

Proyecto Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Análisis medioambiental del ciclo de vida de instalaciones fotovoltaicas. Impacto de su tecnología y sistema de seguimiento

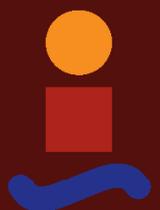
Autor: Carlos Barroso Toro

Tutor: Dr. Ángel Arcos Vargas

**Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Análisis medioambiental del ciclo de vida de instalaciones fotovoltaicas. Impacto de su tecnología y sistema de seguimiento

Autor:

Carlos Barroso Toro

Tutor:

Dr. Ángel Arcos Vargas

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Máster: Análisis medioambiental del ciclo de vida de instalaciones fotovoltaicas. Impacto de su tecnología y sistema de seguimiento

Autor: Carlos Barroso Toro

Tutor: Dr. Ángel Arcos Vargas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mis maestros

A mi tutor

A mis amigos

A mi pareja

A mi familia

Agradecimientos

Con este trabajo doy fin a mi etapa como estudiante, tras varios años disfrutando de la comunidad universitaria en distintas ciudades, Badajoz, Tenerife y Sevilla me han aportado todo lo mejor de cada una de ellas y me han ayudado a convertirme en quien soy actualmente.

La suerte de haber podido encontrar en el camino a personas que aporten tanto a mi día a día y que sean como una segunda familia, en gran parte se la debo a la decisión de enfrentarme al temido mundo de la ingeniería.

Tras los éxitos cosechados es el momento de decir ¡Gracias de corazón!

Gracias a quienes compartieron el sufrimiento previo a los exámenes.

Gracias a quienes disfrutaron de la celebración después del aprobado.

Gracias a quienes formaron un grupo para hacer comunes los problemas y soluciones de todos.

Gracias a quien llegó para aportar estabilidad y hacerme más feliz.

Gracias, especialmente a mi familia, por su apoyo incondicional, siempre, bajo cualquier circunstancia, por los esfuerzos realizados hace tantos y tantos años para poder darnos un futuro mejor, por las horas de campo, de sol, de mina, de costura o de vivero. Por esforzarse durante tanto tiempo para que el camino que escribiesen sus hijos y los hijos de sus hijos fuese más sencillo. Por darnos tantas oportunidades y por hacernos tan felices, gracias a mi familia, gracias a mis abuelos.

Carlos Barroso Toro
Máster en Ingeniería Industrial
Sevilla, 2020

En este estudio se presenta un modelo que hace viable la comparación de sistemas fotovoltaicos, de distintas generaciones y con diferentes montajes. Los sistemas que se tendrán en cuenta serán los basados en silicio, las tecnologías de capa delgada, los paneles orgánicos y los dispositivos de alta concentración fotovoltaica. Además se extraerán datos de distintas ubicaciones y se evaluarán los resultados obtenidos en producción por unidad de superficie (m^2), así como por unidad de potencia (kWp), también se muestra el desempeño en varios índices medioambientales que se usarán para conocer el impacto en cada una de las situaciones propuestas. Estos índices medioambientales serán "*Energy payback time (EPBT)*, *Energy return factor (ERF)*, *Potential for CO₂ mitigation (PCM)*, *Greenhouse-gas payback time (GPBT)* y Tasa de CO₂".

Se estudiarán 6 ubicaciones distintas, concretamente, España, China, Alemania, Italia, Francia y Países nórdicos, con radiaciones anuales entre 1,168kWh y 2,094kWh, por lo que tendremos la posibilidad de conocer cómo se comportan los distintos sistemas en un amplio rango de radiación.

El procedimiento de trabajo consistirá en evaluar el análisis de ciclo de vida de cada uno de los sistemas, tener en cuenta las demandas y entregas de energía a lo largo de la vida de las instalaciones. Para ello se tiene en cuenta la energía necesaria para la fabricación de los propios módulos, así como su instalación y transporte, además de los componentes de balance del sistema (BOS), posteriormente obtenemos cifras de energía producida y emisiones evitadas y finalmente recogemos los valores de energía necesaria para el desmantelamiento y reciclaje de las instalaciones.

Finalmente y tras obtener resultados específicos en cada una de las ubicaciones, para todos los sistemas y montajes, se muestra una serie de resultados promedio que tienen en cuenta a todos los anteriores y serán analizados más profundamente. Los datos específicos de cada ubicación se muestran para facilitar cualquier extracción de información por parte del lector de este trabajo, sin desarrollar un análisis específico por la gran cantidad de casos posibles.

Abstract

This study presents a model that makes the comparison between different photovoltaic systems, from different generations and assemblies. The systems that will be taken into account will be those based on Silicon, thin film technologies, organic panels and high concentration photovoltaic systems. In addition, data will be extracted from different locations and the results obtained in production per unit of surface (m^2), as well as per unit of power (kWp), will also be shown. Performance in various environmental indices that will be used to know the impact on each of the proposed situations will be in the same way analysed. These environmental indices will be Energy payback time (EPBT), Energy return factor (ERF), Potential for CO₂ mitigation (PCM), Greenhouse-gas payback time (GPBT) and CO₂ rate.

We have studied 6 different locations, Spain, China, Germany, Italy, France and the Nordic countries, with annual radiations between 1,168kWh and 2,094kWh, so we are going to be able to get to know how the different systems behave in a wide range of radiation.

The work procedure will consist on evaluating the life cycle analysis of each of the systems, taking into consideration the demands and deliveries of energy throughout the life of the PV systems. In order to achieve this, we bear in mind the energy required for the manufacturing of the modules themselves, as well as their installation and transportation, added to the balance components of the system (BOS), later we obtain figures of produced energy and emissions avoided and finally we collect the values of energy needed for the dismantling and recycling of the facilities.

Finally and after obtaining specific results in each of the locations, for all the systems and assemblies, the average results which take into account all the previous ones will be evidenced and analyzed more deeply. The specific data of each location is shown to facilitate any information extraction by the reader of this work, without developing a specific analysis due to the large number of possible cases.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Lista de abreviaturas	xix
1 Introducción	21
2 Estado del arte	25
2.1 <i>Análisis de ciclo de vida</i>	27
2.2 <i>Tiempo de retorno de la energía - Energy payback time (EPBT)</i>	32
2.3 <i>Distintas tecnologías PV</i>	34
2.4 <i>Tipología de las instalaciones PV</i>	36
3 Análisis de ciclo de vida	39
3.1 <i>¿Qué es el análisis de ciclo de vida?</i>	39
3.2 <i>Límites del sistema y definición</i>	43
3.2.1 <i>Emisiones generadas en la producción de los paneles</i>	43
3.2.2 <i>Emisiones de carbono ahorradas</i>	44
3.2.3 <i>Tiempo de recuperación de la energía y huella de carbono</i>	45
4 Tipología de las instalaciones PV	47
4.1 <i>Instalaciones sobre suelo</i>	47
4.1.1 <i>Instalaciones con estructura fija</i>	47
4.1.2 <i>Instalaciones con seguidores a un eje</i>	48
4.1.3 <i>Instalaciones con seguidores a dos ejes</i>	49
4.2 <i>Instalaciones sobre cubierta</i>	51
4.2.1 <i>Instalación Coplanar</i>	51
4.2.2 <i>Instalación orientada sobre cubierta inclinada</i>	52
4.2.3 <i>Instalación sobre cubierta plana</i>	53
5 Tecnología de los módulos PV	55
5.1 <i>Paneles cristalinos</i>	55
5.1.1 <i>Silicio monocristalino (mono-Si)</i>	56
5.1.2 <i>Silicio policristalino (poli-Si)</i>	57
5.1.3 <i>Paneles de cinta de silicio (Ribbon-Si)</i>	57
5.2 <i>Paneles de capa delgada (Thin film)</i>	58
5.2.1 <i>Teluro de Cadmio (CdTe)</i>	59
5.2.2 <i>Silicio amorfo (a-Si)</i>	59
5.2.3 <i>Paneles CIS/CIGS</i>	60
5.2.4 <i>Paneles solares orgánicos (OPV)</i>	61
5.3 <i>Paneles de alta concentración fotovoltaica (HCPV)</i>	61

6	Análisis de requerimientos y emisiones	63
6.1	<i>Emisiones generadas en su proceso de producción, instalación, operación y desmantelamiento.</i>	63
6.1.1	Cálculos por unidad de superficie	63
6.1.2	Cálculos por unidad de potencia	65
6.2	<i>Emisiones evitadas. Análisis distintas ubicaciones</i>	69
7	Escenarios de estudio	71
7.1	<i>Instalación en España</i>	72
7.2	<i>Instalación en China</i>	77
7.3	<i>Instalación en Alemania</i>	81
7.4	<i>Instalación en Italia</i>	85
7.5	<i>Instalación en Francia</i>	89
7.6	<i>Instalación en Países nórdicos</i>	93
8	Análisis de resultados	97
9	Conclusiones	109
	Referencias	111

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Referencias empleadas en el en el estado del arte. Elaboración propia	27
Tabla 6.1 Requerimiento energético de cada tecnología por unidad de superficie. Elaboración propia	64
Tabla 6.2 Potencia por m^2 y m^2 por kWp en las distintas tecnologías. Elaboración propia	66
Tabla 6.3 Requerimiento energético (MJ) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia	67
Tabla 6.4 Requerimiento energético (kWh) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia	68
Tabla 6.5 Emisiones de gCO_2 por kWh consumido en los países estudiados. Elaboración propia.	69
Tabla 7.1 Radiación anual en las capitales de los distintos países de estudio. Fuente: PVGIS	72
Tabla 7.2 Irradiación anual y producción, ubicación España. Elaboración propia	72
Tabla 7.3 Producción para instalación ubicada en España. Elaboración propia	73
Tabla 7.4 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en España. Elaboración propia	73
Tabla 7.5 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en España. Elaboración propia	73
Tabla 7.6 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en España. Elaboración propia	74
Tabla 7.7 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en España. Elaboración propia	75
Tabla 7.8 Tasa de CO_2 evaluada en gCO_2/kWh instalación ubicada en España. Elaboración propia	76
Tabla 7.9 Irradiación anual y producción, ubicación China. Elaboración propia	77
Tabla 7.10 Producción para instalación ubicada en China. Elaboración propia	77
Tabla 7.11 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en China. Elaboración propia	77
Tabla 7.12 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en China. Elaboración propia	78
Tabla 7.13 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en China. Elaboración propia	78
Tabla 7.14 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en China. Elaboración propia	79
Tabla 7.15 Tasa de CO_2 evaluada en gCO_2/kWh instalación ubicada en China. Elaboración propia	80
Tabla 7.16 Irradiación anual y producción, ubicación Alemania. Elaboración propia	81
Tabla 7.17 Producción para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	81
Tabla 7.18 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	81
Tabla 7.19 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	82
Tabla 7.20 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	82
Tabla 7.21 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	83
Tabla 7.22 Tasa de CO_2 evaluada en gCO_2/kWh instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia	84
Tabla 7.23 Irradiación anual y producción, ubicación Italia. Elaboración propia	85
Tabla 7.24 Producción para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	85
Tabla 7.25 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	85
Tabla 7.26 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	86
Tabla 7.27 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	86
Tabla 7.28 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	87
Tabla 7.29 Tasa de CO_2 evaluada en gCO_2/kWh instalación ubicada en Italia. Elaboración propia	88
Tabla 7.30 Irradiación anual y producción, ubicación Francia. Elaboración propia	89

Tabla 7.31 Producción para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	89
Tabla 7.32 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	89
Tabla 7.33 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	90
Tabla 7.34 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	90
Tabla 7.35 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	91
Tabla 7.36 Tasa de CO ₂ evaluada en gCO ₂ /kWh instalación ubicada en Francia. Elaboración propia	92
Tabla 7.37 Irradiación anual y producción, ubicación Países nórdicos. Elaboración propia	93
Tabla 7.38 Producción para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia	93
Tabla 7.39 <i>Energy payback time</i> para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia	93
Tabla 7.40 <i>Energy return factor</i> para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia	94
Tabla 7.41 <i>Potential for CO₂ mitigation</i> para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia	94
Tabla 7.42 <i>Greenhouse-gas payback time</i> instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia	95
Tabla 7.43 Tasa de CO ₂ evaluada en gCO ₂ /kWh instalación ubicada en P.nórdicos. Elaboración propia	96
Tabla 8.1 Condiciones promedio de las ubicaciones estudiadas. Elaboración propia	97
Tabla 8.2 Resultado promedio de producción por unidad de superficie. Elaboración propia.	97
Tabla 8.3 Resultados promedio de producción por kWp. Elaboración propia	98
Tabla 8.4 Resultados promedio EPBT. Elaboración propia	99
Tabla 8.5 Resultados promedio ERF. Elaboración propia	100
Tabla 8.6 Resultados promedio PCM. Elaboración propia	101
Tabla 8.7 Resultados GPBT, gases evitados promedio. Elaboración propia.	102
Tabla 8.8 Resultados GPBT ubicación China valores de producción promedio. Elaboración propia	103
Tabla 8.9 Resultados GPBT ubicación P. nórdicos valores de producción promedio. Elaboración propia	104
Tabla 8.10 Resultados Tasa CO ₂ , generación en vida con datos promedio. Elaboración propia.	105
Tabla 8.11 Resultados Tasa CO ₂ con diferentes orígenes y datos promedio. Elaboración propia	106

Índice de Figuras

Figura 3.1 Etapas análisis LCA. Elaboración propia	39
Figura 3.2 Línea temporal referida a energía. Elaboración propia	40
Figura 3.3 Línea temporal referida a emisiones. Elaboración propia.	41
Figura 3.4 Comparativa líneas de tiempo energía y emisiones. Elaboración propia.	42
Figura 3.5 Requerimiento energético de cada etapa de la vida útil. Elaboración propia.	43
Figura 4.1 Seguidor solar sobre eje polar. Fuente: (Zyrianov, 2017)	48
Figura 4.2 Seguidor solar sobre eje acimutal. Fuente: (Zyrianov, 2017)	49
Figura 4.3 Seguidor solar sobre eje horizontal. Fuente: (Zyrianov, 2017)	49
Figura 4.4 Seguidor solar sobre 2 ejes. Fuente: (Zyrianov, 2017)	50
Figura 4.5 Instalación coplanar sobre cubierta orientada al sur. Elaboración propia	52
Figura 4.6 Instalación elevada hacia orientación sur. Elaboración propia.	52
Figura 4.7 Instalación sobre cubierta plana. Elaboración propia.	53
Figura 6.1 Requerimiento energético por tecnologías y ud. superficie en inst. fijas. Elaboración propia	64
Figura 6.2 Rangos de eficiencia de las distintas tecnologías. Elaboración propia.	65
Figura 6.3 Ratio de desempeño de las distintas tecnologías. Elaboración propia.	66
Figura 6.4 Potencia por m ² en las distintas tecnologías. Elaboración propia.	67
Figura 6.5 Requerimiento energético (MJ) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia	68
Figura 6.6 Requerimiento energético (kWh) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia	69
Figura 7.1 Mapa de radiación solar europeo. Fuente:(PVGIS)	71
Figura 7.2 Mapa de radiación solar en China. Fuente: (PVGIS)	71

Lista de abreviaturas

PV: Sistemas fotovoltaicos
Si: Silicio
mono-Si: Silicio monocristalino
poli-Si: Silicio policristalino
a-Si: Silicio amorfo
Ribbon-Si: Paneles de cinta de silicio
CdTe: Teluro de Cadmio
CIS: Paneles de Cobre, Indio, Selenio
CIGS: Paneles de Cobre, Indio, Galio y Selenio
OPV: Paneles fotovoltaicos orgánicos
LCA: Análisis de ciclo de vida
EPBT: Energy payback time
ERF: Energy return factor
GPBT: Greenhouse-gas payback time
PCM: Potential for CO₂ mitigation
UE: Unión Europea
GEI: Gases efecto invernadero
BOS: Balance del sistema
IEA: Agencia Internacional de la Energía
CC: Corriente continua
CA: Corriente alterna
TFPV: Células fotovoltaicas de capa delgada
B: Boro
P: Fósforo
PEN: Naftalato de polietileno
PET: Polietileno tereftalato
ISFOC: Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos están teniendo un gran desarrollo en los últimos años y suelen ser motivo de estudio por parte de investigadores de distintos ámbitos. Es común encontrar estudios sobre la paridad de red, la rentabilidad económica o el dimensionamiento óptimo de los sistemas.

Este estudio pretende continuar con la línea de proyectos planteados por Laureleen Riviere y Juan Felipe Hinestroza bajo la tutela del Dr. Ángel Arcos en 2017 y 2019 respectivamente. En dichos proyectos se determina la instalación óptima para un usuario dados unos perfiles de consumo específicos, y una posterior mejora teniendo en cuenta el posible almacenamiento energético y la opción de obtener una retribución por la venta de excedentes. Además, está enmarcado dentro del ámbito de organización industrial gracias a la unión de ingeniería, economía e impacto medioambiental de los sistemas fotovoltaicos, lo cual resulta especialmente interesante si tenemos en cuenta la necesidad de cumplimiento del Acuerdo de París cuyo principal objetivo es reforzar la respuesta mundial ante la amenaza del cambio climático favoreciendo el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza, como se cita en el artículo "*Tras el acuerdo de París*" del Dr. Ángel Arcos de Febrero 2017 .

La finalidad principal de este trabajo es obtener una idea clara respecto a si los sistemas fotovoltaicos (PV) que generalmente se han considerado sistemas de generación de electricidad respetuosos con el medio ambiente, realmente lo son y cuánto en cada caso. Se pretende conocer cual es su impacto medioambiental real, para ello se desarrolla una comparativa entre sistemas basados en Silicio, de primera generación, como son los paneles monocristalinos (mono-Si), policristalinos (poli-Si) y paneles de cinta de silicio (Ribbon-Si), sistemas que desarrollan tecnologías de capa delgada, segunda generación, como son los paneles de telururo de cadmio (CdTe), silicio amorfo (a-Si), los paneles de cobre, indio, selenio (CIS) o cobre, indio, galio, selenio (CIGS), además de los novedosos paneles orgánicos (OPV) y de alta concentración (HCPV).

Su comparativa se realizará mediante la extracción de resultados basados en distintas hipótesis de fabricación e instalación, se tendrán en cuenta 6 ubicaciones distintas, en concreto, España, China, Alemania, Italia, Francia y Países nórdicos. También se tendrán en cuenta los distintos montajes posibles, ya sean sistemas fijos sobre suelo o cubierta, con seguimiento a uno o dos ejes.

Dispondremos de distintos índices medioambientales para conocer el desempeño real de cada una de las tecnologías, lo cual nos permitirá saber su contribución a la mitigación de emisiones, su

capacidad de producción de electricidad, el tiempo de retorno de la energía y/o emisiones generadas, entre otros aspectos.

Se utilizará inicialmente la metodología LCA, análisis de ciclo de vida, para tener en cuenta las entradas y salidas de energía del sistema tanto en la etapa de fabricación de los sistemas como en su posterior instalación, producción, desmantelamiento y reciclaje.

Los requerimientos energéticos variarán en función de la tecnología con la que estemos tratando ya que los sistemas de fabricación son muy diferentes, en la actualidad alrededor del 90% de la tecnología fotovoltaica se basa en el uso de alguna variación del silicio. En el caso de los paneles solares destinados a uso doméstico, este porcentaje es todavía mayor.

La principal diferencia entre los diferentes tipos de módulos de primera generación fotovoltaicos es la pureza del silicio utilizado. Cuanto más puro es el silicio, mejor alineadas están sus moléculas, y mejor será la conversión de la energía solar en electricidad.

De este modo, se establece una relación directa entre la pureza del silicio y la eficiencia de los paneles solares. Por el contrario, el aumento de la pureza del silicio implica procesos más caros.

Sin embargo, los módulos de segunda generación, a pesar de tener un rendimiento más bajo disponen de otras características que pueden ser ventajosas como su facilidad para ser producidos en masa. Esto los hace potencialmente más baratos de fabricar que las células solares de base cristalina. Su apariencia homogénea los hace parecer más atractivos y menos llamativos en caso de querer incorporarlos en el ámbito residencial. Pueden ser flexibles, lo que abre muchas nuevas aplicaciones potenciales, además se adaptan bien a las altas temperaturas y el sombreado tiene menos impacto en su rendimiento.

Su principal limitación es el espacio ya que sus rendimientos son inferiores, por este motivo no es muy común su aplicación en espacios residenciales a pesar de su precio notablemente más bajo.

Como sistemas más novedosos encontramos los orgánicos o de tercera generación, son módulos fotovoltaicos que utilizan células construidas con materiales especiales derivados del carbono, a diferencia de la mayoría de los citados anteriormente que están hechos de silicio. Recientemente se han conseguido diseñar células especiales capaces de aumentar la eficiencia de esta alternativa para intentar convertirla en una opción competitiva en el mercado.

Su principal desventaja son sus muy bajos rendimientos y la necesidad de grandes superficies para obtener una potencia determinada, además su vida útil suele ser más corta que la de los sistemas

Análisis medioambiental del ciclo de vida de instalaciones fotovoltaicas. Impacto de su tecnología y sistema de seguimiento

antecesores, primera y segunda generación, lo cual las hace menos atractivas de cara a instalaciones convencionales.

Por último, debemos mencionar los módulos de alta concentración fotovoltaica, los cuales disponen de una superficie de panel muy pequeña gracias al uso de cristales que concentran los rayos solares sobre ellos. Esta tecnología no está muy extendida en la actualidad pero aporta grandes ventajas.

2 ESTADO DEL ARTE

Tras los estudios realizados con anterioridad por Laureleen Riviere en 2017, y Juan Felipe Hinestroza en 2019, ambos supervisados por el Dr. Ángel Arcos Vargas, en los que se recoge un estudio de viabilidad económica de la instalación de un sistema fotovoltaico a nivel residencial en varios países de la cuenca del mediterráneo (*Riviere, 2017*) y posteriormente el análisis de rentabilidad y tamaño óptimo de estas instalaciones teniendo en cuenta el vertido a la red eléctrica y el almacenamiento de energía (*Hinestroza, 2019*).

En ambos trabajos se concluye que es rentable económicamente la instalación de sistemas fotovoltaicos, pero no se hace una diferenciación de su impacto ambiental en función de los distintos tipos de montaje que podríamos encontrar o de las distintas tecnologías con las que podrían contar las instalaciones. Además de esto los estudios anteriores se centran principalmente en el ámbito residencial, dejando fuera de su alcance las plantas de producción de energía de gran tamaño.

Continuando con esta línea de investigación se presenta el siguiente estado del arte, el cual está dividido principalmente en 4 bloques, análisis de ciclo de vida, tiempo de retorno de la energía, distintos tipos de tecnología fotovoltaica y tipología de las instalaciones en función de su montaje. Como resumen de las referencias empleadas en la realización de esta sección, se presenta la siguiente tabla:

N	Autor	Año	Contenido	Tema
1	Hong <i>et al.</i>	2016	Efectos ambientales sistemas PV policristalinos	Análisis de ciclo de vida
2	Castillo	2019	Inclusión de las fuentes de energía renovables	
3	Stoppato	2006	Introducción de la metodología LCA	
4	Nian	2016	Reformulación de la metodología LCA	
5	Gerbinet, Belboom, Léonard	2014	Estandarización y precisión metodología LCA	
6	Muteri <i>et al.</i>	2020	Impacto de las energías renovables en la UE	

7	Wu <i>et al.</i>	2017	Comparativa emisiones PV y fuentes tradicionales	Análisis de ciclo de vida
8	Desideri <i>et al.</i>	2012	Recuperación de paneles PV	
9	Wender <i>et al.</i>	2014	Ampliación del enfoque LCA	
10	Riviere	2017	Impacto de los sistemas PV en ámbito residencial	
11	Rojas-Hernández & Lizana	2018	Análisis por etapas del ciclo de vida de una instalación PV	
12	Fthenakis & Kim	2010	Importancia de la actualización de datos en análisis de ciclo de vida	
13	Müller, Wambach & Alsema	2005	Posibilidad de reciclaje de los paneles PV	
14	Hou <i>et al.</i>	2015	Análisis de ciclo de vida sistemas mono-Si, poli-Si.	
15	A. Arcos	2017	Acuerdo de Paris	
16	Wu <i>et al.</i>	2017	EPBT instalación 1MW poli-Si en China	
17	Bhandari <i>et al.</i>	2015	Influencia del rendimiento en el EPBT	
18	Toledo & Campos-Guzmán	2016	Sistemas poli-Si integrados en edificios	
19	Sumper <i>et al.</i>	2011	Estudio de instalación 200kW poli-Si en España	
20	Castillo	2019	Comparativa EPBT mono-Si, poli-Si, CdTe	
21	Wild-Scholten	2013	Requerimientos energéticos de cada etapa del proceso para distintas tecnologías	Distintos tipos de tecnología PV
22	Castillo	2019	Predominancia de los sistemas basados en silicio sobre otras tecnologías	
23	Barroso	2017	Revisión sobre los sistemas PV basados en silicio. Aplicación doméstica	

24	Muteri <i>et al.</i>	2020	Distintas generaciones de los sistemas PV	Distintos tipos de tecnología PV
25	Ito, Komoto, Kurokawa	2009	Estudio de instalaciones de grandes dimensiones con distintas tecnologías en China	
26	Pérez-Gallardo <i>et al.</i>	2013	Comparativa medioambiental y económica de distintos sistemas	
27	Cabello Villar	2013	Impacto ambiental de las diferentes tecnologías	
28	Cebaqueba	2019	Impacto ambiental de las diferentes tecnologías	
29	Raugei	2008	Sistemas con almacenamiento de energía	
30	Mejía, Londoño & Osorio	2010	Definición de sistemas con seguidores	Tipología de las instalaciones PV
31	Lara	2015	Proyecto experimental con instalación fija y seguimiento a 2 ejes	
32	Martín	2016	Proyecto experimental con distintas tecnologías y montajes	
33	Zyrianov	2017	Sistemas de seguimiento solar	

Tabla 2.1 Referencias empleadas en el en el estado del arte. Elaboración propia

2.1 Análisis de ciclo de vida

En estos últimos años, los problemas relacionados con la energía y la contaminación se están volviendo cada vez más importantes e implican el uso racional de recursos, la consideración del impacto ambiental debido a la emisión de contaminantes y el consumo de recursos de fuentes no renovables.

Con respecto a los sistemas energéticos, se están llevando a cabo muchos proyectos dirigidos hacia la mitigación de estos problemas, con el objetivo también de cumplir las, cada vez más restrictivas, leyes medioambientales. Para lograr esto se enfocan principalmente en la eficiencia de los dispositivos, la difusión de sistemas de cogeneración, el estudio de plantas con configuraciones innovadoras, el uso de combustibles no tradicionales y, sobretodo, las fuentes de recursos renovables.

En este contexto la energía solar tiene una gran consideración, ya que además de ser una fuente de energía inagotable, es aplicable de forma particular y a pequeña escala para usuarios en sus viviendas, ya sea para obtener energía eléctrica o térmica. Muchos países han introducido políticas para promover la instalación de nuevas plantas de fuentes renovables para alcanzar los objetivos medioambientales en los últimos años.

La finalidad de este trabajo será recopilar y analizar información sobre el balance entre las emisiones liberadas durante la producción de estos sistemas y el posterior ahorro de emisiones que producen a lo largo de su vida útil, en torno a 25 años, dependiendo de la tecnología que utilicen.

La crisis energética y los problemas ambientales han aumentado la atención sobre el desarrollo y la utilización de la energía solar. El artículo (*Hong et al. 2016*) tiene como objetivo identificar los efectos ambientales asociados a los sistemas fotovoltaicos (PV) compuestos de silicio policristalino (poli-Si) en China mediante la evaluación del ciclo de vida.

En los resultados se muestra cómo la tecnología fotovoltaica solar policristalina aporta un elevado número de emisiones en su fabricación contribuyendo así al calentamiento global ya que se usan recursos no renovables, además de las emisiones generadas por el tratamiento del aluminio, el alto consumo energético de la producción de obleas, etc. En definitiva, se concluye con que sería recomendable promover el uso de fuentes de energía renovables para la fabricación de los paneles además de la reutilización de las materias primas.

En la actualidad se presta especial atención a las fuentes de energía renovables, sostenibles y amigables con el medio ambiente para compensar la dependencia de la humanidad a las fuentes de energía convencionales y no renovables, la mayoría de las cuales se basan en el uso de combustibles fósiles, como ya comentamos anteriormente. Se estima que la energía solar provee más energía a la Tierra en una hora que todas las otras fuentes energéticas usadas por el ser humano durante todo un año. Es por esta razón, que la ciencia ha procurado dar grandes avances para promover el uso de la energía solar como fuente renovable, limpia y ampliamente disponible (*Castillo, 2019*)

En el estudio (*Stoppato, 2006*) se hace una introducción a la metodología LCA usando equipos con una eficiencia del 16% y un periodo de vida útil de 28 años. El proceso productivo se divide en 9 fases de las que podemos destacar principalmente la transformación del silicio en silicio solar y el ensamblaje del panel, con el 47.27% y 18.26% del consumo energético del proceso de fabricación, como cabía esperar, también en estas dos etapas es donde se producen la gran mayoría de las emisiones, siendo sus porcentajes 47.61% y 18.39%, sobre el total producido en la fabricación del panel. Además de esto y tras un estudio pormenorizado en distintos países, se concluye que la

energía PV es recomendable para paliar el daño medioambiental debido a su bajo EPBT, de entre 2.3 y 6.5 años en función de las condiciones, y sus bajas emisiones en comparación con las energías convencionales.

El desarrollo de los sistemas solares fotovoltaicos (PV) está siendo impulsado principalmente por las agendas internacionales para reducir las emisiones de carbono (*Nian, 2016*). Los sistemas fotovoltaicos a penas producen emisiones cuando están en funcionamiento, pero sus procesos de fabricación no están libres de ellas. Los estudios encontrados en la literatura generalmente emplean el análisis del ciclo de vida (LCA) para cuantificar las emisiones de carbono de los sistemas fotovoltaicos, pero existen grandes variaciones en los valores recogidos de los factores de emisión a lo largo del ciclo de vida. Este estudio introduce un concepto de expansión temporal de los límites del sistema físico, esta metodología reformulada puede facilitar una descripción precisa, transparente y coherente del sistema y las condiciones de contorno.

En la misma línea, el estudio (*Gerbinet, Belboom, Léonard, 2014*) tiene como objetivo de presentar una visión precisa del LCA aplicada a sistemas PV. Los análisis se clasifican por tipo de panel y por metodología de evaluación de impacto.

En la publicación, (*Muteri et al. 2020*), se remarca que La Unión Europea (UE) asumió el papel principal en el logro de los objetivos finales de la sustitución de combustibles fósiles con energías renovables, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros impactos ambientales debido al uso de éstas. Además se indica que actualmente los esfuerzos se centran en mejorar el rendimiento fotovoltaico, en el ámbito energético y en el campo ambiental. En definitiva, este estudio coincide en catalogar a la tecnología fotovoltaica como ecológica en comparación con las provenientes de combustibles fósiles en muchas categorías de impacto, pero no puede considerarse totalmente libre de impactos ambientales durante su ciclo de vida.

El artículo (*Arcos, 2017*) informa sobre la importancia del Acuerdo de Paris y los cambios que se deben llevar a cabo para cumplir con él, favorecer el desarrollo sostenible, buscar la erradicación de la pobreza y aliarse en contra de la amenaza del cambio climático como principal objetivo.

La evaluación de las ventajas energéticas y ambientales del uso de sistemas fotovoltaicos debe hacerse teniendo en cuenta su ciclo de vida completo. Un buen método estandarizado para alcanzar este objetivo es usar el método LCA, que considera los impactos ambientales y el consumo de energía no renovable, el agotamiento de los recursos y las emisiones durante todo el ciclo de vida de una tecnología.

También coincide en esta idea, (*Wu et al. 2017*) donde se realiza el análisis LCA sobre la aplicación fotovoltaica de la energía solar. Se muestran distintas instalaciones y finalmente se obtiene como resultado que los sistemas de generación de electricidad basados en PV generan emisiones de GEI significativamente más bajas que las estaciones tradicionales de combustibles fósiles, y la diferencia podría ser de hasta un 89% si se trata de sistemas fotovoltaicos conectados a red.

Como ya hemos visto la mayoría de las emisiones se producen durante la fabricación de los módulos sin embargo, la mayor parte de un módulo fotovoltaico puede reciclarse, el vidrio protector, el marco de aluminio y especialmente el material semiconductor y los metales costosos que forman los electrodos, como la plata. Existen instalaciones de recuperación de paneles en las que mediante el reciclaje de obleas se consigue reducir significativamente el consumo de energía durante la producción (*Desideri et al. 2012*).

Según el estudio (*Wender et al. 2014*) en la actualidad las políticas y estrategias de investigación recomiendan la aplicación de la evaluación del ciclo de vida (LCA) en la investigación y desarrollo (I+D) para guiar las tecnologías emergentes hacia disminución de la carga ambiental. Sin embargo, algunas de las prácticas de los estudios LCA existente no son adecuadas para respaldar estas recomendaciones. Existen barreras relacionadas con la disponibilidad de datos, el cambio rápido de tecnología y el aislamiento de la investigación ambiental de la investigación técnica. Una vez superados estos desafíos, necesitaremos de avances metodológicos que ayuden a identificar las oportunidades más beneficiosas para el medio ambiente oportunidades de forma previa a grandes inversiones.

Un enfoque completo para LCA requiere síntesis de social, conocimiento ambiental y técnico más allá de las capacidades de las prácticas actuales. El artículo presenta un marco novedoso para LCA anticipatorio que incorpora pronósticos de tecnología, riesgo investigación, compromiso social y evaluación comparativa de impacto, luego aplica este marco a las tecnologías fotovoltaicas (PV). Esto nos ayuda a guiarnos hacia una evolución tecnológica medioambientalmente sostenible.

En el estudio precedente de esta misma línea de investigación, (*Riviere, 2017*) se analiza el impacto de un sistema PV residencial sin almacenamiento y sin posibilidad de evacuar excedentes energéticos. El resultado final es económica y medioambientalmente beneficioso, principalmente en los países de la cuenca Mediterránea que deben acercarse al modelo de cumplimiento del Acuerdo de París. Para fomentar un mayor interés se propone que se faciliten los trámites así como una posible inclusión de sistemas de almacenamiento que permitiesen mejorar la rentabilidad económica.

El trabajo (*Rojas-Hernández & Lizana, 2018*) examina el ciclo de vida de una planta solar PV para

determinar la cantidad de energía total que se consume en sus diferentes etapas, queda claro que, dado que se trata de un producto para generar energía, si la energía consumida en su producción fuese mayor que la energía generada, no podríamos tratarlo como un producto viable y su uso aplicaría solo en escenarios muy específicos, como lo son las aplicaciones fotovoltaicas espaciales. A continuación se revisan diferentes etapas del ciclo de vida de una planta solar PV y se cuantifican los niveles de energía consumidos en cada una.

En general, la industria fotovoltaica se esfuerza por ahorrar costos a la vez que incrementa los rendimientos, esto se traduce en gran medida en el impacto a lo largo del ciclo de vida de los paneles y en la disminución de las emisiones. La eficiencia de conversión, el aprovechamiento de los materiales y el aumento del rendimiento de producción de los paneles de Si y CdTe están mejorando de forma rápida y continua, por lo que es necesario actualizar a menudo los análisis sobre ciclo de vida para poder seguir la evolución de forma correcta. (*Fthenakis & Kim, 2010*)

Atendiendo también a la cuestión del reciclaje encontramos el estudio (*Müller, Wambach & Alsema, 2005*) en el que se tiene en cuenta la posible reutilización de los paneles. La energía solar fotovoltaica es, a priori una energía limpia, por lo tanto, los impactos ambientales de los módulos fotovoltaicos durante su ciclo de vida completo deben investigarse y reducirse tanto como sea posible. En la mayoría de proyectos, se realizan estudios sin tener en cuenta la fase final de la vida de los paneles y su posible reutilización, cubrir este vacío es el objetivo del proyecto en cuestión.

En la conclusión del estudio, se indica que sería conveniente realizar el encapsulado de los paneles de forma que fuese sencillo poderlos desmontar, así podrían aprovecharse sus distintos componentes aún útiles sin hacer un gasto extra de energía.

En el estudio (*Hou et al., 2015*) se han realizado evaluaciones del ciclo de vida de la energía fotovoltaica conectada a la red con módulos solares poli-Si y mono-Si en China. Los tiempos de recuperación de energía oscilan entre 1.6 y 2.3 años, mientras que las emisiones de GEI ahora están en el rango de 60.1-87.3 gramos de CO₂/kWh. Las previsiones de futuro indican que se espera que tanto los tiempos de recuperación de la energía como las emisiones de GEI disminuyan aún más gracias al avance tecnológico.

El conjunto de estos trabajos nos ha ayudado enormemente a conocer y comprender la metodología de cálculo para el desarrollo de las técnicas LCA, cuáles son los procesos que se siguen en la elaboración de los paneles fotovoltaicos, y cuáles son los requerimientos energéticos de cada uno de ellos, pero en general carecen de algunos requisitos que en este trabajo se consideran esenciales para calcular el impacto real de los módulos PV como pueden ser comparativas entre distintos tipos de

instalación, país y técnicas de fabricación o comparativas entre distintas tecnologías.

2.2 Tiempo de retorno de la energía - *Energy payback time* (EPBT)

El tiempo de retorno de la energía se define como los años que un sistema fotovoltaico tiene que operar para recuperar la entrada de energía, tanto de la fabricación de módulos y el requerimiento energético del equilibrio del sistema (BOS), en el cual se incluye estructura, cableado y demás partes necesarias para la instalación, además de esto se tendrá también en cuenta la energía consumida en la fabricación de los inversores y el transporte de todo el material necesario. Por tanto, el cálculo del tiempo de retorno de la energía (EPBT) se puede presentar como la ecuación:

$$EPBT(\text{años}) = \frac{\text{Energía consumida por el sistema PV a lo largo de su vida (kWh)}}{\text{Energía eléctrica generada anualmente } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right)}$$

En el artículo, (*Wu et al. 2017*) se detalla el caso de una instalación de 1MW en China, calculando el aporte total de energía, incluyendo la energía de fabricación de los módulos y energía del balance del sistema (BOS), así como los demás elementos. Además, se estudia la producción de la planta y a través de esos datos se obtiene un resultado de EPBT en torno a 2.3 años, llegando a la conclusión de que un sistema solar en esas condiciones contribuiría a una generación limpia de energía durante más de 22 años, dado el supuesto de un período de operación de 25 años. Teniendo en cuenta estos datos, se puede afirmar que la instalación de energía solar es mucho más respetuosa con el medio ambiente que los sistemas tradicionales de combustibles fósiles.

Existe un enorme crecimiento de interés sobre cómo conseguir mejorar el rendimiento energético de las tecnologías PV, lo que nos llevaría a una mayor producción y una reducción del EPBT. De ahí el gran número de estudios recientes publicados en sobre este tema. (*Bhandari et al. 2015*)

(*Toledo & Campos-Guzmán, 2016*) Muestra los casos de estudio aplicados un contexto específico, en el que los paneles PV han sido integrados en edificios, el valor del EPBT asociado a los sistemas de integración arquitectónica varía en función de la localización geográfica de la instalación y de los parámetros técnicos del sistema. Se proponen casos como instalación en fachada principal, sistemas orientados verticalmente o integración en azoteas, en varias ubicaciones. Como cabía esperar en los resultados del estudio se llega a la conclusión de que en zonas de baja radiación y con inclinaciones no favorables la producción no es suficiente como para tener un EPBT menor a 25 años.

Podemos llegar a la conclusión de que existen varios factores que afectan notablemente al EPBT, entre ellos están: el tipo de tecnología fotovoltaica, el tipo de sistema (integrados, montados en suelo

o acoplados), los ratios de eficiencia y degradación, la vida útil de los equipos, la localización de la instalación, la irradiación anual y la orientación.

Para instalaciones ubicadas en España encontramos el estudio (*Sumper et al. 2011*) en el que además de hacer una comparativa entre distintas ubicaciones del territorio nacional, se muestra una subdivisión de fases del proyecto con los consiguientes costes energéticos de cada una de ellas. El estudio viene a confirmar de nuevo que la producción del panel es el principal consumo de energía, esto nos invita a pensar que mejorando el sistema de producción de los paneles o utilizando paneles reciclados podríamos abaratar enormemente el gasto de recursos y el consumo energético.

Si nos centramos en el EPBT propiamente, se muestra también una tendencia al estancamiento de la producción a partir de radiaciones solares anuales muy altas, por encima de $1,800\text{kWh/m}^2$, por lo que la energía recuperada tampoco crece notablemente a partir del este límite, con lo que el EPBT se mantiene estabilizado.

En lo que a las diferencias entre tecnologías aplicadas respecta, se denota una clara ventaja de los sistemas policristalinos y de capa delgada sobre los monocristalinos, como se muestra en los resultados del estudio.

Al comparar el tiempo de retribución energética de sistemas fotovoltaicos compuestos por diferentes tecnologías (silicio monocristalino, silicio policristalino y CdTe), de una estimación realizada por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), basada en datos disponibles para la producción e instalación de sistemas fotovoltaicos en Europa con una irradiación de $1,700\text{ kWh/m}^2$ anuales y un ratio de rendimiento (PR) del 0.75, se obtuvo que los sistemas fotovoltaicos mono y policristalinos tienen el mayor tiempo de retribución energética. La energía utilizada para módulos de silicio instalados en el techo se recupera en un tiempo de entre 1.7 y 2.3 años. Estos valores pueden variar de acuerdo a la ubicación del sistema y los métodos de fabricación. (*Castillo, 2019*).

En el estudio (*Wild-Scholten, 2013*) encontramos un amplio desglose de la contribución en gasto energético en función de los materiales usados y las distintas tecnologías. Se cifran cada uno de los componentes necesarios para dar lugar a sistemas monocristalinos, policristalinos y amorfos de silicio, así como capa delgada de CdTe y CIGS. Como resultado del estudio se arroja una comparativa de la energía necesaria en cada uno de los casos.

Mediante los datos aportados por los anteriores estudios, podremos conocer una primera aproximación de la bondad de los sistemas PV en cuanto al tiempo necesario para devolver la energía que fue necesaria para dar lugar a su fabricación. El factor EPBT sólo relaciona cantidades

de energía, sin tener en cuenta las emisiones provocadas por la fabricación de los sistemas.

2.3 Distintas tecnologías PV

El uso de energía solar ha tenido un gran auge a nivel mundial en los últimos años, los países más soleados disponen de un abundante potencial para la explotación de este recurso ya sea por medio de colectores solares, los cuales convierten la radiación solar en calor, o módulos fotovoltaicos, que transforman la radiación solar en electricidad. Los módulos fotovoltaicos están compuestos de materiales semiconductores que convierten fotones en electricidad, y existen actualmente diversas opciones de materiales con esta propiedad, donde se incluyen: el silicio monocristalino, silicio policristalino, silicio amorfo y tecnologías de película delgada, como telurio de cadmio (CdTe) y diselenuro de indio y cobre (CIS), entre otras.

En la actualidad la tecnología fotovoltaica mejor establecida y más utilizada es la de silicio cristalino, la cual ha representado aproximadamente el 85% de la capacidad de producción mundial de energía fotovoltaica en la última década. La importancia de esta tecnología como una alternativa baja en carbono para la producción de electricidad ha aumentado notablemente a la vez que aumentaba la preocupación por la cuestión medioambiental en el entorno global, este crecimiento puede atribuirse también a una fuerte disminución en los costos de producción y la creciente mejora de los rendimientos en estos sistemas. (*Castillo, 2019*).

En el trabajo fin de grado (*Barroso, 2017*) se reafirma la idea de que alrededor del 85-90% de la tecnología fotovoltaica se basa en el uso de alguna variación del silicio, este porcentaje es aún mayor en el ámbito doméstico. El silicio usado en fotovoltaica puede tener varias formas. La mayor diferencia entre ellas es la pureza del silicio usado. Cuanto más puro es el silicio, mejor alineadas están sus moléculas, y más capacidad tiene para convertir la energía solar en electricidad.

Desde hace años se vienen haciendo revisiones sobre el impacto de las distintas tecnologías como es el caso del trabajo (*Cabello Villar, 2013*) y su posterior revisión (*Cebaqueba, 2019*) los cuales han sido de gran ayuda, tanto para obtener datos que facilitasen el presente estudio como para implantar una metodología comparativa basada en índices medioambientales y valores absolutos de producción. Como continuación de estos estudios y para complementarlos, se añadirán comparativas en función de los distintos sistemas de seguimiento y se evaluarán diferentes ubicaciones tanto de fabricación como de instalación de los equipos.

El objetivo del desarrollo continuo de la tecnología fotovoltaica es aumentar el rendimiento de las células, para reducir el precio de mercado de los módulos y optimizar la velocidad y el costo de los

procesos de fabricación. Las células solares se pueden crear con una sola o múltiples capas de materiales absorbentes de luz. En el primer caso, nos referimos a celdas de unión simple, fáciles de fabricar pero menos eficientes; por el contrario, las configuraciones múltiples tienen varios mecanismos de absorción y separación de carga, en este caso son sistemas más complejos y aportan mayor rendimiento. Los sistemas fotovoltaicos se pueden distinguir en función de su tecnología y de los materiales de células solares.

Las tecnologías de células fotovoltaicas generalmente se clasifican en tres generaciones:

La primera generación incluye los paneles tradicionales con una estructura base de silicio cristalino, como células de silicio monocristalino (mono-Si) y silicio policristalino (poli-Si).

La segunda generación se basa en las células solares de película delgada, que incluyen silicio amorfo (a-Si), telururo de cadmio (CdTe), seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), seleniuro de indio de cobre (CIS), entre otras.

La tercera generación contiene a las tecnologías más innovadoras, no basadas en silicio y nuevos dispositivos conceptuales como paneles fotovoltaicos orgánicos o semi-orgánicos (OPV), además de otras tecnologías innovadoras que no se recogieron en la comparativa final realizada en este trabajo como perovskita solar células (PSC), células solares sensibilizadas por colorante (DSSC) y células de punto cuántico (QD). (*Muteri et al. 2020*)

En el estudio (*Ito, Komoto, Kurokawa, 2009*) se analiza el ciclo de vida de sistemas de grandes dimensiones instalados en áreas desérticas utilizando mono-Si, poli-Si, a-Si, CdTe y módulos CIS (Cobre, Indio, Selenio). Se supone un sistema de 1 GW en el desierto de Gobi, incluidas las líneas de transmisión. Si estudiamos aspectos ambientales como pueden ser: requisitos de energía, tiempo de recuperación de energía, emisiones de CO₂ y tasa de emisiones de CO₂, podemos observar distintos datos en función de las distintas tecnologías.

El estudio (*Pérez-Gallardo et al. 2013*) propone un proyecto integrado dentro de un marco que gestiona simultáneamente criterios técnicos, económicos y ambientales. El objetivo es maximizar la energía anual generada por la instalación. El análisis realizado tiene en cuenta distintos tipos de tecnología de paneles solares, entre ellos se encuentran los paneles de primera generación, silicio monocristalino (mono-Si) y silicio policristalino (poli-Si), paneles de segunda generación, silicio amorfo (a-Si), telururo de cadmio (CdTe) y diseleniuro de indio de cobre (CIS). Posteriormente, se estudia el impacto ambiental, así como criterios técnicos y económicos como el conocido Energy payback time, para el tiempo de recuperación de la energía o el tiempo de retorno de la inversión.

Para seleccionar la mejor opción entre las cinco opciones en estudio, se realiza una evaluación ponderada de todos criterios para obtener una puntuación para cada tecnología. Obteniéndose como resultado tras el análisis, teniendo en cuenta los impactos ambientales por kWh producido, que la tecnología del módulo PV CIS cumple mejor los objetivos.

Otro detalle a tener en cuenta desde un punto de vista tanto ambiental como económico, es con frecuencia el almacenamiento de la energía, que, en la mayoría de las instalaciones domésticas no conectadas a la red se consigue mediante baterías industriales recargables. (*Raugei, 2008*)

En los artículos tratados anteriormente, encontramos información al respecto del comportamiento de los distintos tipos de paneles PV, con respecto principalmente a su capacidad de producción, por su eficiencia y su adaptabilidad al medio. En este trabajo la idea principal es centrarnos en la diferenciación entre las formas de producir cada tipo de panel, sus requerimientos energéticos, sus componentes y emisiones, además de su capacidad productiva posterior, para poder así hacer un análisis global del ciclo de vida completo.

2.4 Tipología de las instalaciones PV

En este apartado veremos una diferenciación de las plantas fotovoltaicas en función de su tipo de montaje, ya sean instalaciones fijas, con seguidores a un eje, con seguidores a dos ejes, integradas en fachadas/azoteas o sobre suelo.

Se pueden identificar cuatro clases de instalaciones fotovoltaicas: conectadas a la red y centralizadas (grandes centrales eléctricas); conectadas a la red pero distribuidas (sistemas más pequeños para tejados y fachadas); no conectadas a la red y de uso no doméstico (centrales eléctricas e instalaciones industriales en zonas remotas); no conectadas a la red y de uso doméstico (principalmente sistemas autónomos en tejados de viviendas en zonas remotas). Estos cuatro tipos de instalaciones se diferencian por requerir componentes adicionales para su instalación y uso, como estructuras metálicas, de soporte, cimientos, cableado y dispositivos para el almacenamiento de la energía (todos ellos son denominados colectivamente como equilibrio del sistema, o BOS).

Para definir el concepto de seguidores, nos apoyaremos en el trabajo (*Escobar, Holguín, Osorio, 2010*) donde se indica que los sistemas fotovoltaicos disponen de la posibilidad de implementar un dispositivo adicional con el fin de aumentar la captación de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación, este complemento será el seguidor solar.

Un seguidor solar es un dispositivo conformado básicamente por una parte fija y una móvil, cuya

finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento.

La división principal la haremos entre seguidores a un eje y seguidores a dos ejes. En el primer caso, el eje de rotación puede ser vertical, horizontal u oblicuo, es menos complejo y costoso. El seguidor a dos ejes cuenta con dos grados de libertad y tiene la capacidad de realizar un seguimiento total del sol, tanto en inclinación como en azimut, el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje, pero es importante mencionar que suelen ser más costosos.

El estudio (*Lara, 2015*) muestra un proyecto experimental en el que se pretende medir la diferencia de producción entre un sistema fijo y un sistema con seguidor a dos ejes para una ubicación concreta (Leganés, España). El resultado obtenido tras el estudio arroja datos de incrementos en la producción en torno al 20.6% gracias al seguimiento, lo que haría viable la instalación. En el estudio, se dan datos reales de la producción obtenida, así como comparativas entre los distintos sistemas.

El trabajo (*Zyrianov, 2017*) nos permitirá ver una comparativa descriptiva de los diferentes sistemas de seguimiento tanto en 1 eje, diferenciando entre eje polar, acimutal y horizontal, así como en 2 ejes.

Siguiendo con la cuestión estructural podemos encontrar resultados comparativos entre sistemas fijos, sistemas con seguidores a 1 eje y a 2 ejes en el trabajo (*Martín, 2016*) además de una comparativa a su vez de distintas tecnologías, paneles monocristalinos, policristalinos y amorfos. El fundamento de este estudio es poder discernir cuándo conviene, y cuándo no, utilizar un sistema orientado para una determinada tecnología fotovoltaica y qué sistema de orientación convendría dado el caso. Además de compararse los distintos montajes y tecnologías entre sí, también podemos encontrar la comparativa respecto de una simulación de un año entero para observar las diferencias de producción obtenidas y las esperadas. Todas las mediciones del estudio fueron llevadas a cabo en una planta experimental ubicada en Valladolid (España).

El último estudio citado, es uno de los más íntimamente ligados al trabajo que se presenta en este documento ya que hace varias comparativas que serán comunes. Para poder hacerlo aún más interesante se podrían diversificar las ubicaciones para ver el comportamiento en función de la variación de radiación, además de la posibilidad de incorporar otras tecnologías como CdTe y enfocar los resultados al apartado medioambiental con el cálculo del EPBT así como el ciclo de vida de cada tipo de instalación.

3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

3.1 ¿Qué es el análisis de ciclo de vida?

Según la definición que encontramos en trabajos como (Sumper, 2011) nos apoyaremos en la norma ISO 14040 para hacer un análisis de ciclo de vida eficiente. El objetivo de este análisis será conocer el impacto medioambiental de un producto y sus distintas etapas a lo largo de su vida útil. Se recomienda evaluar y cuantificar de forma sistemática las entradas y salidas del proceso, además de dividir el estudio en 4 etapas definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados.

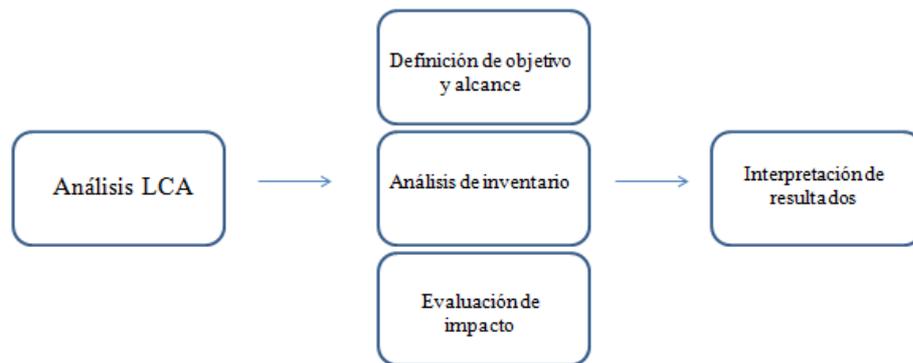


Figura 3.1 Etapas análisis LCA. Elaboración propia

Una vez realizado el análisis de ciclo de vida podremos comparar distintas tecnologías en función de los índices y parámetros establecidos, localizar los procesos con más emisiones o más consumo energético, los cuales serían los principales candidatos a mejorar para reducir el impacto.

En nuestro caso, diferenciaremos 3 etapas durante el ciclo de vida útil de la instalación, estas etapas serán fabricación, producción y desmontaje. Además, separaremos también el estudio en función de los valores energéticos y la componente de las emisiones ya que como veremos a continuación, sus contribuciones son complemente opuestas.

En primer lugar, representaremos una imagen ilustrativa referida al efecto que tiene cada proceso respecto al consumo/producción energética.

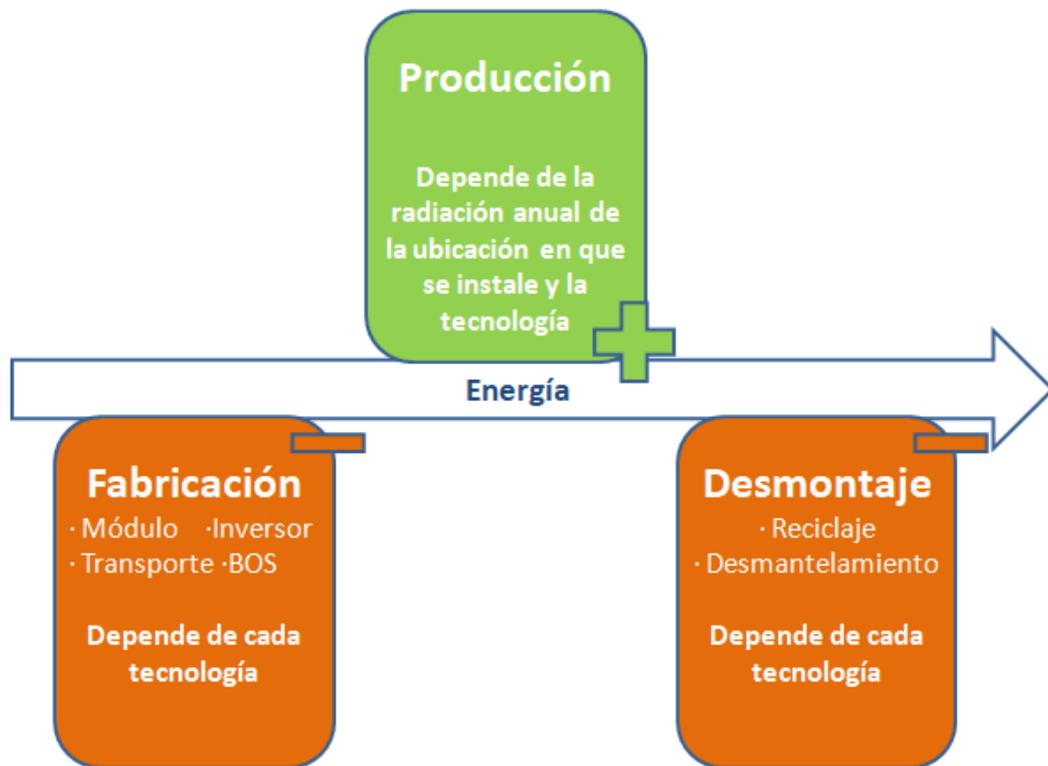


Figura 3.2 Línea temporal referida a energía. Elaboración propia

Observamos que en las etapas de fabricación y desmontaje, el aporte de energía es negativo ya que se produce un consumo. Por el contrario, en durante el periodo de producción, el aporte de energía es positivo ya que el sistema PV está generando electricidad. La cantidad de energía consumida, sólo dependerá del tipo de tecnología que estemos tratando, considerando el tipo de módulo y de montaje, ya que no habrá diferencia en esta cantidad de energía en función de la ubicación en la que se fabrique o desmonte. Si que encontraremos una diferencia en la energía producida que dependerá de cada una de las tecnologías así como de la ubicación de la instalación ya que será un valor en función de la radiación.

Si atendemos a la cuestión de la emisiones, la imagen que debemos percibir es totalmente opuesta.

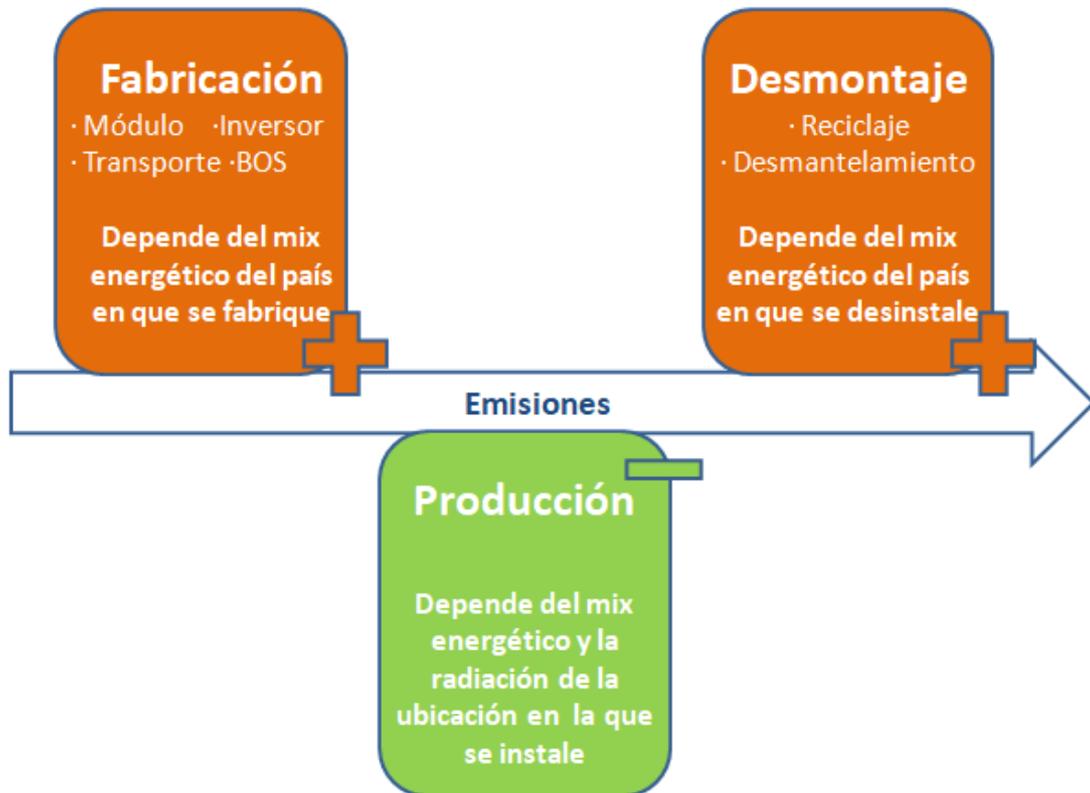


Figura 3.3 Línea temporal referida a emisiones. Elaboración propia.

Podemos observar como en este caso los valores positivos de emisiones se encuentran en las etapas de fabricación y desmontaje, aparecen en color rojo para remarcar su efecto nocivo ya que nuestro interés será el de reducir las emisiones, de ahí que la etapa de producción aparezca en color verde y con valor negativo, ya que hace referencia a las emisiones que se evitan gracias a la producción energética de los sistemas PV.

En este apartado la ubicación será fundamental, ya que las emisiones producidas y/o evitadas dependerán directamente del mix energético del país en el que nos encontremos en cada parte del proceso.

Para aclarar un poco más esta comparación, presentaremos una nueva imagen con las líneas temporales enfrentadas, en la que podremos ver oposición de las mismas.

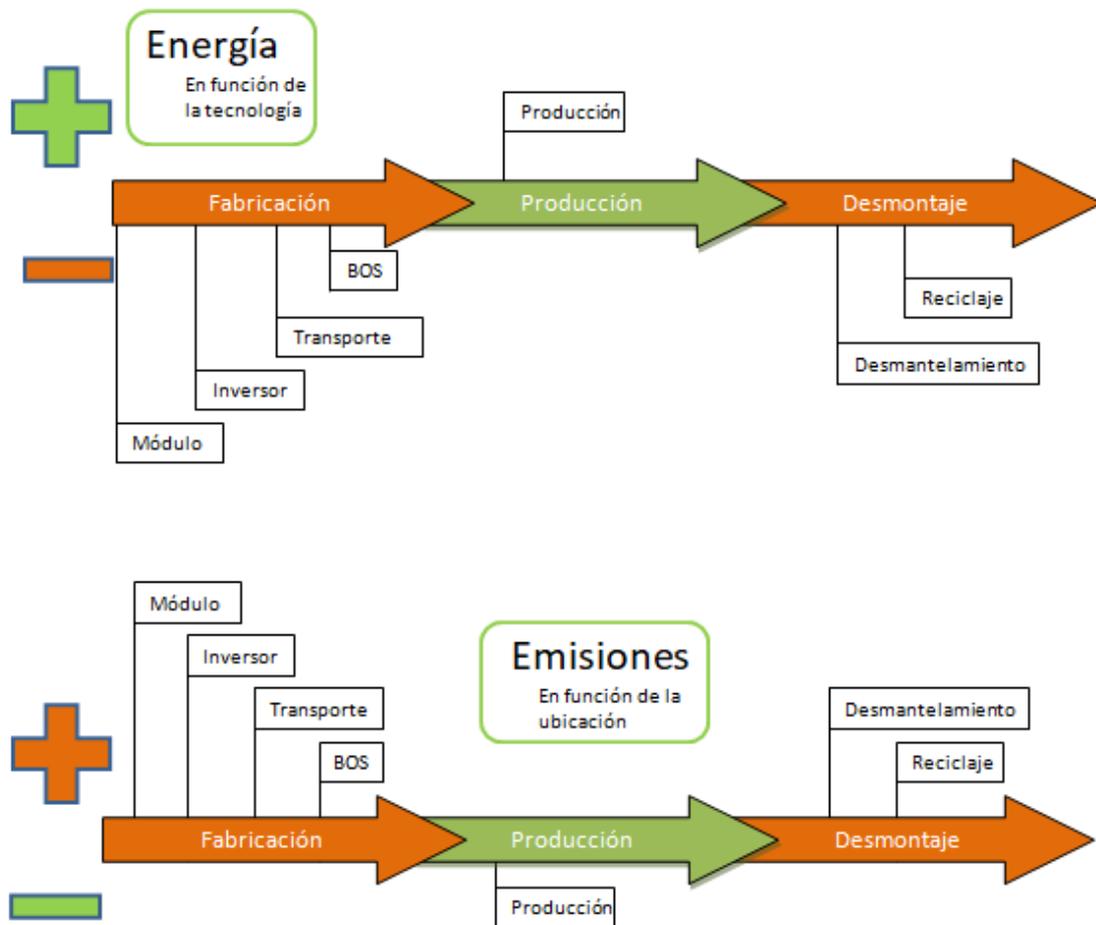


Figura 3.4 Comparativa líneas de tiempo energía y emisiones. Elaboración propia.

Adicionalmente, conocemos la definición de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía, en la que se cita que el análisis de ciclo de vida es lo siguiente: "metodología que se usa para evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todas sus etapas de existencia (extracción de materias primas, producción, distribución, uso, fin de vida). En cada una de las fases se cuantifican las entradas de energía y recursos y las posibles salidas en forma de emisiones, vertidos y residuos asociados con el sistema que se está evaluando."

3.2 Límites del sistema y definición

Las principales etapas que tendremos en cuenta con respecto al análisis de ciclo de vida en las que se producen emisiones serán la fabricación de los módulos, teniendo en cuenta todos los procesos llevados a cabo, el montaje de los equipos, la construcción de las plantas, los costes de operación de los sistemas, el desmontaje y finalmente la eliminación de residuos, además del transporte entre los puntos de extracción, fabricación e instalación, por otro lado se contrarrestarán estas emisiones teniendo en cuenta la generación eléctrica de los sistemas de estudio.

3.2.1 Emisiones generadas en la producción de los paneles

Haciendo uso de un gráfico que se mostrará posteriormente en el apartado de requerimientos energéticos, podemos ver la demanda energética de cada uno de los procesos que conlleva una instalación fotovoltaica. Estos datos se han calculado mediante la media del consumo energético de cada proceso en cada una de las tecnologías arrojando la gráfica que se muestra a continuación:

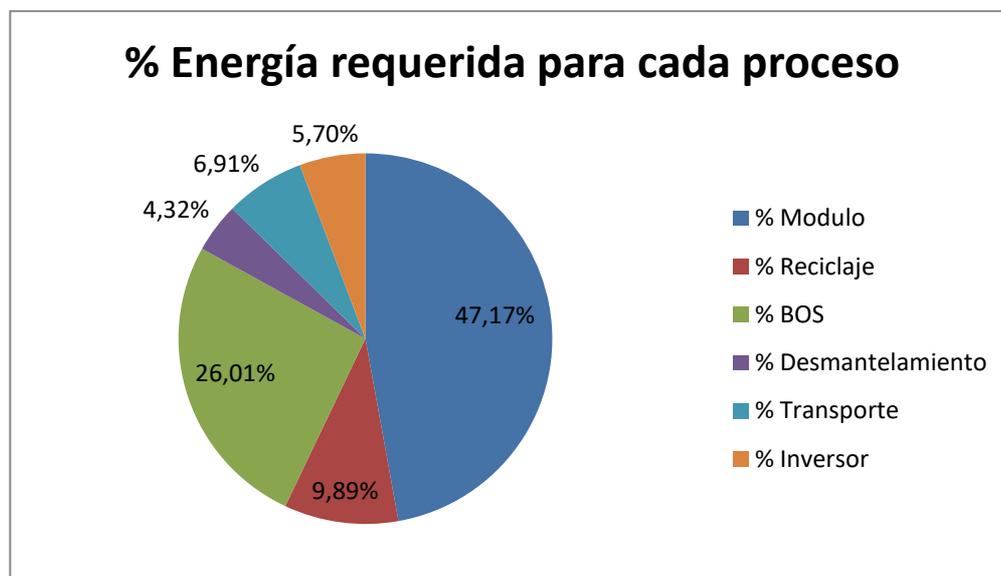


Figura 3.5 Requerimiento energético de cada etapa de la vida útil. Elaboración propia.

Con lo que podemos aproximarnos con certeza a que la mayor parte de la energía se utiliza en la fabricación de los módulos fotovoltaicos coincidiendo con la idea vista anteriormente en el trabajo (*Stopatto, 2006*). Cabe mencionar que no desglosaremos la cantidad de energía invertida en cada proceso ya que la fabricación de las distintas tecnologías cuenta con distintos métodos con lo que no tendría sentido intentar englobar técnicas que apareciesen solo en algunos de los procesos.

3.2.2 Emisiones de carbono ahorradas

Las emisiones de carbono ahorradas se consideraran como las emisiones que no han tenido lugar gracias a la instalación del sistema PV. Se calcularán en función del mix energético del país en cuestión.

El índice PCM, del inglés *Potential for CO₂ mitigation*, definido como la cantidad de emisiones de CO₂ equivalente evitadas usando un sistema particular. Depende no solo de la tecnología fotovoltaica sino también de las principales fuentes de energía eléctrica que se usen en el país. Este será uno de los valores más interesantes en este trabajo ya que haremos una comparativa teniendo en cuenta distintas ubicaciones.

$$PCM = Gen. eléctrica anual * (Vida útil - EPBT) * CO_2 \text{ (emisiones medias del país)}$$

También hemos de tener en cuenta un parámetro paralelo al EPBT pero relacionado con las emisiones evitadas en este caso, el cual se conoce como GPBT, Greenhouse-gas payback time.

$$GPBT(\text{años}) = \frac{GHG_{\text{emitido en el ciclo de vida}}}{GHG_{\text{evitados en un año de producción}}}$$

Donde GHG_{emitidos}, serán los generados por el procesado de los módulos además de las emisiones de gases de efecto invernadero del conjunto de componentes necesarios para la instalación, así como transportes o preparación del terreno, etc., y GHG_{evitados} igualmente, pero correspondiendo a la generación eléctrica durante un año de la instalación y en función del país sobre el que se realizan los cálculos y su mix energético particular. Todas las emisiones expresadas en kg CO₂-eq.

Para comparar las distintas tecnologías usaremos el índice de emisiones de CO₂, el cual es útil para determinar cómo es de efectivo un sistema fotovoltaico en términos de calentamiento global.

$$Tasa \ de \ CO_2 \left(\frac{gCO_{2eq}}{kWh} \right) = \frac{Emisión \ total \ de \ CO_{2eq} \ en \ el \ ciclo \ de \ vida \ (g \ CO_2 \ eq)}{Generación \ eléctrica \ anual \ \left(\frac{kWh}{año} \right) * Tiempo \ de \ vida \ (años)}$$

3.2.3 Tiempo de recuperación de la energía y huella de carbono

Dado que los sistemas fotovoltaicos generan electricidad, el tiempo de retorno energético (EPBT) será uno de los principales factores a tener en cuenta. Es un índice que expresa el número de años que tarda el sistema en recuperar la energía inicial consumida, aquella necesaria desde la producción de los componentes hasta el desmantelamiento y reciclado del sistema final. Se muestra a continuación la ecuación base que modela la estimación del tiempo de retorno energético en sistemas fotovoltaicos.

$$EPBT(\text{años}) = \frac{\text{Energía consumida por el sistema PV a lo largo de su vida (kWh)}}{\text{Energía eléctrica generada anualmente } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right)}$$

El índice ERF, por sus siglas en inglés *Energy return factor*, se define como el cociente entre el tiempo de funcionamiento considerado para la instalación y el tiempo de retorno energético. Representa la cantidad de veces que el sistema genera la energía que ha sido consumida en su producción.

$$ERF = \frac{\text{Tiempo de vida útil (años)}}{EPBT (\text{años})} = \frac{\text{Energía generada en su vida útil (kWh)}}{\text{Energía consumida en su vida útil (kWh)}}$$

4 TIPOLOGÍA DE LAS INSTALACIONES PV

En este apartado, trataremos la diferenciación de las instalaciones fotovoltaicas en función de su tipo de montaje, ya sea sobre suelo, donde encontraremos diferentes tipos según cuenten con estructura fija, con seguidores a un eje, con seguidores a dos ejes, o por el contrario instaladas sobre cubierta, con sus distintas variantes.

Debemos mencionar que de todas estas posibilidades, las más comunes son las instalaciones sobre soporte fijo, así como las que disponen de seguimiento a uno y dos ejes, especialmente en el caso de un eje, ya que por motivos de mantenimiento suelen ser más rentables.

4.1 Instalaciones sobre suelo

Dentro de las instalaciones sobre suelo encontraremos distintos apartados, cabe mencionar que son las más comunes para instalaciones de grandes dimensiones.

4.1.1 Instalaciones con estructura fija

Se trata de la gran mayoría de las instalaciones que conocemos, un soporte fijo provee a los paneles de la rigidez estructural y de la orientación necesaria para su óptimo funcionamiento.

Desde los inicios de las aplicaciones rurales, las estructuras de soporte de los módulos fotovoltaicos han sido sencillas y de fácil implementación, además debían ser construidas con materiales livianos y resistentes que permitieran su fácil transporte y resistencia a las inclemencias meteorológicas.

A lo largo de los años ha habido una evolución de estos sistemas de soporte ofreciéndole a los módulos fotovoltaicos mayor robustez y mayor aprovechamiento del recurso solar. Esta estructura de soporte cumple una doble función, la primera es proveer de rigidez mecánica al generador fotovoltaico asegurando el perfecto ensamblaje de los módulos y un correcto anclaje que le permita resistir a los agentes atmosféricos. La segunda de sus funciones es garantizar el mayor aprovechamiento de la radiación solar.

Las estructuras fijas pueden estar ubicadas en suelo o en cubierta plana y deben estar dispuestas de tal forma que garantice el óptimo aprovechamiento de los rayos solares. Existen diferentes estructuras que se clasifican según su soporte fijo, entre ellas, se distinguen principalmente las estructuras de soporte tipo A y las tipo V.

En las estructuras tipo A, se pueden instalar entre 4 y 5 paneles, son las más comunes en suelo. Sin embargo, la estructura tipo V, suele ser más liviana y está pensada para soportar de 2 a 5 módulos sobre cubierta plana.

4.1.2 Instalaciones con seguidores a un eje

Este tipo de instalaciones, además de disponer de una estructura que permita la correcta fijación al suelo, y las propiedades mecánicas necesarias, disponen de un sistema de seguimiento que permite optimizar la producción por un mayor aprovechamiento de las horas de sol.

El seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol durante todo el día. Se utilizan tanto en sistemas PV tradicionales, como en los sistemas de concentración ya sean PV o termosolares.

Podemos encontrar distintos tipos de seguidores a un sólo eje:

En torno al eje polar, la superficie gira sobre un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. La velocidad de giro es de 15° por hora, como la de un reloj aproximadamente.

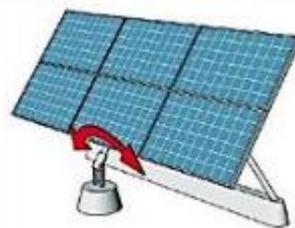


Figura 4.1 Seguidor solar sobre eje polar. Fuente: (Zyrianov, 2017)

En torno a un eje azimutal, la superficie gira sobre un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol. La velocidad de giro es variable a lo largo del día.

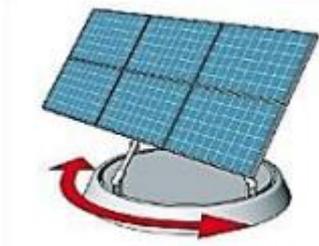


Figura 4.2 Seguidor solar sobre eje acimutal. Fuente: (Zyrianov, 2017)

En torno un eje horizontal, la superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol.

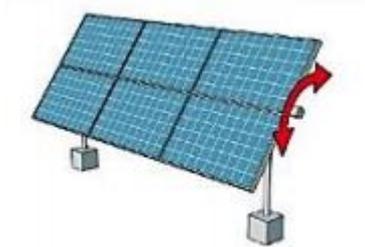


Figura 4.3 Seguidor solar sobre eje horizontal. Fuente: (Zyrianov, 2017)

El mayor beneficio de los sistemas de seguimiento solar es que ofrecen un impulso en la producción de la electricidad. Generalmente, una instalación de paneles solares con seguimiento en un eje cuenta con un aumento del rendimiento de entre el 25 y el 35%.

4.1.3 Instalaciones con seguidores a dos ejes

Se trata de una evolución de las instalaciones con seguimiento a un eje, el objetivo de las instalaciones con seguidores a dos ejes es el aprovechamiento máximo de la radiación solar a lo largo del día y del año, el seguidor estará calibrado para producir la máxima cantidad de energía eléctrica mediante la posición óptima del panel en todo momento.

Un seguidor en dos ejes, se mueve en dos ejes, uno alineado norte-sur y otro este-oeste. Este tipo de sistemas están diseñados para maximizar la producción de energía durante todo el año. Pueden variar la orientación según la estación, además de seguir al sol durante el día. Por lo tanto, cuentan con un seguimiento solar más preciso que los de un eje, con mayores rendimientos, y generalmente, dificultan el robo de los paneles solares, sin embargo, suponen un mayor coste tanto en el desembolso inicial como en el mantenimiento a lo largo de su vida útil.

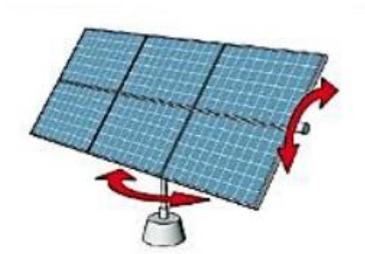


Figura 4.4 Seguidor solar sobre 2 ejes. Fuente: (Zyrianov, 2017)

Los sistemas del motor de los seguidores mecánicos pueden ser eléctricos, que son los más utilizados; hidráulicos, más apropiados para seguidores solares de gran tamaño; y accionados por gravedad, que se trata de un sistema más original que no necesita electricidad, pero que pierde control de la posición del seguidor.

Los seguidores solares pueden contar con control manual o automático. El control manual está más indicado para viviendas individuales que deseen abaratar costes. Los automáticos, cuentan con microprocesadores que determinan la posición del Sol basándose en sensores o en un programa de datos astronómicos sobre la posición del solar.

Como ya mencionamos anteriormente, el incremento de producción con el sistema de seguimiento a un solo eje puede estar en torno al 25-35%, en caso de tener instalaciones con seguimiento a dos ejes, conseguiríamos un aumento adicional del rendimiento de entre el 5 y el 10%, con lo que a priori podríamos obtener una diferencia del 40% con sistemas de estructura fija. Si la instalación se realiza en zonas de alta latitud donde la posición del sol varía drásticamente entre los meses de invierno y verano, un sistema de seguimiento solar en dos ejes hará más notable la optimización de la producción y el rendimiento del sistema solar.

Sin embargo, estos sistemas presentan desventajas. La principal es el aumento del coste de instalación y mantenimiento. Un seguidor solar cuesta más que un sistema solar fijo, porque cuenta con partes tecnológicas más complejas y móviles. Esto conduce al segundo factor de aumento de coste: el mantenimiento. Con sistemas más complejos, mayor mantenimiento, lo que añade un coste a la instalación durante su vida útil.

Otra desventaja de los seguidores solares es que normalmente son pesados como para instalarlos sobre cubierta, con lo que deberíamos tenerlos en cuenta solo en caso de instalaciones sobre terreno, lo cual limita su aplicabilidad.

4.2 Instalaciones sobre cubierta

En la actualidad las instalaciones fotovoltaicas sobre cubierta están en auge, probablemente por la mayor eficiencia que supone aprovechar una construcción ya existente y compatibilizar en ella dos usos, en lugar de ocupar nuevas extensiones de suelo.

Estas instalaciones suelen no tener una gran potencia, por las limitaciones de superficie, y principalmente se usan en ámbito doméstico.

Dos de los aspectos claves para que la instalación fotovoltaica ofrezca mayor o menor rendimiento son la inclinación y orientación del módulo. El ángulo de inclinación del módulo incide en los picos de producción de la instalación a lo largo del año, cuánto más plano se encuentre el módulo mejor para el verano, y cuanto más vertical mejor para la producción en invierno. Siempre se trata de buscar el sur a la hora de orientar los módulos, cuanto más nos desviemos hacia el amanecer más producción tendremos por las mañanas, y cuanto más nos desviemos hacia el atardecer más orientaremos nuestra generación solar hacia las tardes.

La orientación sur y una inclinación de alrededor de 30° son los puntos de partida de toda buena colocación, sobre terreno esto es fácil de conseguir seleccionando la estructura de montaje correcta pero en el caso de las instalaciones sobre cubierta habrá diferentes opciones.

4.2.1 Instalación Coplanar

Es la solución de mejor integración estética en la instalación fotovoltaica si se dispone de una cubierta inclinada de teja, consistente en colocar los módulos con la orientación e inclinación que esta disponga. En lo que respecta al rendimiento fotovoltaico cuanto más al sur se encuentre orientada mejor, una pequeña desviación de 30° al Este o el Oeste sólo presenta alrededor de un 3% de pérdidas con respecto al sur óptimo, por lo que es la colocación ideal para este tipo de cubiertas.

Si la desviación de la cubierta respecto al Sur es de 45° o más entonces se deben valorar otros tipos de colocación, ya que la pérdida de rendimiento haría necesaria la instalación de más paneles para alcanzar el mismo objetivo de producción.

En la imagen adjunta se muestra una instalación PV sobre una cubierta orientada al sur, si bien es cierto que la estructura modifica levemente la inclinación de los paneles para una optimización de la producción, de ahí que la zona posterior se encuentre un poco más alzada que la zona frontal.



Figura 4.5 Instalación coplanar sobre cubierta orientada al sur. Elaboración propia

4.2.2 Instalación orientada sobre cubierta inclinada

Cuando se dispone de una cubierta inclinada con orientación este-oeste pero se quiere orientar los módulos hacia el sur para sacar el máximo rendimiento a la instalación procedemos a realizar una instalación orientada. Los módulos se colocan sobre estructuras triangulares con 30° de inclinación sobresaliendo de la cubierta por una o dos vertientes. Obviamente con esta colocación priorizamos el rendimiento por encima de la integración estética.

En la imagen adjunta se muestra una instalación PV sobre una cubierta orientada al este, la estructura fija sobre la que se apoya le hace tener orientación sur y la inclinación adecuada.



Figura 4.6 Instalación elevada hacia orientación sur. Elaboración propia.

4.2.3 Instalación sobre cubierta plana

En cubiertas planas se podría optar por colocar los módulos coplanares posados sobre la cubierta dejándolos a 0° de inclinación, si bien, este tipo de cubierta suele disponer de pretilas laterales que permiten ocultar los módulos por lo que a efectos de integración estética no hay mayor relevancia y se busca conseguir la orientación e inclinación óptimas.

En la figura que se adjunta a continuación se muestra una instalación PV sobre una cubierta plana, la estructura fija sobre la que se apoya le hace tener orientación sur y la inclinación adecuada.



Figura 4.7 Instalación sobre cubierta plana. Elaboración propia.

5 TECNOLOGÍA DE LOS MÓDULOS PV

Las células fotovoltaicas son dispositivos productores de electricidad que pueden diferir en materiales semiconductores, tamaños y formas. Cuando muchas células solares están conectadas eléctricamente entre sí y montadas en un soporte marco, forman un módulo fotovoltaico. Se pueden conectar varios módulos para formar una matriz, tanto los módulos fotovoltaicos como las matrices producen electricidad de corriente continua (CC), y son solo una parte de un sistema fotovoltaico, el cual también incluye otros componentes como son:

Inversor: componente encargado de transformar la electricidad de corriente continua (CC) producida por los módulos en corriente alterna (CA), que se utiliza para la transmisión de la energía. Este dispositivo necesita ser reemplazado al menos una vez durante el ciclo de vida de una matriz PV ya que su vida útil es aproximadamente la mitad que la de los paneles.

Balance del sistema (BOS): Se trata de componentes para conectar todas las partes de forma segura, como cables y conectores, además de las estructuras y soportes de la instalación. También se debe tener en cuenta la caja de conexiones, la cual es una parte esencial de un sistema solar ya que se trata del sistema eléctrico que permite la conexión de múltiples módulos solares en paralelo.

Todo lo citado anteriormente se encuentra en cualquier sistema fotovoltaico pero en este apartado, el objetivo será diferenciar las distintas tecnologías que pueden implementar los paneles PV.

5.1 Paneles cristalinos

Alrededor del 90% de la tecnología fotovoltaica se basa en el uso de alguna variación del silicio. En el caso de los paneles solares destinados a uso doméstico, este porcentaje es todavía mayor.

La principal diferencia entre los diferentes tipos de módulos fotovoltaicos es la pureza del silicio utilizado. Cuanto más puro es el silicio, mejor alineadas están sus moléculas, y mejor será la conversión de la energía solar en electricidad.

De este modo, se establece una relación directa entre la pureza del silicio y la eficiencia de los paneles solares. Por el contrario, el aumento de la pureza del silicio implica procesos más caros.

El silicio cristalino es la base de las celdas monocristalinas y policristalinas. Las cuales son conocidas también como células de primera generación.

5.1.1 Silicio monocristalino (mono-Si)

Las células solares hechas de silicio monocristalino (mono-Si), son fácilmente reconocibles por un color y apariencia uniforme desde el exterior, lo que indica silicio de alta pureza.

Las células solares monocristalinas están hechas de lingotes de silicio, que son de forma cilíndrica. Para optimizar el rendimiento y reducir los costos de una sola célula solar monocristalina, se cortan cuatro lados de los lingotes cilíndricos para hacer obleas de silicio, que es lo que da a los paneles solares monocristalinos su aspecto característico.

Una buena manera de diferenciar los paneles solares monocristalinos y policristalinos es que las células solares policristalinas se ven perfectamente rectangulares sin bordes redondeados.

Las células monocristalinas destacan por estar fabricadas con silicio de muy alta pureza. Por esta razón, suelen ser las más eficientes, también en términos de espacio, lo que se traduce en la práctica en instalaciones pequeñas, de color oscuro y con celdas de bordes redondeados.

Su nivel de eficiencia medio suele estar en torno al 19.7% pudiendo llegar en casos excepcionales al 27.6% según indican los estudios revisados en la bibliografía. Las células monocristalinas son las más adecuadas para instalaciones en zonas donde la exposición a la luz solar no es muy alta por su alto rendimiento en estas condiciones.

La vida útil de este tipo de células está garantizada para aproximadamente 25 años como hemos citado en anteriores ocasiones.

Entre sus desventajas se encuentra su precio de mercado, ya que suele ser superior al de otras tecnologías por contener una mayor cantidad de silicio, además el proceso de fabricación es más costoso y cuenta con una serie de pérdidas por los cortes realizados.

Del mismo modo que destacan por su buen comportamiento en situaciones de baja exposición lumínica, como por ejemplo en días nublados, las células monocristalinas suelen rendir mejor que otros sistemas fotovoltaicos cuando las temperaturas son altas.

En definitiva, los paneles solares monocristalinos tienden a ser más eficientes en climas cálidos. El rendimiento sufre a medida que sube la temperatura, pero menos que los paneles solares policristalinos.

5.1.2 Silicio policristalino (poli-Si)

Los primeros paneles solares basados en silicio policristalino, que también se conocen como polisilicio (poli-Si) y silicio multicristalino (multi-Si), datan de los años 80. Su mayor ventaja respecto a las celdas monocristalinas parte de su proceso productivo ya que en este caso, los paneles solares policristalinos no requieren el proceso de Czochralski, lo que permite un menor coste productivo y un precio de mercado más bajo. El silicio en bruto se derrite y se vierte en un molde cuadrado, que se enfría y se corta en obleas perfectamente cuadradas, con este proceso no solo se utiliza una cantidad mucho menor de este elemento, sino que se evitan las pérdidas en la fase de producción.

Los paneles solares policristalinos tienden a ser menos estéticos que los monocristalinos y de película delgada ya que tienen un aspecto menos uniforme y un color azul característico que también los hace fácilmente reconocibles pero dificulta su integración en el medio.

Aunque estas células son más asequibles desde el punto de vista económico, cuentan con algunas desventajas. La menor tolerancia al calor hace que cuenten con una eficiencia inferior a la alternativa monocristalina. En concreto, se estima que en los paneles que incluyen estas celdas disponen de una eficiencia media del 16.4%, fundamentalmente por la menor cantidad de silicio que incorporan.

El efecto negativo que las altas temperaturas provocan sobre estas células, las hace menos atractivas que las monocristalinas para instalaciones en áreas cálidas, así como su menor ratio producción/superficie, al contar con menor eficiencia. Por lo general, necesita cubrir una superficie más grande para generar la misma energía eléctrica que con un panel solar hecho de silicio monocristalino.

5.1.3 Paneles de cinta de silicio (*Ribbon-Si*)

Los paneles solares *String Ribbon* también conocidos como "Cinta de silicio" están hechos de silicio policristalino. La tecnología cinta de silicio recibe este nombre por ser una tecnología que se fabrica a través de silicio policristalino en forma de cables resistentes a la temperatura, posteriormente se extraen a través de silicio fundido, lo que da como resultado cintas de silicio muy finas. Su aspecto es parecido a los paneles solares policristalinos tradicionales.

No han tenido una gran cuota de mercado y su futuro parece no estar claro, se trata de una de las tecnologías menos frecuentes de uso.

La fabricación de paneles solares Ribbon-Si sólo utiliza la mitad de la cantidad de silicio necesaria

para la fabricación monocristalina. Esto contribuye a reducir los costos, sin embargo su fabricación es significativamente más costosa en términos energéticos.

Su eficiencia media se sitúa en torno al 13.25%, es decir, por debajo de los paneles convencionales monocristalinos y policristalinos. En algunos estudios bajo condiciones puntuales de laboratorio de investigación, se ha conseguido aumentar la eficiencia de este tipo de células solares hasta el 18.5%. A pesar de esto, los paneles solares Ribbon-Si por lo general siguen teniendo la menor eficiencia de espacio de entre los tipos principales de paneles solares de base cristalina.

5.2 Paneles de capa delgada (*Thin film*)

Depositar una o varias capas finas de material fotovoltaico sobre un sustrato es la esencia de cómo se fabrican las células solares de película delgada. También se conocen como células fotovoltaicas de película delgada (TFPV). Los diferentes tipos de células solares de película delgada se pueden clasificar en función del material fotovoltaico que se deposita en el sustrato:

- Telururo de cadmio (CdTe)
- Silicio amorfo (a-Si)
- Seleniuro de galio de indio y cobre (CIS / CIGS)
- Células fotovoltaicas orgánicas (OPV)

Cada uno de estos tipos de módulos tendrá unas características propias como son, el coste energético de fabricación, la eficiencia, el ratio de desempeño. Exceptuando a los módulos orgánicos (OPV), los cuales son más recientes, los módulos de capa delgada suelen ser conocidos como módulos de segunda generación.

Algunas de sus características principales son entre otras, su facilidad de producción en masa. Esto los hace potencialmente más baratos de fabricar que las células solares de base cristalina. Su apariencia homogénea los hace parecer más atractivos y menos llamativos en caso de querer incorporarlos en el ámbito residencial. Pueden ser flexibles, lo que abre muchas nuevas aplicaciones potenciales, además se adaptan bien a las altas temperaturas y el sombreado tiene menos impacto en su rendimiento.

Su principal limitación es el espacio ya que sus rendimientos son bastante bajos, por este motivo no es muy común su aplicación en espacios residenciales a pesar de su precio notablemente más bajo

que el de los paneles cristalinos. Con la misma superficie instalada en paneles monocristalinos podemos obtener hasta 4 veces más producción, esta eficiencia notablemente baja significa además que tendremos que hacer un desembolso mayor en estructuras y cables para cubrir ese incremento de espacio necesario con los paneles de capa delgada.

5.2.1 Teluro de Cadmio (CdTe)

Los sistemas fotovoltaicos de teluro de cadmio (CdTe) describen una tecnología que se basa en el uso de una delgada capa semiconductor diseñada para absorber y convertir la luz solar en electricidad. Se trata de la única tecnología de capa delgada con costos inferiores a los de las células solares convencionales basadas en el uso de silicio cristalino.

El teluro de cadmio es la única tecnología de panel solar de película delgada que ha superado la rentabilidad de los paneles solares de silicio cristalino en una porción significativa del mercado (sistemas de varios kilovatios).

La eficiencia media de los paneles solares basados en teluro de cadmio usualmente se encuentra en torno al 10.47%.

Por otra parte, la toxicidad del cadmio es una preocupación ambiental que puede ser mitigada por el reciclaje de módulos de CdTe al final de su vida útil, aunque todavía hay mucha incertidumbre al respecto ya que se trata de una tecnología incipiente en el mercado, por lo que la opinión pública es escéptica. El uso de materiales no convencionales también puede convertirse en un factor limitante de la escalabilidad industrial de la tecnología CdTe en el futuro a medio plazo. La abundancia de telurio es comparable a la del platino en la corteza terrestre y contribuye significativamente al costo del módulo.

5.2.2 Silicio amorfo (a-Si)

Los paneles fotovoltaicos de silicio amorfo son un tipo de panel fotovoltaico de lámina delgada y se reconocen por su color gris oscuro.

Este tipo de panel puede responder con poca luz, y es el único tipo de panel fotovoltaico que se puede utilizar con iluminación artificial. Utilizan una cantidad enormemente baja de silicio comparadas con las células solares de silicio cristalino.

Debido a que el rendimiento de la energía eléctrica es bajo, las células solares basadas en silicio amorfo tradicionalmente solo se han usado para aplicaciones a pequeña escala, como en las

calculadoras de bolsillo. Sin embargo, las innovaciones recientes también los han hecho más atractivos para algunas aplicaciones a gran escala.

Su configuración amorfa de la materia reduce el desplazamiento de las cargas y por lo tanto baja el rendimiento que alcanza a un máximo del 10%, notablemente inferior al 16% para policristalinos y 20% para monocristalinos, comentado anteriormente.

El proceso de fabricación permite utilizar poca materia y montar paneles finos de aproximadamente 1 μm (micrómetro). Como consecuencia este tipo de panel fotovoltaico pesa menos y se puede utilizar sobre sustratos curvos. Además, su coste de fabricación es menor al de los paneles cristalinos. Sin embargo, un inconveniente importante del panel de silicio amorfo es su rápida degradación que induce una disminución del rendimiento los primeros años.

5.2.3 Paneles CIS/CIGS

En primer lugar debemos aclarar que las siglas CIS, se refieren a los elementos que componen el panel principalmente, cobre, indio y selenio. En el caso de los paneles CIGS se añade además galio.

Se trata de una tecnología menos común que los sistemas cristalinos basados en silicio, su fabricación tuvo lugar tras el auge de los sistemas fotovoltaicos convencionales y para poder reducir los costos de producción y evitar problemas ligados a la posible escasez de silicio, por estas razones se empezó a investigar e invertir en módulos de otros materiales. Con la creación de los paneles solares de capa fina, como las de silicio amorfo, se logró una reducción importante de los costos.

Una de sus peculiaridades principales es que se pueden fabricar en láminas flexibles.

En comparación con las otras tecnologías de película delgada, las células solares CIGS han demostrado el mayor potencial en términos de eficiencia ya que generalmente operan con una eficiencia media del 14.4%

Gracias a los actuales procesos, como por ejemplo, tecnologías de imprenta, se pueden fabricar en capas ultra finas, que nos permiten ahorrar una enorme cantidad de materia prima.

Los paneles CIS proporcionan un buen funcionamiento en condiciones de la luz corta, esto los hace ideales para el uso en latitudes norteafricanas e islas británicas. Aun cuando el cociente de producción/superficie es más bajo que en los paneles cristalinos, pueden proporcionar un rendimiento aceptable en días nublados ya que cada célula es una sola tira que funciona a lo largo de toda la longitud del panel, por lo que no afecta tanto el sombreado la nubosidad.

5.2.4 Paneles solares orgánicos (OPV)

Los paneles solares orgánicos, son los conocidos como sistemas de tercera generación, son módulos fotovoltaicos que utilizan células construidas con materiales especiales derivados del carbono, a diferencia de la mayoría de los citados anteriormente que están hechos de silicio. Recientemente se han conseguido diseñar células especiales capaces de aumentar la eficiencia de esta alternativa para intentar convertirla en una opción competitiva en el mercado.

Gracias a su estructura basada en el carbono, son una alternativa más económica que la fotovoltaica tradicional a priori. Debemos recordar que para fabricar las placas solares basadas en celdas inorgánicas no es necesario utilizar grandes cantidades de silicio purificado, pero el uso de otros materiales empobrece el rendimiento

De media su eficiencia está en torno al 7.5%, la más baja de las citadas en este estudio. Como característica peculiar, cabe mencionar que esta tecnología es capaz de producir electricidad utilizando no solo la parte visible de la luz, como se ha hecho hasta ahora, si no también la parte infrarroja.

Existen tres tipos de celdas solares orgánicas: moleculares, de polímeros orgánicos e híbridas, siendo las basadas en polímeros orgánicos semiconductores las más empleadas. El emplear un sustrato plástico, ya sea naftalato de polietileno (PEN) o polietileno tereftalato (PET), además, facilita la fabricación en continuo y permite abaratar aún más su producción.

Su principal problema es la rápida degradación de sus materiales, al tratarse de materiales orgánicos responden muy mal al contacto con agua y oxígeno y su vida útil es mucho más corta que la de los demás sistemas estudiados.

5.3 Paneles de alta concentración fotovoltaica (HCPV)

Los sistemas de energía solar fotovoltaica de alta concentración o por sus siglas en inglés HCPV (de High Concentrated PhotoVoltaic) son unos de los más novedosos y actualmente hay varias compañías investigando en ellos con el objetivo de superar uno de los escollos que más ha limitado el desarrollo de la energía fotovoltaica; los elevados costos de los materiales fotovoltaicos. A día de hoy, la fotovoltaica de concentración es ya una tecnología disponible para la producción de electricidad y se presenta como una alternativa más a la generación de electricidad limpia.

Toda la tecnología solar fotovoltaica, para transformar la luz solar en electricidad, se basa en

materiales semiconductores que resultan relativamente caros debido a sus costosos sistemas de fabricación , aunque en los últimos años ha habido un notable descenso en los costos. Así, para obtener volúmenes importantes de electricidad, es necesario disponer de amplias superficies de paneles fotovoltaicos, lo que en la concepción convencional de la fotovoltaica se traduce en el empleo de mucho material fotovoltaico, resultando caro.

La tecnología de concentración fotovoltaica (HCPV) plantea una ingeniosa estrategia para encarar este problema y reducir el precio de la electricidad fotovoltaica. Así, en vez de disponer el caro material fotovoltaico en toda la superficie del panel, busca concentrar la luz solar que recibe el panel, a través de elementos económicos como espejos y lentes, en uno o varios espacios reducidos dentro del panel, que serán en los que se disponga el material fotovoltaico. Con ello se consigue emplear una mucho menor cantidad de material fotovoltaico y reducir los costes de forma importante. El material fotovoltaico se encarga de transformar la energía contenida en los fotones de la luz solar en impulsos eléctricos, como en todas las demás tecnologías.

Al requerirse una menor superficie de material fotovoltaico, se hace posible emplear tecnología fotovoltaica más eficiente en la conversión de luz a electricidad. Esta, aunque sea más cara, al ser muy poca cantidad la necesitada compensará sobradamente su precio más elevado. De esta forma se obtienen paneles solares con células fotovoltaicas que tienen un rendimiento medio de entorno al 27.5%, bastante superior a cualquiera de los rendimientos de las células fotovoltaicas convencionales de silicio o capa delgada..

En resumen, esta tecnología busca, mediante el empleo de una pequeña cantidad de células fotovoltaicas muy eficaces, reducir los costos y a la vez mejorar el rendimiento

La tecnología HCPV, para poder ser usada con éxito, requiere de un clima con abundante radiación solar directa, es decir con poca presencia de nubes a lo largo del año. Según datos de algunos fabricantes, a partir de índices de radiación anual de aproximadamente 1500 kWh/m² anuales, resulta más interesante la tecnología fotovoltaica de concentración que la convencional (porque se entiende que para alcanzar ese nivel, se requerirá un número suficiente de horas de radiación solar directa).

Por ahora su uso es muy reducido, en España existen dos instalaciones experimentales, pertenecientes al ISFOC (Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración) situadas en Puertollano y en Almoguera.

6 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y EMISIONES

En este apartado haremos un análisis sobre los datos recopilados en trabajos anteriores, añadiendo los apuntes necesarios para encaminarlo hacia nuestro objetivo comparativo y posteriormente haremos un cálculo de la variación en función de los distintos montajes que podrían darse, en caso de que no estén recogidos.

Nos apoyaremos principalmente en los estudios (*Muteri et al. 2020*), (*Cebaqueba, 2019*) en el cual se realiza una revisión de otro trabajo relacionado (*Cabello-Villar, 2013*) y (*García-Valverde, Cherni & Urbina, 2009*) ya que disponen de una amplia recopilación de datos sobre las distintas tecnologías además de ser muy actuales. Por la diferencia en el año de publicación entre los trabajos, se realizará una actualización de algunos datos suponiendo un desarrollo similar en todas las tecnologías en los últimos años.

6.1 Emisiones generadas en su proceso de producción, instalación, operación y desmantelamiento.

Se estudiarán las emisiones realizadas en función de la energía usada para la fabricación de los módulos, reciclaje de los mismos, equipos de balance del sistema, desmantelamiento de la instalación, transporte y fabricación e instalación de inversores.

6.1.1 Cálculos por unidad de superficie

Este apartado dependerá principalmente de los requerimientos energéticos por unidad de superficie de cada una de las tecnologías, mediante los datos recogidos elaboramos la siguiente tabla, la cual está referida a sistemas fijos, se incrementará el coste energético en un 10% BOS y un 20% BOS para los sistemas con seguimiento a 1 y 2 ejes respectivamente:

	FIJA							+10% BOS	+20% BOS
	Energía invertida (MJ/m ²)								
	E mod	E rec	E bos	E desmant	E transport	E invers	TOTAL	1 EJE	2 EJES
Mono-Si	716.60	106.23	173.44	28.80	46.08	38.04	1109.19	1126.53	1143.88
Poli-Si	701.90	106.23	173.44	28.80	46.08	38.04	1094.49	1111.83	1129.18
a-Si	109.12	108.54	173.44	28.80	46.08	38.04	504.02	521.36	538.71
CdTe	149.42	39.65	173.44	28.80	46.08	38.04	475.43	492.77	510.12
CIS/CIGS	322.40	40.70	173.44	28.80	46.08	38.04	649.46	666.80	684.15
Ribbon-Si	506.90	76.51	173.44	28.80	46.08	38.04	869.77	887.11	904.46
HCPV	447.30	52.76	173.44	28.80	46.08	38.04	786.42	803.76	821.11
Orgánico	143.99	38.21	173.44	28.80	46.08	38.04	468.56	485.90	503.25

Tabla 6.1 Requerimiento energético de cada tecnología por unidad de superficie. Elaboración propia

Los apartados $E_{\text{módulo}}$ y $E_{\text{reciclaje}}$ serán en los que encontremos las principales diferencias, puesto que son los más dependientes del tipo de módulo, sin embargo los valores de E_{BOS} , $E_{\text{desmantelamiento}}$, $E_{\text{transporte}}$ y E_{inversor} se considerarán iguales para todos los tipos de instalación, siguiendo la metodología propuesta por (Cabello-Villar, 2013) y (Cebaqueba, 2019) ya que están expresados en m² y la variación de los componentes del sistema, estructuras, trayectos y demás es muy pequeña.

Para hallar estos valores se ha procedido a realizar la transformación de MJ_{primarios} a MJ_{eléctricos}, con el factor de conversión 0.32 recomendado para facilitar la posterior comparación entre tecnologías.

A continuación, mostraremos una figura comparativa con los requerimientos indicados en la tabla para poder visualizar mejor las diferencias:

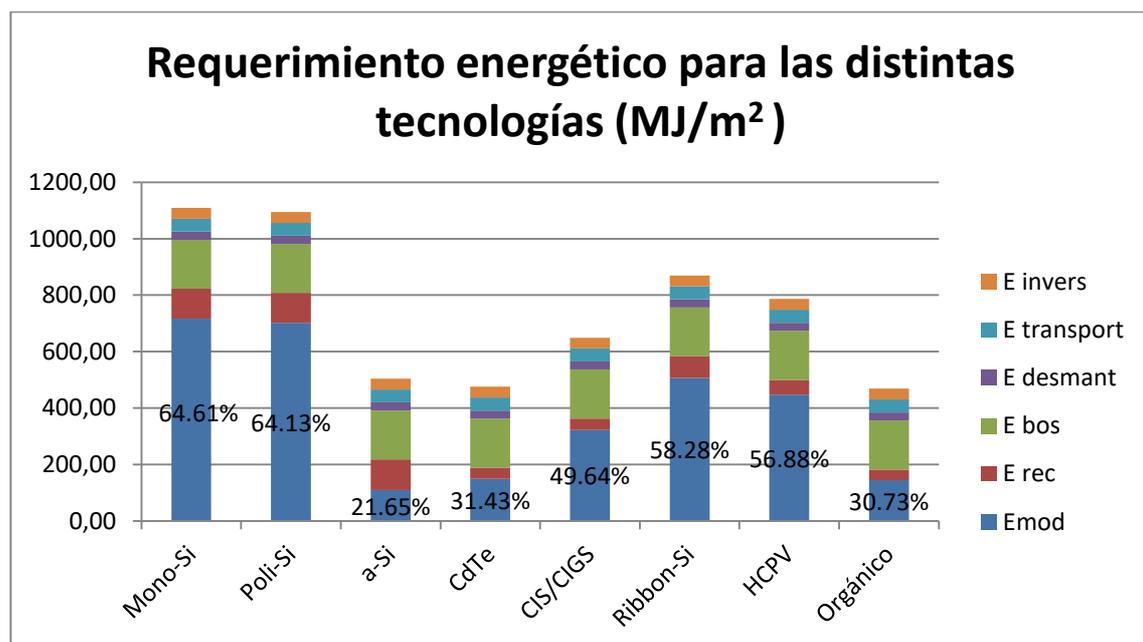


Figura 6.1 Requerimiento energético por tecnologías y ud. superficie en inst. fijas. Elaboración propia

El porcentaje que se muestra en la tabla indica la repercusión sobre el total que tiene la fabricación del módulo, podemos observar que en las tecnologías convencionales es mucho más importante que en las más actuales, esto coincide con la idea comentada a lo largo del trabajo de que se pretende usar métodos alternativos al tratamiento del silicio por su enorme coste energético.

6.1.2 Cálculos por unidad de potencia

Hemos de recordar que en el apartado anterior hemos hecho una comparativa por unidad de superficie por lo que será necesario adentrarnos ahora en el concepto del rendimiento ya que encontraremos grandes variaciones entre las distintas tecnologías.

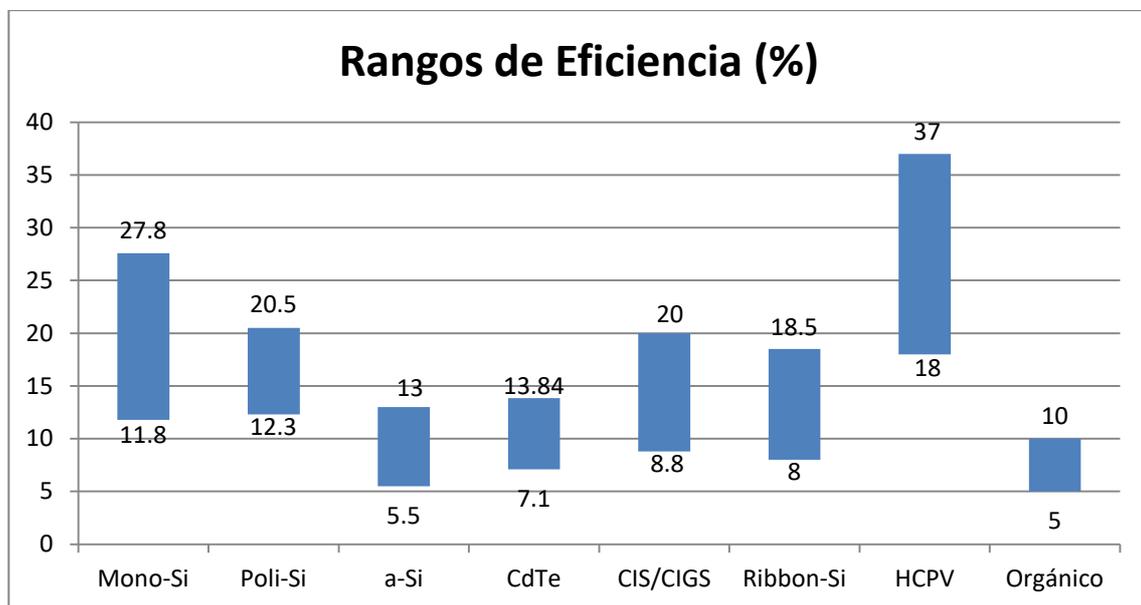


Figura 6.2 Rangos de eficiencia de las distintas tecnologías. Elaboración propia.

Esta cuestión tendrá una gran repercusión ya que encontraremos amplias diferencias en el número de metros cuadrados de instalación PV necesarios en función del rendimiento para alcanzar un mismo nivel de generación eléctrica. Ya que la eficiencia de los paneles PV se mide como la capacidad que tienen de transformar la energía solar captada por la célula PV en energía eléctrica.

Además de esto, debemos considerar otro coeficiente relacionado con el aprovechamiento de la radiación solar, el coeficiente de rendimiento, ratio de desempeño o performance rate (PR) .

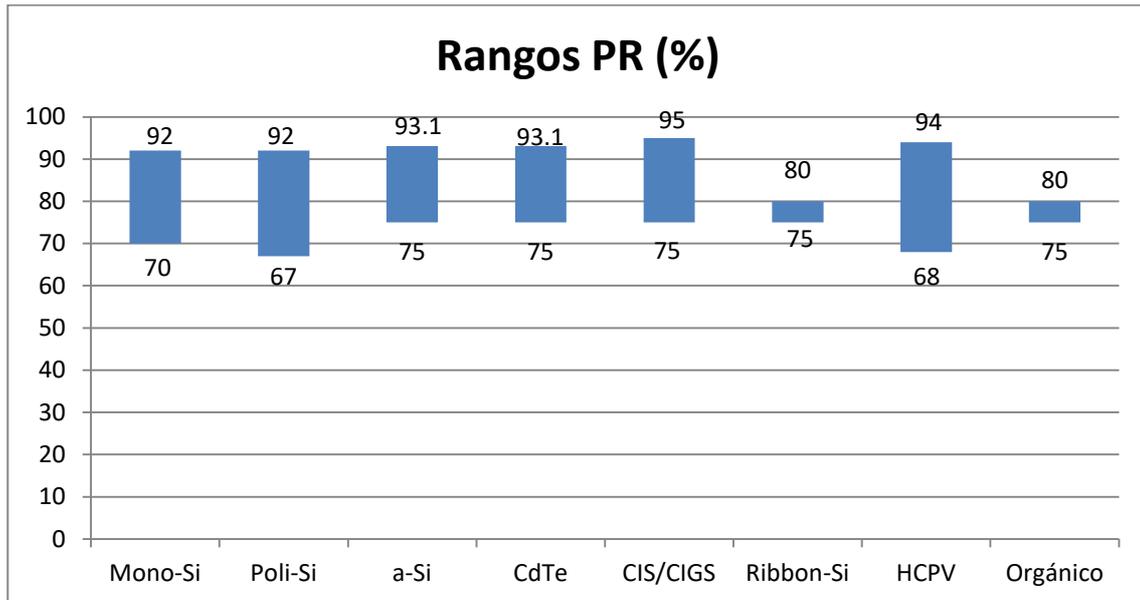


Figura 6.3 Ratio de desempeño de las distintas tecnologías. Elaboración propia.

Este coeficiente, también indica la calidad o deterioro del panel PV ya que lo que indica es la relación de la radiación que incide sobre el panel y la radiación que realmente capta.

Los parámetros citados anteriormente, limitarán la potencia que puede desarrollar cada tipo de módulo por unidad de superficie, recopilando los datos de las fuentes citadas obtenemos lo siguiente:

Potencia por m ² (Wp)		m ² por kWp	
Mono-Si	199.6	Mono-Si	5.01
Poli-Si	167.1	Poli-Si	5.98
a-Si	110.05	a-Si	9.09
CdTe	134.4	CdTe	7.44
CIS/CIGS	155.1	CIS/CIGS	6.45
Ribbon-Si	150.1	Ribbon-Si	6.66
HCPV	322	HCPV	3.11
Orgánico	30.2	Orgánico	33.11

Tabla 6.2 Potencia por m² y m² por kWp en las distintas tecnologías. Elaboración propia

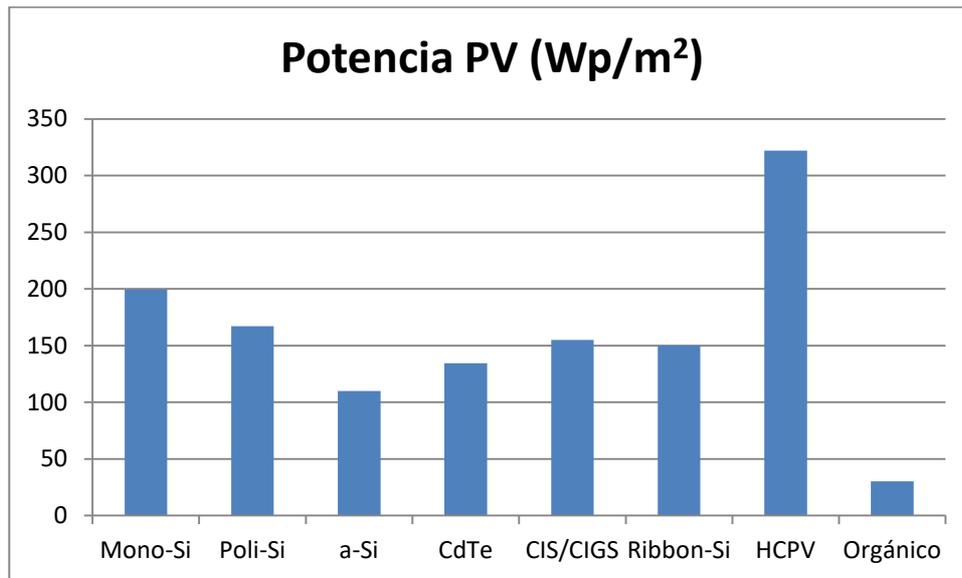


Figura 6.4 Potencia por m² en las distintas tecnologías. Elaboración propia.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo mostrado en este apartado, obtenemos los siguientes datos referidos al consumo energético por la fabricación de un kWp de cada una de las tecnologías:

	FIJA							+10% BOS 1 EJE	+20% BOS 2 EJES
	Energía por kWp (MJ/kWp)								
	E mod	E rec	E bos	E desmant	E transport	E invers	TOTAL		
Mono-Si	3590.2	532.2	868.9	144.3	230.9	190.6	5557.1	5644.0	5730.9
Poli-Si	4200.5	635.7	1037.9	172.4	275.8	227.6	6549.9	6653.7	6757.5
a-Si	991.5	986.3	1576.0	261.7	418.7	345.7	4579.9	4737.5	4895.1
CdTe	1111.8	295.0	1290.5	214.3	342.9	283.0	3537.4	3666.5	3795.5
CIS/CIGS	2078.7	262.4	1118.2	185.7	297.1	245.3	4187.4	4299.2	4411.0
Ribbon-Si	3377.1	509.7	1155.5	191.9	307.0	253.4	5794.6	5910.2	6025.7
HCPV	1389.1	163.9	538.6	89.4	143.1	118.1	2442.3	2496.2	2550.0
Orgánico	4767.9	1265.2	5743.0	953.6	1525.8	1259.6	15515.2	16089.5	16663.8

Tabla 6.3 Requerimiento energético (MJ) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia

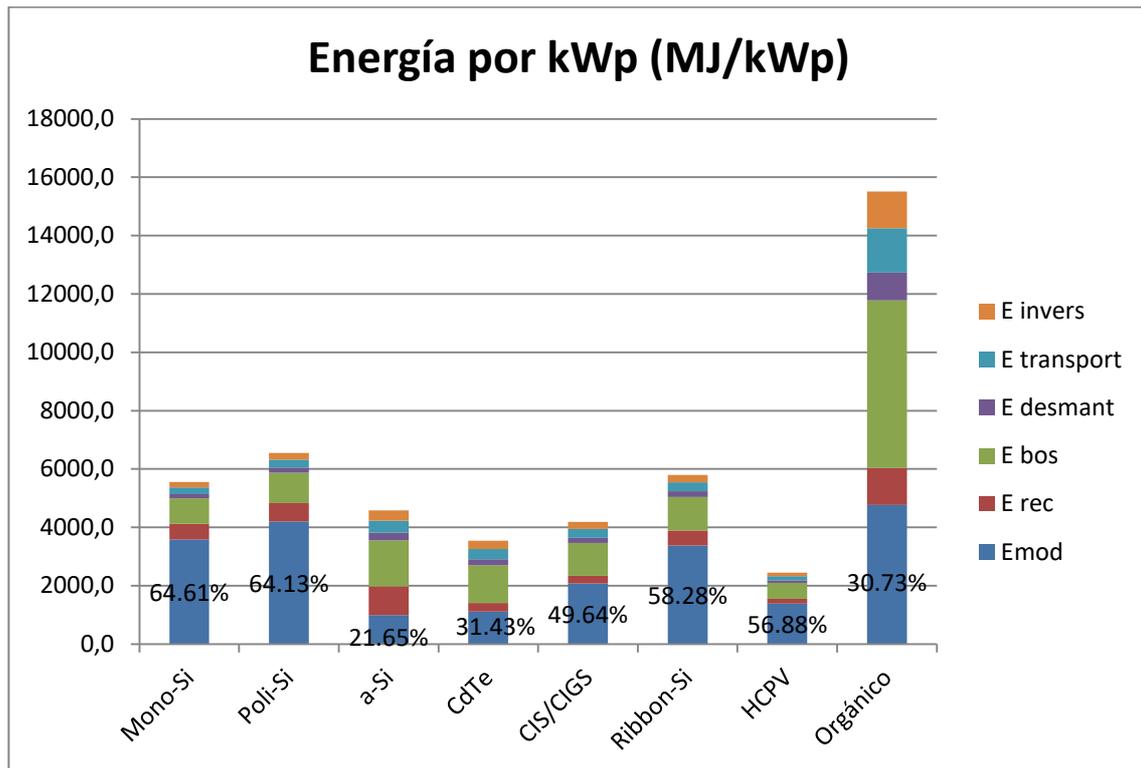


Figura 6.5 Requerimiento energético (MJ) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia

De nuevo como en el apartado anterior se muestra sobre la gráfica el porcentaje que supone la fabricación del módulo sobre cada kWp en las distintas tecnologías.

Finalmente se mostrará con el mismo formato seguido hasta ahora, el requerimiento energético de cada una de las tecnologías, por kWp y expresado en kWh, con lo que tendremos una muy fácil comparación a la hora de calcular los índices de recuperación energética y demás factores a tener en cuenta en el estudio.

	FIJA							+10% BOS 1 EJE	+20% BOS 2 EJES
	Energía por kWp (kWh/kWp)								
	E mod	E rec	E bos	E desmant	E transport	E invers	TOTAL		
Mono-Si	997.27	147.84	241.37	40.08	64.13	52.94	1543.63	1567.77	1591.90
Poli-Si	1166.80	176.59	288.32	47.88	76.60	63.24	1819.42	1848.25	1877.08
a-Si	275.43	273.97	437.78	72.69	116.31	96.02	1272.20	1315.98	1359.76
CdTe	308.82	81.95	358.47	59.52	95.24	78.62	982.62	1018.46	1054.31
CIS/CIGS	577.41	72.89	310.62	51.58	82.53	68.13	1163.16	1194.22	1225.28
Ribbon-Si	938.08	141.59	320.97	53.30	85.28	70.40	1609.61	1641.71	1673.81
HCPV	385.87	45.51	149.62	24.84	39.75	32.82	678.42	693.38	708.34
Orgánico	1324.41	351.45	1595.29	264.90	423.84	349.89	4309.79	4469.32	4628.84

Tabla 6.4 Requerimiento energético (kWh) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia

En la gráfica adjunta, así como en la tabla, se observa un incremento importante de la contribución en requerimiento energético de las partes distintas al módulo inversamente proporcional al rendimiento y la potencia que aporta cada tecnología. Esto se debe a la cantidad de estructuras, cableado y demás que hacen falta para una misma potencia ya que ocupan una superficie mayor.

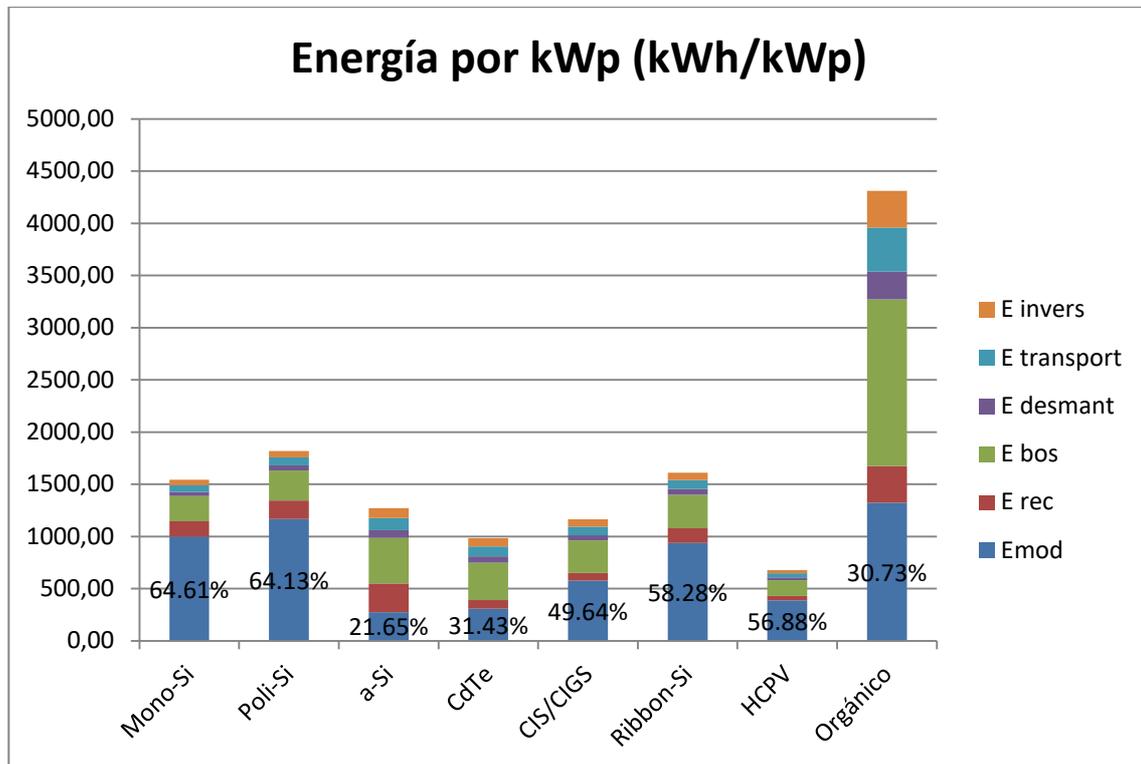


Figura 6.6 Requerimiento energético (kWh) de las distintas tecnologías por kWp. Elaboración propia

6.2 Emisiones evitadas. Análisis distintas ubicaciones

Para el cálculo de las emisiones evitadas será primordial conocer el mix energético de cada uno de los países sobre los que queramos realizar hipótesis, ya que dependerá enormemente cuales sean sus fuentes de producción de electricidad más comunes y el nivel de emisión de cada una de ellas.

En este caso nos serviremos de los datos obtenidos en la web <https://www.electricitymap.org/map> para conocer las emisiones en cada una de las distintas ubicaciones europeas del estudio, así como los valores recogidos en el estudio (Li, Chalvatzis & Pappas, 2020) para el caso de China.

Datos emisiones (gCO ₂ /kWh)	España	China	Alemania	Italia	Francia	P.Nórdicos
	140	559	319	380	86	41

Tabla 6.5 Emisiones de gCO₂ por kWh consumido en los países estudiados. Elaboración propia.

Hemos de tener en cuenta también que la generación eléctrica será dependiente de la radiación, y ésta

Análisis medioambiental del ciclo de vida de instalaciones fotovoltaicas. Impacto de su tecnología y sistema de seguimiento

a su vez de la ubicación en la que nos encontremos, por lo que se propondrán distintos escenarios. Para calcularla usaremos la siguiente expresión:

$$\textit{Generación anual} = \textit{Irradiación} \times \textit{PR} \times \textit{Eficiencia}$$

7 ESCENARIOS DE ESTUDIO

En este capítulo procederemos a calcular los índices mencionados con anterioridad para cada una de las tecnologías así como para sus distintos montajes. Para ello necesitaremos conocer el valor de irradiación en las ubicaciones de estudio el cual hallaremos mediante la base de datos de PVGIS para poder calcular la producción.

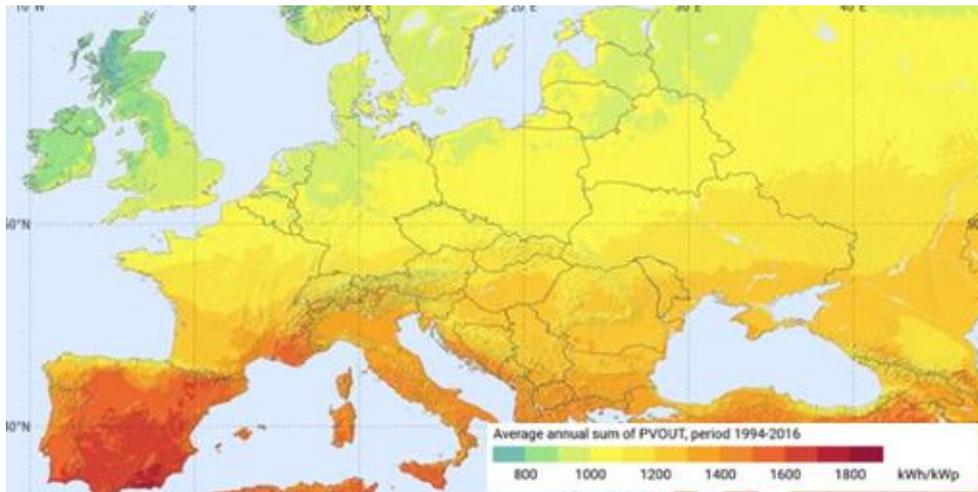


Figura 7.1 Mapa de radiación solar europeo. Fuente:(PVGIS)

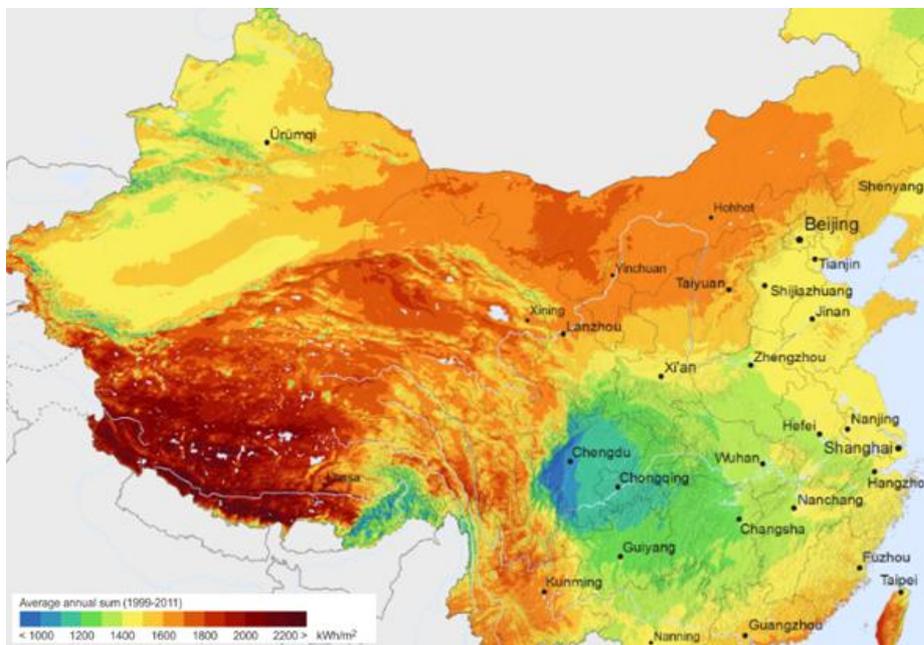


Figura 7.2 Mapa de radiación solar en China. Fuente: (PVGIS)

Tomaremos los valores arrojados por la base de datos PVGIS para cada una de las capitales de los países citados.

Radiación anual (kWh/m ²)	España	China	Alemania	Italia	Francia	P. Nórdicos
	2094.21	1400	1270.23	1927.6	1384.65	1168.07

Tabla 7.1 Radiación anual en las capitales de los distintos países de estudio. Fuente: PVGIS

Recordemos que los distintos parámetros a estudiar son los siguientes:

- Producción
- EPBT - Energy payback time
- ERF - Energy return factor
- PCM - Potential for CO₂ mitigation
- GPBT - Greenhouse-gas payback time
- Tasa CO₂

7.1 Instalación en España

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en España, donde el valor de referencia de radiación anual será de 2094.21kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1637.12	2191.22	2263.81		33.85%	38.28%
Irrad anual [kWh/m ²]	2094.21	2783.31	2884.01		32.91%	37.71%

Tabla 7.2 Irradiación anual y producción, ubicación España. Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior el incremento de producción se eleva en los sistemas con seguimiento a 1 eje y de nuevo se incrementa en los de seguimiento a 2 ejes ya que la radiación anual que incide sobre ellos es mayor.

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m2)	Fija (kWp)	1 eje (m2)	1 eje (kWp)	2 ejes (m2)	2 ejes(kWp)
Mono-Si	334.17	1674.21	444.13	2225.11	460.20	2305.62
Poli-Si	273.04	1634.01	362.89	2171.68	376.02	2250.25
a-Si	162.82	1479.48	216.39	1966.31	224.22	2037.45
CdTe	184.29	1371.21	244.93	1822.41	253.79	1888.35
CIS/CIGS	256.33	1652.68	340.68	2196.50	353.00	2275.97
Ribbon-Si	215.05	1432.71	285.81	1904.14	296.15	1973.03
HCPV	466.49	1448.71	619.98	1925.41	642.41	1995.07
Orgánico	121.73	1517.59	161.78	2016.95	167.63	2089.93

Tabla 7.3 Producción para instalación ubicada en España. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

En la columna "Requerimiento energético" se indica el valor en kWh necesarios para producir un kWp de cada una de las tecnologías y en sus diferentes montajes.

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	0.92	1567.77	0.70	1591.90	0.69
Poli-Si	1819.42	1.11	1848.25	0.85	1877.08	0.83
a-Si	1272.20	0.86	1315.98	0.67	1359.76	0.67
CdTe	982.62	0.72	1018.46	0.56	1054.31	0.56
CIS/CIGS	1163.16	0.70	1194.22	0.54	1225.28	0.54
Ribbon-Si	1609.61	1.12	1641.71	0.86	1673.81	0.85
HCPV	678.42	0.47	693.38	0.36	708.34	0.36
Orgánico	4309.79	2.84	4469.32	2.22	4628.84	2.21

Tabla 7.4 Energy payback time para instalación ubicada en España. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

ERF	Fija		1 eje		2 ejes	
	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	27.11	25.00	35.48	25.00	36.21
Poli-Si	25.00	22.45	25.00	29.37	25.00	29.97
a-Si	25.00	29.07	25.00	37.35	25.00	37.46
CdTe	25.00	34.89	25.00	44.73	25.00	44.78
CIS/CIGS	25.00	35.52	25.00	45.98	25.00	46.44
Ribbon-Si	25.00	22.25	25.00	29.00	25.00	29.47
HCPV	25.00	53.39	25.00	69.42	25.00	70.41
Orgánico	17.50	6.16	17.50	7.90	17.50	7.90

Tabla 7.5 Energy return factor para instalación ubicada en España. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

En la primera columna "Vida útil - EPBT" se muestra la cantidad de años que tiene la instalación para producir energía limpia tras haber devuelto la energía necesaria para su fabricación.

PCM	Fija		1 eje		2 ejes	
	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	24.08	5643.64	24.30	7500.68	24.31	7772.06
Poli-Si	23.89	5464.32	24.15	7262.35	24.17	7525.10
a-Si	24.14	5000.08	24.33	6645.35	24.33	6885.78
CdTe	24.28	4661.68	24.44	6195.61	24.44	6419.77
CIS/CIGS	24.30	5621.55	24.46	7471.32	24.46	7741.64
Ribbon-Si	23.88	4789.13	24.14	6364.99	24.15	6595.27
HCPV	24.53	4975.51	24.64	6612.71	24.64	6851.95
Orgánico	14.66	3114.73	15.28	4139.63	15.29	4289.40

Tabla 7.6 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en España. Elaboración propia

Greenhouse-gas payback time (GPBT):

En las siguientes tablas se muestran valores para sistemas fijos, con seguimiento a 1 eje y a 2 ejes respectivamente, y se indica con iniciales el país de producción de los sistemas PV y posteriormente la ubicación en la que se realiza la instalación y generación de electricidad. La primera columna "Gases evitados" indica los KgCO₂/año que se evitan con la producción correspondiente a cada una de las distintas tecnologías.

FIJA							
GPBT	G.evitados (España) KgCO2/año	GPBT (España - España)	GPBT (China - España)	GPBT (Alemania - España)	GPBT (Italia - España)	GPBT (Francia - España)	GPBT (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	234.39	0.92	3.6814	2.1008	2.5026	0.5664	0.2700
Poli-Si	228.76	1.11	4.4459	2.5371	3.0223	0.6840	0.3261
a-Si	207.13	0.86	3.4334	1.9593	2.3340	0.5282	0.2518
CdTe	191.97	0.72	2.8613	1.6328	1.9451	0.4402	0.2099
CIS/CIGS	231.38	0.70	2.8102	1.6037	1.9103	0.4323	0.2061
Ribbon-Si	200.58	1.12	4.4859	2.5599	3.0494	0.6901	0.3290
HCPV	202.82	0.47	1.8698	1.0670	1.2711	0.2877	0.1371
Orgánico	212.46	2.84	11.3393	6.4709	7.7083	1.7445	0.8317
1 EJE							
GPBT	G.evitados (España) KgCO2/año	GPBT (España - España)	GPBT (China - España)	GPBT (Alemania - España)	GPBT (Italia - España)	GPBT (Francia - España)	GPBT (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	311.52	0.70	2.8133	1.6054	1.9124	0.4328	0.2063
Poli-Si	304.04	0.85	3.3982	1.9392	2.3100	0.5228	0.2492
a-Si	275.28	0.67	2.6723	1.5250	1.8166	0.4111	0.1960
CdTe	255.14	0.56	2.2314	1.2734	1.5169	0.3433	0.1637
CIS/CIGS	307.51	0.54	2.1709	1.2388	1.4757	0.3340	0.1592
Ribbon-Si	266.58	0.86	3.4426	1.9645	2.3402	0.5296	0.2525
HCPV	269.56	0.36	1.4379	0.8206	0.9775	0.2212	0.1055
Orgánico	282.37	2.22	8.8477	5.0490	6.0145	1.3612	0.6489
2 EJES							
GPBT	G.evitados (España) KgCO2/año	GPBT (España - España)	GPBT (China - España)	GPBT (Alemania - España)	GPBT (Italia - España)	GPBT (Francia - España)	GPBT (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	322.79	0.69	2.7568	1.5732	1.8741	0.4241	0.2022
Poli-Si	315.04	0.83	3.3307	1.9007	2.2642	0.5124	0.2443
a-Si	285.24	0.67	2.6648	1.5207	1.8115	0.4100	0.1954
CdTe	264.37	0.56	2.2293	1.2722	1.5155	0.3430	0.1635
CIS/CIGS	318.64	0.54	2.1496	1.2267	1.4613	0.3307	0.1577
Ribbon-Si	276.22	0.85	3.3873	1.9330	2.3026	0.5211	0.2484
HCPV	279.31	0.36	1.4176	0.8090	0.9637	0.2181	0.1040
Orgánico	292.59	2.21	8.8435	5.0467	6.0117	1.3605	0.6486

Tabla 7.7 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en España. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

La siguiente tabla arroja información sobre los gCO₂ emitidos por la producción de un kWh de cada uno de los sistemas en función de su país de fabricación y siendo instalados en España.

La primera columna "Generación a lo largo de su vida" nos indica la cantidad de energía en kWh que produce cada uno de los sistemas en la ubicación establecida.

FIJA							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - España)	T.CO ₂ (China - España)	T.CO ₂ (Alemania - España)	T.CO ₂ (Italia - España)	T.CO ₂ (Francia - España)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	41855.35	5.1632	21.26	12.13	14.45	3.27	1.56
Poli-Si	40850.25	6.2354	25.69	14.66	17.46	3.95	1.88
a-Si	36987.05	4.8154	20.55	11.73	13.97	3.16	1.51
CdTe	34280.36	4.0130	17.19	9.81	11.69	2.64	1.26
CIS/CIGS	41317.10	3.9413	16.58	9.46	11.27	2.55	1.22
Ribbon-Si	35817.65	6.2915	26.12	14.91	17.76	4.02	1.92
HCPV	36217.80	2.6224	10.93	6.24	7.43	1.68	0.80
Orgánico	26557.84	22.7191	97.43	55.60	66.23	14.99	7.15
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - España)	T.CO ₂ (China - España)	T.CO ₂ (Alemania - España)	T.CO ₂ (Italia - España)	T.CO ₂ (Francia - España)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	55627.85	3.9456	15.75	8.99	10.71	2.42	1.16
Poli-Si	54292.03	4.7660	19.03	10.86	12.94	2.93	1.40
a-Si	49157.64	3.7479	14.96	8.54	10.17	2.30	1.10
CdTe	45560.32	3.1296	12.50	7.13	8.49	1.92	0.92
CIS/CIGS	54912.50	3.0447	12.16	6.94	8.26	1.87	0.89
Ribbon-Si	47603.46	4.8282	19.28	11.00	13.11	2.97	1.41
HCPV	48135.27	2.0167	8.05	4.60	5.47	1.24	0.59
Orgánico	35296.70	17.7270	70.78	40.39	48.12	10.89	5.19
2EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - España)	T.CO ₂ (China - España)	T.CO ₂ (Alemania - España)	T.CO ₂ (Italia - España)	T.CO ₂ (Francia - España)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - España)
Mono-Si	57640.47	3.8665	15.44	8.81	10.49	2.38	1.13
Poli-Si	56256.32	4.6713	18.65	10.64	12.68	2.87	1.37
a-Si	50936.16	3.7373	14.92	8.52	10.14	2.30	1.09
CdTe	47208.68	3.1266	12.48	7.12	8.49	1.92	0.92
CIS/CIGS	56899.23	3.0148	12.04	6.87	8.18	1.85	0.88
Ribbon-Si	49325.75	4.7507	18.97	10.82	12.89	2.92	1.39
HCPV	49876.80	1.9883	7.94	4.53	5.40	1.22	0.58
Orgánico	36573.73	17.7187	70.75	40.37	48.09	10.88	5.19

Tabla 7.8 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en España. Elaboración propia

7.2 Instalación en China

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en China, donde el valor de referencia de radiación anual será de 1400kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1125.76	1482.33	1521.18		31.67%	35.12%
Irrad anual [kWh/m ²]	1400	1821.38	1871.39		30.10%	33.67%

Tabla 7.9 Irradiación anual y producción, ubicación China. Elaboración propia

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m ²)	Fija (kWp)	1 eje (m ²)	1 eje (kWp)	2 ejes (m ²)	2 ejes (kWp)
Mono-Si	223.40	1119.23	290.64	1456.11	298.62	1496.08
Poli-Si	182.53	1092.35	237.47	1421.14	243.99	1460.16
a-Si	108.84	989.05	141.61	1286.74	145.49	1322.07
CdTe	123.20	916.67	160.28	1192.58	164.68	1225.32
CIS/CIGS	171.36	1104.84	222.94	1437.38	229.06	1476.84
Ribbon-Si	143.76	957.78	187.03	1246.06	192.17	1280.27
HCPV	311.85	968.48	405.71	1259.98	416.85	1294.57
Orgánico	81.38	1014.52	105.87	1319.89	108.77	1356.12

Tabla 7.10 Producción para instalación ubicada en China. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.38	1567.77	1.08	1591.90	1.06
Poli-Si	1819.42	1.67	1848.25	1.30	1877.08	1.29
a-Si	1272.20	1.29	1315.98	1.02	1359.76	1.03
CdTe	982.62	1.07	1018.46	0.85	1054.31	0.86
CIS/CIGS	1163.16	1.05	1194.22	0.83	1225.28	0.83
Ribbon-Si	1609.61	1.68	1641.71	1.32	1673.81	1.31
HCPV	678.42	0.70	693.38	0.55	708.34	0.55
Orgánico	4309.79	4.25	4469.32	3.39	4628.84	3.41

Tabla 7.11 Energy payback time para instalación ubicada en China. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

ERF	Fija		1 eje		2 ejes	
	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	18.13	25.00	23.22	25.00	23.50
Poli-Si	25.00	15.01	25.00	19.22	25.00	19.45
a-Si	25.00	19.44	25.00	24.44	25.00	24.31
CdTe	25.00	23.32	25.00	29.27	25.00	29.06
CIS/CIGS	25.00	23.75	25.00	30.09	25.00	30.13
Ribbon-Si	25.00	14.88	25.00	18.98	25.00	19.12
HCPV	25.00	35.69	25.00	45.43	25.00	45.69
Orgánico	17.50	4.12	17.50	5.17	17.50	5.13

Tabla 7.12 *Energy return factor* para instalación ubicada en China. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

PCM	Fija		1 eje		2 ejes	
	V.U -EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U -EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U -EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	23.62	14778.33	23.92	19226.46	23.94	19754.32
Poli-Si	23.33	14248.56	23.70	18537.24	23.71	19046.18
a-Si	23.71	13110.79	23.98	17057.01	23.97	17525.31
CdTe	23.93	12261.18	24.15	15951.68	24.14	16389.63
CIS/CIGS	23.95	14789.87	24.17	19241.48	24.17	19769.75
Ribbon-Si	23.32	12485.18	23.68	16243.09	23.69	16689.05
HCPV	24.30	13155.25	24.45	17114.85	24.45	17584.74
Orgánico	13.25	7515.41	14.11	9777.48	14.09	10045.92

Tabla 7.13 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en China. Elaboración propia

Greenhouse-gas payback time (GPBT):

Fija							
GPBT	G. evitados (China) KgCO ₂ /año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P. Nórdicos - China)
Mono-Si	625.65	0.35	1.3792	0.7871	0.9376	0.2122	0.1012
Poli-Si	610.62	0.42	1.6656	0.9505	1.1322	0.2562	0.1222
a-Si	552.88	0.32	1.2863	0.7340	0.8744	0.1979	0.0943
CdTe	512.42	0.27	1.0719	0.6117	0.7287	0.1649	0.0786
CIS/CIGS	617.60	0.26	1.0528	0.6008	0.7157	0.1620	0.0772
Ribbon-Si	535.40	0.42	1.6806	0.9590	1.1424	0.2585	0.1233
HCPV	541.38	0.18	0.7005	0.3997	0.4762	0.1078	0.0514
Orgánico	567.12	1.06	4.2481	2.4242	2.8878	0.6536	0.3116
1 EJE							
GPBT	G. evitados (China) KgCO ₂ /año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P. Nórdicos - China)
Mono-Si	813.96	0.27	1.0767	0.6144	0.7319	0.1656	0.0790
Poli-Si	794.42	0.33	1.3005	0.7422	0.8841	0.2001	0.0954
a-Si	719.29	0.26	1.0227	0.5836	0.6952	0.1573	0.0750
CdTe	666.65	0.21	0.8540	0.4873	0.5805	0.1314	0.0626
CIS/CIGS	803.50	0.21	0.8308	0.4741	0.5648	0.1278	0.0609
Ribbon-Si	696.55	0.33	1.3175	0.7519	0.8956	0.2027	0.0966
HCPV	704.33	0.14	0.5503	0.3140	0.3741	0.0847	0.0404
Orgánico	737.82	0.85	3.3861	1.9323	2.3018	0.5209	0.2484
2 EJES							
GPBT	G. evitados (China) KgCO ₂ /año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P. Nórdicos - China)
Mono-Si	836.31	0.27	1.0640	0.6072	0.7233	0.1637	0.0780
Poli-Si	816.23	0.32	1.2855	0.7336	0.8739	0.1978	0.0943
a-Si	739.04	0.26	1.0285	0.5869	0.6992	0.1582	0.0754
CdTe	684.95	0.22	0.8604	0.4910	0.5849	0.1324	0.0631
CIS/CIGS	825.56	0.21	0.8297	0.4735	0.5640	0.1276	0.0609
Ribbon-Si	715.67	0.33	1.3074	0.7461	0.8887	0.2011	0.0959
HCPV	723.67	0.14	0.5472	0.3122	0.3720	0.0842	0.0401
Orgánico	758.07	0.85	3.4133	1.9478	2.3203	0.5251	0.2503

Tabla 7.14 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en China. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

FIJA							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - China)	T.CO ₂ (China - China)	T.CO ₂ (Alemania - China)	T.CO ₂ (Italia - China)	T.CO ₂ (Francia - China)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	27980.71	7.7235	30.84	17.60	20.96	4.74	2.26
Poli-Si	27308.80	9.3274	37.24	21.25	25.32	5.73	2.73
a-Si	24726.20	7.2032	28.76	16.41	19.55	4.42	2.11
CdTe	22916.76	6.0029	23.97	13.68	16.29	3.69	1.76
CIS/CIGS	27620.89	5.8956	23.54	13.43	16.00	3.62	1.73
Ribbon-Si	23944.45	9.4112	37.58	21.44	25.54	5.78	2.76
HCPV	24211.96	3.9228	15.66	8.94	10.65	2.41	1.15
Orgánico	17754.18	33.9847	135.70	77.44	92.24	20.88	9.95
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - China)	T.CO ₂ (China - China)	T.CO ₂ (Alemania - China)	T.CO ₂ (Italia - China)	T.CO ₂ (Francia - China)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	36402.63	6.0294	24.07	13.74	16.37	3.70	1.77
Poli-Si	35528.48	7.2830	29.08	16.59	19.77	4.47	2.13
a-Si	32168.55	5.7272	22.87	13.05	15.55	3.52	1.68
CdTe	29814.48	4.7824	19.10	10.90	12.98	2.94	1.40
CIS/CIGS	35934.51	4.6526	18.58	10.60	12.63	2.86	1.36
Ribbon-Si	31151.50	7.3781	29.46	16.81	20.03	4.53	2.16
HCPV	31499.52	3.0817	12.30	7.02	8.36	1.89	0.90
Orgánico	23098.01	27.0891	108.16	61.72	73.53	16.64	7.93
2EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - China)	T.CO ₂ (China - China)	T.CO ₂ (Alemania - China)	T.CO ₂ (Italia - China)	T.CO ₂ (Francia - China)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	37402.07	5.9587	23.79	13.58	16.17	3.66	1.75
Poli-Si	36503.91	7.1990	28.74	16.40	19.54	4.42	2.11
a-Si	33051.74	5.7596	23.00	13.12	15.63	3.54	1.69
CdTe	30633.03	4.8184	19.24	10.98	13.08	2.96	1.41
CIS/CIGS	36921.09	4.6461	18.55	10.59	12.61	2.85	1.36
Ribbon-Si	32006.76	7.3214	29.23	16.68	19.87	4.50	2.14
HCPV	32364.34	3.0641	12.23	6.98	8.32	1.88	0.90
Orgánico	23732.17	27.3063	109.03	62.22	74.12	16.77	8.00

Tabla 7.15 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en China. Elaboración propia

7.3 Instalación en Alemania

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en Alemania, donde el valor de referencia de radiación anual será de 1270.23kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1022.05	1323.25	1353.28		29.47%	32.41%
Irrad anual [kWh/m ²]	1270.23	1620.95	1658.24		27.61%	30.55%

Tabla 7.16 Irradiación anual y producción, ubicación Alemania. Elaboración propia

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m ²)	Fija (kWp)	1 eje (m ²)	1 eje (kWp)	2 ejes (m ²)	2 ejes (kWp)
Mono-Si	202.69	1015.48	258.65	1295.87	264.61	1325.68
Poli-Si	165.61	991.10	211.34	1264.75	216.20	1293.84
a-Si	98.76	897.37	126.02	1145.14	128.92	1171.49
CdTe	111.78	831.70	142.64	1061.34	145.93	1085.76
CIS/CIGS	155.48	1002.43	198.40	1279.20	202.97	1308.63
Ribbon-Si	130.44	869.00	166.45	1108.94	170.28	1134.45
HCPV	282.94	878.71	361.07	1121.32	369.37	1147.12
Orgánico	73.83	920.49	94.22	1174.64	96.39	1201.66

Tabla 7.17 Producción para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.52	1567.77	1.21	1591.90	1.20
Poli-Si	1819.42	1.84	1848.25	1.46	1877.08	1.45
a-Si	1272.20	1.42	1315.98	1.15	1359.76	1.16
CdTe	982.62	1.18	1018.46	0.96	1054.31	0.97
CIS/CIGS	1163.16	1.16	1194.22	0.93	1225.28	0.94
Ribbon-Si	1609.61	1.85	1641.71	1.48	1673.81	1.48
HCPV	678.42	0.77	693.38	0.62	708.34	0.62
Orgánico	4309.79	4.68	4469.32	3.80	4628.84	3.85

Tabla 7.18 Energy payback time para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

ERF	Fija		1 eje		2 ejes	
	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	16.45	25.00	20.66	25.00	20.82
Poli-Si	25.00	13.62	25.00	17.11	25.00	17.23
a-Si	25.00	17.63	25.00	21.75	25.00	21.54
CdTe	25.00	21.16	25.00	26.05	25.00	25.75
CIS/CIGS	25.00	21.55	25.00	26.78	25.00	26.70
Ribbon-Si	25.00	13.50	25.00	16.89	25.00	16.94
HCPV	25.00	32.38	25.00	40.43	25.00	40.49
Orgánico	17.50	3.74	17.50	4.60	17.50	4.54

Tabla 7.19 *Energy return factor* para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

PCM	Fija		1 eje		2 ejes	
	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	23.48	7606.07	23.79	9706.16	23.80	9929.45
Poli-Si	23.16	7323.62	23.54	9345.72	23.55	9560.72
a-Si	23.58	6750.70	23.85	8614.62	23.84	8812.80
CdTe	23.82	6319.36	24.04	8064.19	24.03	8249.71
CIS/CIGS	23.84	7623.29	24.07	9728.14	24.06	9951.94
Ribbon-Si	23.15	6416.80	23.52	8188.53	23.52	8376.90
HCPV	24.23	6791.28	24.38	8666.40	24.38	8865.77
Orgánico	12.82	3763.79	13.70	4803.00	13.65	4913.49

Tabla 7.20 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

Greenhouse-gas payback time (GPBT):

Fija							
GPBT	G.evitados (Alemania) KgCO2/año	GPBT (España - Alemania)	GPBT (China - Alemania)	GPBT (Alemania - Alemania)	GPBT (Italia - Alemania)	GPBT (Francia - Alemania)	GPBT (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	323.94	0.67	2.6637	1.5201	1.8108	0.4098	0.1954
Poli-Si	316.16	0.81	3.2169	1.8358	2.1868	0.4949	0.2359
a-Si	286.26	0.62	2.4843	1.4177	1.6888	0.3822	0.1822
CdTe	265.31	0.52	2.0703	1.1815	1.4074	0.3185	0.1518
CIS/CIGS	319.77	0.51	2.0333	1.1603	1.3822	0.3128	0.1491
Ribbon-Si	277.21	0.81	3.2458	1.8523	2.2065	0.4994	0.2381
HCPV	280.31	0.34	1.3529	0.7721	0.9197	0.2081	0.0992
Orgánico	293.63	2.05	8.2047	4.6821	5.5774	1.2623	0.6018
1 EJE							
GPBT	G.evitados (Alemania) KgCO2/año	GPBT (España - Alemania)	GPBT (China - Alemania)	GPBT (Alemania - Alemania)	GPBT (Italia - Alemania)	GPBT (Francia - Alemania)	GPBT (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	413.38	0.53	2.1200	1.2098	1.4412	0.3262	0.1555
Poli-Si	403.45	0.64	2.5608	1.4614	1.7408	0.3940	0.1878
a-Si	365.30	0.50	2.0138	1.1492	1.3689	0.3098	0.1477
CdTe	338.57	0.42	1.6816	0.9596	1.1431	0.2587	0.1233
CIS/CIGS	408.07	0.41	1.6359	0.9336	1.1121	0.2517	0.1200
Ribbon-Si	353.75	0.65	2.5942	1.4804	1.7635	0.3991	0.1903
HCPV	357.70	0.27	1.0836	0.6184	0.7366	0.1667	0.0795
Orgánico	374.71	1.67	6.6674	3.8048	4.5324	1.0258	0.4890
2 EJES							
GPBT	G.evitados (Alemania) KgCO2/año	GPBT (España - Alemania)	GPBT (China - Alemania)	GPBT (Alemania - Alemania)	GPBT (Italia - Alemania)	GPBT (Francia - Alemania)	GPBT (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	422.89	0.53	2.1043	1.2008	1.4304	0.3237	0.1543
Poli-Si	412.74	0.64	2.5423	1.4508	1.7282	0.3911	0.1865
a-Si	373.70	0.51	2.0340	1.1607	1.3827	0.3129	0.1492
CdTe	346.36	0.43	1.7016	0.9710	1.1567	0.2618	0.1248
CIS/CIGS	417.45	0.41	1.6407	0.9363	1.1154	0.2524	0.1203
Ribbon-Si	361.89	0.65	2.5855	1.4754	1.7576	0.3978	0.1896
HCPV	365.93	0.27	1.0821	0.6175	0.7356	0.1665	0.0794
Orgánico	383.33	1.69	6.7501	3.8520	4.5886	1.0385	0.4951

Tabla 7.21 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

FIJA							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Alemania)	T.CO2 (China - Alemania)	T.CO2 (Alemania - Alemania)	T.CO2 (Italia - Alemania)	T.CO2 (Francia - Alemania)	T.CO2 (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	25387.10	8.5125	33.99	19.40	23.11	5.23	2.49
Poli-Si	24777.47	10.2803	41.05	23.42	27.90	6.32	3.01
a-Si	22434.26	7.9391	31.70	18.09	21.55	4.88	2.33
CdTe	20792.54	6.6162	26.42	15.08	17.96	4.06	1.94
CIS/CIGS	25060.63	6.4979	25.95	14.81	17.64	3.99	1.90
Ribbon-Si	21724.97	10.3727	41.42	23.63	28.15	6.37	3.04
HCPV	21967.68	4.3235	17.26	9.85	11.74	2.66	1.27
Orgánico	16108.49	37.4567	149.56	85.35	101.67	23.01	10.97
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Alemania)	T.CO2 (China - Alemania)	T.CO2 (Alemania - Alemania)	T.CO2 (Italia - Alemania)	T.CO2 (Francia - Alemania)	T.CO2 (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	32396.67	6.7750	27.05	15.44	18.39	4.16	1.98
Poli-Si	31618.71	8.1836	32.68	18.65	22.21	5.03	2.40
a-Si	28628.53	6.4354	25.70	14.66	17.47	3.95	1.88
CdTe	26533.51	5.3738	21.46	12.24	14.59	3.30	1.57
CIS/CIGS	31980.06	5.2280	20.87	11.91	14.19	3.21	1.53
Ribbon-Si	27723.40	8.2904	33.10	18.89	22.50	5.09	2.43
HCPV	28033.12	3.4628	13.83	7.89	9.40	2.13	1.01
Orgánico	20556.17	30.4388	121.54	69.36	82.62	18.70	8.91
2EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Alemania)	T.CO2 (China - Alemania)	T.CO2 (Alemania - Alemania)	T.CO2 (Italia - Alemania)	T.CO2 (Francia - Alemania)	T.CO2 (P.Nórdicos - Alemania)
Mono-Si	33141.95	6.7246	26.85	15.32	18.25	4.13	1.97
Poli-Si	32346.10	8.1244	32.44	18.51	22.05	4.99	2.38
a-Si	29287.13	6.5000	25.95	14.81	17.64	3.99	1.90
CdTe	27143.92	5.4378	21.71	12.39	14.76	3.34	1.59
CIS/CIGS	32715.76	5.2433	20.94	11.95	14.23	3.22	1.54
Ribbon-Si	28361.18	8.2625	32.99	18.83	22.43	5.08	2.42
HCPV	28678.02	3.4580	13.81	7.88	9.39	2.12	1.01
Orgánico	21029.06	30.8163	123.05	70.22	83.64	18.93	9.02

Tabla 7.22 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en Alemania. Elaboración propia

7.4 Instalación en Italia

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en Italia, donde el valor de referencia de radiación anual será de 1927.65 kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1511.13	1977.96	2035.62		30.89%	34.71%
Irrad anual [kWh/m ²]	1927.65	2503.77	2582.34		29.89%	33.96%

Tabla 7.23 Irradiación anual y producción, ubicación Italia. Elaboración propia

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m ²)	Fija (kWp)	1 eje (m ²)	1 eje (kWp)	2 ejes (m ²)	2 ejes (kWp)
Mono-Si	307.60	1541.06	399.53	2001.64	412.06	2064.45
Poli-Si	251.33	1504.05	326.44	1953.57	336.69	2014.87
a-Si	149.87	1361.81	194.66	1768.82	200.77	1824.33
CdTe	169.63	1262.16	220.33	1639.38	227.25	1690.82
CIS/CIGS	235.94	1521.24	306.46	1975.90	316.08	2037.90
Ribbon-Si	197.95	1318.76	257.11	1712.90	265.17	1766.65
HCPV	429.38	1333.49	557.71	1732.03	575.22	1786.39
Orgánico	112.04	1396.89	145.53	1814.38	150.10	1871.32

Tabla 7.24 Producción para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.00	1567.77	0.78	1591.90	0.77
Poli-Si	1819.42	1.21	1848.25	0.95	1877.08	0.93
a-Si	1272.20	0.93	1315.98	0.74	1359.76	0.75
CdTe	982.62	0.78	1018.46	0.62	1054.31	0.62
CIS/CIGS	1163.16	0.76	1194.22	0.60	1225.28	0.60
Ribbon-Si	1609.61	1.22	1641.71	0.96	1673.81	0.95
HCPV	678.42	0.51	693.38	0.40	708.34	0.40
Orgánico	4309.79	3.09	4469.32	2.46	4628.84	2.47

Tabla 7.25 Energy payback time para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

ERF	Fija		1 eje		2 ejes	
	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	24.96	25.00	31.92	25.00	32.42
Poli-Si	25.00	20.67	25.00	26.42	25.00	26.84
a-Si	25.00	26.76	25.00	33.60	25.00	33.54
CdTe	25.00	32.11	25.00	40.24	25.00	40.09
CIS/CIGS	25.00	32.70	25.00	41.36	25.00	41.58
Ribbon-Si	25.00	20.48	25.00	26.08	25.00	26.39
HCPV	25.00	49.14	25.00	62.45	25.00	63.05
Orgánico	17.50	5.67	17.50	7.10	17.50	7.07

Tabla 7.26 *Energy return factor* para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

PCM	Fija		1 eje		2 ejes	
	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	24.00	14053.47	24.22	18253.65	24.23	18826.46
Poli-Si	23.79	13597.11	24.05	17660.90	24.07	18215.11
a-Si	24.07	12453.79	24.26	16175.88	24.25	16683.49
CdTe	24.22	11617.09	24.38	15089.12	24.38	15562.62
CIS/CIGS	24.24	14009.78	24.40	18196.91	24.40	18767.94
Ribbon-Si	23.78	11916.55	24.04	15478.07	24.05	15963.78
HCPV	24.49	12410.36	24.60	16119.47	24.60	16625.31
Orgánico	14.41	7651.61	15.04	9938.46	15.03	10250.33

Tabla 7.27 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

Greenhouse-gas payback time (GPBT):

Fija							
GPBT	G. evitados (Italia) KgCO2/año	GPBT (España - Italia)	GPBT (China - Italia)	GPBT (Alemania - Italia)	GPBT (Italia - Italia)	GPBT (Francia - Italia)	GPBT (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	585.60	0.37	1.4735	0.8409	1.0017	0.2267	0.1081
Poli-Si	571.54	0.45	1.7795	1.0155	1.2097	0.2738	0.1305
a-Si	517.49	0.34	1.3743	0.7842	0.9342	0.2114	0.1008
CdTe	479.62	0.29	1.1452	0.6535	0.7785	0.1762	0.0840
CIS/CIGS	578.07	0.28	1.1248	0.6419	0.7646	0.1730	0.0825
Ribbon-Si	501.13	0.45	1.7955	1.0246	1.2206	0.2762	0.1317
HCPV	506.73	0.19	0.7484	0.4271	0.5088	0.1151	0.0549
Orgánico	530.82	1.14	4.5386	2.5900	3.0853	0.6982	0.3329
1 EJE							
GPBT	G. evitados (Italia) KgCO2/año	GPBT (España - Italia)	GPBT (China - Italia)	GPBT (Alemania - Italia)	GPBT (Italia - Italia)	GPBT (Francia - Italia)	GPBT (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	760.62	0.29	1.1522	0.6575	0.7832	0.1773	0.0845
Poli-Si	742.36	0.35	1.3917	0.7942	0.9461	0.2141	0.1021
a-Si	672.15	0.27	1.0944	0.6246	0.7440	0.1684	0.0803
CdTe	622.96	0.23	0.9139	0.5215	0.6213	0.1406	0.0670
CIS/CIGS	750.84	0.22	0.8891	0.5074	0.6044	0.1368	0.0652
Ribbon-Si	650.90	0.35	1.4099	0.8046	0.9584	0.2169	0.1034
HCPV	658.17	0.15	0.5889	0.3361	0.4003	0.0906	0.0432
Orgánico	689.47	0.91	3.6236	2.0679	2.4633	0.5575	0.2658
2 EJES							
GPBT	G. evitados (Italia) KgCO2/año	GPBT (España - Italia)	GPBT (China - Italia)	GPBT (Alemania - Italia)	GPBT (Italia - Italia)	GPBT (Francia - Italia)	GPBT (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	784.49	0.28	1.1343	0.6473	0.7711	0.1745	0.0832
Poli-Si	765.65	0.34	1.3705	0.7821	0.9316	0.2108	0.1005
a-Si	693.24	0.27	1.0964	0.6257	0.7453	0.1687	0.0804
CdTe	642.51	0.23	0.9173	0.5235	0.6235	0.1411	0.0673
CIS/CIGS	774.40	0.22	0.8845	0.5047	0.6012	0.1361	0.0649
Ribbon-Si	671.33	0.35	1.3937	0.7954	0.9474	0.2144	0.1022
HCPV	678.83	0.15	0.5833	0.3329	0.3965	0.0897	0.0428
Orgánico	711.10	0.91	3.6388	2.0765	2.4736	0.5598	0.2669

Tabla 7.28 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

Fija							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - Italia)	T.CO ₂ (China - Italia)	T.CO ₂ (Alemania - Italia)	T.CO ₂ (Italia - Italia)	T.CO ₂ (Francia - Italia)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	38526.44	5.6093	22.40	12.78	15.23	3.45	1.64
Poli-Si	37601.29	6.7742	27.05	15.44	18.39	4.16	1.98
a-Si	34045.33	5.2315	20.89	11.92	14.20	3.21	1.53
CdTe	31553.92	4.3597	17.41	9.93	11.83	2.68	1.28
CIS/CIGS	38031.01	4.2818	17.10	9.76	11.62	2.63	1.25
Ribbon-Si	32968.95	6.8351	27.29	15.57	18.55	4.20	2.00
HCPV	33337.27	2.8490	11.38	6.49	7.73	1.75	0.83
Orgánico	24445.60	24.6822	98.55	56.24	66.99	15.16	7.23
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - Italia)	T.CO ₂ (China - Italia)	T.CO ₂ (Alemania - Italia)	T.CO ₂ (Italia - Italia)	T.CO ₂ (Francia - Italia)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	50040.90	4.3862	17.51	9.99	11.91	2.69	1.28
Poli-Si	48839.25	5.2981	21.15	12.07	14.38	3.25	1.55
a-Si	44220.52	4.1663	16.64	9.49	11.31	2.56	1.22
CdTe	40984.49	3.4790	13.89	7.93	9.44	2.14	1.02
CIS/CIGS	49397.40	3.3846	13.51	7.71	9.19	2.08	0.99
Ribbon-Si	42822.43	5.3673	21.43	12.23	14.57	3.30	1.57
HCPV	43300.84	2.2418	8.95	5.11	6.08	1.38	0.66
Orgánico	31751.70	19.7062	78.68	44.90	53.49	12.11	5.77
2EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - Italia)	T.CO ₂ (China - Italia)	T.CO ₂ (Alemania - Italia)	T.CO ₂ (Italia - Italia)	T.CO ₂ (Francia - Italia)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - Italia)
Mono-Si	51611.22	4.3182	17.24	9.84	11.72	2.65	1.26
Poli-Si	50371.86	5.2170	20.83	11.89	14.16	3.20	1.53
a-Si	45608.19	4.1739	16.67	9.51	11.33	2.56	1.22
CdTe	42270.61	3.4919	13.94	7.96	9.48	2.15	1.02
CIS/CIGS	50947.52	3.3670	13.44	7.67	9.14	2.07	0.99
Ribbon-Si	44166.23	5.3057	21.18	12.09	14.40	3.26	1.55
HCPV	44659.65	2.2205	8.87	5.06	6.03	1.36	0.65
Orgánico	32748.09	19.7886	79.01	45.09	53.71	12.16	5.80

Tabla 7.29 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en Italia. Elaboración propia

7.5 Instalación en Francia

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en Francia, donde el valor de referencia de radiación anual será de 1384.65 kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1113.4	1433.86	1471.1		28.78%	32.13%
Irrad anual [kWh/m ²]	1384.65	1759.62	1806.47		27.08%	30.46%

Tabla 7.30 Irradiación anual y producción, ubicación Francia. Elaboración propia

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m ²)	Fija (kWp)	1 eje (m ²)	1 eje (kWp)	2 ejes (m ²)	2 ejes (kWp)
Mono-Si	220.95	1106.96	280.78	1406.73	288.26	1444.18
Poli-Si	180.53	1080.38	229.42	1372.95	235.53	1409.50
a-Si	107.65	978.20	136.80	1243.11	140.45	1276.20
CdTe	121.85	906.62	154.85	1152.14	158.97	1182.81
CIS/CIGS	169.48	1092.72	215.38	1388.64	221.11	1425.61
Ribbon-Si	142.19	947.28	180.69	1203.80	185.50	1235.86
HCPV	308.43	957.86	391.96	1217.25	402.39	1249.66
Orgánico	80.48	1003.40	102.28	1275.13	105.00	1309.08

Tabla 7.31 Producción para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.39	1567.77	1.11	1591.90	1.10
Poli-Si	1819.42	1.68	1848.25	1.35	1877.08	1.33
a-Si	1272.20	1.30	1315.98	1.06	1359.76	1.07
CdTe	982.62	1.08	1018.46	0.88	1054.31	0.89
CIS/CIGS	1163.16	1.06	1194.22	0.86	1225.28	0.86
Ribbon-Si	1609.61	1.70	1641.71	1.36	1673.81	1.35
HCPV	678.42	0.71	693.38	0.57	708.34	0.57
Orgánico	4309.79	4.30	4469.32	3.50	4628.84	3.54

Tabla 7.32 Energy payback time para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

	Fija		1 eje		2 ejes	
ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	17.93	25.00	22.43	25.00	22.68
Poli-Si	25.00	14.85	25.00	18.57	25.00	18.77
a-Si	25.00	19.22	25.00	23.62	25.00	23.46
CdTe	25.00	23.07	25.00	28.28	25.00	28.05
CIS/CIGS	25.00	23.49	25.00	29.07	25.00	29.09
Ribbon-Si	25.00	14.71	25.00	18.33	25.00	18.46
HCPV	25.00	35.30	25.00	43.89	25.00	44.11
Orgánico	17.50	4.07	17.50	4.99	17.50	4.95

Tabla 7.33 *Energy return factor* para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

	Fija		1 eje		2 ejes	
PCM	V.U -EPBT	PCM (kgCO2)	V.U -EPBT	PCM (kgCO2)	V.U -EPBT	PCM (kgCO2)
Mono-Si	23.61	2247.21	23.89	2855.76	23.90	2931.79
Poli-Si	23.32	2166.34	23.65	2752.99	23.67	2826.29
a-Si	23.70	1993.73	23.94	2533.64	23.93	2601.10
CdTe	23.92	1864.73	24.12	2369.70	24.11	2432.80
CIS/CIGS	23.94	2249.32	24.14	2858.45	24.14	2934.55
Ribbon-Si	23.30	1898.22	23.64	2412.27	23.65	2476.49
HCPV	24.29	2001.05	24.43	2542.95	24.43	2610.66
Orgánico	13.20	1139.48	14.00	1448.05	13.96	1486.61

Tabla 7.34 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

Greenhouse-gas payback time (GPBT):

Fija							
GPBT	G.evitados (Francia) KgCO2/año	GPBT (España - Francia)	GPBT (China - Francia)	GPBT (Alemania - Francia)	GPBT (Italia - Francia)	GPBT (Francia - Francia)	GPBT (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	95.20	2.27	9.0641	5.1725	6.1617	1.3945	0.6648
Poli-Si	92.91	2.74	10.9464	6.2467	7.4412	1.6841	0.8029
a-Si	84.13	2.12	8.4536	4.8241	5.7466	1.3005	0.6200
CdTe	77.97	1.76	7.0449	4.0202	4.7890	1.0838	0.5167
CIS/CIGS	93.97	1.73	6.9190	3.9484	4.7034	1.0645	0.5075
Ribbon-Si	81.47	2.77	11.0448	6.3028	7.5081	1.6992	0.8101
HCPV	82.38	1.15	4.6037	2.6272	3.1295	0.7083	0.3377
Orgánico	86.29	6.99	27.9187	15.9321	18.9787	4.2952	2.0477
1 EJE							
GPBT	G.evitados (Francia) KgCO2/año	GPBT (España - Francia)	GPBT (China - Francia)	GPBT (Alemania - Francia)	GPBT (Italia - Francia)	GPBT (Francia - Francia)	GPBT (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	120.98	1.81	7.2441	4.1339	4.9244	1.1145	0.5313
Poli-Si	118.07	2.19	8.7503	4.9934	5.9483	1.3462	0.6418
a-Si	106.91	1.72	6.8810	3.9267	4.6776	1.0586	0.5047
CdTe	99.08	1.44	5.7459	3.2789	3.9060	0.8840	0.4214
CIS/CIGS	119.42	1.40	5.5900	3.1900	3.8000	0.8600	0.4100
Ribbon-Si	103.53	2.22	8.8645	5.0586	6.0260	1.3638	0.6502
HCPV	104.68	0.93	3.7026	2.1129	2.5170	0.5696	0.2716
Orgánico	109.66	5.71	22.7825	13.0011	15.4872	3.5050	1.6710
2 EJES							
GPBT	G.evitados (Francia) KgCO2/año	GPBT (España - Francia)	GPBT (China - Francia)	GPBT (Alemania - Francia)	GPBT (Italia - Francia)	GPBT (Francia - Francia)	GPBT (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	124.20	1.79	7.1649	4.0887	4.8706	1.1023	0.5255
Poli-Si	121.22	2.17	8.6563	4.9398	5.8844	1.3317	0.6349
a-Si	109.75	1.73	6.9255	3.9521	4.7079	1.0655	0.5080
CdTe	101.72	1.45	5.7938	3.3063	3.9386	0.8914	0.4250
CIS/CIGS	122.60	1.40	5.5866	3.1881	3.7977	0.8595	0.4098
Ribbon-Si	106.28	2.20	8.8034	5.0238	5.9844	1.3544	0.6457
HCPV	107.47	0.92	3.6844	2.1025	2.5046	0.5668	0.2702
Orgánico	112.58	5.76	22.9837	13.1159	15.6240	3.5360	1.6857

Tabla 7.35 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

FIJA							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Francia)	T.CO2 (China - Francia)	T.CO2 (Alemania - Francia)	T.CO2 (Italia - Francia)	T.CO2 (Francia - Francia)	T.CO2 (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	27673.92	7.8091	31.18	17.79	21.20	4.80	2.29
Poli-Si	27009.38	9.4308	37.66	21.49	25.60	5.79	2.76
a-Si	24455.10	7.2831	29.08	16.59	19.77	4.47	2.13
CdTe	22665.49	6.0694	24.23	13.83	16.47	3.73	1.78
CIS/CIGS	27318.05	5.9610	23.80	13.58	16.18	3.66	1.75
Ribbon-Si	23681.92	9.5155	37.99	21.68	25.83	5.85	2.79
HCPV	23946.49	3.9663	15.84	9.04	10.77	2.44	1.16
Orgánico	17559.51	34.3614	137.20	78.29	93.27	21.11	10.06
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Francia)	T.CO2 (China - Francia)	T.CO2 (Alemania - Francia)	T.CO2 (Italia - Francia)	T.CO2 (Francia - Francia)	T.CO2 (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	35168.16	6.2411	24.92	14.22	16.94	3.83	1.83
Poli-Si	34323.65	7.5387	30.10	17.18	20.46	4.63	2.21
a-Si	31077.66	5.9283	23.67	13.51	16.09	3.64	1.74
CdTe	28803.42	4.9503	19.77	11.28	13.44	3.04	1.45
CIS/CIGS	34715.91	4.8160	19.23	10.97	13.07	2.96	1.41
Ribbon-Si	30095.10	7.6371	30.49	17.40	20.73	4.69	2.24
HCPV	30431.32	3.1899	12.74	7.27	8.66	1.96	0.93
Orgánico	22314.72	28.0400	111.96	63.89	76.11	17.22	8.21
2EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO2 (España - Francia)	T.CO2 (China - Francia)	T.CO2 (Alemania - Francia)	T.CO2 (Italia - Francia)	T.CO2 (Francia - Francia)	T.CO2 (P.Nórdicos - Francia)
Mono-Si	36104.51	6.1728	24.65	14.07	16.75	3.79	1.81
Poli-Si	35237.52	7.4577	29.78	16.99	20.24	4.58	2.18
a-Si	31905.10	5.9666	23.82	13.60	16.20	3.67	1.75
CdTe	29570.31	4.9916	19.93	11.37	13.55	3.07	1.46
CIS/CIGS	35640.22	4.8131	19.22	10.97	13.06	2.96	1.41
Ribbon-Si	30896.38	7.5845	30.28	17.28	20.59	4.66	2.22
HCPV	31241.55	3.1742	12.67	7.23	8.62	1.95	0.93
Orgánico	22908.85	28.2877	112.95	64.46	76.78	17.38	8.28

Tabla 7.36 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en Francia. Elaboración propia

7.6 Instalación en Países nórdicos

A continuación pasaremos a hacer el estudio de una hipotética instalación en Países Nórdicos, donde el valor de referencia de radiación anual será de 1168.07 kWh/m² para una instalación fija según los datos ofrecidos por PVGIS.

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	948.17	1283.64	1309.43		35.38%	38.10%
Irrad anual [kWh/m ²]	1168.07	1553.67	1584.69		33.01%	35.67%

Tabla 7.37 Irradiación anual y producción, ubicación Países nórdicos. Elaboración propia

Producción:

Producción	Fija		1 eje		2 ejes	
	Fija (m ²)	Fija (kWp)	1 eje (m ²)	1 eje (kWp)	2 ejes (m ²)	2 ejes (kWp)
Mono-Si	186.39	933.81	247.92	1242.08	252.87	1266.88
Poli-Si	152.29	911.39	202.57	1212.25	206.61	1236.46
a-Si	90.81	825.20	120.79	1097.61	123.20	1119.52
CdTe	102.79	764.81	136.72	1017.29	139.45	1037.60
CIS/CIGS	142.97	921.80	190.17	1226.11	193.97	1250.59
Ribbon-Si	119.95	799.11	159.54	1062.91	162.73	1084.13
HCPV	260.19	808.04	346.08	1074.78	352.99	1096.24
Orgánico	67.89	846.45	90.31	1125.88	92.11	1148.36

Tabla 7.38 Producción para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Fija		1 eje		2 ejes	
	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.65	1567.77	1.26	1591.90	1.26
Poli-Si	1819.42	2.00	1848.25	1.52	1877.08	1.52
a-Si	1272.20	1.54	1315.98	1.20	1359.76	1.21
CdTe	982.62	1.28	1018.46	1.00	1054.31	1.02
CIS/CIGS	1163.16	1.26	1194.22	0.97	1225.28	0.98
Ribbon-Si	1609.61	2.01	1641.71	1.54	1673.81	1.54
HCPV	678.42	0.84	693.38	0.65	708.34	0.65
Orgánico	4309.79	5.09	4469.32	3.97	4628.84	4.03

Tabla 7.39 Energy payback time para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia

Energy return factor (ERF):

	Fija		1 eje		2 ejes	
ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	15.12	25.00	19.81	25.00	19.90
Poli-Si	25.00	12.52	25.00	16.40	25.00	16.47
a-Si	25.00	16.22	25.00	20.85	25.00	20.58
CdTe	25.00	19.46	25.00	24.97	25.00	24.60
CIS/CIGS	25.00	19.81	25.00	25.67	25.00	25.52
Ribbon-Si	25.00	12.41	25.00	16.19	25.00	16.19
HCPV	25.00	29.78	25.00	38.75	25.00	38.69
Orgánico	17.50	3.44	17.50	4.41	17.50	4.34

Tabla 7.40 *Energy return factor* para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

	Fija		1 eje		2 ejes	
PCM	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	23.35	893.87	23.74	1188.95	23.74	1212.69
Poli-Si	23.00	859.58	23.48	1143.34	23.48	1166.17
a-Si	23.46	793.67	23.80	1055.67	23.79	1076.75
CdTe	23.72	743.64	24.00	989.13	23.98	1008.88
CIS/CIGS	23.74	897.16	24.03	1193.33	24.02	1217.15
Ribbon-Si	22.99	753.09	23.46	1001.70	23.46	1021.70
HCPV	24.16	800.42	24.35	1064.65	24.35	1085.91
Orgánico	12.41	430.63	13.53	572.79	13.47	584.22

Tabla 7.41 *Potential for CO₂ mitigation* para instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia

Greenhouse-gas Payback Time (GPBT):

FIJA							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	38.29	5.64	22.5378	12.8615	15.3209	3.4674	1.6530
Poli-Si	37.37	6.82	27.2181	15.5323	18.5024	4.1874	1.9963
a-Si	33.83	5.26	21.0196	11.9951	14.2888	3.2338	1.5417
CdTe	31.36	4.39	17.5170	9.9963	11.9078	2.6949	1.2848
CIS/CIGS	37.79	4.31	17.2039	9.8176	11.6950	2.6468	1.2618
Ribbon-Si	32.76	6.88	27.4627	15.6719	18.6687	4.2250	2.0143
HCPV	33.13	2.87	11.4470	6.5324	7.7815	1.7611	0.8396
Orgánico	34.70	17.39	69.4193	39.6150	47.1902	10.6799	5.0916
1 EJE							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	50.93	4.31	17.2092	9.8206	11.6985	2.6476	1.2622
Poli-Si	49.70	5.21	20.7872	11.8625	14.1308	3.1980	1.5246
a-Si	45.00	4.09	16.3466	9.3284	11.1122	2.5149	1.1989
CdTe	41.71	3.42	13.6499	7.7895	9.2790	2.1000	1.0012
CIS/CIGS	50.27	3.33	13.2796	7.5781	9.0272	2.0430	0.9740
Ribbon-Si	43.58	5.27	21.0586	12.0173	14.3153	3.2398	1.5445
HCPV	44.07	2.20	8.7958	5.0195	5.9793	1.3532	0.6451
Orgánico	46.16	13.55	54.1222	30.8855	36.7915	8.3265	3.9696
2 EJES							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	51.94	4.29	17.1321	9.7766	11.6461	2.6357	1.2566
Poli-Si	50.69	5.18	20.6982	11.8117	14.0703	3.1843	1.5181
a-Si	45.90	4.15	16.5598	9.4500	11.2571	2.5477	1.2146
CdTe	42.54	3.47	13.8538	7.9058	9.4176	2.1313	1.0161
CIS/CIGS	51.27	3.35	13.3583	7.6230	9.0807	2.0551	0.9798
Ribbon-Si	44.45	5.27	21.0500	12.0124	14.3095	3.2385	1.5439
HCPV	44.95	2.21	8.8098	5.0274	5.9887	1.3553	0.6462
Orgánico	47.08	13.76	54.9568	31.3618	37.3589	8.4549	4.0308

Tabla 7.42 Greenhouse-gas payback time instalación ubicada en Países nórdicos. Elaboración propia

Tasa de CO₂:

FIJA							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - P. Nórdicos)	T.CO ₂ (China - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Alemania - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Italia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Francia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	23345.31	9.2570	36.96	21.09	25.13	5.69	2.71
Poli-Si	22784.70	11.1794	44.64	25.47	30.34	6.87	3.27
a-Si	20629.96	8.6335	34.47	19.67	23.43	5.30	2.53
CdTe	19120.27	7.1948	28.73	16.39	19.53	4.42	2.11
CIS/CIGS	23045.09	7.0662	28.21	16.10	19.18	4.34	2.07
Ribbon-Si	19977.71	11.2799	45.04	25.70	30.62	6.93	3.30
HCPV	20200.90	4.7017	18.77	10.71	12.76	2.89	1.38
Orgánico	14812.94	40.7326	162.64	92.81	110.56	25.02	11.93
1 EJE							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - P. Nórdicos)	T.CO ₂ (China - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Alemania - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Italia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Francia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	31051.99	7.0684	28.22	16.11	19.19	4.34	2.07
Poli-Si	30306.33	8.5380	34.09	19.45	23.17	5.24	2.50
a-Si	27440.26	6.7141	26.81	15.30	18.22	4.12	1.97
CdTe	25432.20	5.6065	22.39	12.77	15.22	3.44	1.64
CIS/CIGS	30652.68	5.4544	21.78	12.43	14.80	3.35	1.60
Ribbon-Si	26572.70	8.6495	34.54	19.71	23.48	5.31	2.53
HCPV	26869.56	3.6127	14.43	8.23	9.81	2.22	1.06
Orgánico	19702.95	31.7569	126.80	72.36	86.20	19.51	9.30
2 EJES							
Tasa CO ₂	Generación vida (kWh)	T.CO ₂ (España - P. Nórdicos)	T.CO ₂ (China - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Alemania - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Italia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (Francia - P.Nórdicos)	T.CO ₂ (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	31671.97	7.0367	28.10	16.03	19.10	4.32	2.06
Poli-Si	30911.41	8.5014	33.95	19.37	23.08	5.22	2.49
a-Si	27988.12	6.8017	27.16	15.50	18.46	4.18	1.99
CdTe	25939.97	5.6902	22.72	12.97	15.44	3.50	1.67
CIS/CIGS	31264.68	5.4867	21.91	12.50	14.89	3.37	1.61
Ribbon-Si	27103.24	8.6459	34.52	19.70	23.47	5.31	2.53
HCPV	27406.03	3.6185	14.45	8.24	9.82	2.22	1.06
Orgánico	20096.33	32.2466	128.76	73.48	87.53	19.81	9.44

Tabla 7.43 Tasa de CO₂ evaluada en gCO₂/kWh instalación ubicada en P.nórdicos. Elaboración propia

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras los resultados obtenidos en el apartado anterior, los cuales dependen de las distintas ubicaciones en las que ha sido estudiada la posible instalación, realizaremos un promedio para hacer un análisis global de cada una de las tecnologías y sus montajes con el cual podremos tener una visión más realista del comportamiento de los sistemas estudiados.

En primer lugar mostraremos las condiciones promedio obtenidas y los valores de producción ofrecidos por PVGIS, así como los incrementos de producción al implementar seguimiento en la instalación:

PVGIS	Fija	1 eje	2 ejes	Incremento respecto sistemas fijos	1 eje	2 ejes
Prod anual PV [kWh]:	1226.27	1615.38	1659.07		31.67%	35.12%
Irrad anual [kWh/m ²]	1540.80	2007.12	2064.52		30.10%	33.67%

Tabla 8.1 Condiciones promedio de las ubicaciones estudiadas. Elaboración propia

Podemos observar que de media el incremento con seguimiento a 1 eje, es de en torno al 30% en cuanto a radiación y producción anual, un valor considerable y que hará estas instalaciones muy interesantes como veremos a continuación en los demás resultados. El incremento para 2 ejes es de en torno al 35%, teniendo en cuenta que se trata de instalaciones más costosas, con mayor mantenimiento y mayor tasa de fallo en los sistemas de seguimiento parece que serán menos interesantes a priori.

Producción:

Producción	Fija (m ²)	1 eje (m ²)	2 ejes (m ²)
Mono-Si	245.87	320.28	329.44
Poli-Si	200.89	261.69	269.17
a-Si	119.79	156.05	160.51
CdTe	135.59	176.63	181.68
CIS/CIGS	188.59	245.67	252.7
Ribbon-Si	158.22	206.11	212
HCPV	343.21	447.09	459.87
Orgánico	89.56	116.66	120

Tabla 8.2 Resultado promedio de producción por unidad de superficie. Elaboración propia.

Producción	Fija (kWp)	1 eje (kWp)	2 ejes(kWp)
Mono-Si	1231.79	1604.59	1650.48
Poli-Si	1202.21	1566.06	1610.85
a-Si	1088.52	1417.95	1458.51
CdTe	1008.86	1314.19	1351.78
CIS/CIGS	1215.95	1583.95	1629.26
Ribbon-Si	1054.1	1373.12	1412.4
HCPV	1065.88	1388.46	1428.18
Orgánico	1116.56	1454.48	1496.08

Tabla 8.3 Resultados promedio de producción por kWp. Elaboración propia

Debemos mencionar que el comportamiento de todas las tecnologías es similar en cuanto al incremento de producción con seguimiento a 1 y 2 ejes, por tanto nos centraremos principalmente en analizar el comportamiento de las tecnologías en sí.

Podemos observar que por unidad de superficie como cabía esperar la tecnología de alta concentración es la que consigue una mayor producción, sin embargo por kWp instalado los sistemas PV monocristalinos son los que mejor desempeño tienen.

Por el contrario, los sistemas orgánicos cuentan con la menor producción por unidad de superficie, y los de capa delgada de Teluro de Cadmio son menos atractivos en este sentido en cuanto al cálculo por kWp.

Cabe remarcar que estos datos se han obtenido mediante el promedio de todos los vistos anteriormente por lo que pueden verse afectados por un muy buen o muy mal rendimiento de alguna de las tecnologías en una ubicación concreta.

Podríamos concluir con que las tecnologías basadas en silicio, ya sean monocristalinas, policristalinas o de alta concentración, son las que mayor producción obtienen en todas las configuraciones de montajes posibles. Además de destacar el bajo desempeño de los paneles orgánicos por unidad de superficie, lo que nos llevará a necesitar grandes superficies para obtener producciones similares a las de otros sistemas.

Energy payback time (EPBT):

EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT	Req E	EPBT
Mono-Si	1543.63	1.25	1567.77	0.98	1591.90	0.96
Poli-Si	1819.42	1.51	1848.25	1.18	1877.08	1.17
a-Si	1272.20	1.17	1315.98	0.93	1359.76	0.93
CdTe	982.62	0.97	1018.46	0.77	1054.31	0.78
CIS/CIGS	1163.16	0.96	1194.22	0.75	1225.28	0.75
Ribbon-Si	1609.61	1.53	1641.71	1.20	1673.81	1.19
HCPV	678.42	0.64	693.38	0.50	708.34	0.50
Orgánico	4309.79	3.86	4469.32	3.07	4628.84	3.09

Tabla 8.4 Resultados promedio EPBT. Elaboración propia

En cuanto al índice referido al *Energy payback time* encontramos que los sistemas que más energía requieren para su fabricación son además los que menos producen, como vimos en el apartado anterior, los orgánicos. Además de esto su valor de EPBT es el más alto de todos, entre 3.86 años para instalaciones fijas y aproximadamente 3.08 años para las instalaciones con seguimiento. Cabe mencionar que en algunos casos el EPBT es más bajo en instalaciones con seguidores a 1 eje que en 2 ejes ya que el requerimiento energético es mayor y el incremento de producción no muy alto.

Como cabía esperar, los sistemas de menor requerimiento energético son los de alta concentración ya que necesitan pequeñas cantidades de material PV al usar lupas y cristales de aumento para maximizar la producción. En este caso el EPBT es de 0.64 años para instalación fija y 0.5 años en caso de contar con seguimiento.

Haciendo una comparativa entre las tecnologías de primera y segunda generación, las de capa delgada disponen de menores tiempos de devolución de energía por lo que son más favorables.

La mayoría de valores se encuentran en torno a 1.5 años, siendo conocedores de que la vida útil de los sistemas PV es aproximadamente de 25 años, podemos denotar de lo favorable que es la energía fotovoltaica en el ámbito de devolución energética. Lo cual veremos de nuevo con el índice ERF.

Energy return factor (ERF):

ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF	Vida útil	ERF
Mono-Si	25.00	19.95	25.00	25.59	25.00	25.92
Poli-Si	25.00	16.52	25.00	21.18	25.00	21.45
a-Si	25.00	21.39	25.00	26.94	25.00	26.82
CdTe	25.00	25.67	25.00	32.26	25.00	32.05
CIS/CIGS	25.00	26.13	25.00	33.16	25.00	33.24
Ribbon-Si	25.00	16.37	25.00	20.91	25.00	21.10
HCPV	25.00	39.28	25.00	50.06	25.00	50.41
Orgánico	17.50	4.53	17.50	5.70	17.50	5.66

Tabla 8.5 Resultados promedio ERF. Elaboración propia

El índice ERF, nos indica el número de veces que un sistema PV devolverá la energía que se usó en su fabricación, por tanto, siendo superior a 1, podemos considerarlos sistemas productores de energía.

De nuevo, los sistemas de alta concentración arrojan los valores más interesantes en este parámetro, motivados por su alta producción y su bajo requerimiento energético. En el peor lugar encontramos los sistemas orgánicos por las razones opuestas, además en esta ocasión se suma que su vida útil es más corta por lo que el tiempo de generación de energía se reduce.

Todos los sistemas disponen de ERF superiores a 1, el valor más bajo es 4.53 para instalaciones orgánicas fijas y el valor más alto lo encontramos en instalaciones HCPV con seguimiento a 2 ejes, las cuales devuelven 50.41 veces la energía consumida en su fabricación.

En este apartado vemos también que las tecnologías de capa delgada tienen mayor ERF que las de primera generación, sistemas de silicio convencionales, con valores de ERF en torno a 25, y menores a 20 respectivamente.

Potential for CO₂ mitigation (PCM):

PCM	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)	V.U - EPBT	PCM (kgCO ₂)
Mono-Si	23.75	7537.10	24.02	9788.61	24.04	10071.13
Poli-Si	23.49	7276.59	23.82	9450.42	23.83	9723.26
a-Si	23.83	6683.79	24.07	8680.36	24.07	8930.87
CdTe	24.03	6244.62	24.23	8109.91	24.22	8343.90
CIS/CIGS	24.04	7531.83	24.25	9781.61	24.25	10063.83
Ribbon-Si	23.47	6376.49	23.80	8281.44	23.81	8520.53
HCPV	24.36	6688.98	24.50	8686.84	24.50	8937.39
Orgánico	13.64	3935.94	14.43	5113.23	14.41	5261.66

Tabla 8.6 Resultados promedio PCM. Elaboración propia

El índice PCM, *Potential for CO₂ mitigation*, nos dará información sobre la cantidad de emisiones que puede evitar un sistema, es decir, la cantidad de emisiones que dejan de producirse gracias a haber obtenido energía eléctrica mediante el uso de sistemas PV.

De nuevo los mejores valores se encuentran en HCPV y los peores en los sistemas orgánicos, era de esperar ya que este índice está íntimamente ligado con el EPBT, la vida útil y la producción. Entre los sistemas de primera y segunda generación vemos valores muy similares, ya que como habíamos identificado anteriormente unos tienen mayor producción y otros menor EPBT.

Los sistemas HCPV con seguimiento a 2 ejes disponen de capacidad para evitar en torno a 8937.39 kg CO₂ equivalentes, a lo largo de su vida útil. Los sistemas más pobres con respecto a este índice disponen de valores aproximados a 3935.94 kg CO₂ equivalentes, los sistemas orgánicos fijos.

Este índice nos muestra claramente la gran ayuda medioambiental que supone el uso de sistemas PV respecto a sistemas convencionales por la notable cantidad de emisiones evitadas.

Greenhouse-gas Payback Time (GPBT):

GPBT					
FIJA	G.evitados (PROM)	1 EJE	G.evitados (PROM)	2 EJES	G.evitados (PROM)
Mono-Si	317.18	Mono-Si	411.90	Mono-Si	423.77
Poli-Si	309.56	Poli-Si	402.01	Poli-Si	413.59
a-Si	280.29	a-Si	363.99	a-Si	374.48
CdTe	259.77	CdTe	337.35	CdTe	347.08
CIS/CIGS	313.10	CIS/CIGS	406.60	CIS/CIGS	418.32
Ribbon-Si	271.42	Ribbon-Si	352.48	Ribbon-Si	362.64
HCPV	274.46	HCPV	356.42	HCPV	366.69
Orgánico	287.51	Orgánico	373.36	Orgánico	384.13

Tabla 8.7 Resultados GPBT, gases evitados promedio. Elaboración propia.

El índice, *Greenhouse-gas payback time*, nos indica el tiempo que tarda el sistema en devolver las emisiones generadas, es decir, el tiempo necesario para tener un balance nulo de emisiones, esto dependerá del país de origen y el país de instalación.

Para mostrar unos resultados más feacientes los calcularemos en base al caso más favorable y al más desfavorable, con lo que conoceremos ambos extremos del rango GPBT. Es evidente que la circunstancia más favorable de cara a este índice sería fabricar los sistemas en el país de menor emisión de CO₂, en nuestro caso, los países nórdicos, e instalarlo en el lugar de mayores emisiones, China. Por el contrario y como parece más cercano a la realidad calcularemos el GPBT de sistemas producidos en China pero instalados en los países nórdicos.

FIJA							
GPBT	G.evitados (China) KgCO2/año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	317.18	0.68	2.7205	1.5525	1.8494	0.4185	0.1995
Poli-Si	309.56	0.82	3.2855	1.8749	2.2334	0.5055	0.2410
a-Si	280.29	0.64	2.5373	1.4479	1.7248	0.3903	0.1861
CdTe	259.77	0.53	2.1145	1.2066	1.4374	0.3253	0.1551
CIS/CIGS	313.10	0.52	2.0767	1.1851	1.4117	0.3195	0.1523
Ribbon-Si	271.42	0.83	3.3150	1.8917	2.2535	0.5100	0.2431
HCPV	274.46	0.35	1.3818	0.7885	0.9393	0.2126	0.1013
Orgánico	287.51	2.10	8.3796	4.7819	5.6963	1.2892	0.6146
1 EJE							
GPBT	G.evitados (China) KgCO2/año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	411.90	0.53	2.1277	1.2142	1.4464	0.3273	0.1561
Poli-Si	402.01	0.64	2.5700	1.4666	1.7471	0.3954	0.1885
a-Si	363.99	0.51	2.0210	1.1533	1.3739	0.3109	0.1482
CdTe	337.35	0.42	1.6876	0.9631	1.1472	0.2596	0.1238
CIS/CIGS	406.60	0.41	1.6418	0.9369	1.1161	0.2526	0.1204
Ribbon-Si	352.48	0.65	2.6036	1.4858	1.7699	0.4006	0.1910
HCPV	356.42	0.27	1.0875	0.6206	0.7393	0.1673	0.0798
Orgánico	373.36	1.68	6.6914	3.8186	4.5487	1.0295	0.4908
2 EJES							
GPBT	G.evitados (China) KgCO2/año	GPBT (España - China)	GPBT (China - China)	GPBT (Alemania - China)	GPBT (Italia - China)	GPBT (Francia - China)	GPBT (P.Nórdicos - China)
Mono-Si	423.77	0.53	2.0999	1.1983	1.4275	0.3231	0.1540
Poli-Si	413.59	0.64	2.5370	1.4478	1.7246	0.3903	0.1861
a-Si	374.48	0.51	2.0298	1.1583	1.3798	0.3123	0.1489
CdTe	347.08	0.43	1.6981	0.9690	1.1543	0.2612	0.1245
CIS/CIGS	418.32	0.41	1.6373	0.9344	1.1130	0.2519	0.1201
Ribbon-Si	362.64	0.65	2.5801	1.4724	1.7539	0.3969	0.1892
HCPV	366.69	0.27	1.0798	0.6162	0.7340	0.1661	0.0792
Orgánico	384.13	1.69	6.7361	3.8441	4.5791	1.0363	0.4941

Tabla 8.8 Resultados GPBT ubicación China valores de producción promedio. Elaboración propia

Se repite de nuevo el patrón, en el que los mejores valores se dan en HCPV y los peores en sistemas orgánicos. Además de esto se observan unos valores muy bajos, inferiores en algunos casos a 0.1 años, con lo que podemos asegurar que es una gran medida de cara a mitigar las emisiones.

Entre los sistemas de primera y segunda generación, los cuales están más desarrollados que orgánicos y HCPV, encontramos una ligera ventaja en el caso de los de capa delgada, su menor requerimiento energético hace menor su impacto ambiental.

También cabe mencionar que como en los casos anteriores, los sistemas con seguimiento a 2 ejes, arrojan los mejores datos seguidos muy de cerca de los sistemas con seguimiento a 1 eje, lo cual en la vertiente económica y práctica los haría más interesantes a priori.

FIJA							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	317.18	0.68	2.7205	1.5525	1.8494	0.4185	0.1995
Poli-Si	309.56	0.82	3.2855	1.8749	2.2334	0.5055	0.2410
a-Si	280.29	0.64	2.5373	1.4479	1.7248	0.3903	0.1861
CdTe	259.77	0.53	2.1145	1.2066	1.4374	0.3253	0.1551
CIS/CIGS	313.10	0.52	2.0767	1.1851	1.4117	0.3195	0.1523
Ribbon-Si	271.42	0.83	3.3150	1.8917	2.2535	0.5100	0.2431
HCPV	274.46	0.35	1.3818	0.7885	0.9393	0.2126	0.1013
Orgánico	287.51	2.10	8.3796	4.7819	5.6963	1.2892	0.6146
1 EJE							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	411.90	0.53	2.1277	1.2142	1.4464	0.3273	0.1561
Poli-Si	402.01	0.64	2.5700	1.4666	1.7471	0.3954	0.1885
a-Si	363.99	0.51	2.0210	1.1533	1.3739	0.3109	0.1482
CdTe	337.35	0.42	1.6876	0.9631	1.1472	0.2596	0.1238
CIS/CIGS	406.60	0.41	1.6418	0.9369	1.1161	0.2526	0.1204
Ribbon-Si	352.48	0.65	2.6036	1.4858	1.7699	0.4006	0.1910
HCPV	356.42	0.27	1.0875	0.6206	0.7393	0.1673	0.0798
Orgánico	373.36	1.68	6.6914	3.8186	4.5487	1.0295	0.4908
2 EJES							
GPBT	G.evitados (P.Nórdicos) KgCO2/año	GPBT (España - P.Nórdicos)	GPBT (China - P.Nórdicos)	GPBT (Alemania - P.Nórdicos)	GPBT (Italia - P.Nórdicos)	GPBT (Francia - P.Nórdicos)	GPBT (P.Nórdicos - P.Nórdicos)
Mono-Si	423.77	0.53	2.0999	1.1983	1.4275	0.3231	0.1540
Poli-Si	413.59	0.64	2.5370	1.4478	1.7246	0.3903	0.1861
a-Si	374.48	0.51	2.0298	1.1583	1.3798	0.3123	0.1489
CdTe	347.08	0.43	1.6981	0.9690	1.1543	0.2612	0.1245
CIS/CIGS	418.32	0.41	1.6373	0.9344	1.1130	0.2519	0.1201
Ribbon-Si	362.64	0.65	2.5801	1.4724	1.7539	0.3969	0.1892
HCPV	366.69	0.27	1.0798	0.6162	0.7340	0.1661	0.0792
Orgánico	384.13	1.69	6.7361	3.8441	4.5791	1.0363	0.4941

Tabla 8.9 Resultados GPBT ubicación P. nórdicos valores de producción promedio. Elaboración propia

Como esperabamos, el caso más desfavorable se muestra en la situación de sistemas con origen China, país con más emisiones de los estudiados e instalación en países nórdicos, el lugar donde menos emisiones se dan, por tanto donde más dificultad existe para evitarlas.

Los valores más favorables están en torno a 1 año, para sistemas HCPV con seguimiento a dos ejes, un valor muy similar al de seguimiento a 1 solo eje. Por el contrario, las peores cifras las encontramos en los paneles orgánicos, cuya vida útil promedio es de 17.5 años y en caso de instalación fija tardarían 8.3796 años en balancear sus emisiones de fabricación bajo esta hipótesis.

De nuevo en la comparativa entre sistemas de primera y segunda generación sigue apreciándose una ligera ventaja para los de capa delgada, con valores en torno a los 2 años, mientras que los basados en silicio se aproximan más a 3 años.

Tasa de CO₂:

Tasa de CO ₂					
Fija	Generación vida (kWh)	1 eje	Generación vida (kWh)	2 ejes	Generación vida (kWh)
Mono-Si	30794.80	Mono-Si	40114.70	Mono-Si	41262.03
Poli-Si	30055.31	Poli-Si	39151.41	Poli-Si	40271.19
a-Si	27212.98	a-Si	35448.86	a-Si	36462.74
CdTe	25221.56	CdTe	32854.74	CdTe	33794.42
CIS/CIGS	30398.79	CIS/CIGS	39598.84	CIS/CIGS	40731.42
Ribbon-Si	26352.61	Ribbon-Si	34328.10	Ribbon-Si	35309.92
HCPV	26647.02	HCPV	34711.61	HCPV	35704.40
Orgánico	19539.76	Orgánico	25453.37	Orgánico	26181.37

Tabla 8.10 Resultados Tasa CO₂, generación en vida con datos promedio. Elaboración propia.

Como en el caso anterior, el índice Tasa de CO₂ también depende de la ubicación en la que se origine el sistema y en la que se instale, ya que a lo largo de su vida útil la generación eléctrica será mayor o menor en función de esto, así como las emisiones generadas y evitadas. El índice nos indica los gCO₂ emitidos por la generación de cada kWh, siendo así, los sistemas que más produzcan y menos emisiones hayan tenido en su fabricación serán los que den mejores resultados.

Por lo citado anteriormente y al estar contando con datos de radiación promedio, el caso más favorable será la fabricación en países nórdicos ya que habría arrojado unas menores emisiones y por el contrario, el más desfavorable de nuevo China.

FIJA							
Tasa CO2	Generación vida (kWh)	T.CO2 Origen España	T.CO2 Origen China	T.CO2 Origen Alemania	T.CO2 Origen Italia	T.CO2 Origen Francia	T.CO2 Origen P.Nórdicos
Mono-Si	30794.80	7.01	28.02	15.99	19.05	4.31	2.06
Poli-Si	30055.31	8.47	33.84	19.31	23.00	5.21	2.48
a-Si	27212.98	6.54	26.13	14.91	17.76	4.02	1.92
CdTe	25221.56	5.45	21.78	12.43	14.80	3.35	1.60
CIS/CIGS	30398.79	5.35	21.39	12.21	14.54	3.29	1.57
Ribbon-Si	26352.61	8.55	34.14	19.48	23.21	5.25	2.50
HCPV	26647.02	3.56	14.23	8.12	9.67	2.19	1.04
Orgánico	19539.76	30.87	123.30	70.36	83.81	18.97	9.04
1 EJE							
Tasa CO2	Generación vida (kWh)	T.CO2 Origen España	T.CO2 Origen China	T.CO2 Origen Alemania	T.CO2 Origen Italia	T.CO2 Origen Francia	T.CO2 Origen P.Nórdicos
Mono-Si	40114.70	5.47	21.85	12.47	14.85	3.36	1.60
Poli-Si	39151.41	6.60	26.39	15.06	17.94	4.06	1.94
a-Si	35448.86	5.19	20.75	11.84	14.11	3.19	1.52
CdTe	32854.74	4.33	17.33	9.89	11.78	2.67	1.27
CIS/CIGS	39598.84	4.22	16.86	9.62	11.46	2.59	1.24
Ribbon-Si	34328.10	6.69	26.73	15.26	18.17	4.11	1.96
HCPV	34711.61	2.79	11.17	6.37	7.59	1.72	0.82
Orgánico	25453.37	24.58	98.15	56.01	66.72	15.10	7.20
2EJES							
Tasa CO2	Generación vida (kWh)	T.CO2 Origen España	T.CO2 Origen China	T.CO2 Origen Alemania	T.CO2 Origen Italia	T.CO2 Origen Francia	T.CO2 Origen P.Nórdicos
Mono-Si	41262.03	5.40	21.57	12.31	14.66	3.32	1.58
Poli-Si	40271.19	6.52	26.06	14.87	17.71	4.01	1.91
a-Si	36462.74	5.22	20.85	11.90	14.17	3.21	1.53
CdTe	33794.42	4.36	17.44	9.95	11.86	2.68	1.28
CIS/CIGS	40731.42	4.21	16.82	9.60	11.43	2.59	1.23
Ribbon-Si	35309.92	6.63	26.50	15.12	18.01	4.08	1.94
HCPV	35704.40	2.77	11.09	6.33	7.54	1.71	0.81
Orgánico	26181.37	24.75	98.83	56.40	67.18	15.20	7.25

Tabla 8.11 Resultados Tasa CO2 con diferentes orígenes y datos promedio. Elaboración propia

Se observa como era de esperar que los países con más emisiones, disponen de una tasa de CO₂ más elevada, es decir, usar sistemas producidos en países con fuentes de energía no muy respetuosas con el medio ambiente supone un cargo de emisiones a la posterior producción de los sistemas PV.

También podemos remarcar la gran ventaja de los sistemas HCPV, con apenas $1\text{gCO}_2/\text{kWh}$ cuando son producidos en países nórdicos y operan con los rangos medios de radiación estimados. En el lado opuesto, sistemas orgánicos fabricados en China pueden tener una tasa de hasta $123.30\text{gCO}_2/\text{kWh}$, una diferencia muy importante.

Cabe mencionar que los valores obtenidos para la instalación ubicada en España son bastante cercanos a los de países nórdicos y teniendo en cuenta que la radiación media es mucho más alta, la generación también lo sería y podríamos obtener valores muy próximos con sistemas fabricados en España e instalados en España, recordemos que el dato obtenido en el cálculo específico del apartado 7.1 arroja un resultado en el entorno de los $2\text{gCO}_2/\text{kWh}$ en instalaciones con seguimiento y de hasta $0.582\text{gCO}_2/\text{kWh}$ para instalaciones con seguimiento fabricadas en países nórdicos e instaladas en España.

Según la tasa de CO_2 los sistemas de segunda generación vuelven a ser algo superiores a los de primera generación, principalmente por su menor requerimiento energético lo que les ayuda a evitar emisiones en su fabricación y les permite corregirlas más fácilmente a lo largo de su vida útil.

9 CONCLUSIONES

Tras los análisis realizados durante el presente estudio, las comparativas entre las citadas tecnologías y montajes de sistemas fotovoltaicos en distintas ubicaciones y con diferentes condiciones de radiación, podemos confirmar en primer lugar que la energía fotovoltaica es una energía de bajo impacto medioambiental, en todos los casos estudiados sus efectos han sido positivos, en cuanto a devolución de energía consumida en su fabricación, mitigación de emisiones y demás aspectos tenidos en cuenta a lo largo del trabajo.

En los resultados obtenidos en todos los índices se muestra claramente la gran ventaja de los sistemas de alta concentración sobre el resto, al utilizar poco material PV sus requerimientos energéticos son más bajos y gracias a los sistemas de concentración su rendimiento es muy alto, sin embargo, estos sistemas aún están en desarrollo y no son muy comunes, aunque sin duda parecen ser la mejor opción de cara al futuro.

Por el contrario, los sistemas orgánicos han demostrado no estar en condiciones de competir contra el resto salvo para condiciones muy particulares. Su vida útil más corta y su bajo rendimiento son sus 2 problemas principales, por lo que hacen muy alto el coste en estructuras y superficie necesaria para su implantación.

Con respecto a las tecnologías más usuales, las basadas en silicio, primera generación y las de capa delgada, segunda generación, hemos observado que existen algunos índices en el que el desempeño de unas es mejor que el de las otras y viceversa. Por lo general, los sistemas de primera generación disponen de una gran cantidad de silicio que les permite tener rendimientos más altos, lo que les lleva a producir más a pesar de que su coste energético sea también más alto. Por otro lado, los sistemas de segunda generación, están enfocados en el uso de otros materiales por la escasez de silicio en la corteza terrestre lo que les hace tener rendimientos más bajos pero también procesos de fabricación más sencillos y menos costosos que les permiten tener mejores valores con respecto a índices medioambientales como la Tasa de CO₂, GPBT, ERF o EPBT. Podríamos decir que decantarnos por sistemas de una u otra generación estará muy influenciado por el lugar donde pretendamos realizar la instalación, sus condiciones climatológicas y la procedencia de los sistemas fotovoltaicos, si en un futuro los sistemas de segunda generación consiguen alcanzar cotas de rendimiento similares a las de los sistemas basados en silicio, serán mejores en todos los ámbitos tenidos en cuenta.

Referencias

- Arcos-Vargas, Á., & Riviere, L. (2017). Grid Parity and Carbon Footprint: An Analysis for Residential Solar Energy in the Mediterranean Area. Springer.
- Arcos-Vargas, Á. (2017) Tras el Acuerdo de París. DYNA, 2, 12-14
- Barroso Toro, C. (2017) Estudio de viabilidad y rentabilidad del autoabastecimiento eléctrico en viviendas residenciales mediante placas fotovoltaicas.
- Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., & Apul, D. S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 133-141.
- Castillo-Calderón, V. (2019). Análisis de Ciclo de Vida de Sistemas Solares Fotovoltaicos Policristalinos Centralizados en Instalaciones de Generación Distribuida para Autoconsumo.
- Cebaqueba Gutiérrez, A. J. (2019). Evolución de la incidencia ambiental de tecnologías fotovoltaicas.
- Wild-Scholten, M. M. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 296-305.
- Desideri, U., Proietti, S., Zepparelli, F., Sdringola, P., & Bini, S. (2012). Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. *Applied Energy*, 97, 930-943.
- Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), 1609-1628.
- García - Valverde, R., Cherni, JA y Urbina, A. (2010). Análisis del ciclo de vida de las tecnologías fotovoltaicas orgánicas. *Progreso en energía fotovoltaica: investigación y aplicaciones* , 18 (7), 535-558.
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 747-753.

Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 133, 283-293.

Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., ... & Yao, Q. (2016). Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Applied Energy*, 164, 882-890.

Ito, M., Komoto, K., & Kurokawa, K. (2010). Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules. *Current Applied Physics*, 10(2), S271-S273.

Lara Pelegrín, P. J. (2015). Análisis y comparación de datos de un seguidor fotovoltaico de dos ejes con back-tracking (Bachelor's thesis).

Martín Turiel, P. (2016). Determinación experimental del incremento de producción en sistemas solares fotovoltaicos con seguimiento en un eje y en dos ejes.

Mejía, A. E., Londoño, M. H., & Osorio, J. C. (2010). Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico. *Scientia et Technica*, 1(44), 245-250.

Muller, A., Wambach, K., & Alsema, E. (2006). Life cycle analysis of solar module recycling process. In *Materials research society symposium proceedings* (Vol. 895, p. 89). Warrendale, Pa.; Materials Research Society; 1999.

Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, 13(1), 252.

Nian, V. (2016). Impacts of changing design considerations on the life cycle carbon emissions of solar photovoltaic systems. *Applied Energy*, 183, 1471-1487.

Perez-Gallardo, J. R., Azzaro-Pantel, C., Astier, S., Domenech, S., & Aguilar-Lasserre, A. (2014). Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems. *Renewable Energy*, 64, 82-97.

Prakash, V., Ghosh, S., & Kanjilal, K. (2020). Costs of avoided carbon emission from thermal and renewable sources of power in India and policy implications. *Energy*, 117522.

Raugei, M. (2010). La electricidad fotovoltaica (PV) y su papel en el presupuesto energético actual y futuro. *Ecología política*, (39), 65-72.

Rojas-Hernández, I., & Lizana Moreno, F. (2018). Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica. *Ingeniería Energética*, 39(3), 195-202.

Stoppato, A. (2008). Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy*, 33(2), 224-232.

Sumper, A., Robledo-García, M., Villafáfila-Robles, R., Bergas-Jané, J., & Andrés-Peiró, J. (2011). Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(8), 3888-3896.

Toledo Arias, C. A., & Campos Guzmán, V. (2016). Consideraciones en el tiempo de retorno energético de sistemas fotovoltaicos integrados arquitectónicamente en edificios.

Villar, A. C. (2013). Análisis de la influencia ambiental de las diferentes tecnologías fotovoltaicas.

Wender, B. A., Foley, R. W., Prado-Lopez, V., Ravikumar, D., Eisenberg, D. A., Hottle, T. A., ... & Bates, M. E. (2014). Illustrating anticipatory life cycle assessment for emerging photovoltaic technologies.

Wu, P., Ma, X., Ji, J., & Ma, Y. (2017). Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. *Energy Procedia*, 105, 68-74.

Zyrianov, F. (2017). Diseño e implementación del sistema de control de un seguidor solar.

Impacto climático por zonas. Electricitymap. Recuperado de: (<https://www.electricitymap.org/map>) [21/09/2020]

Photovoltaic geographical information system. PVGIS. Recuperado de: (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR) [23/09/2020]

¿En qué consisten las generaciones de los paneles solares? Solarenergía. Recuperado de: (<https://solarenergia.mx/productos/en-que-consisten-las-generaciones-de-los-paneles-solares/>) [12/05/2020]

Energía solar fotovoltaica de alta concentración. Sitiosolar. Recuperado de: (<http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>) [13/05/2020]

Seguidores solares. Sotysolar. Recuperado de: (<https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>) [15/05/2020]

