [83] Ignacio Mártil, «Perovskitas, ¿el “Santo Grial” de la energía solar?», *El periodico de la energía.com*. <https://elperiodicodelaenergia.com/perovskitas-el-santo-grial-de-la-energia-solar/>
- [84] Susana Ramos Terrón, «FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS DE PEROVSKITA DE NUEVA COMPOSICIÓN». junio de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/investiga/ccs/documentos/TFM-Susana-Ramos-Terron.pdf>
- [85] Claudia Medina y Malte Neumeier, «Los 6 tipos de paneles fotovoltaicos más famosos», *GRUPO MAE*, 10 de junio de 2021. <https://maerenovables.com/tipos-paneles-solares-famosos/>
- [86] DS New Energy, «¿Qué es una célula solar de heterounión?», *DS New Energy*, 14 de marzo de 2020. <https://www.dsisolar.com/info/what-is-a-heterojunction-solar-cell-43962423.html>
- [87] A. Langner, «Photovoltaics Report», p. 50.
- [88] R. Frischknecht *et al.*, «Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems», *Int. Energy Agency IEA PVPS Task 12 Rep. T12*, vol. 4, p. 2015, 2015.
- [89] IEA, «The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions». 5 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/events/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions-world-energy-outlook-special-report>
- [90] C. Escuela Moreno, «Estudio sobre las posibilidades de valorización de residuos de paneles fotovoltaicos», 2017, [En línea]. Disponible en: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5835>
- [91] Juan Pablo Romero Campos, «ANÁLISIS CICLO VIDA Y ECONÓMICO APLICADO A LA REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS». 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174091>
- [92] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, y C. Yang, «Global status of recycling waste solar panels: A review», *Waste Manag.*, vol. 75, pp. 450-458, may 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.036.
- [93] Ecologistas en acción, «Reciclaje de metales: la alternativa a la minería». enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/189564/informe-reciclaje-de-metales-como-alternativa-a-la-mineria/>
- [94] V. M. Fthenakis, «End-of-life management and recycling of PV modules», *Energy Policy*, vol. 28, n.º 14, pp. 1051-1058, nov. 2000, doi: 10.1016/S0301-4215(00)00091-4.
- [95] Misiterio de Fomento, «CTE Documento de ahorro de energía». 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DccHE.pdf>
- [96] European Commission, «DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo». 14 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557>
- [97] «Guide to Integrating Renewable Energy in Federal Construction», p. 133.
- [98] «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», p. 137.

- [99] Lucas Kruitwagen, «We mapped every large solar plant on the planet using satellites and machine learning», *The Conversation*. <https://theconversation.com/we-mapped-every-large-solar-plant-on-the-planet-using-satellites-and-machine-learning-170747>
- [100] R. R. Hernandez, M. K. Hoffacker, y C. B. Field, «Land-Use Efficiency of Big Solar», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, n.º 2, pp. 1315-1323, ene. 2014, doi: 10.1021/es4043726.
- [101] TOYOTA, «TOYOTA prius e-plug in, características.» <https://www.toyota.es/coches/prius-plugin/>
- [102] E. Andreu Rico, «Proyecto de planta fotovoltaica de 1 MWp en Abanilla (Murcia)», PhD Thesis, Universitat Politècnica de València, 2018.
- [103] SUNPOWER, «SUNPOWER MAXEON 5 características y tecnología». julio de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ecovatios.com/wp-content/uploads/2020/12/MAXEON-5-430-440-450-W.pdf>
- [104] 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, nov. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.003.
- [105] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., Oakdene Hollins Ltd., y The Hague Centre for Strategic Studies., *Critical metals in strategic energy technologies: assessing rare metals as supply chain bottlenecks in low carbon energy technologies*. LU: Publications Office, 2011. Accedido: 8 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2790/35600>
- [106] V. P. Equipment, «International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)». September, 2015.
- [107] C. Candelise, J. F. Speirs, y R. Gross, «Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: A real concern?», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 4972-4981, 2011.
- [108] V. Fthenakis, «Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 9, pp. 2746-2750, dic. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.05.001.
- [109] NREL, «Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart», *NREL*, 2022. <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>
- [110] IHS Markit, «Predictions for the PV industry in 2019». 2019. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.ihs.com/www/pdf/0219/IHS-Markit-Predictions-for-the-PV-industry-2019.pdf>
- [111] W. Shockley y H. J. Queisser, «Detailed Balance Limit of Efficiency of *p-n* Junction Solar Cells», *J. Appl. Phys.*, vol. 32, n.º 3, pp. 510-519, mar. 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
- [112] S. Rühle, «Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells», *Sol. Energy*, vol. 130, pp. 139-147, jun. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.015.
- [113] 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, abr. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.12.053.
- [114] Kyojiro Kaneko, «Recent Status On Electromagnetic Casting». 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40423.pdf>
- [115] G. Kavlak, J. McNerney, R. L. Jaffe, y J. E. Trancik, «Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment», *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, n.º 6, pp. 1651-1659, 2015, doi: 10.1039/C5EE00585J.
- [116] A. PSE, «Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems ISE», *Photovolt. Reportnd*.
- [117] A. Elshkaki, «Materials, energy, water, and emissions nexus impacts on the future contribution of PV solar technologies to global energy scenarios», *Sci. Rep.*, vol. 9, n.º 1, p. 19238, dic. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-55853-w.
- [118] ITRPV, «ITRPV (2019) International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2018 Results (10th Edition).» 2019. [En línea]. Disponible en: <https://pv-manufacturing.org/wp-content/uploads/2019/03/ITRPV-2019.pdf>
- [119] A. García-Olivares, «Substituting silver in solar photovoltaics is feasible and allows for decentralization in smart regional grids», *Environ. Innov. Soc. Transit.*, vol. 17, pp. 15-21, dic. 2015, doi: 10.1016/j.eist.2015.05.004.
- [120] M. de Wild-Scholten, «Life Cycle Assessment of Photovoltaics Status 2011, Part 1 Data collection», p. 11.



- [121] B. A. Andersson y S. Jacobsson, «Monitoring and assessing technology choice: the case of solar cells», *Energy Policy*, vol. 28, n.º 14, pp. 1037-1049, nov. 2000, doi: 10.1016/S0301-4215(00)00090-2.
- [122] D. I. Bleiwas, *Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, 2010.
- [123] W. Berger, F.-G. Simon, K. Weimann, y E. A. Alsema, «A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, n.º 10, pp. 711-718, ago. 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.12.001.
- [124] L. Tschümperlin, P. Stolz, F. Wyss, y R. Frischknecht, «Life cycle assessment of low power solar inverters (2.5 to 20 kW)», p. 21.
- [125] ORMAZABAL, «Ormazabal CA 109, transformada.is». 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ormazabal.com/es/descargas/cat%C3%A1logos-y-documentaci%C3%B3n>
- [126] S. Bumby, E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, y J. Sahl, «Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, n.º 14, pp. 5587-5593, jul. 2010, doi: 10.1021/es9037879.
- [127] José Alfonso Alonso Lorenzo, «¿Cómo calcular la sección de conductores para instalaciones de paneles solares?», *SUNFIELDS EUROPE*.
- [128] Ministerio de ciencia y tecnología, «Guía técnica de aplicación- Caídas de tensión, Anexo 2», septiembre de 2003. http://www.uco.es/electrotecnia-etsiam/reglamentos/Guia_Tecnica_REBT/guia_bt_anexo_2_sep03R1.pdf
- [129] HidroCantábrico distribución eléctrica S.A.U., «Especificación técnica de las canalizaciones subterráneas de baja y media tensión», julio de 2011. https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Electricidad/Ingenieria/2116218461_2772011142751.pdf
- [130] A. Lucas, C. Alexandra Silva, y R. Costa Neto, «Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles», *Energy Policy*, vol. 41, pp. 537-547, feb. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.015.
- [131] WIKIPEDIA, «Acero inoxidable», *Wikipedia*, 8 de diciembre de 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable
- [132] WIKIPEDIA, «Vidrio común», 27 de marzo de 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio_com%C3%BAn
- [133] Mariano, «Fibra de vidrio», *Tecnología de los Plásticos*, 6 de diciembre de 2011. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html#:~:text=La%20fibra%20de%20vidrio%20E2%80%9Ctipo,de%202.53g%2Fcm3>.
- [134] USGS, «Mineral Commodity Summaries», 2015. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70140094>
- [135] A. Ortego, A. Valero, y G. Calvo, «MEDEAS Annex4:Task2.2.c.2.Exergy extraction curves considering non renewable resources and raw materials.» [En línea]. Disponible en: https://www.medeas.eu/system/files/documentation/files/Deliverable%202.2%20%28D7%29_Annex4_Task%202.2.c.2_Exergy%20extraction%20curves.pdf
- [136] C. J. Barnhart, M. Dale, A. R. Brandt, y S. M. Benson, «The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity», *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, n.º 10, p. 2804, 2013, doi: 10.1039/c3ee41973h.
- [137] I. Capellán-Pérez, C. de Castro, y I. Arto, «Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 760-782, sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.137.
- [138] C. de Castro y I. Capellán-Pérez, «Concentrated Solar Power: Actual Performance and Foreseeable Future in High Penetration Scenarios of Renewable Energies», *Biophys. Econ. Resour. Qual.*, vol. 3, n.º 3, p. 14, sep. 2018, doi: 10.1007/s41247-018-0043-6.
- [139] E. G. Hertwich *et al.*, «Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 112, n.º 20, pp. 6277-6282, may 2015, doi: 10.1073/pnas.1312753111.
- [140] M. Schmied y W. Knörr, «Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258». 2012. [En línea]. Disponible en:



- https://www.clecat.org/media/CLECAT_Guide_on_Calculating_GHG_emissions_for_freight_for_warding_and_logistics_services.pdf
- [141] Z. Kis, N. Pandya, y R. H. E. M. Koppelaar, «Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction», *Energy Policy*, vol. 120, pp. 144-157, sep. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.05.033.
- [142] S. Teske, *Achieving the paris climate agreement goals: global and regional 100% renewable energy scenarios with non-energy GHG pathways for +1.5c and +2c*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [143] C. Jones y G. Hammond, «Embodied energy and carbon - The ICE database», 2019. <https://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.XpWW4cgzZPZ>
- [144] J. Martín García, *Dinámica de sistemas: ejercicios*. Barcelona: Juan Martín García, 2012.
- [145] J. W. Forrester, «Some Basic Concepts in System Dynamics», p. 17.
- [146] N. Ferreras, «TFM Análisis comparativo de modelos de cambio climático desarrollados en Dinámica de Sistemas». [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/27603>
- [147] I. De Blas, M. Mediavilla, I. Capellán, y C. Duce, «MEDEAS», *medeas.eu*. <https://www.medeas.eu/model/medeas-model>
- [148] I. Capellán *et al.*, «MEDEAS-World model- Deliverable 4.1». [En línea]. Disponible en: https://www.medeas.eu/system/files/documentation/files/Deliverable%204.1%20%28D13%29_Global%20Model.pdf
- [149] W. Hermann, «Quantifying global exergy resources», *Energy*, vol. 31, n.º 12, pp. 1685-1702, sep. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.09.006.
- [150] C. de Castro, M. Mediavilla, L. J. Miguel, y F. Frechoso, «Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 824-835, dic. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.040.
- [151] Watson & Eggert, «Understanding relative metal prices and availability: Combining physical and economic perspectives», p. 10, 2020, doi: 10.1111/jiec.13087.
- [152] H. U. Sverdrup, A. H. Olafsdottir, y K. V. Ragnarsdottir, «Development of a Biophysical Economics Module for the Global Integrated Assessment Model WORLD7», en *Feedback Economics*, R. Y. Cavana, B. C. Dangerfield, O. V. Pavlov, M. J. Radzicki, y I. D. Wheat, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 247-283. doi: 10.1007/978-3-030-67190-7_10.
- [153] Joint Global Change Research Institute, «GCAM v5.3 Documentation: Economic Choice in GCAM», *GCAM v5.3 Documentation: Economic Choice in GCAM*.
- [154] I. J. M. Arnold y E. B. Vrugt, «Fundamental uncertainty and stock market volatility», *Appl. Financ. Econ.*, vol. 18, n.º 17, pp. 1425-1440, sep. 2008, doi: 10.1080/09603100701857922.
- [155] J. Laherrère, «Oil & gas production forecasts (1900-2200)», Personal communication (April 2018), 2018.
- [156] S. H. Mohr, J. Wang, G. Ellem, J. Ward, y D. Giurco, «Projection of world fossil fuels by country», *Fuel*, vol. 141, pp. 120-135, feb. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.10.030.
- [157] I. de Blas, M. Mediavilla, I. Capellán-Pérez, y C. Duce, «The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm», *Energy Strategy Rev.*, vol. 32, p. 100543, nov. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100543.
- [158] IEA, «Solar PV reports», 2021. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- [159] G. Parrado Hernando, L. J. Miguel Gonzalez, y F. A. Frechoso Escudero, «ANALYSIS OF THE VARIABLE RENEWABLE ENERGY IN THE SPANISH POWER SYSTEM BASED ON KERNEL PROBABILISTIC DISTRIBUTIONS», *DYNA*, vol. 96, n.º 1, pp. 179-185, mar. 2021, doi: 10.6036/9892.
- [160] M. Görig y C. Breyer, «Energy learning curves of PV systems», *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 35, n.º 3, pp. 914-923, may 2016, doi: 10.1002/ep.12340.
- [161] A. Louwen, W. G. J. H. M. van Sark, A. P. C. Faaij, y R. E. I. Schropp, «Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development», *Nat. Commun.*, vol. 7, n.º 1, p. 13728, dic. 2016, doi: 10.1038/ncomms13728.



- [162] B. Steffen, D. Hischer, y T. S. Schmidt, «Historical and projected improvements in net energy performance of power generation technologies», *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, n.º 12, pp. 3524-3530, 2018, doi: 10.1039/C8EE01231H.
- [163] M. Perez, R. Perez, K. R. Rábago, y M. Putnam, «Overbuilding & curtailment: The cost-effective enablers of firm PV generation», *Sol. Energy*, vol. 180, pp. 412-422, mar. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.12.074.
- [164] K. Hacatoglu, M. A. Rosen, y I. Dincer, «Comparative life cycle assessment of hydrogen and other selected fuels», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n.º 13, pp. 9933-9940, jul. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.020.
- [165] M. Mori, M. Jensterle, T. Mržljak, y B. Drobnič, «Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterruptible power supply system using renewable energy», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, n.º 11, pp. 1810-1822, nov. 2014, doi: 10.1007/s11367-014-0790-6.
- [166] Great Britain, Department of Energy and Climate Change, Great Britain, y Parliament, *Electricity demand reduction: consultation on options to encourage permanent reductions in electricity use*. London: Stationery Office, 2012.
- [167] Rebecca Gasper, «How the US Can Save Billions by Reducing Electricity Use», *World resources institute*, 12 de noviembre de 2014. <https://www.wri.org/insights/how-us-can-save-billions-reducing-electricity-use>
- [168] M. Ciucci, «La política energética: principios generales», p. 9, 2021.
- [169] J. Freire-González, «Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries», *Energy Policy*, vol. 102, pp. 270-276, mar. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.002.
- [170] J. Freire-González, «Energy taxation policies can counteract the rebound effect: analysis within a general equilibrium framework», *Energy Effic.*, vol. 13, n.º 1, pp. 69-78, ene. 2020, doi: 10.1007/s12053-019-09830-x.
- [171] T. Wiedmann, M. Lenzen, L. T. Keyßer, y J. K. Steinberger, «Scientists' warning on affluence», *Nat. Commun.*, vol. 11, n.º 1, p. 3107, dic. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16941-y.
- [172] L. I. Brand-Correa, J. Martin-Ortega, y J. K. Steinberger, «Human Scale Energy Services: Untangling a 'golden thread'», *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 38, pp. 178-187, abr. 2018, doi: 10.1016/j.erss.2018.01.008.
- [173] D. Font Vivanco, R. Kemp, y E. van der Voet, «How to deal with the rebound effect? A policy-oriented approach», *Energy Policy*, vol. 94, pp. 114-125, jul. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.03.054.
- [174] Jose Antonio Ludeña, «Estado estacionario», *Economipedia*, junio de 2021. <https://economipedia.com/definiciones/estado-estacionario.html>
- [175] C. Kerschner, «Economic de-growth vs. steady-state economy», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 6, pp. 544-551, abr. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.019.
- [176] I. Capellán-Pérez, M. Mediavilla, C. de Castro, Ó. Carpintero, y L. J. Miguel, «Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach», *Energy*, vol. 77, pp. 641-666, dic. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.063.