



industriales

etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

DISEÑO Y ESTUDIO AMBIENTAL DE UNA PLACA FOTOVOLTAICA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Juventino Iges Sánchez

Director: Ramón Francisco Pamies Porras
Nicolás Alajarín Bernal

Cartagena, 28 de Julio de 2020



Universidad
Politécnica
de Cartagena

AGRADECIMIENTOS:

Agradecer en este trabajo a mi familia por haberme brindado la oportunidad de estudiar esta maravillosa carrera, en la que he adquirido tantos conocimientos y destrezas, como amigos que conservaré toda la vida.

Agradecer también a mis amigos y familiares por apoyarme y guiarme en los buenos y malos momentos que han podido surgir durante de la carrera y en especial culminar con este trabajo para obtener el esperado título de ingeniería.

El origen de este trabajo radica en la necesidad cada vez más necesaria, de la implantación de obtención de fuentes de energía proveniente de fuentes renovables como puede ser el estudio de la tecnología solar fotovoltaica para hacer frente a la angustiosa situación con el cambio climático y sus actuales consecuencias.

A su vez y no siendo el ultimo menos importante agradecer a mi gran director del trabajo, Ramón Pamies. Gracias a su esfuerzo y dedicación en el trabajo, ha supuesto un pilar importante y fundamental en el adecuado seguimiento y desarrollo del trabajo.

RESUMEN

En este proyecto se estudia la energía renovable como fuente limpia de obtención de energía junto con sus vertientes más representativas, y su demanda energética actual tanto a nivel global como local.

El proyecto se centra en la evaluación del impacto ambiental de una placa solar fotovoltaica. Para ello, se define este equipo, junto con sus aplicaciones en el mercado actual, componentes que la integran, tipología con mayor demanda, los procesos generales para su fabricación y el fenómeno físico que gobierna la obtención de energía eléctrica a partir de los rayos ultravioletas procedentes del sol.

Una vez definida la placa fotovoltaica y los componentes que la integran, se emplea el programa de diseño asistido por ordenador en 3D SolidWorks para su diseño usando silicio cristalino con el objetivo de disponer las diferentes cantidades de material requeridos para la conformación de cada uno de los componentes.

Posteriormente, se utiliza el programa CES EduPack para seleccionar los materiales que serán evaluados para su estudio de impacto ambiental a través de la herramienta ECO-AUDIT. Además, para este estudio se precisa los procesos de conformado de los materiales junto con las técnicas de reciclado disponibles tras el fin de vida del producto. Con toda esta información se analiza los diferentes resultados obtenidos en función de la propuesta de partida junto con 3 propuestas de mejora.

Descriptores: energía renovable, placa solar fotovoltaica, componentes, conexiones eléctricas, materiales, silicio, procesos de fabricación, efecto fotovoltaico, reciclaje, conformado, impacto ambiental.

ABSTRACT

This project studies the concept of renewable energy as a clean source of energy together with its most representative aspects, and its current energy demand at both global and local levels.

The project is focused on the environmental impact assessment of a photovoltaic solar panel. For this purpose, this equipment is defined, along with its applications in the current market, components that integrate it, typology with greater demand, the general processes for its manufacture and the physical phenomenon that governs the obtaining of electrical energy from ultraviolet rays from the Sun.

Having contextualized photovoltaic solar energy and its components, The SolidWorks 3D Computer-Aided Design Program is used to design a crystalline silicon photovoltaic solar panel with the aim of providing the different amounts of material required for the conformation of each components.

Subsequently, the EduPack CES program is used to select the materials that will be evaluated for their environmental impact study through the ECO-AUDIT tool. In addition, this study requires the process of forming the materials together with the recycling techniques available after the end of the product's life. All this information analyses the different results obtained according to the starting proposal together with 3 improvement proposals.

Descriptors: renewable energy, photovoltaic solar panel, components, electrical connections, materials, silicon, manufacturing processes, photovoltaic effect, recycling, forming, environmental impact.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

- MW: Megavattios
- cm: Centímetros
- mm: Milímetros
- μm : Micrómetros
- EVA: Etileno Vinil Acetato
- PTFE: Politetrafluoroetileno
- CSM: Células de silicio monocristalino
- CSP: Células de silicio policristalino
- V: Voltios
- A: Amperios
- W: Vatios
- EIA: Evaluación de Impacto Ambiental
- BOE: Boletín Oficial del Estado
- APA: Asociación de Empresas de Energías Renovables
- °C: Grados centígrados.
- LCOE: Levelized Cost Of Energy
- EoL: End Of Life
- PM1: PROPUESTA DE MEJORA: SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DE ALUMINIO POR FIBRA DE CARBONO (PM1).
- PM2: PROPUESTA DE MEJORA: REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LAS CÉLULAS SOLARES.
- PM3: PROPUESTA DE MEJORA: SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DEL MARCO ESTRUCTURAL CON LA REDUCCIÓN DEL ESPESOR EN LAS OBLEAS DE SILICIO
- FORSU: Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbano
- MJ: Megajulios

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. MATERIALES Y MEDIOAMBIENTE: CÓMO MEDIR EL IMPACTO	12
1.2. ENERGÍAS RENOVABLES	14
1.3. ¿QUÉ ES UNA PLACA FOTOVOLTAICA?	21
1.3.1. APLICACIONES CONECTADAS A RED	22
1.3.2. APLICACIONES AUTÓNOMAS	23
1.3.3. EQUIPOS PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO	26
1.3.4. EFECTO FOTOVOLTAICO	26
1.3.5. TIPOLOGÍA PLACAS SOLARES	30
1.4. ELEMENTOS DE UNA PLACA FOTOVOLTAICA	32
2. OBJETIVOS	37
2.1. OBJETIVO GENERAL	37
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
3. MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1. SOLIDWORKS	38
3.2. CES EDUPACK	39
4. RESULTADOS	42
4.1. DISEÑO DE LA PLACA FOTOVOLTAICA	42
4.2. CARACTERÍSTICAS QUE COMPONEN LA PLACA FOTOVOLTAICA: MATERIALES, PESO, PROCESO DE FABRICACIÓN Y TRANSPORTE	52
5. PROPUESTAS DE MEJORA PARA DISMINUIR EL TIEMPO DE RETORNO DE LA ENERGÍA	59
SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DE ALUMINIO POR FIBRA DE CARBONO (PM1).	59
REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LAS CÉLULAS SOLARES (PM2).	63
SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DEL MARCO ESTRUCTURAL CON LA REDUCCIÓN DEL ESPESOR EN LAS OBLEAS DE SILICIO (PM3).	66
IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS DE RECICLAJE EN LAS PROPUESTAS DE MEJORA.	68
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	77



7. BIBLIOGRAFÍA	79
8. ANEXOS	84
ANEXOS 1 Materiales	84
Aluminium, 2017, wrought, T42	84
Epoxy SMC (Carbon fiber)	85
EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)	86
PTFE (Unfiled)	87
SILICON	88
SODA LIME	89
COPPER CAST	90
SILVER, COMMERCIAL, FINE, SOFT	91
NATURAL RUBBER (15-42% CARBON BLACK)	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Consumo de energía primaria 2018 en el mundo.....	15
Figura 2 Consumo de energía primaria en 2018 en la Unión Europea.....	15
Figura 3 Consumo de energía primaria 2018 en España	16
Figura 4 Localización energía nuclear en España.....	17
Figura 5 Balance de energía eléctrica nacional 2018 [5].....	18
Figura 6 Empleo sobre el sector de la solar fotovoltaica [5]	21
Figura 7 Aplicaciones conectadas a la red. Sistemas sobre el suelo	23
Figura 8 Aplicaciones conectadas a la red. Sistemas en edificación.....	23
Figura 9 Aplicaciones autónomas. Aplicaciones profesionales. Sistema de alumbrado terrestre	25
Figura 10 Efecto fotovoltaico.....	28
Figura 11 Proceso de texturización sobre células de silicio monocristalino.....	29
Figura 12 Célula de silicio monocristalino	30
Figura 13 Célula de silicio policristalino.....	31
Figura 14 Célula de silicio amorfo	31
Figura 15 Componentes placa fotovoltaica [17]	33
Figura 16 Método de impresión: serigrafía.....	36
Figura 17 Distancia de separación de los fingers con Grid Calculator – PV Lighthouse	44
Figura 18 Placa fotovoltaica de silicio monocristalino - diseño original – renderizado	47
Figura 19 Placa fotovoltaica de silicio policristalino - diseño original - renderizado	47
Figura 20 Representación circuito eléctrico	48
Figura 21 Distancia seguridad tab wire – imagen obtenida desde el ensamblaje SolidWorks	48
Figura 22 Plano placa fotovoltaica silicio monocristalino - diseño original	50
Figura 23 Plano placa fotovoltaica silicio policristalino - diseño original	51
Figura 24 Curva característica esfuerzo-deformación de un material dúctil frente a un material frágil [30]	52
Figura 25 Elementos que intervienen en el proceso de laminación.....	55
Figura 26 Irradiación en España	56
Figura 27 Gráfica resultados CES - Diseño original	57
Figura 28 Gráfica resultados CES - PM1	62
Figura 29 Gráfica resultados CES - PM2	65



Figura 30 Gráfica resultados CES - PM3	67
Figura 31 Comparativa resultados totales de la implementación de Eol.....	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen parámetros de diseño – diseño original.....	45
Tabla 2 Características de la placa fotovoltaica - diseño original	54
Tabla 3 Resultados CES - Diseño original	57
Tabla 4 Resumen parámetros - PM1	60
Tabla 5 Características de la placa fotovoltaica - PM1.....	61
Tabla 6 Comparativa resultados CES – PM1 / Diseño original.....	62
Tabla 7 Resumen parámetros de diseño - PM2.....	63
Tabla 8 Características de la placa fotovoltaica - PM2.....	64
Tabla 9 Comparativa resultados CES - PM2 / Diseño original	65
Tabla 10 Resumen parámetros de diseño - PM3.....	66
Tabla 11 Características de la placa fotovoltaica - PM3.....	67
Tabla 12 Comparativa resultados CES - PM3 / Diseño original	68
Tabla 13 Disminución impacto ambiental de las PMs (%).....	68
Tabla 14 Procesos EoL para los materiales del proyecto.....	70
Tabla 15 Comparativa aplicando EoL - diseño original	71
Tabla 16 Comparativa aplicando EoL - PM1	72
Tabla 17 Comparativa aplicando EoL - PM2.....	72
Tabla 18 Comparativa aplicando EoL - PM3.....	72
Tabla 19 Disminución tras la aplicación de los procesos de reciclado del EoL	74

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se contextualiza el impacto ambiental y su evaluación como objetivo de estudio de este proyecto aplicado a la energía solar fotovoltaica. También se realiza una revisión del estado del arte de la energía solar fotovoltaica junto con sus pros, contras, aplicaciones en la actualidad y la tipología más representativa para su estudio, además de la situación del punto de partida de la demanda energética de las energías renovables y la estandarización de sus diferentes vertientes. Por otro lado, se definen todos los elementos que integran una placa solar fotovoltaica a nivel comercial, puesto que estos mismos elementos serán dimensionados y evaluados en su posterior representación en 3D y su evaluación de impacto ambiental respectivamente. Por último, se explica el fenómeno físico por el que se rige el funcionamiento de las células solares fotovoltaicas y se produce la energía eléctrica en forma de corriente continua.

1.1. MATERIALES Y MEDIOAMBIENTE: CÓMO MEDIR EL IMPACTO

Definimos el impacto ambiental como el efecto provocado por las diferentes actividades del ser humano sobre el medioambiente, haciendo referencia a los resultados devastadores que supone la explotación económica sobre la naturaleza. La ecología se trata de la ciencia encargada de estudiar la relación entre los seres vivos y el ambiente, además de medir el impacto que origina y trazar diferentes vías para su reducción [1].

Las consecuencias del impacto ambiental no repercuten únicamente sobre la belleza paisajística, sino que afecta de forma directa a la salud de las personas debido a la polución, calidad del aire, alimentos contaminados y por supuesto, la explotación de forma sistemática de diferentes recursos naturales y sus posteriores consecuencias.

En paralelo, es posible categorizar el término para incluir las posibles consecuencias de diferentes fenómenos de desastres naturales.

Se puede clasificar los diferentes impactos medioambientales en función de la durabilidad del efecto sobre el emplazamiento agrupados en 4 tipos:

- i. Persistente. Hace referencia a una influencia a largo plazo.

- ii. Temporal. No se originan consecuencias desastrosas, permitiendo la posibilidad de recuperación de forma paulatina.
- iii. Reversible. Permite la recuperación del impacto a un ritmo relativamente rápido, con la imposibilidad de recuperar a las condiciones originales del entorno.
- iv. Irreversible. Como su mismo nombre indica, sus consecuencias presentan tal dimensión que es imposible reestablecer el punto de partida en el que se encontraba el escenario.

Por otro lado, definimos la evaluación de impacto ambiental (EIA) como el procedimiento que reúne el sumatorio de estudios, análisis, investigaciones y toma de medidas que permiten estimar las posibles consecuencias tras las actividades de un determinado proyecto, instalación u obra sobre el medio ambiente [2].

La incorporación del término EIA ha supuesto un factor determinante de cara a su incorporación en el diseño, estudio y aplicación de los diferentes profesionales, pues anteriormente los únicos parámetros a tener en cuenta para la producción de las diferentes actividades se basaban en beneficios económicos, técnicos y sociales. Sin embargo, en la década de los 70, entra en vigor la normativa asociada a este aspecto incorporando un factor de garantía para asegurar la sostenibilidad del desarrollo del proceso para el medioambiente y por tanto una herramienta de vital importancia para la protección ambiental, tras detectarse síntomas de la decadencia y deterioro de este tanto a nivel local como mundial.

Se concibe como una etapa previa de análisis y estudio con el objetivo de anticiparse y prever los posibles escenarios que determinadas acciones pueden desencadenar de forma positiva o negativa, de cara a plantear medidas preventivas, correctoras o compensatorias con el fin de solventar o disminuir estos efectos perjudiciales

La EIA se trata a su vez, de una metodología administrativa regulada por *“la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental”* que afirma *“La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o*

compensación.” compuesta por 64 artículos recogida por el BOE cuyo documento completo se encuentra en la siguiente bibliografía [3].

A nivel europeo podemos encontrar la legislación Directiva 2011/92/UE, mientras que a nivel nacional podemos destacar: la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, la Ley 42/2007, de 13 de diciembre y la Ley 27/2006, de 18 de julio.

1.2. ENERGÍAS RENOVABLES

Tras definir la trascendencia de la evaluación del impacto ambiental, se relaciona con la necesidad del estudio e implementación de la obtención de energía a través de las diferentes fuentes renovables, dada la situación actual. Sus ventajas se relacionan directamente con su repercusión en el medioambiente tratándose de fuentes inagotables asegurando una producción limpia, es decir, no generan residuos ni producen emisiones contaminantes.

La participación y producción de la energía primaria procedente de estas fuentes renovables se encuentra cada vez más presente tanto a nivel nacional como mundial destacando positivamente la obtención de energía eléctrica a partir de recursos renovables, sin embargo, sigue predominando el uso de las energías fósiles.

El alcance que presenta en el año 2018, tal y como se observa en el estudio macroeconómico realizado por APPA, las fuentes renovables a nivel mundial, alcanza el cuarto puesto con un 10,8% resaltando un incremento del 7,1%, liderando el primer puesto el petróleo con un 33,6% a pesar de verse reducido en un 0,5%, seguido del carbón con un 27,2% y el gas natural con un 23,9%, con una intervención imperiosa de combustibles fósiles [4].

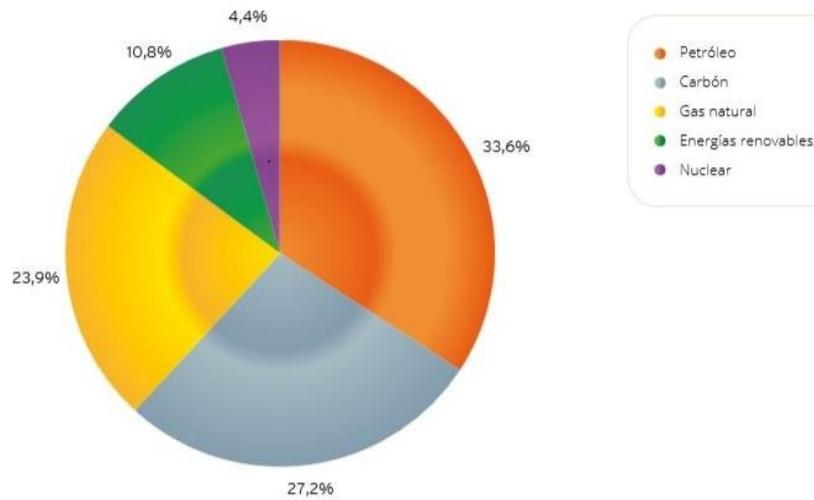


Figura 1 Consumo de energía primaria 2018 en el mundo

Este mismo análisis a nivel europeo, las energías renovables alcanzan un tercer puesto con una participación del 15,5% con un incremento del 7,8 %. En primer lugar, se encuentra el petróleo con un 36,2%, seguido del gas natural con un 23%. El inconveniente de asumir alrededor de tres cuartas partes de consumo energético (74,2%) a través de combustibles fósiles radica en la dependencia energética exterior para abastecer la demanda.

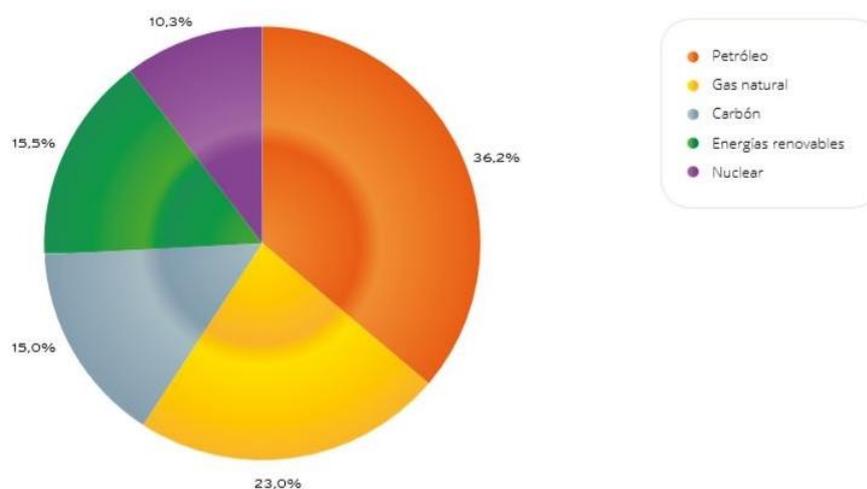


Figura 2 Consumo de energía primaria en 2018 en la Unión Europea

Por último, la situación que presenta España, aplicado al mismo estudio, resulta similar al panorama europeo ocupando el sector de las renovables en tercer puesto con un 13,9%, con un incremento del 8,2%. Persistiendo en el liderazgo se encuentra el petróleo junto con sus derivados con un 44,9% seguido del gas natural con un 21,1%.

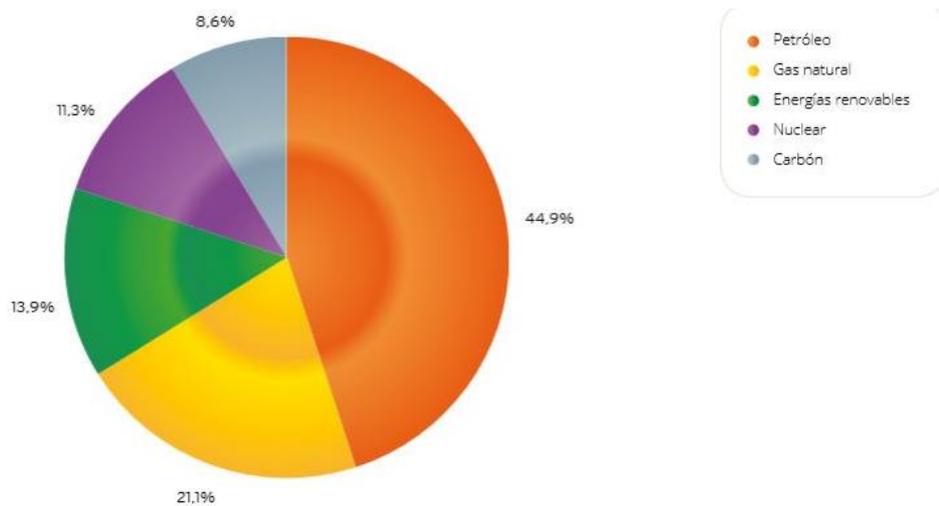


Figura 3 Consumo de energía primaria 2018 en España

Destaca la participación de la infraestructura nuclear sobre la producción eléctrica en España, basada en la producción de electricidad a partir de los métodos de fisión o fusión aplicados a los núcleos de átomos provocadas en el interior de un reactor con el objetivo de generar energía calorífica para calentar agua, induciendo el movimiento de turbinas para producir finalmente electricidad. Uno de los inconvenientes más destacados se trata del desfavorable apoyo social que presenta esta industria, debido a la posibilidad de accidentes nucleares, además de la gestión de los consecuentes residuos radiactivos y sus repercusiones para el medioambiente. Sin embargo, permite generar una elevada energía eléctrica a partir de cantidades reducidas de combustible nuclear y estos métodos no producen gases de efecto invernadero [5, 6].

Actualmente se encuentran 5 emplazamientos de centrales nucleares operativas en territorio nacional, contando con 7 reactores de agua ligera que son capaces de producir una potencia eléctrica de 7.398,77 MW [7].

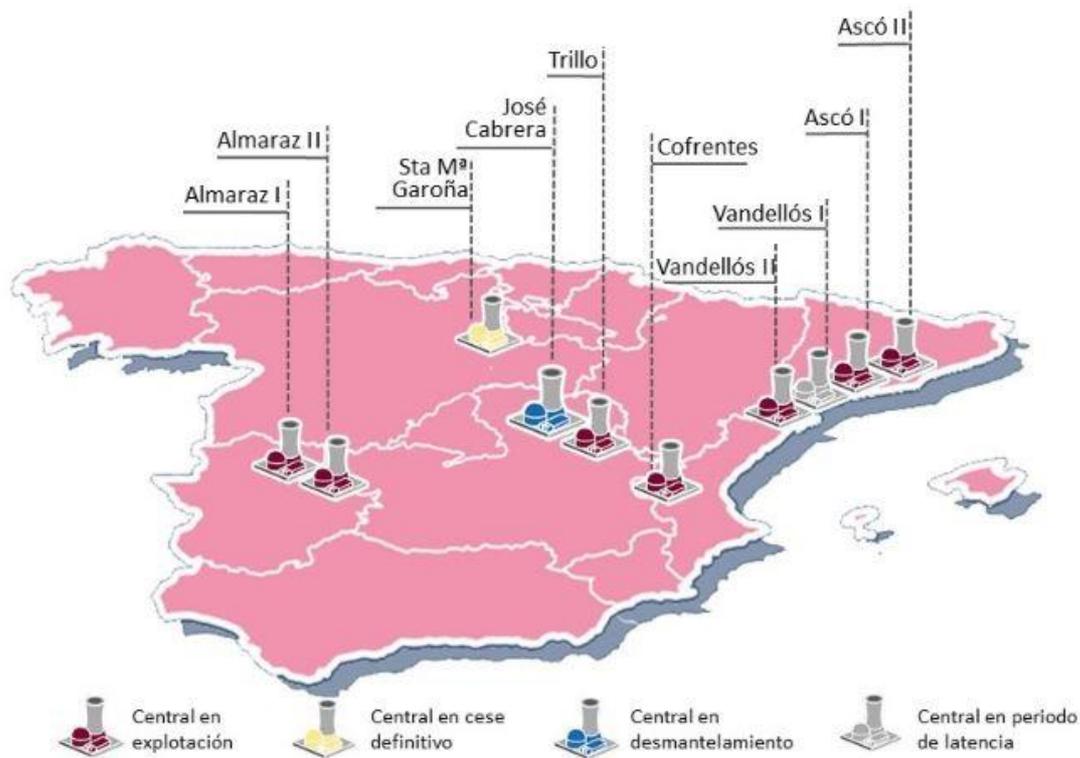


Figura 4 Localización energía nuclear en España

En este proyecto analizaremos la energía solar fotovoltaica basada en la obtención de energía eléctrica mediante dispositivos denominados células solares integrados en placas fotovoltaicas. Esta tecnología se basa en las propiedades de los materiales semiconductores regidos por el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico a partir de los rayos ultravioletas del sol tratándose por tanto de un recurso inagotable.

Debido a la eficacia y a las numerosas aplicaciones para las que está destinada esta tecnología se ha consolidado como la tercera fuente de obtención de energía renovable en función de capacidad instalada optando en primer lugar la energía eólica, basada en el aprovechamiento de la energía cinética que posee una masa de aire mediante el empleo de aerogeneradores situados en parques eólicos, seguido de la energía hidroeléctrica o hidráulica basada en la producción de energía eléctrica mediante el uso de la energía cinética de una masa de agua a través de turbinas situadas generalmente aguas debajo de presas para el aprovechamiento de la diferencia de cotas. Según el estudio de APPA realizado en 2018, las tecnologías renovables asumieron el 37,6% de la demanda

eléctrica en territorio nacional cuyos 3 primeros puestos fueron la energía eólica con un 18,2%, la energía hidráulica con un 13,3% y la solar fotovoltaica con un 2,9% [4, 8].

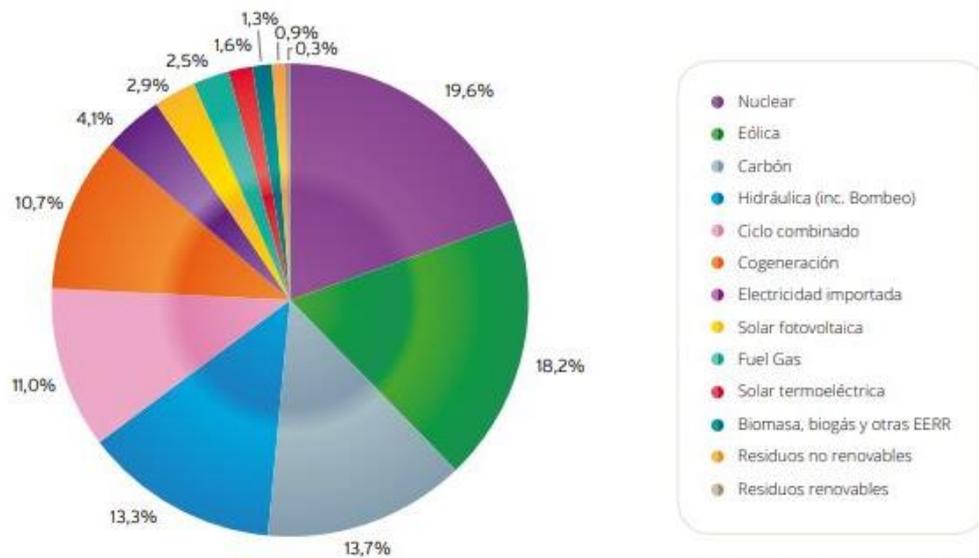


Figura 5 Balance de energía eléctrica nacional 2018 [5]

Hoy en día, afortunadamente constituye una tecnología de generación eléctrica renovable que proviene de un recurso limpio e inagotable de manera natural y respetuosa con el medio ambiente pues no producen residuos ni emisiones de gases contaminantes.

Con el objetivo de abordar de forma didáctica y general el concepto de las energías renovables con sus diferentes vertientes, se definen las tipologías restantes que no ha sido tratadas anteriormente: biomasa, solar térmica, marina y biocarburantes.

➤ Biomasa.

Radica en el tratamiento de materia orgánica para su posterior rentabilidad energética en forma de generación de calor o electricidad, aunque se trata de un proceso más laborioso a partir de 4 procedimientos: Combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis.

El producto empleado para esta práctica abarca una amplia gama de posibilidades, aunque su origen generalmente es agrícola o forestal tanto de origen animal como

vegetal, además de emplearse la materia orgánica de aguas residuales y diferentes desechos como lodos de depuradora, restos sólidos urbanos (FORSU) o residuos procedentes de diferentes industrias.

Este sector presenta una gran oportunidad para el aprovechamiento de residuos, evitando un gran impacto ambiental debido a la quema de estos desechos reduciendo a su vez el riesgo de incendios [8].

➤ Solar térmica.

Aprovecha los rayos ultravioletas procedentes del sol con el fin de calentar líquidos o gases, o bien, a partir de este principio, para la producción de electricidad. Para ello se emplean unos dispositivos denominados colectores, encargados de concentrar la luz solar para conseguir elevadas temperaturas, incluyendo la posibilidad de mecanismos de seguimiento solar para aumentar la eficiencia de esta tecnología.

En el caso de la producción de la electricidad, el procedimiento consiste primeramente en la obtención de calor aplicado a un líquido permitiendo que el vapor generado se transforme en energía mecánica utilizada para el accionamiento de una turbina que alimenta un generador para su producción eléctrica [9].

Los colectores están formados principalmente por dos componentes:

- a) Reflectores: espejos o lentes encargados de capturar y acumular la energía solar.
- b) Receptores o acumuladores: conductos por los que circulan un líquido o un gas que reciben la energía suministrada por los receptores.

➤ Marina.

Se conoce como las diferentes tecnologías encargadas de aprovechar la energía cinética de los flujos de masas de agua de los océanos como puede ser mareas, olas, corrientes marinas, o diferencias de temperatura entre cotas como el fondo marino y la superficie.

Sin embargo, resulta una tecnología difícil de asentar debido a la complejidad de instalación en el medio e inversión, posibles averías ante condiciones adversas, corrosión o el traslado de la energía producida a tierra [8].

➤ Biocarburantes.

Se trata de combustibles renovables empleados como alternativa parcial al combustible comúnmente empleado en diferentes medios de transporte producido a partir de materia prima biológica de origen animal o vegetal. Estos sustitutos reemplazan parte del combustible fósil empleado con márgenes entre el 5% y el 15%. De esta forma, se reduce el empleo de recursos no renovables de los derivados del petróleo disminuyendo las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y, por tanto, la dependencia de importaciones exteriores y una contribución de riqueza y crecimiento del país. Existen dos biocarburantes principalmente, el biodiesel y el bioetanol [8].

Una de razones fundamentales y necesarias de la implantación de forma sistemática de tecnologías para la obtención de energía a través de fuentes renovables no sólo radica en la lucha contra el cambio climático que da lugar a una disminución de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, sino a la mejora de la calidad del aire en el ambiente a nivel global, la creación directa e indirecta de empleo mediante la investigación y la implantación de estas tecnologías producto del empuje del autoconsumo, asegurar un suministro energético con costes sostenibles y locales de forma controlada que conlleva a la reducción de la dependencia energética debido a la escasa existencia de yacimientos de combustibles fósiles en territorio nacional y por tanto la consecuente necesidad de obtener dichos productos en el extranjero, disminuyendo así la vulnerabilidad de dependencia económica del país ante decisiones políticas y económicas externas. Además, da lugar al equilibrio interterritorial proporcionando una estabilidad en zonas rurales que consiguen de forma natural los recursos necesarios para la producción [4].

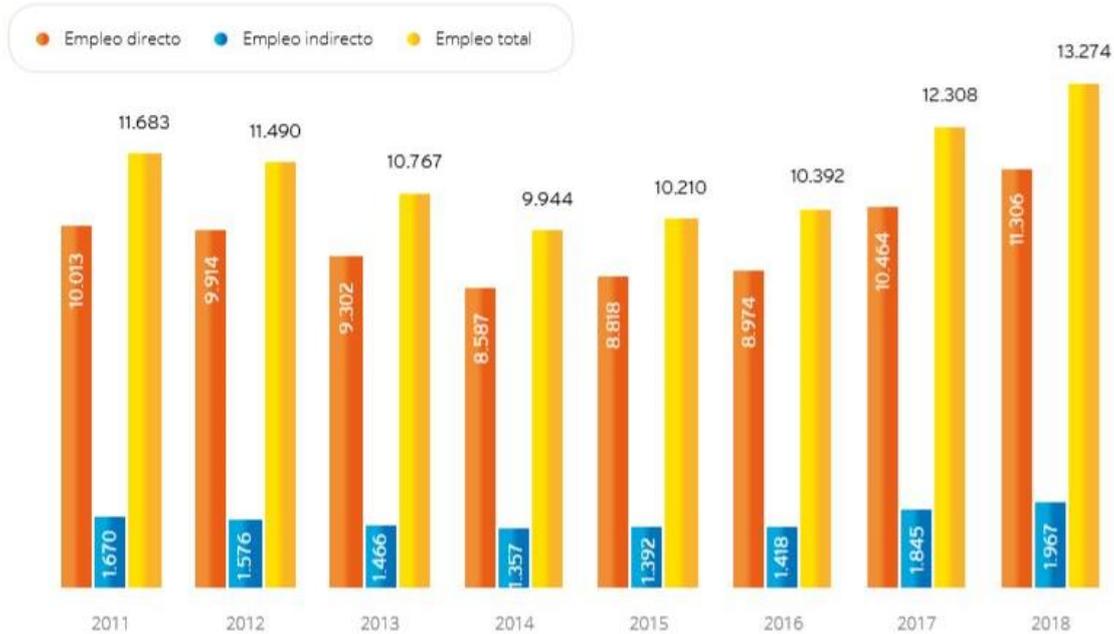


Figura 6 Empleo sobre el sector de la solar fotovoltaica [5]

Por otro lado, este sector presenta diferentes inconvenientes como la necesidad de inversión con costes elevados, la dependencia climatología propia de la condición que presenta en general las energías renovables, en este caso, siendo totalmente dependientes del sol, por lo tanto, no es posible asegurar una producción continuada anual. Al mismo tiempo precisa de un emplazamiento con una gran superficie para la producción a gran escala, el almacenamiento de la energía presenta ciertas deficiencias. Además, es incapaz de hacer frente las demandas pico que actualmente requiere la sociedad.

1.3. ¿QUÉ ES UNA PLACA FOTOVOLTAICA?

Una placa fotovoltaica, también conocido como panel solar o módulo fotovoltaico, se trata del dispositivo empleado para la transformación directa de la radiación proveniente del sol en energía eléctrica como consecuencia del proceso conocido como efecto fotoeléctrico mediante el empleo de materiales semiconductores.

Una de las principales virtudes de los paneles fotovoltaicos consiste en su aspecto modular, es decir, puesto que las placas fotovoltaicas se componen por células o celdas

solares conectadas eléctricamente, podemos determinar su extensión en función del uso o aplicación al que se vaya a destinar.

Por tanto, podemos clasificar un sistema o instalación fotovoltaica que se compone del conjunto del equipamiento necesario para producir, transformar y utilizar esta energía en dos grandes grupos:

1.3.1. APLICACIONES CONECTADAS A RED

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red se encargan de administrar la energía producida por las placas solares a la red eléctrica convencional para su posterior uso y venta. La instalación requiere de inversores encargados de adecuar la energía a las condiciones de la red que originan las placas fotovoltaicas puesto que el objetivo esta instalación no radica en satisfacer demandas pico de energía eléctrica ni asegurar una producción continuada de la misma por lo que no es necesario la presencia de acumuladores. Al mismo tiempo, estos sistemas se pueden diferenciar en los dos grupos que se presentan a continuación [10, 11]:

1.3.1.1. INSTALACIONES SOBRE SUELO

Se trata de instalaciones como parques y huertos solares las cuales se dedican a la producción de energía eléctrica en la que diferentes propietarios de instalaciones fotovoltaicas se ubican en el mismo emplazamiento y, por tanto, comparten diferentes servicios como seguridad o mantenimiento suponiendo una disminución significativa en la inversión económica, diferenciándose entre ellas las dimensiones de la factoría, presentando los parques solares una amplitud mayor formada por varias plantas solares. Este tipo de instalaciones generalmente producen una cantidad entorno a los 100 kW.



Figura 7 Aplicaciones conectadas a la red. Sistemas sobre el suelo

1.3.1.2. SISTEMAS EN EDIFICACIÓN

Al igual que en el caso anterior, estas instalaciones tienen el objetivo de producir energía eléctrica mediante la instalación de la tecnología fotovoltaica incorporados como material propio de edificaciones como tejados, fachadas o ventanas. La incorporación de este material supone un elemento estético con un importante impacto visual. Este tipo de instalaciones generalmente producen una cantidad inferior a los 100kW.



Figura 8 Aplicaciones conectadas a la red. Sistemas en edificación

1.3.2. APLICACIONES AUTÓNOMAS

Las instalaciones autóctonas tienen la función de satisfacer la solicitud de energía eléctrica en el emplazamiento donde se encuentran establecidas. Por esta razón se precisa la incorporación de acumuladores al conjunto del sistema fotovoltaico.

Las diferentes aplicaciones para las que se destina este tipo de instalaciones alcanzan una gran variedad que se definen a continuación:

1.3.2.1. APLICACIONES DE PEQUEÑO CONSUMO

El sector fotovoltaico se encuentra en auge en el uso de sistemas fotovoltaicos reducidos para el suministro de energía eléctrica en pequeños equipos como calculadoras, sistemas de iluminación domésticos, cargadores o linternas portátiles.

1.3.2.2. APLICACIONES PROFESIONALES

Todas las aplicaciones coinciden necesidad de su correcto y continuado funcionamiento al tratarse de equipos de suma importancia tales como:

- Aplicaciones espaciales como paneles solares en estaciones espaciales o satélites.
- Protección catódica en gaseoductos, oleoductos, taques de almacenamiento, puentes. Esta aplicación se emplea en elementos metálicos con el objetivo de eliminar o disminuir la corriente que origina la corrosión mediante el uso de placas fotovoltaicas.
- Alumbrado terrestre, aéreo y marítimo. Diferentes elementos tales como señales luminosas, indicadores de seguridad como balizamientos, señales de emergencia, sistemas de aproximación en aeropuertos o plataformas petrolíferas en los que es rentable la implementación de sistemas fotovoltaicos puesto que por el emplazamiento y el carácter del elemento es de obligado cumplimiento su operatividad durante todo el año.



Figura 9 Aplicaciones autónomas. Aplicaciones profesionales. Sistema de alumbrado terrestre

- Equipos remotos en telecomunicaciones. Al igual que en el caso anterior, dado por la naturaleza de la ubicación de diferentes equipos telemáticos como telefonía móvil o repetidores, resulta una mayor rentabilidad la alimentación de energía a través de sistemas fotovoltaicos.
- Telemetría. Es de vital importancia la recogida de diferentes magnitudes físicas tanto por seguridad o investigación en los que los sistemas fotovoltaicos garantizan el suministro continuado de estos componentes.

1.3.2.3. SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN RURAL

Se utilizan para satisfacer demandas puntuales y/o continuadas de energía eléctrica en aquellas zonas donde la implantación de un tendido eléctrico adecuado es inviable por las características propias del entorno o los costes suponen una inversión desorbitada. Generalmente son sistemas empleados en países en vías de desarrollo financiados por organizaciones benefactoras para la creación de un sistema de electrificación de viviendas, centros educativos o sanitarios.

1.3.2.4. SISTEMAS DOMÉSTICOS

Las aplicaciones domésticas rondan potenciales en torno a 100 o 200 vatios de potencia con el objetivo de satisfacer la demanda energética de una residencia. Las placas fotovoltaicas generalmente se encuentran en las fachadas de la vivienda.

1.3.2.5. SISTEMAS DE BOMBEO

Se trata de sistemas situados en zonas rurales para el suministro de agua generalmente de carácter agrícola o ganadero para sus diferentes aplicaciones cuya función radica en impulsar el fluido desde una fuente natural como un pozo o un acuífero a una red de distribución a través de una motobomba.

1.3.3. EQUIPOS PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para concluir con los equipos indispensables necesarios para el funcionamiento de las aplicaciones explicadas anteriormente se define los equipos inversores y acumuladores:

A. INVERSOR

Dispositivo encargado de adecuar la energía eléctrica en forma de onda continua producida por la placa fotovoltaica en corriente alterna, siendo esta adecuada para su posterior utilización en las diferentes aplicaciones estudiadas anteriormente.

B. ACUMULADOR

Un acumulador actúa como una batería secundaria o recargable cuya función consiste en el almacenaje de energía eléctrica tras la salida del inversor a través de una transformación en energía electroquímica. El objetivo del acumulador radica en abastecer las demandas de energía bajo toda circunstancia sobre picos elevados que el sistema fotovoltaico sea incapaz de generar por sí mismo. Existe una amplia variedad de acumuladores, sin embargo, las más extendidas por su bajo coste son las de tipo plomo-ácido.

1.3.4. EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico se trata del fenómeno físico por el cual las células solares son capaces de producir energía eléctrica en forma de corriente continua debido a la naturaleza que presentan los materiales semiconductores, en este caso, el silicio, presentando una excelente conductividad a altas temperaturas y actuando como aislantes a bajas temperaturas [19, 20].

Para poder comprender el proceso es necesario contextualizar el material en cuestión. El silicio presenta enlaces covalentes que comparten 4 electrones en su última capa de

valencia cuya combinación de numerosos átomos de silicio originan un entramado estructural formando un único sólido denominado cristal.

Cuando los fotones, partículas con una determinada cantidad de energía procedentes de los rayos ultravioletas, inciden sobre el cristal de silicio, los electrones que atraviesan e impactan sobre los electrones que forman los enlaces covalentes del cristal de silicio, son liberados de la posición en la red cristalina de tal forma que se genera el par hueco-electrón. Estos electrones se desplazan libremente por la red molecular del cristal ocupando los huecos que previamente han sido formados. De esta forma, los electrones se encuentran en la banda de conducción y los huecos generan conductividad eléctrica en la banda de valencia. De esta forma, el silicio puro se considera un material conductor de tipo intrínseco.

Para incrementar estos efectos, el silicio se dopa con diferentes elementos para generar huecos (semiconductores de tipo P) o electrones en la banda de conducción (semiconductores tipo N). Cuando un semiconductor tipo P se une a un semiconductor tipo N, se genera la existencia de una barrera interna de potencial a ambas caras del elemento conformando lo que se conoce como una *unión P-N*.

La función principal de la unión P-N consiste en crear una barrera de potencial mediante la formación de las diferentes capas que obliguen a los electrones desalojados de sus respectivos enlaces covalentes como a los huecos que posteriormente originan, avanzar hacia el lado contrario originando un campo eléctrico permanente. La unión de ambos materiales origina que el exceso de agujeros del material P se desplacen por difusión al material N, realizando la misma mecánica los electrones libres del material N hacia al material P.

De esta forma, cuando las partículas percibidas sean incapaces de superar la diferencia de potencial, impedirá la circulación de la corriente, conformando el principio básico del funcionamiento de los diodos.

De esta forma, es posible afirmar que una célula solar actúa como un diodo puesto que cuando los electrones de los fotones contienen la suficiente energía como para superar

la barrera de potencial se producirá una diferencia de tensión entre las dos partes del material.

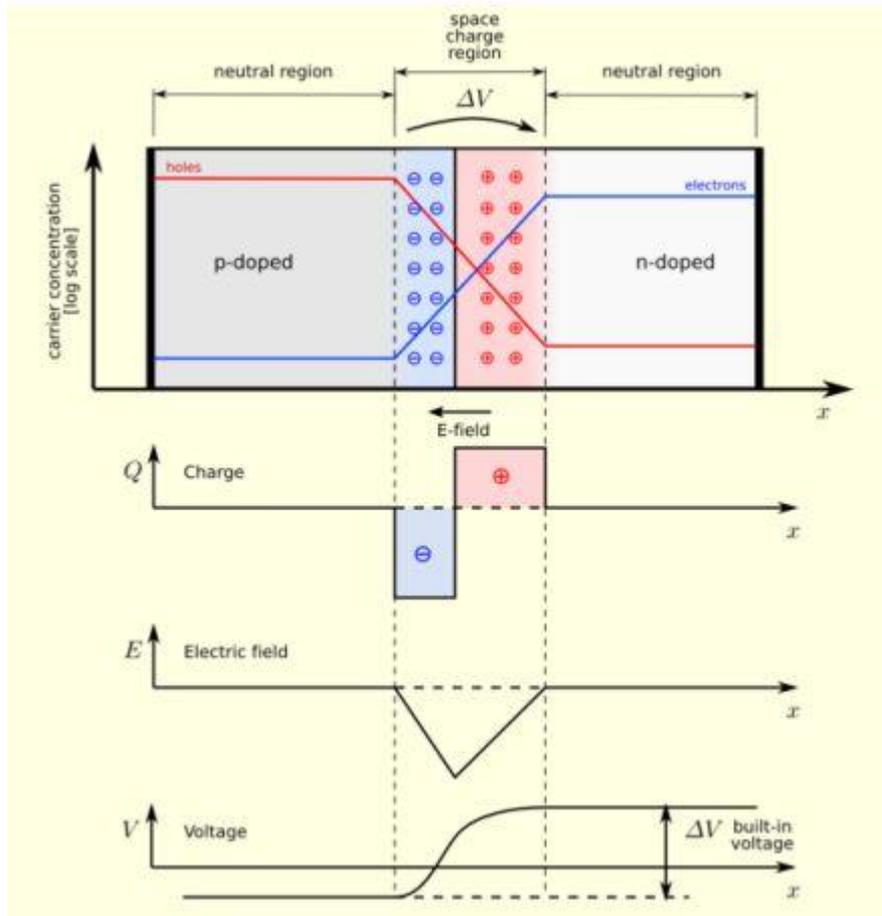


Figura 10 Efecto fotovoltaico

Además, se texturiza su superficie para disminuir las pérdidas por reflexión con resultados de aproximadamente un 20 %. El procedimiento consiste en impregnar la superficie con una disolución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) al 2% para las CSM, formando micropirámides asegurando una doble absorción de la luz reflejada. Para las CSP el químico que se utiliza generalmente se trata de ácido nítrico (HNO_3), fluoruro de hidrógeno (HF) o diferentes aditivos debido a que no presentan una orientación precisa.

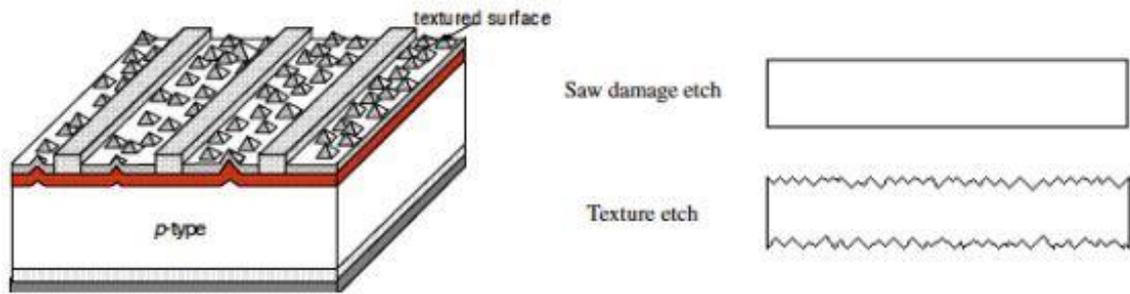


Figura 11 Proceso de texturización sobre células de silicio monocristalino

Por último, para concluir con la obtención final de la célula fotovoltaica, se incluye una capa antirreflectante de material transparente con el índice de refracción óptimo para adecuar el índice de refracción del silicio con el vidrio templado que se integrará en la cara superior como elemento de seguridad y protección del conjunto. Para ello, se emplean materiales como el óxido de silicio (SiO_2), el nitruro de silicio (Si_3N_4) o el óxido de aluminio (Al_2O_3), cuyos resultados arrojan una disminución promedio del 10% de la reflexión.

En la imagen de a continuación se recoge el desarrollo de los diferentes procesos para la obtención de la célula solar fotovoltaica.



1.3.5. TIPOLOGÍA PLACAS SOLARES

En este apartado se definen las 3 tipologías de células solares fabricados con silicio puesto que presentan mayor demanda y rendimiento dado las aplicaciones para las que generalmente se destina este tipo de tecnologías descritas en el punto anterior [10, 12, 13]:

➤ Células de silicio monocristalino (CSM).

Para la obtención del producto, el procedimiento más empleado y arraigado se denomina Czochralski a través de la utilización de silicio puro. Este método consiste en la obtención de lingotes de silicio monocristalino mediante la fundición de silicio policristalino alojados en un crisol de material refractario destinado a soportar altas temperaturas, en este caso cuarzo de alta pureza, que se hace girar de forma continuada en una atmosfera del gas noble argón a bajas presiones dando lugar a un producto final con forma cilíndrica. Por esta razón las células de silicio monocristalino presentan chaflanes en sus esquinas.

Su coste es mayor debido a la complejidad del proceso que resulta plasmado en la eficacia final de la célula. El rendimiento que presenta en condiciones óptimas de laboratorio es entorno a un 24% mientras que realmente se obtiene entre un 15 y un 18% en aplicaciones prácticas, convirtiéndose en las células de mayor rentabilidad eléctrica. Se caracteriza por presentar un color homogéneo oscuro entre azul y negro y la presencia de chaflanes por el método de fabricación de este como se ha mencionado anteriormente.



Figura 12 Célula de silicio monocristalino

➤ Células de silicio policristalino (CSP).

En ese caso, el proceso por el que se obtienen obleas de CSP resulta más simple, por lo que disminuye los costes permitiendo mayores lotes de producción en la industria. La obtención de estos elementos se basa en diferentes procesos de fundición cuyo enfriamiento se realiza de forma controlada en moldes de sección cuadrada de grafito o cuarzo. A través de estos moldes podemos obtener diferentes dimensiones cuadradas o rectangulares aprovechando al máximo el espacio sobre la placa fotovoltaica.

El rendimiento que presenta en condiciones óptimas de laboratorio se encuentra entre el 19% y 20% mientras que realmente se obtiene resultados entre el 12% y 14% en aplicaciones prácticas. Se caracteriza por su color azul oscuro.

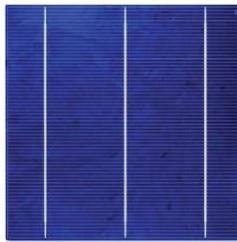


Figura 13 Célula de silicio policristalino

➤ Silicio amorfo.

Las células de silicio amorfo se componen de diferentes capas delgadas permitiendo la conductividad eléctrica implementadas en numerosas aplicaciones como en la integración arquitectónica.

El rendimiento que presenta en condiciones óptimas de laboratorio se encuentra alrededor del 16% mientras que realmente se obtiene menor que un 10% en aplicaciones prácticas. Se caracteriza por su color amarronado y por no encontrarse visiblemente conexas entre sus células.



Figura 14 Célula de silicio amorfo

Una de las principales diferencias entre el empleo de CSC o CSP consiste en el clima del entorno donde se pretende instalar la placa fotovoltaica. Las CSC funciona favorablemente en climas fríos, mientras que en climas mayormente cálidos se opta por la opción de CSP.

Además, de que las CSC trabajan aproximadamente 2 V por encima de las SP, ofreciendo en su punto de máxima potencia alrededor de 0,5 A superior de corriente, por lo tanto son capaces de obtener 35 W mayor de potencia.

Sin embargo, la razón que determina la tipología de la instalación radica en alcanzar de forma satisfactoria la potencia demandada para la aplicación para la que esta destinada y su consecuente instalación solar fotovoltaica [14].

1.4. ELEMENTOS DE UNA PLACA FOTOVOLTAICA

A continuación, se definen los elementos que integran la placa fotovoltaica que serán estudiados en el proyecto [15, 16] .

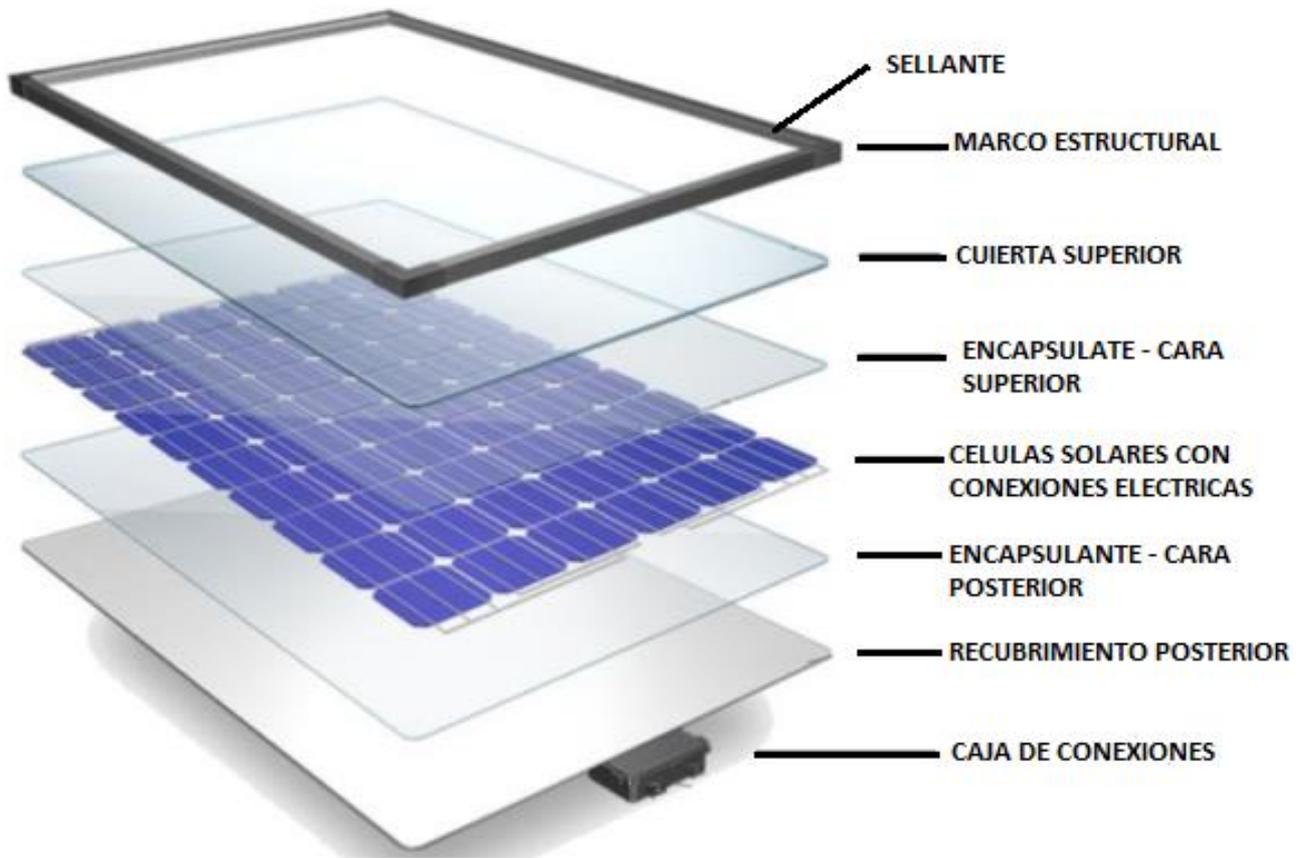


Figura 15 Componentes placa fotovoltaica [17]

A. MARCO ESTRUCTURAL.

Aporta rigidez y resistencia al conjunto soportando los esfuerzos y las cargas del conjunto. Este elemento es la base sobre la que sujetar y fijar la placa fotovoltaica en sus diferentes aplicaciones o sobre la que anclar en los seguidores solares.

Para conformar este componente puede dividirse en piezas atornillando las esquinas o bien se presionan y se adhieren con diferentes uniones o adhesivos.

El material más empleado es el aluminio o el acero inoxidable.

B. CUBIERTA SUPERIOR.

Este elemento es el encargado de proteger las células fotovoltaicas frente a los agentes atmosféricos y a posibles impactos que pueda contemplar dado que se trata de una tecnología que se encuentra al aire libre.

Comúnmente se emplea vidrio templado debido a su elevada resistencia ante impactos y su excelente transferencia de la radiación solar, permitiendo exposiciones de larga duración de los rayos ultravioletas.

C. CÉLULAS SOLARES.

Como se ha descrito anteriormente, las células solares son la herramienta indispensable de la obtención de la energía eléctrica en forma de corriente continua de todo el sistema fotovoltaico.

D. ENCAPSULANTE.

Su función radica en cohesionar los elementos electrónicos junto con las células aportando estanquidad, aislamiento eléctrico, seguridad ante posibles vibraciones y protección al conjunto.

Generalmente se utilizan polímeros termoplásticos transparentes, sin embargo, actualmente, el material más empleado es el etilvinilacetato, comercialmente conocido como EVA.

E. RECUBRIMIENTO POSTERIOR.

En paralelo a la cubierta superior, este elemento aporta protección y seguridad al conjunto frente a condiciones climatológicas desfavorables y la humedad, supliendo la necesidad de la transparencia.

Los materiales más empleados son siliconas y polímeros como el PTFE.

F. SELLANTE.

Este elemento evita el contacto directo eliminando el rozamiento de la cubierta superior con el marco evitando posibles roturas.

G. DEDOS DE CUADÍCULA O FINGERS.

Se trata del elemento horizontal encargado de transportar la energía producida por las células solar hacia las barras colectoras.

La forma de insertar estos elementos se basa en el método de la serigrafía, descrito posteriormente.

El material más utilizado de estos elementos son la plata y sus aleaciones.

H. BARRA COLECTTORA O BUSBAR.

Son los elementos perpendiculares a los fingers con el propósito de transportar la energía eléctrica en forma de corriente continua recogida por los fingers.

Al igual que los fingers, la forma de implantar estos elementos se realiza mediante serigrafía, cuyo material es plata.

Podemos encontrar diferentes nomenclaturas en función del número de busbar que se incorpora a la célula solar desde 2BB hasta 5BB.

I. ALAMBRE DE LENGÜETA O TAB WIRE.

Se utiliza para trasladar la energía producida por las células solares a través de los busbar conectando eléctricamente las células en serie formando filas.

El material que se emplea para fabricar este elemento es el cobre mediante un proceso de laminación con el resultado de una sección rectangular con superficie plana, que se incorpora a la célula solar soldando estos elementos a los busbar.

La forma de integrar este elemento es mediante uniones de soldadura con los busbar.

J. CABLE DE BUS O BUS WIRE.

Se utilizan para conectar las células solares en paralelo. Este debe tener unas dimensiones mayores puesto que se encarga de trasladar el sumatorio de la energía transferida por los tab wire con el objetivo de lograr una mejorada resistencia por unidad de longitud.

Al igual que los tab wire, el material que se emplea para fabricar este elemento es el cobre mediante un proceso de laminación con el resultado de una sección rectangular con superficie plana.

La forma de integrar este elemento es mediante uniones de soldadura con los tab wire.

K. CAJA DE CONEXIONES.

Se ubica en la parte posterior de la placa fotovoltaica, junto al recubrimiento posterior.

Los terminales positivo y negativo de los bus wire se conectan bajo terminales de interconexión mediante este elemento. Se incluyen diodos de protección cuyo objetivo consiste en evitar los efectos perjudiciales de puntos calientes.

1.4.1. SERIGRAFÍA

La serigrafía es el método más consolidado y demandado debido a su relación eficiencia-complejidad en la aplicación de la implantación de metalización de contacto superior e inferior, incluida la alineación de obleas para situar pastas metálicas con moldes de rejilla a una velocidad de producción elevada.

El procedimiento es simple, consiste en la aplicación directa de la escobilla de impresión (squeegee) sobre la superficie de la pieza en la que se exprime un material determinado sobre el molde en forma de rejilla (screen) para la aplicación de estudio del proyecto, adhiriéndose sobre la superficie del sustrato (substrate). Finalmente se extrae el entramado formando el patrón deseado, permitiendo impresiones de dimensiones muy reducidas [18].

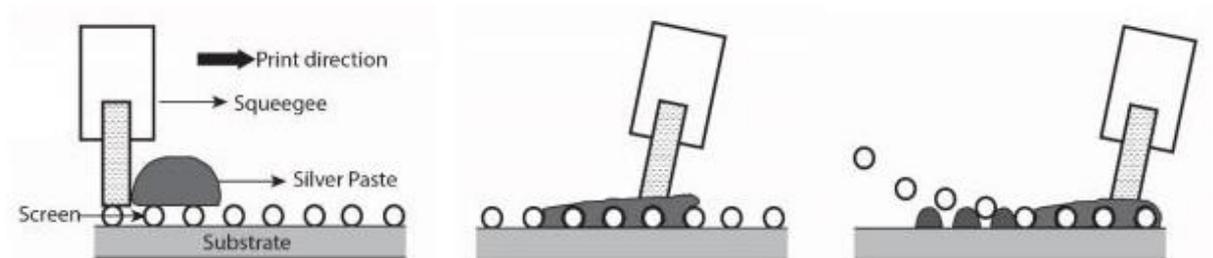


Figura 16 Método de impresión: serigrafía

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseño de la placa fotovoltaica para su posterior estudio de impacto ambiental

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboración de la lista de materiales que componen un panel fotovoltaico.
- Cálculo de la energía contenida de los materiales.
- Cálculo de la energía de fabricación de las piezas que forman el panel.
- Evaluación de la huella de carbono de la fabricación del panel fotovoltaico.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado definiremos las herramientas por las cuales llevaremos el proyecto a cabo para el diseño y su posterior estudio ambiental, definiendo las herramientas necesarias para la su aplicación.

3.1. SOLIDWORKS

SolidWorks se trata de una herramienta de diseño asistido para modelar y gestionar elementos en 3D y la obtención de planos en 2D permitiendo una gran variedad de posibilidades en cuanto a las operaciones y soluciones que implementa este programa asegurando un elevado rendimiento y una calidad final en el resultado del producto.

Respecto al objetivo de diseñar una placa fotovoltaica definiremos una placa solar fotovoltaica de silicio monocristalino y otra de silicio policristalino puesto que son las tipologías más demandadas y con mayor eficiencia como se ha estudiado anteriormente. Por otro lado, definiremos de forma individual el conjunto de los elementos que integran la placa concretando sus dimensiones para su posterior implementación y ejecución en el programa.

Para la obtención de los parámetros de diseño de los elementos que conforman las placas solares se descarta la posibilidad de adquirir la información por parte de alguna entidad comercial dedicada al suministro y/o fabricación en este tipo de industria y con ello recrearlo posteriormente. El objetivo radica en representar el estudio de forma real y competitiva y arrojar unos resultados consecuentes y sostenibles. Sin embargo, después del contacto telefónico y vía email por medio de diferentes unidades de negocio coinciden en desconocer o declinar la opción de compartir esta documentación.

Por lo tanto, para el desarrollo y obtención de la placa fotovoltaica y del conjunto de elementos que la constituyen, se procede al diseño propio de diferentes parámetros y a la investigación del detalle de todas las dimensiones de los componentes que constituye el objeto de estudio. Para ello, se define un rango de valores óptimo en la industria de este tipo de tecnología eligiendo finalmente un valor medio.

3.2. CES EDUPACK

Por otro lado, emplearemos el programa CES EduPack empleado para el estudio de los materiales y procesos con una base de datos alrededor de 9000 materiales con sus respectivas propiedades, características y aplicaciones prácticas en la actualidad.

Además, utilizaremos la herramienta ECO-AUDIT que proporciona el estudio del ciclo de vida de un producto en función de los materiales, su peso y los procesos empleados para su obtención. A partir de la extensa base de datos del programa, permite calcular la energía demandada y la huella de carbono durante la vida del producto cuyos resultados son extraíbles a partir de gráficos y tablas al alcance del diseñador.

El ciclo de vida de un producto (lifecycle) hace referencia a todas las fases de la vida de este, desde la fase de diseño hasta la fase de eliminación (EoL). En función del diseño y de los diferentes procesos a los que ha estado sometido, el grado de impacto ambiental está sometido a diferentes variaciones. Por ello, es de gran relevancia determinar la posibilidad de reutilización o una segunda vida al final de su vida útil, de esta forma, se consigue una reducción de la energía consumida para la obtención de estos elementos.

El objetivo de las ecoauditorías radica en la evaluación de las demandas energéticas y la huella de carbono del ciclo de vida del producto permitiendo comparativas de diseño para su posterior evaluación para estudiar la mejora de la funcionalidad del producto [21, 22].

En este trabajo fin de grado se van a realizar las ecoauditorías atendiendo a los siguientes parámetros [21]:

- El material.

El programa determina la cantidad de energía empleada y la huella de carbono generada para la producción de cada uno de los materiales en función de los pesos introducidos. El programa cuantifica la energía empleada en unidades de megajulios (MJ), mientras que la huella de dióxido de carbono (CO₂) se representa en kilogramos (kg).

- El proceso de fabricación.

El proceso de fabricación del material supone un empleo de energía para el conformado del producto en función del procesado, aportando la información de la energía asociada y la huella de CO₂ del mismo.

En función del material seleccionado el programa determina diferentes posibilidades de fabricación del producto,

- El transporte.

Este aspecto supone un aspecto fundamental para el computo de la energía consumida en la totalidad del proceso. Actualmente, existe un amplio tráfico del mercado a nivel mundial en cuanto a las posibilidades de suministro de productos tanto a nivel aéreo, marítimo o terrestre permitiendo la elección de cualquiera de estas posibilidades y el tipo de combustible empleado.

Este parámetro proporciona la energía empleada en función del transporte y la distancia recorrida entre los puntos en MJ y la huella de carbono en función de estos mismos valores en kg.

- La eliminación.

Se contempla como la fase de eliminación del producto cuando finaliza su tiempo de vida útil, siendo de vital importancia la elección del método en la fase de eliminación del producto. El programa contiene diferentes opciones:

- Landfill. Traslado al destino de residuos correspondiente del producto incluido los costos para su ejecución.
- Downcycle. Reciclado bajo o infrarreciclaje. Cuando el material no se puede reciclar en su totalidad, pero es posible obtener fracciones reciclables.
- Recycle. Reciclaje del producto.
- Re-engineer. Reingeniería del producto. Este campo abarca la formación de diferentes estrategias administrativas y comerciales reinventando diferentes productos o procesos con el fin de disparar el rendimiento, la eficacia y la productividad. De esta forma se revaloriza un producto a través de la gestión de un nuevo enfoque para aumentar su competitividad en el mercado actual [23].
- Reuse. Reutilización del producto.

- Combust. Reutilización energética. Consiste en el aprovechamiento del calor generado durante el proceso de combustión del producto.

También se podría tener en cuenta el impacto ambiental de uso de la placa fotovoltaica, que en este caso sería simplemente el mantenimiento de la misma. Las tareas asociadas a este ejercicio radican en inspecciones eléctricas como el correcto estado de cables o sujeción de conexiones. Además de comprobaciones visuales ante la posibilidad de rotura de las partes expuestas, y limpieza del módulo para asegurar la eficacia en la captación solar.

Indicar que la ejecución de esta operación está sujeta a diferentes condiciones como evitar este trabajo bajo condiciones climatológicas adversas como lluvia o viento o bajo irradiancias inferiores a 200 W/m^2 , o el empleo de sustancias líquidas con específicas composiciones y que presenten bajas diferencias de temperatura con respecto al módulo [24].

Sin embargo, en este proyecto, el programa no puede cuantificar este procedimiento por lo tanto no repercute en los resultados ofrecidos.

4. RESULTADOS

4.1. DISEÑO DE LA PLACA FOTOVOLTAICA

Como se ha procedido anteriormente, se describe de forma individual los valores obtenidos tras la investigación del detalle de todas las piezas que constituyen la placa fotovoltaica:

A. MARCO ESTRUCTURAL.

El dimensionado de este elemento es simple pues su objetivo es sujetar de forma segura la placa fotovoltaica aportando rigidez y estabilidad. Para ello, emplearemos un perfil sencillo que emplea comúnmente la industria.

Por otra parte, hay que matizar que los diferentes agujeros empleados generalmente para diferentes usos tales como tomas de conexión de tierra no se implementaran en el diseño puesto que el objetivo del estudio se basa en cuantificar la totalidad del material empleado.

B. CUBIERTA SUPERIOR.

Las dimensiones de esta pieza vista desde planta se definirán en función de las dimensiones necesarias para sellar las células y los elementos electrónicos.

El espesor del vidrio de la cara superior de la placa presenta una amplia gama de valores comprendido entre 0.1 a 10 mm, preferiblemente de 0.3 a 5 mm. Sin embargo, en la industria se emplea generalmente espesores de 3.2 mm empleando este valor en el diseño original de la pieza [25].

C. CELULAS SOLARES.

Las células de silicio presentan una forma cuadrada con una dimensión de 156 mm de lado tanto para las células de silicio monocristalino como las de silicio policristalino. Sin embargo, las células monocristalino presentan un chaflán de 10 mm debido a la naturaleza en esta tipología.

El número de células que compone la placa fotovoltaica consta de un tamaño estándar 10 X 6 unidades [26].

Por último, el espesor de las células será de 0.16 mm [27].

D. ENCAPSULANTE.

Las dimensiones del largo por el ancho estarán definidas tanto por las dimensiones de las células como por la distancia de separación entre ellas en función de las necesidades para su ensamblaje.

El espesor de este elemento se encuentra comúnmente entre 50 μm y 2mm. En el proyecto emplearemos un espesor de 0,6 mm tanto por la cara superior como por la inferior [25].

E. RECUBRIMIENTO POSTERIOR.

Al igual que el vidrio superior este elemento se conformará en función de las dimensiones obtenidas en la encapsulación de las células solares junto con el entramado electrónico.

El espesor de este elemento consta de 38 μm [25].

F. SELLANTE.

El diseño de este elemento es un prototipo para garantizar su adecuada eficacia.

G. FINGER.

El ancho de este elemento radica en los márgenes que la aplicación de la serigrafía permite, encontrándose unos valores entre 30 y 150 μm . Por lo tanto, emplearemos un valor medio de 100 μm . Por otro lado, los espesores que admite este método consisten entre 10 y 15 μm , aplicando un valor medio de diseño de 12.5 μm [18].

El número de fingers empleados basaremos un diseño de 60 unidades por placa. La razón de emplear esta cantidad radica en diseñar una serie de parámetros para la obtención de la distancia de separación entre ellos a través de la aplicación "PV Grid Calculator" con el objetivo de obtener la mayor eficiencia en función del precio del watio en el mercado actual. El resultado de la distancia que se encuentra entre fingers tras la simulación de la herramienta se trata de 0.25 cm.



SIMULATION
RESOURCES
CONTRIBUTORS
PV LIGHTHOUSE

RESTORE
EXPORT

INPUTS

Solar cell dimensions

Shape Square

Length X_{cell} 15,6 cm

Cell area A_{cell} 243,4 cm²

Solar cell design

Measurement setup Single cell

Front contact N grid

Rear contact P coating

Number of elements

	N	P
Busbars N_B	3	
Pads per busbar N_P	9	9
Fingers per busbar N_F	60	
Finger spacing S_F	0,250	cm

Element dimensions

	N	P
Pad length L_P	2000	2000
Pad width W_P	1500	1500
Busbar width W_B	1500	1500
Finger width W_F	100	

N metal



P metal

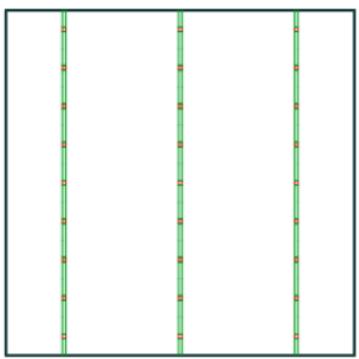


Figura 17 Distancia de separación de los fingers con Grid Calculator – PV Lighthouse

La longitud de este elemento vendrá determinada por la distancia del lado de la placa de 156 mm.

H. BUSBAR.

El número de busbar empleado en el diseño tiene la nomenclatura de 3BB puesto que se trata de la especificación más generalizada. Indica que se establecerá 3 busbar por cada cara de la placa [15].

El ancho de cada elemento se establecerá la medida utilizada por defecto en la aplicación anteriormente mencionada PV Grid Calculator, la cual emplea un ancho de 1.5 mm.

Como se ha estudiado en el marco teórico del proyecto, el procedimiento empleado para la producción de este elemento sobre la placa se trata de la serigrafía, por lo que obtendremos un espesor de 12.5 μm .

Aplicaremos una distancia entre ellas de forma equidistante.

Puesto que la forma de la placa es cuadrada, al igual que los fingers, la longitud de este elemento presenta la misma medida que el lado de esta.

I. TAB WIRE.

El ancho de este elemento generalmente trata de 1 a 2 mm, mientras que el espesor es de 0.1 a 0.2 mm. Por lo tanto, el dato a considerar en el trabajo es de 1.5 mm y 0.15 mm respectivamente [28].

J. BUS WIRE.

El ancho de este elemento generalmente trata de 4 a 6 mm, mientras que el espesor es de 0.15 a 0.35 mm. Por lo tanto, el dato a considerar en el trabajo es de 5 mm y 0.25 mm respectivamente [28].

Tabla 1 Resumen parámetros de diseño – diseño original

ELEMENTO	DISEÑO	MATERIAL CES
MARCO ESTRUCTURAL	Perfil comercial	Aluminio, 2017, forjado, T42
VIDRIO SUPERIOR	Espesor: 3,2 mm	Vidrio: Soda lime - 0080
CÉLULAS SOLARES	Forma cuadrada, lado: 156 mm (10 X 6 uds.) Espesor: 0,16mm *Células Si monocristalino chaflán de 10 mm	Silicio

ENCAPSULANTE	Espesor: 0,6 mm	EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)
RECUBRIMIENTO POSTERIOR	Espesor: 38 μ m	PTFE (virgen)
SELLANTE	Prototipo	Caucho natural
FINGER	Número: 60 Ancho: 100 μ m Espesor: 12,5 μ m Distancia de separación: 2,5 mm	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
BUSBAR	Número: 3BB Ancho: 1,5 mm Espesor: 12,5 μ m	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
TAB WIRE	Ancho: 1,5 mm Espesor: 0,15 mm	Cobre, fundición
BUSBAR	Ancho: 5 mm Espesor: 0,25 mm	Cobre, fundición

Una vez definidos todos los elementos que integran la placa solar fotovoltaica se procede a su recreación en el programa SolidWorks. Para ello se han formado diferentes piezas para todas las configuraciones que se desarrollan en el proyecto. Las operaciones empleadas han sido extrusiones a partir de los croquis cuyas dimensiones se detallan anteriormente, matrices para obtener diferentes entramados que son iguales en todo el conjunto como las células solares, los fingers y los busbar, además de matrices con rotación de 180 grados para poder definir los tab wire y los busbar para formar las diferentes filas de interconexión eléctrica. Para finalizar, se procede al ensamblaje de todas las piezas con diferentes relaciones de posición para su fijación.

Para poder mostrar los resultados se emplea el uso de la herramienta renderizado para la obtención de imágenes con mayor realismo, sin embargo, puesto que hay elementos con espesores muy reducidos y por la naturaleza de este y del propio programa, otros resultados se muestran a través de imágenes rescatadas desde la aplicación para una mayor legibilidad.



Figura 18 Placa fotovoltaica de silicio monocristalino - diseño original – renderizado

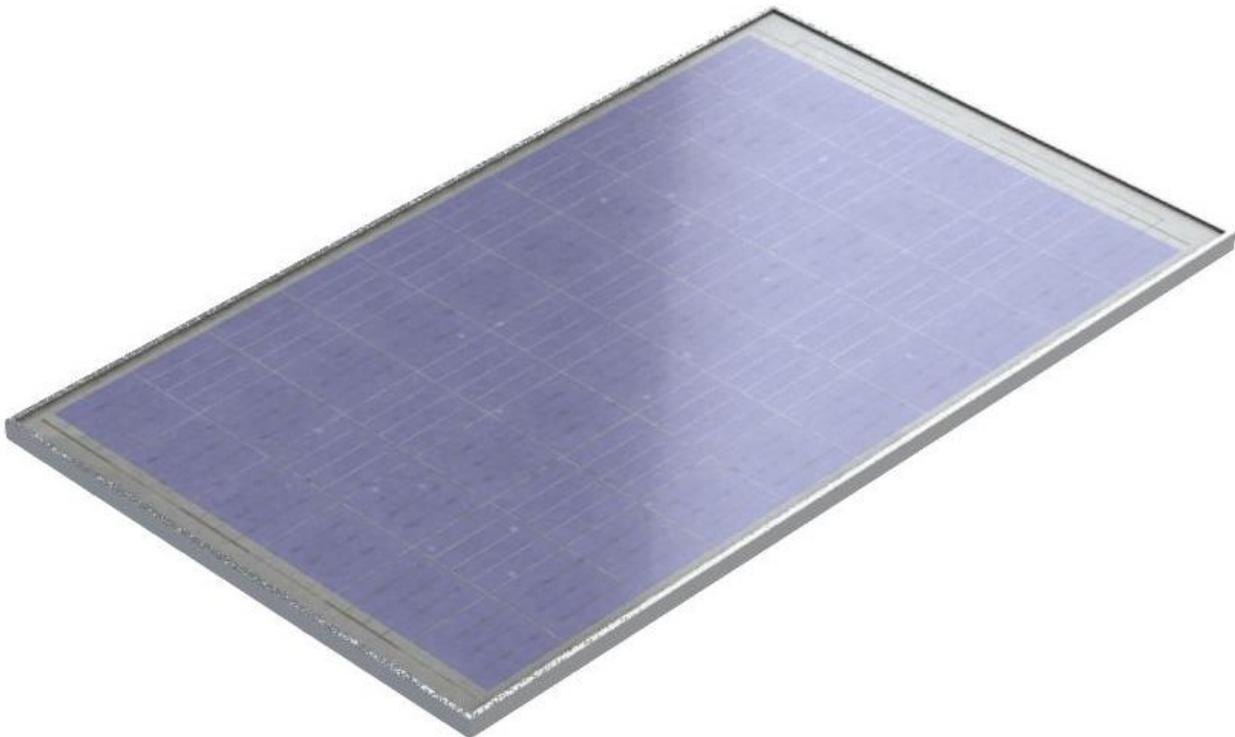


Figura 19 Placa fotovoltaica de silicio policristalino - diseño original - renderizado

En la figura 16 se representa a modo de esquema general la interconexión de las células solares integrada por los tab wire y los bus wire.

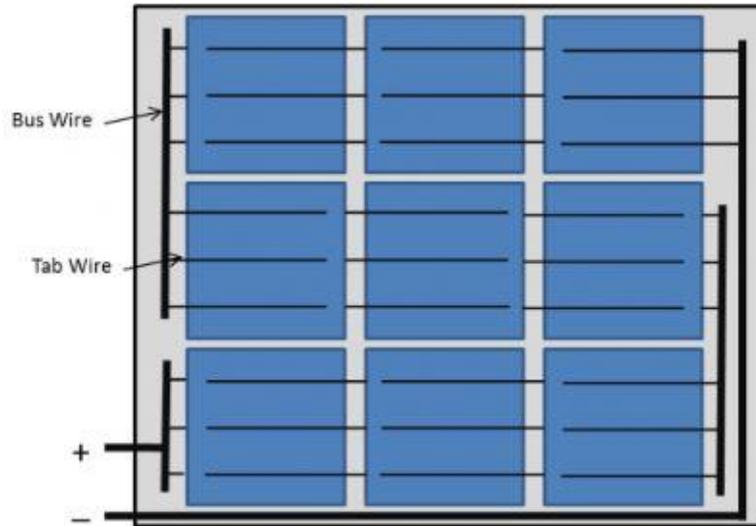


Figura 20 Representación circuito eléctrico

Un aspecto para tener en cuenta en el diseño del elemento eléctrico tab wire se trata de mantener una distancia de seguridad entre las conexiones de la cara superior con respecto de la cara inferior y viceversa para evitar posibles cortocircuitos. Para ello mantendremos una separación de 2 cm [16].

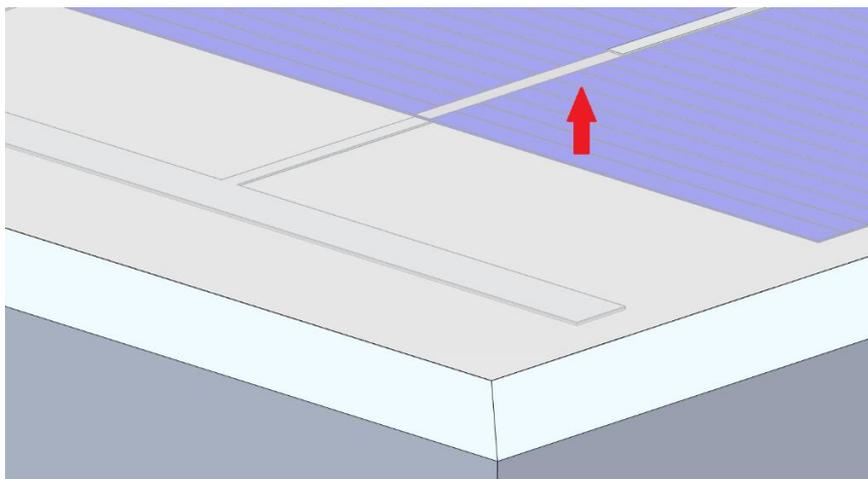


Figura 21 Distancia seguridad tab wire – imagen obtenida desde el ensamblaje SolidWorks

Finalmente se adjunta el plano donde se define el desarrollo de la placa fotovoltaica con los diferentes elementos explicados anteriormente, tanto para la placa de silicio monocristalino como para la placa de silicio policristalino.

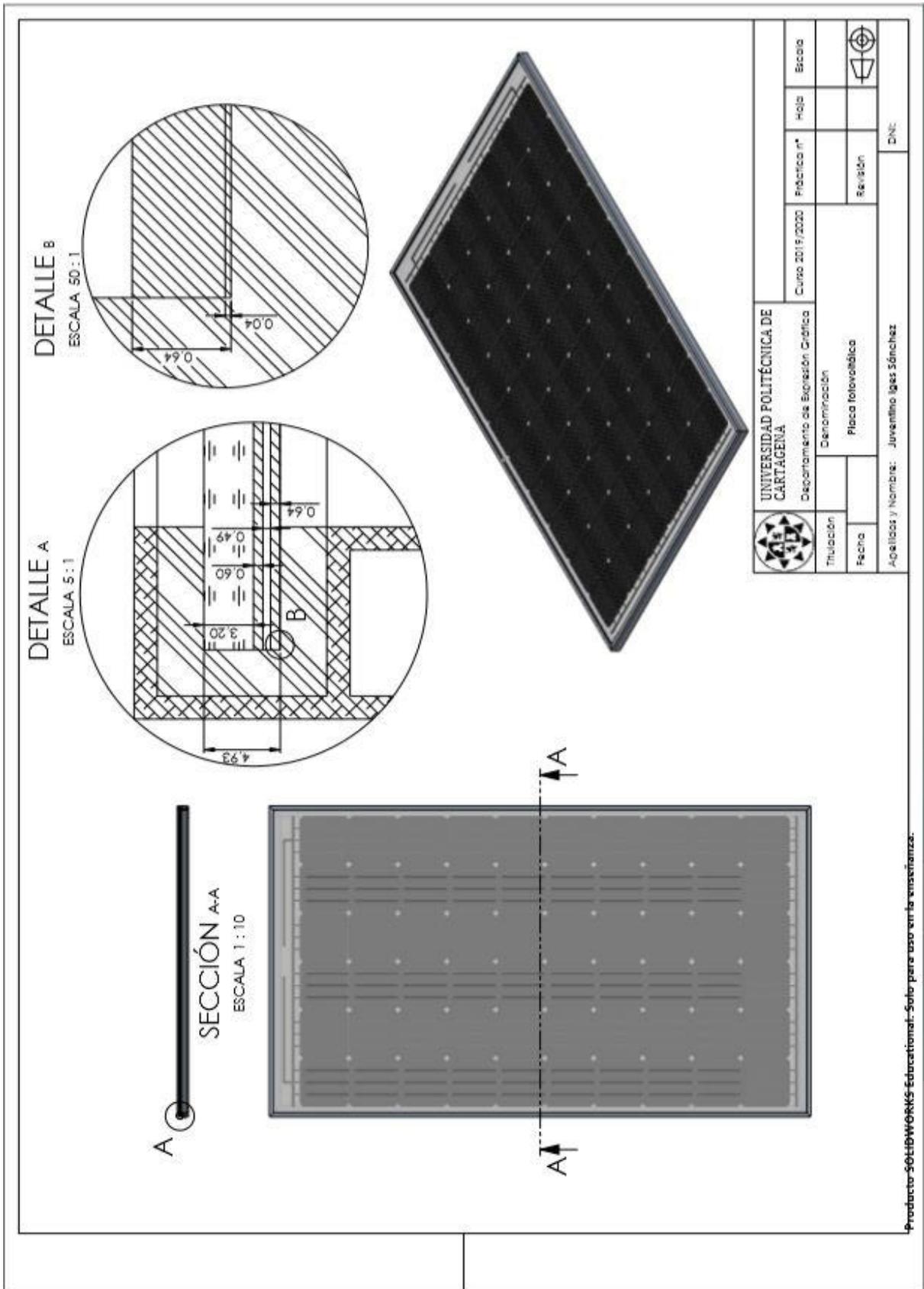


Figura 22 Plano placa fotovoltaica silicio monocristalino - diseño original

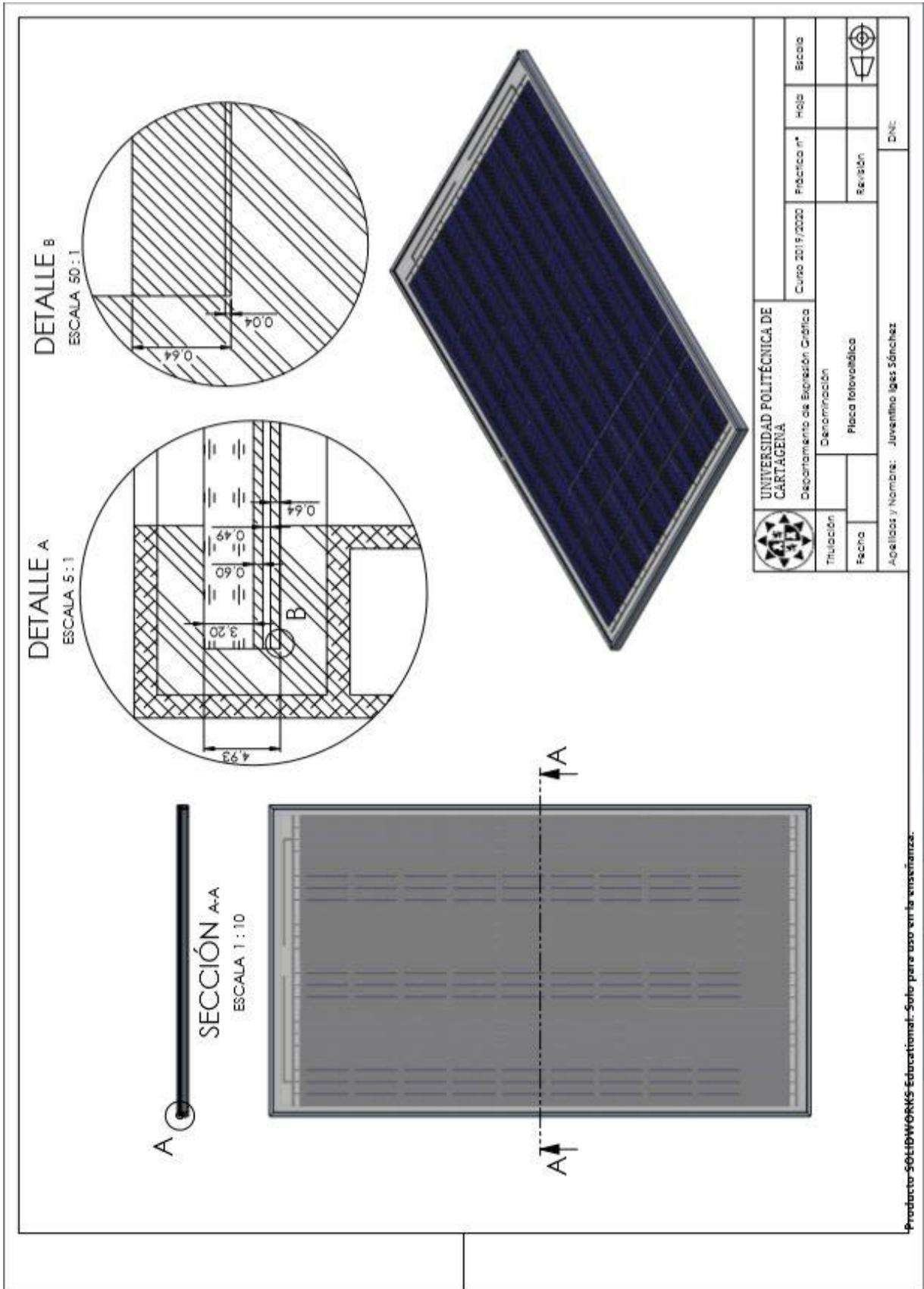


Figura 23 Plano placa fotovoltaica silicio policristalino - diseño original

4.2. CARACTERÍSTICAS QUE COMPONEN LA PLACA FOTOVOLTAICA: MATERIALES, PESO, PROCESO DE FABRICACIÓN Y TRANSPORTE

El objetivo principal del desarrollo de las placas fotovoltaicas en SolidWorks radica en determinar de forma real todos los elementos que la integran con el fin de obtener y aportar los pesos específicos de cada material empleado al estudio de impacto ambiental realizado por el programa CES EduPack.

En paralelo, se describen los procesos de fabricación asociados a los diferentes elementos que constituye la placa fotovoltaica, tratándose de un aspecto fundamental del programa CES para poder obtener los resultados deseados en la herramienta ECO-AUDIT.

➤ Deformación plástica.

Este método genérico se designa comúnmente como proceso de conformado por deformación plástica (PCDP) haciendo referencia a la aplicación de cargas localizadas sobre el bruto de partida hasta el punto de deformarlo plásticamente consiguiendo las características mecánicas y dimensionales deseadas, por esta razón, los materiales empleados presentan apropiadas condiciones de límite elástico y ductilidad, debido a que permitan elevadas deformaciones plásticas sin llegar a la falla del material consiguiendo deformaciones permanentes. Algunos procedimientos como la forja o el laminado se fundamentan en la deformación plástica [29].

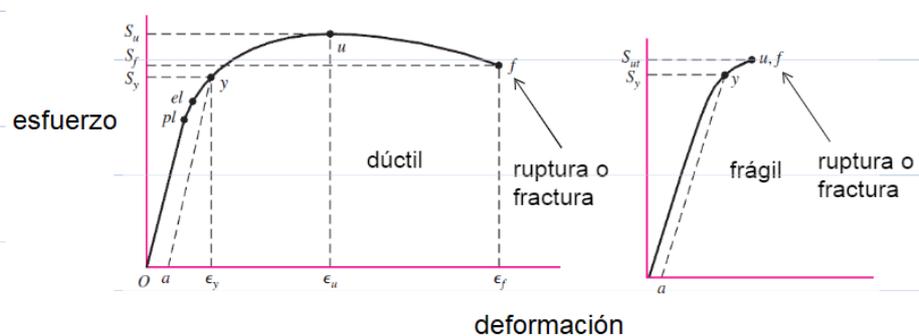


Figura 24 Curva característica esfuerzo-deformación de un material dúctil frente a un material frágil [30]

➤ Moldeo.

Esta técnica se conoce como moldeo por inyección considerando costes de producción reducidos y permitiendo el procesado de piezas con geometrías complejas y elevada precisión. El procedimiento radica inyectar el material en estado líquido, el cual previamente se ha llevado a su punto de fusión, sobre un molde constituido por diversas partes. Posteriormente, se deja enfriar el conjunto, solidificando y adaptando la forma final requerida [31].

Este procedimiento es aplicable a los diferentes materiales que intervienen en el proyecto que comparten este proceso de fabricación, es decir, el desarrollo de esta práctica es la misma aplicado en este caso al vidrio y a los polímeros.

➤ Acabado cerámico.

En el caso de las células solares, las técnicas abordadas para la obtención de las obleas de silicio cristalino tanto para el tipo monocristalino como para el policristalino consiste en el método estandarizado Czochralski y en procedimientos de fundición respectivamente, tal y como se ha explicado en el punto 1.3.4.

Posteriormente, una vez obtenido el lingote, se dispone para su producción en obleas finales empleando para ello, hilos de acero inoxidable aplicando un abrasivo para aliviar los esfuerzos mecánicos que ocasiona este ejercicio. El inconveniente de este proceso radica en la pérdida de material de elevada pureza con un alto porcentaje debido a la manufactura de espesores reducidos [13].

➤ Extrusión de polímeros

El proceso tiene lugar en una extrusora cuyo funcionamiento básicamente consiste en conducir al material base, suministrado en forma de pellets generalmente, sobre un tornillo de Arquímedes guiado en un barril encargado de aportar progresivamente una temperatura y presión determinada forzando la salida del material resultante sobre un orificio de escasas dimensiones.

Se trata de una operación continua, sencilla y polivalente destinada a un gran número de aplicaciones industriales como perfiles de diferentes secciones, láminas, marcos o películas de espesor reducido [32].

A continuación, se muestra la Tabla 2 que recoge todos los elementos expuestos anteriormente en función de los materiales que los componen, su peso, sus diferentes procesos de fabricación.

Tabla 2 Características de la placa fotovoltaica - diseño original

MATERIAL CES	ELEMENTO	PESO [g]	PROCESO DE FABRICACIÓN
Aluminio, 2017, forjado, T42	MARCO ESTRUCTURAL	2552,39	Deformación plástica
Vidrio: Soda lime - 0080	VIDRIO SUPERIOR	13750,2	Moldeo
Silicio	CÉLULAS SOLARES	Monocristalino: 532,8 Policristalino: 537,6	Acabado cerámico
EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)	ENCAPSULANTE	1993,2	Extrusión
PTFE (virgen)	RECUBRIMIENTO POSTERIOR	144,18	Extrusión
Caucho natural	SELLANTE	551,24	Moldeo
Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)	FINGER/ BUSBAR	25,2	Deformación plástica
Cobre, fundición	TAB WIRE / BUS WIRE	175,09	Deformación plástica

A su vez, con el objetivo de estudiar los procesos de fabricación que engloba esta tecnología, se menciona la importancia del proceso de laminación que interconectan el conjunto de los compuestos de la cubierta superior, encapsulante tanto superior como inferior, las células solares junto con sus respectivas conexiones eléctricas y el recubrimiento posterior.

El proceso de laminación o encapsulado se trata de un método fundamental para la obtención de módulos fotovoltaicos mediante máquinas denominadas laminadoras que extraen por vacío los gases albergados, ejerciendo la presión necesaria para confinar

los elementos necesarios que se encuentran en el panel fotovoltaico. Un correcto ejercicio de esta práctica asegura un buen estado de sus elementos durante un largo periodo de tiempo [16].

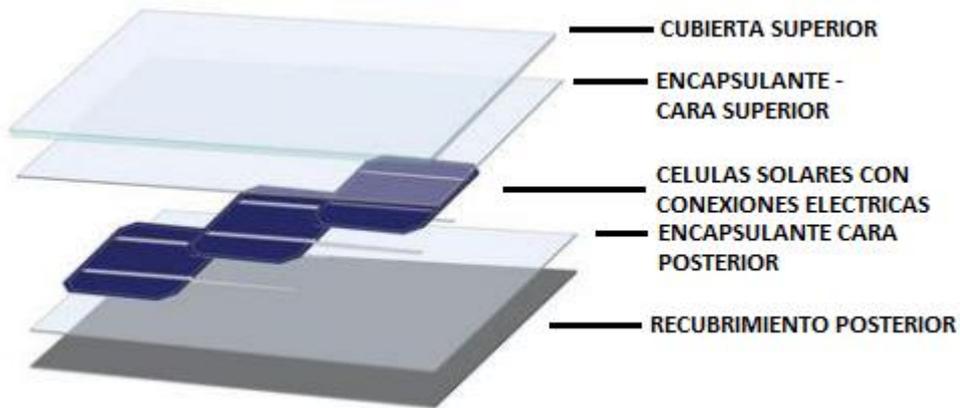


Figura 25 Elementos que intervienen en el proceso de laminación

Un aspecto importante para tener en cuenta con el fin de obtener unos resultados reales y precisos se trata de incluir el transporte en el proceso. Puesto que el diseño de la placa fotovoltaica no es proporcionado por ningún suministrador o fabricante, sino que se trata de un diseño propio como se ha definido anteriormente, se opta por decantarse por un emplazamiento que reúna las características idóneas para la implantación de módulos fotovoltaicos.

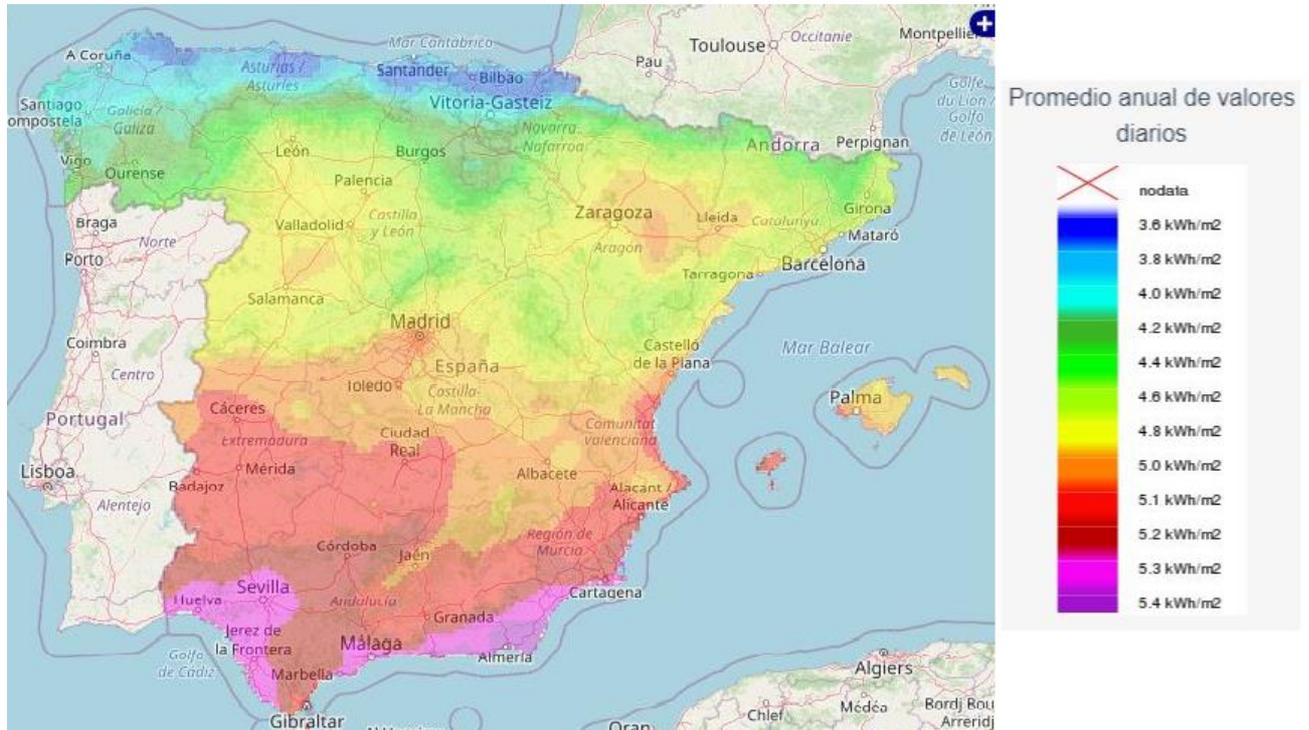


Figura 26 Irradiación en España

Para ello, definiremos que en todos los procesos se produce un traslado general de Madrid – Almería, con una irradiación global de 5.4 [$kWh/m^2/dia$]. Para estudiar la influencia del transporte durante el desarrollo del impacto ambiental [33].

Hay que indicar que el estudio se dedica al peso correspondiente del obtenido por el silicio policristalino. Esto es debido a que ambas opciones arrojaran prácticamente el mismo valor ya que la diferencia entre ambas es mínima, por lo tanto, a fin de destacar los resultados de forma clara y precisa, se opta por el material policristalino por ser la opción más desfavorable, es decir, presenta el peso mayor.

Tras definir toda la documentación necesaria para el desarrollo de la ecoauditoría a través del programa CES EduPack se obtienen los siguientes resultados a partir de la siguiente tabla.

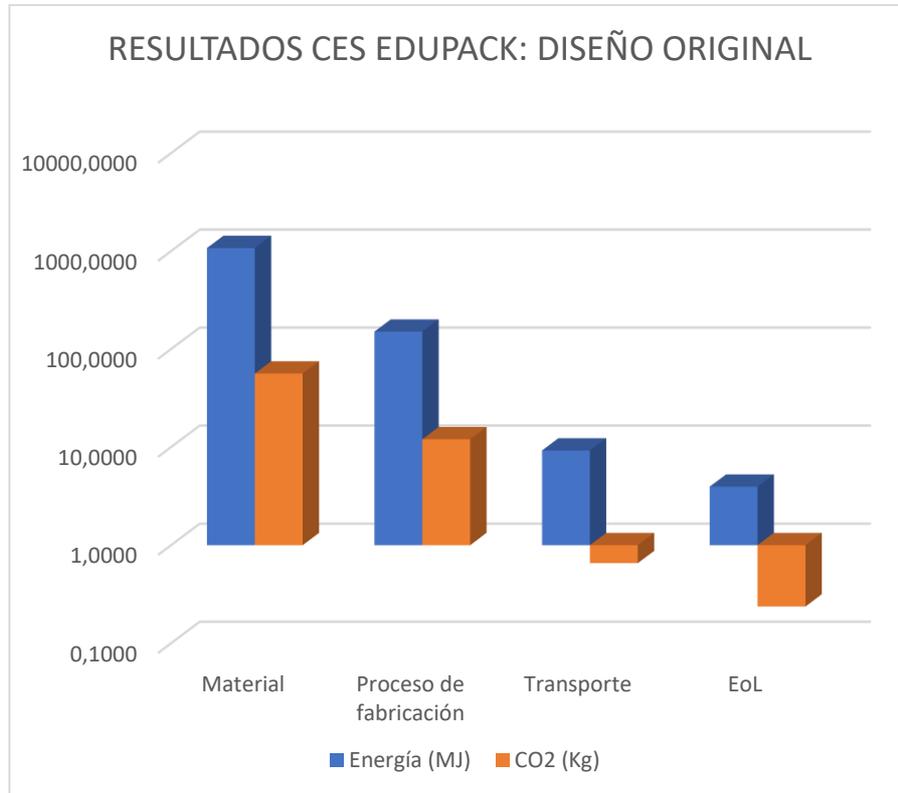


Figura 27 Gráfica resultados CES - Diseño original

Tabla 3 Resultados CES - Diseño original

FASE	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)
Material	1070	86,8	56,2	81,3
Proceso de fabricación	151	12,2	12	17,5
Transporte	9,22	0,7	0,655	0,9
EoL	3,95	0,3	0,237	0,3
Total	1234,17	100	69,1	100

Podemos afirmar que para producir una placa fotovoltaica de silicio cristalino a través del diseño expuesto a lo largo del proyecto de los materiales que la integran, junto con los diferentes procesos de fabricación llevados a cabo para su conformación, aplicando un transporte del producto de 550 kilómetros (km) y en el caso de una falta de gestión de los elementos tras los 25 años de vida útil del equipo tras su instalación en el que se desechan a sus respectivos centros residuales, se emplea una energía total de 1234,17 MJ y se libera 69,1 kg de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Resaltar que tanto la energía para la producción de los materiales elegidos como las emisiones emitidas superan el 80% del total originado. Estos resultados consolidan la necesidad de profundizar en el estudio de los materiales con propiedades adecuadas para una producción sostenible y eficaz en el mercado, con el objetivo de aumentar el rendimiento energético del proceso global.

La intervención de las técnicas de fabricación en el estudio destaca mayormente por su aportación en la huella de carbono con un 17,5% del conjunto. Por otro lado, el transporte del producto vía terrestre simulando la distancia recorrida del centro de producción a la ubicación de instalación es prácticamente inapreciable, al igual que la fase de fin de vida de los componentes del equipo, ya que no se aplica ninguna funcionalidad tras su desmantelado.

5. PROPUESTAS DE MEJORA PARA DISMINUIR EL TIEMPO DE RETORNO DE LA ENERGÍA

En este apartado se van a proponer una serie de mejoras sobre los materiales utilizados para reducir el tiempo de retorno de la energía.

SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DE ALUMINIO POR FIBRA DE CARBONO (PM1).

Se procede a la sustitución del material procedente del marco estructural de aluminio serie 2017 (Aluminium, 2017, Wrought, T42) por la resina epoxy de fibra de carbono (Carbon Fiber, SMC) debido a la similitud de las propiedades mecánicas que presentan. Además, tras la comparativa de las densidades que exhiben ambos materiales recogidos por la herramienta CES EduPack (Aluminium, 2017, Wrought, T42: $2.78 \cdot 10^3 - 2.81 \cdot 10^3$ [kg/m^3]; Carbon Fiber, SMC: $1.4 \cdot 10^3 - 1.7 \cdot 10^3$ [kg/m^3]), definimos que la resina epoxy resulta una disminución en la densidad de aproximadamente un 50%. De esta forma, para un mismo volumen presentará una masa con la misma reducción.

$$\text{ECUACIÓN (1): } \text{densidad1} = \frac{\text{masa1}}{\text{volumen1}}$$

$$\text{ECUACIÓN (2): } \text{densidad2} = \frac{\text{masa2}}{\text{volumen2}}$$

$$\text{densidad2} \approx 0.5 \text{ densidad1} ; \text{volumen1} = \text{volumen2}$$

$$\text{comparando las ECUACIONES (1) y (2): } \frac{\text{masa1}}{\text{volumen1}} \cdot 0.5 = \frac{\text{masa2}}{\text{volumen1}}$$

$$\text{resultando, } \mathbf{\text{masa2} \approx 0.5 \text{masa1}}$$

Además de presentar una densidad mucho menor, el material sustituto tiene una buena resistencia mecánica a la par que modulo elástico y resulta un buen aislante térmico. Además, presenta un buen comportamiento ante cambios de temperaturas y una excelente durabilidad [21].

Como se ha procedido anteriormente en el punto 4.2, se adjuntan las tablas necesarias para definir la implementación de la propuesta de mejora citada para su integración junto con sus resultados.

Tabla 4 Resumen parámetros - PM1

ELEMENTO	DISEÑO	MATERIAL CES
MARCO ESTRUCTURAL	Perfil comercial	Epoxy SMC (fibra de carbono)
VIDRIO SUPERIOR	Espesor: 3,2 mm	Vidrio: Soda lime - 0080
CÉLULAS SOLARES	Forma cuadrada, lado: 156 mm (10 X 6 uds.) Espesor: 0,16mm *Células Si monocristalino chaflán de 10 mm	Silicio
ENCAPSULANTE	Espesor: 0,6 mm	EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)
RECUBRIMIENTO POSTERIOR	Espesor: 38 μ m	PTFE (virgen)
SELLANTE	Prototipo	Caucho natural
FINGER	Número: 60 Ancho: 100 μ m Espesor: 12,5 μ m Distancia de separación: 2,5 mm	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
BUSBAR	Número: 3BB Ancho: 1,5 mm Espesor: 12,5 μ m	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
TAB WIRE	Ancho: 1,5 mm Espesor: 0,15 mm	Cobre, fundición
BUSBAR	Ancho: 5 mm Espesor: 0,25 mm	Cobre, fundición

En este caso, encontramos un nuevo proceso de fabricación diferente a los expuestos anteriormente destinado al material resina Epoxy SMC de fibra de carbono definido a continuación [34, 35] .

- Moldeo por compresión.

Se trata de un método frecuente y consolidado en el empleo de polímeros centrado en la obtención de piezas de grandes superficies, planas y sencillas.

El método se basa en introducir el material base del elemento con las condiciones adecuadas (cantidad, volumen, forma y orientación), en un molde metálico ubicado entre dos planchas. Una vez completado la inserción del material sobre el molde, comienza una etapa de precalentamiento, en el que estas planchas que proporcionan calor absorbido por el molde hasta alcanzar la temperatura de fusión que permite fundir el polímero empleado. Posteriormente, se mantiene la temperatura, comenzando la fase de moldeo manteniendo una presión constante a lo largo de este proceso. La presión ejercida normalmente es suministrada por una prensa hidráulica asegurando el conjunto de forma compacta y permitiendo unos resultados adecuados con buenas propiedades.

Por último, una vez finalizado la fase de moldeo, ejerciendo la misma presión se deja enfriar el conjunto concluyendo la solidificación obteniendo la pieza deseada.

Tabla 5 Características de la placa fotovoltaica - PM1

MATERIAL CES	ELEMENTO	PESO [g]	PROCESO DE FABRICACIÓN
Epoxy SMC (fibra de carbono)	MARCO ESTRUCTURAL	1412,93	Moldeo por compresión
Vidrio: Soda lime - 0080	VIDRIO SUPERIOR	13750,2	Moldeo
Silicio	CÉLULAS SOLARES	Monocristalino: 532,8 Policristalino: 537,6	Acabado cerámico
EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)	ENCAPSULANTE	1993,2	Extrusión
PTFE (virgen)	RECUBRIMIENTO POSTERIOR	144,18	Extrusión
Caucho natural	SELLANTE	551,24	Moldeo
Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)	FINGER/ BUSBAR	25,2	Deformación plástica
Cobre, fundición	TAB WIRE / BUS WIRE	175,09	Deformación plástica

Figura 28 Gráfica resultados CES - PM1

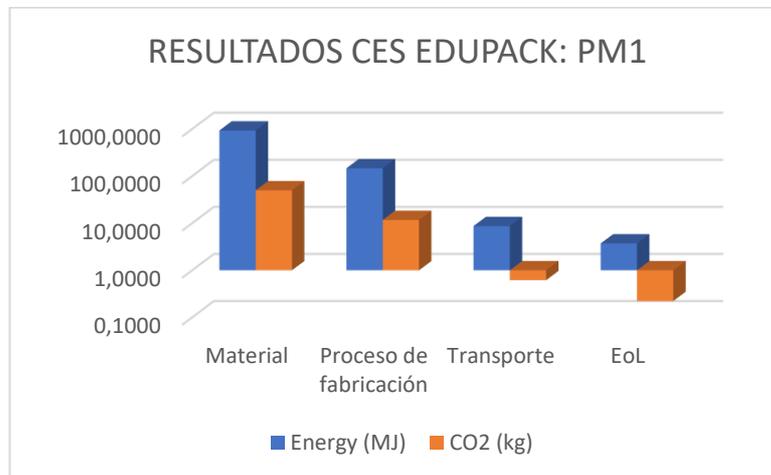


Tabla 6 Comparativa resultados CES – PM1 / Diseño original

FASE	PM1				DISEÑO ORIGINAL			
	Energy (MJ)	Energy (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)	Energy (MJ)	Energy (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)
Material	929	85,4	50	79,9	1070	86,8	56,2	81,3
Proceso de fabricación	147	13,5	11,7	18,7	151	12,2	12	17,5
Transporte	8,69	0,8	0,617	1	9,22	0,7	0,655	0,9
EoL	3,72	0,3	0,223	0,4	3,95	0,3	0,237	0,3
Total	1088,41	100	62,54	100	1234,17	100	69,1	100

En este caso, se aborda la sustitución del material empleado en el marco estructural, entre el aluminio y la resina epoxy SMC con fibra de carbono basado en el concepto de optimizar materiales que ofrecen propiedades similares y reduciendo aproximadamente a la mitad la masa requerida para obtener las dimensiones y condiciones de partida. De esta forma, se consume una energía de 1089,41 MJ y se emite 62,54 kg de CO₂.

Aunque las proporciones entre ambas posibilidades son prácticamente iguales, el sumatorio total se reduce, ratificando una propuesta de mejora que reduce la energía y las emisiones de CO₂ con respecto al diseño original en un 11,81% y un 9,5% respectivamente, resaltando una vez más la elevada discrepancia entre los materiales y el resto de los parámetros.

REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LAS CÉLULAS SOLARES (PM2).

En este caso, reduciremos el grosor de las células de silicio desde 160 μm que presenta el diseño original a 50 μm . Esta propuesta supone una gran relevancia puesto que el silicio cristalino supone entorno al 90% del mercado a nivel internacional de la producción de la energía solar fotovoltaica con una tasa de crecimiento elevada, suponiendo un aspecto de gran relevancia el estudio y la mejora continuada de la disminución de la oblea de silicio suponiendo una reducción en los costes de producción y fabricación para un desarrollo sostenible.

El estudio mencionado, afirma que incluso este nuevo dimensionado supone una mejora en la eficiencia del módulo, reduciendo el gasto de capital de producción de un 48%, el coste del módulo en un 28% y el coste total de producir una instalación suponiendo una fuente de obtención renovable a lo largo de su vida útil (LCOE) en un 24%. Estos datos ofrecen unos resultados arrolladores potenciando la posibilidad de adaptación e implantación de este tipo de industria, que, dada a la situación de lucha contra la reducción de emisiones de gases contaminantes, es necesario la evolución del proceso tecnológico para la disminución de costes y un mayor arraigo de esta tecnología [27, 36].

De nuevo se adjuntan la información necesaria para definir la implementación de esta propuesta de mejora citada para su integración junto con sus resultados.

Tabla 7 Resumen parámetros de diseño - PM2

ELEMENTO	DISEÑO	MATERIAL CES
MARCO ESTRUCTURAL	Perfil comercial	Aluminio, 2017, forjado, T42
VIDRIO SUPERIOR	Espesor: 3,2 mm	Vidrio: Soda lime - 0080
CÉLULAS SOLARES	Forma cuadrada, lado: 156 mm (10 X 6 uds.) Espesor: 0,05mm *Células Si monocristalino chaflán de 10 mm	Silicio

ENCAPSULANTE	Espesor: 0,6 mm	EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)
RECUBRIMIENTO POSTERIOR	Espesor: 38 μ m	PTFE (virgen)
SELLANTE	Prototipo	Caucho natural
FINGER	Número: 60 Ancho: 100 μ m Espesor: 12,5 μ m Distancia de separación: 2,5 mm	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
BUSBAR	Número: 3BB Ancho: 1,5 mm Espesor: 12,5 μ m	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
TAB WIRE	Ancho: 1,5 mm Espesor: 0,15 mm	Cobre, fundición
BUSBAR	Ancho: 5 mm Espesor: 0,25 mm	Cobre, fundición

Tabla 8 Características de la placa fotovoltaica - PM2

MATERIAL CES	ELEMENTO	PESO [g]	PROCESO DE FABRICACIÓN
Aluminio, 2017, forjado, T42	MARCO ESTRUCTURAL	2554,9	Deformación plástica
Vidrio: Soda lime - 0080	VIDRIO SUPERIOR	13750,2	Moldeo
Silicio	CÉLULAS SOLARES	Monocristalino: TOTAL: 166,8 Policristalino: TOTAL: 168	Acabado cerámico
EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)	ENCAPSULANTE	1993,2	Extrusión
PTFE (virgen)	RECUBRIMIENTO POSTERIOR	144,18	Extrusión
Caucho natural	SELLANTE	548,98	Moldeo
Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)	FINGER/ BUSBAR	25,2	Deformación plástica

Cobre, fundición	TAB WIRE / BUS WIRE	175,09	Deformación plástica
------------------	---------------------	--------	----------------------

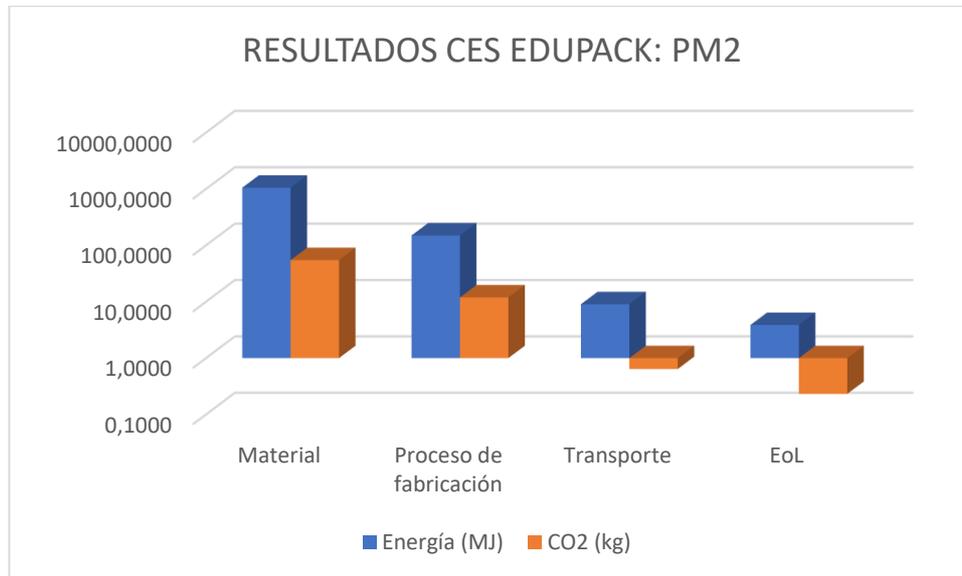


Figura 29 Gráfica resultados CES - PM2

Tabla 9 Comparativa resultados CES - PM2 / Diseño original

FASE	PM2				DISEÑO ORIGINAL			
	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)
Material	1050	86,7	54,8	81	1070	86,8	56,2	81,3
Proceso de fabricación	150	12,3	12	17,7	151	12,2	12	17,5
Transporte	9,05	0,7	0,642	1	9,22	0,7	0,655	0,9
EoL	3,87	0,3	0,232	0,3	3,95	0,3	0,237	0,3
Total	1212,92	100	67,647	100	1234,17	100	69,1	100

Este caso se valora la reducción del espesor de las obleas de silicio cristalino de 160 μm a 50 μm reduciendo el peso del silicio de 537,6 a 168 gramos, esto supone una reducción de 369,6 g y por tanto un 68,65% del conjunto sobre este material en concreto. En cuanto a la reducción de costes del material en cuestión resulta un acierto categórico, sin embargo, en cuanto a la reducción del impacto ambiental no supone progresos significantes en el estudio, con una escasa reducción del 1,72% de la energía empleada y un 2,1% sobre las emisiones producidas.

SUSTITUCIÓN DEL MATERIAL DEL MARCO ESTRUCTURAL CON LA REDUCCIÓN DEL ESPESOR EN LAS OBLEAS DE SILICIO (PM3).

En este apartado se incorpora las dos propuestas de mejora detalladas anteriormente en una misma célula solar, es decir, se propone una placa fotovoltaica con la sustitución del material del marco estructural entre el aluminio y la resina epoxy de fibra de carbono y la reducción del espesor de las obleas de silicio cristalino, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 10 Resumen parámetros de diseño - PM3

ELEMENTO	DISEÑO	MATERIAL CES
MARCO ESTRUCTURAL	Perfil comercial	Epoxy SMC (fibra de carbono)
VIDRIO SUPERIOR	Espesor: 3,2 mm	Vidrio: Soda lime - 0080
CÉLULAS SOLARES	Forma cuadrada, lado: 156 mm (10 X 6 uds.) Espesor: 0,05mm *Células Si monocristalino chaflán de 10 mm	Silicio
ENCAPSULANTE	Espesor: 0,6 mm	EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)
RECUBRIMIENTO POSTERIOR	Espesor: 38 μ m	PTFE (virgen)
SELLANTE	Prototipo	Caucho natural
FINGER	Número: 60 Ancho: 100 μ m Espesor: 12,5 μ m Distancia de separación: 2,5 mm	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
BUSBAR	Número: 3BB Ancho: 1,5 mm Espesor: 12,5 μ m	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)
TAB WIRE	Ancho: 1,5 mm Espesor: 0,15 mm	Cobre, fundición
BUSBAR	Ancho: 5 mm Espesor: 0,25 mm	Cobre, fundición

Tabla 11 Características de la placa fotovoltaica - PM3

MATERIAL CES	ELEMENTO	PESO [g]	PROCESO DE FABRICACIÓN
Epoxy SMC (fibra de carbono)	MARCO ESTRUCTURAL	1414,32	Moldeo
Vidrio: Soda lime - 0080	VIDRIO SUPERIOR	13750,2	Moldeo
Silicio	CÉLULAS SOLARES	Monocristalino: TOTAL: 166,8 Policristalino: TOTAL: 168	Acabado cerámico
EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)	ENCAPSULANTE	1993,2	Extrusión
PTFE (virgen)	RECUBRIMIENTO POSTERIOR	144,18	Extrusión
Caucho natural	SELLANTE	548,98	Moldeo
Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)	FINGER/BUSBAR	25,2	Deformación plástica
Cobre, fundición	TAB WIRE / BUS WIRE	175,09	Deformación plástica

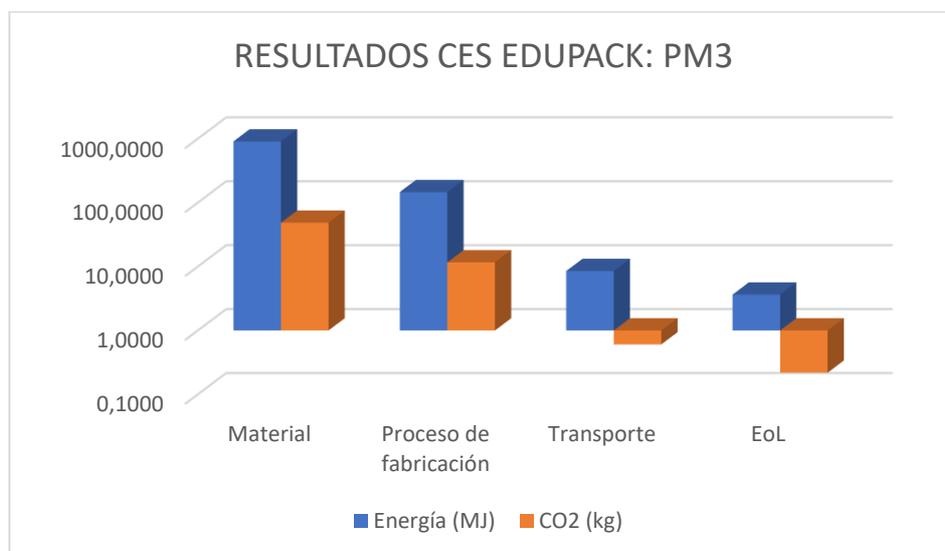


Figura 30 Gráfica resultados CES - PM3

Tabla 12 Comparativa resultados CES - PM3 / Diseño original

FASE	PM3				DISEÑO ORIGINAL			
	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)	Energía (MJ)	Energía (%)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (%)
Material	907	85,1	48,5	79,54	1070	86,8	56,2	81,3
Proceso de fabricación	146	13,7	11,7	19,11	151	12,2	12	17,5
Transporte	8,52	0,85	0,605	0,99	9,22	0,7	0,655	0,9
EoL	3,64	0,35	0,219	0,36	3,95	0,3	0,237	0,3
Total	1065,16	100	61,024	100	1234,17	100	69,1	100

Por último, esta propuesta trata de unificar los métodos de mejora expuestos anteriormente en una misma, aportando la mayor reducción en los parámetros estudiados, representando la opción más recomendada en cuando a la optimización y producción de placas fotovoltaicas de silicio cristalino con mayor rendimiento en cuanto a costes de producción energéticas y reducción de emisiones de CO₂ con valores de 1065,16 MJ y 61,024 kg, aportando una reducción en un 13,7% y un 11,7% respectivamente.

Tabla 13 Disminución impacto ambiental de las PMs (%)

	Energía (%MJ)	Emisiones CO ₂ (%kg)
PM1	11,8	9,5
PM2	1,72	2,1
PM3	13,7	11,7

IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS DE RECICLAJE EN LAS PROPUESTAS DE MEJORA.

Un aspecto a tener en cuenta para el análisis del impacto ambiental radica en su gestión una vez completada la vida útil del producto, es decir, determinar si el producto puede ser destinado a otro fin [13].

Dado el cuantioso número de aplicaciones que involucra la energía solar fotovoltaica es de vital importancia establecer adecuadas directrices acerca de esta materia, cuyo objetivo radica en solventar la pérdida de materiales obteniendo un beneficio económico y medioambiental a partir de técnicas que aseguren su rendimiento y viabilidad, promoviendo un desarrollo sostenible.

Las tecnologías de recuperación están orientadas principalmente a la obtención del vidrio de la cara superior, las células de silicio cristalino y los metales.

Con respecto al marco estructural, en paralelo a su diseño, su montaje se comprende de diferentes piezas desmontables cuya retirada se efectúa manualmente mediante la extracción de diferentes componentes que las integra (tornillos, adhesivos u otros elementos de sujeción), resultando un proceso relativamente sencillo.

Por otro lado, el resto de los componentes se encuentran integrados en un único elemento a través del proceso de laminación. Para poder diferenciar estos componentes existen diversas técnicas basadas en el concepto de triturar la pieza para su posterior separación o la obtención de los diferentes componentes por medio de diferentes tratamientos.

La primera opción consiste en reducir por trituración los paneles en determinadas dimensiones para diferentes acciones posteriores de separación en función de su densidad y propiedades electrostáticas. Este proceso resulta inviable tanto técnica como económicamente debido a que presenta un alto contenido en partículas que resultan difícil determinar su composición dado su equivalente heterogeneidad al no observarse un material predominante en la parte. Por otro lado, existen otros procedimientos como métodos químicos y térmicos para el reciclaje de ciertos componentes.

MÉTODOS QUÍMICOS

Consiste en actuar químicamente sobre la capa del encapsulado de material EVA con el fin de rescatar la célula solar íntegramente. El proceso más consolidado radica en sumergir el panel solar en ácido nítrico o en tricloroetileno. Sin embargo, este método ocasiona el deterioro de las propiedades del resto de componentes declinando, por

tanto, esta opción como un procedimiento viable técnicamente para el reciclaje de los diferentes componentes.

DEGRADACIÓN TÉRMICA

Consiste en la descomposición térmica de la capa de encapsulante EVA para la recuperación y reciclaje del vidrio de la cara superior, la célula y los metales pertenecientes a las conexiones eléctrica mediante hornos de convección de alta temperatura en una atmósfera inerte, puesto que las atmósferas con contenido en oxígeno benefician la combustión del EVA ocasionando la rotura de célula. Este proceso es debido al bajo punto de fusión del material encapsulante en comparación con el resto de los elementos, permitiendo su descomposición en monóxido de carbono (CO) y CO₂ y resultando la alternativa más factible para el reciclado de materias primas asociadas a paneles solares que superan su vida útil, cuyos efectos son visibles en la degradación de la potencia proporcionada por el mismo.

En paralelo, los polímeros termoplásticos como el PTFE son reciclables, que en este caso actúa como recubrimiento posterior de la placa fotovoltaica [37].

El proceso de reciclado se basa comúnmente en la trituración de los elementos para su posterior tratamiento en fase líquida en la que se eliminan posibles impurezas y gases que puedan albergar en su interior, e incluso se trata químicamente para adecuar sus propiedades a las condiciones originales. Finalmente, el material obtenido se conforma en lingotes, placas o el dimensionado adecuado para su posterior procesado [38].

La tabla número 13 recoge los procesos a los que se someten los diferentes elementos que disponen la placa fotovoltaica y que será objeto de estudio de este apartado para analizar como interviene en el impacto ambiental.

Tabla 14 Procesos EoL para los materiales del proyecto

ELEMENTO	MATERIAL - CES	EoL
MARCO ESTRUCTURAL	Aluminio, 2017, forjado, T42	Reciclaje
MARCO ESTRUCTURAL - SUSTITUTO	Epoxy SMC (fibra de carbono)	Reciclaje bajo
VIDRIO SUPERIOR	Vidrio: Soda lime - 0080	Reciclaje
CÉLULAS SOLARES	Silicio	Reutilización

ENCAPSULANTE	EVA (Shore A85, 25% acetato de vinilo)	Vertedero
RECUBRIMIENTO POSTERIOR	PTFE (virgen)	Reciclaje
SELLANTE	Caucho natural	Vertedero
FINGER/ BUSBAR	Plata, pureza comercial, fina, suave (recocida)	Reciclaje
TAB WIRE / BUS WIRE	Cobre, fundición	Reciclaje

Destacar que la herramienta ECO-AUDIT no recoge todos los procesos de reacondicionamiento para todos los materiales que presenta en su base de datos, por lo tanto, se procede a elección del proceso más representativo en cada caso. Con respecto al material sustituto del marco estructural, la resina epoxy de fibra de carbono, se considera la necesidad de tratar nuevamente el material para asegurar sus propiedades mecánicas por lo que se procede al infrarreciclaje, ya que el programa no permite la acción del reciclaje. En paralelo, el silicio procedente de las células solares, se propone su reutilización al rescatar de forma íntegra este componente, considerando la conformidad de las acciones pertinentes para la aprobación del perfecto rendimiento del equipo.

A continuación, se muestra la comparativa de implementar las diferentes técnicas de reciclaje a los 4 casos estudiados en el proyecto.

Tabla 15 Comparativa aplicando EoL - diseño original

FASE	DISEÑO ORIGINAL - RECICLADO		DISEÑO ORIGINAL	
	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)
Material	1070	56,2	1070	56,2
Proceso de fabricación	151	12	151	12
Transporte	9,22	0,655	9,22	0,655
EoL	-679	-39,5	3,95	0,237
Total	555	29,4	1234,17	69,1



Tabla 16 Comparativa aplicando EoL - PM1

FASE	PM1 - RECICLADO		PM1	
	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Material	930	50	929	50
Proceso de fabricación	147	11,7	147	11,7
Transporte	8,69	0,617	8,69	0,617
EoL	-199	-11,7	3,72	0,223
Total	886	50,6	1088,41	62,54

Tabla 17 Comparativa aplicando EoL - PM2

FASE	PM2 - RECICLADO		PM2	
	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)
Material	1050	54,8	1050	54,8
Proceso de fabricación	150	12	150	12
Transporte	9,05	0,642	9,05	0,642
EoL	-657	-38	3,87	0,232
Total	554	29,4	1212,92	67,647

Tabla 18 Comparativa aplicando EoL - PM3

FASE	PM3 - RECICLADO		PM3	
	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)	Energía (MJ)	CO ₂ (kg)
Material	907	48,5	907	48,5
Proceso de fabricación	146	11,7	146	11,7
Transporte	8,52	0,605	8,52	0,605
EoL	-117	-10,2	3,64	0,219
Total	885	50,5	1065,16	61,024

En la figura 31 se visualizan la totalidad de los resultados sobre cada uno de los diseños estudiados con respecto la implementación de los procesos de reciclado del tras el final de vida útil del producto.

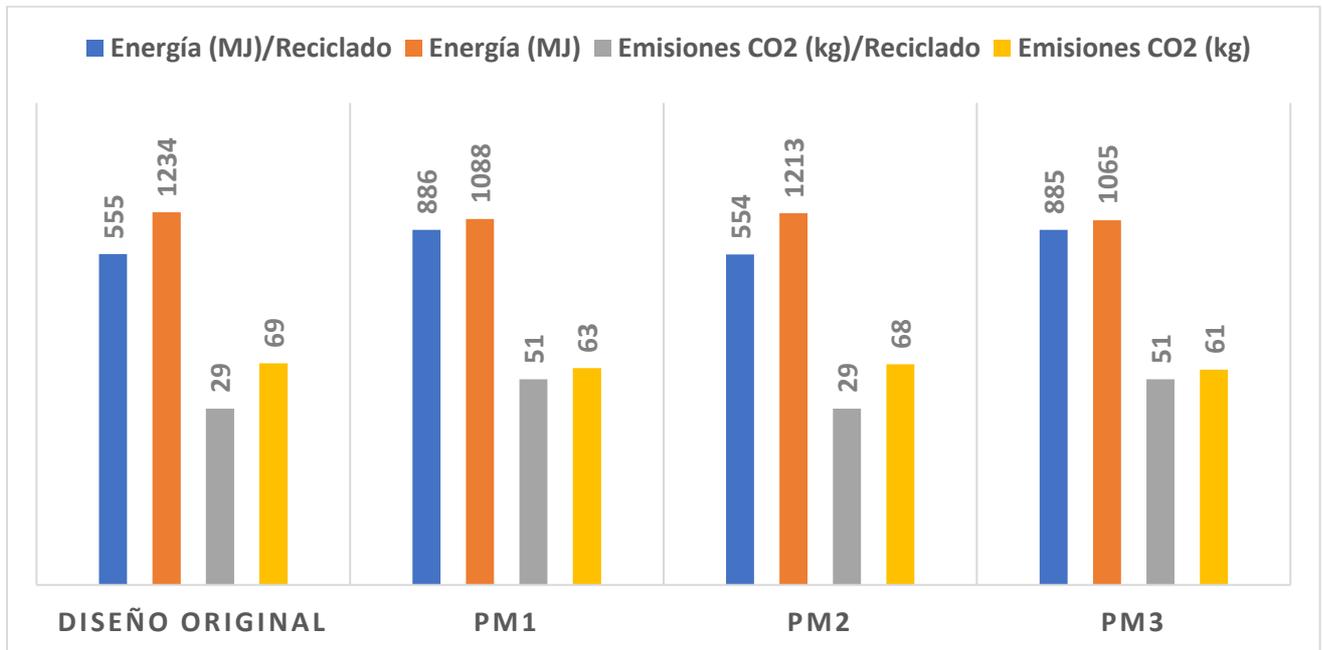


Figura 31 Comparativa resultados totales de la implementación de Eol

Tras la evaluación de los resultados obtenidos, la opción con mayor eficiencia energética se trata de la propuesta en la que únicamente se reduce el espesor de las células de silicio cristalino de 160 μm a 50 μm tras la aplicación de las diferentes técnicas de reciclado estudiadas sobre la totalidad de los materiales evaluados en el proyecto.

Por otro lado, existe una diferencia considerable entre los valores proporcionados por los diseños que presentan distintos materiales pertenecientes al marco estructural, debido a imposibilidad de reciclar por completo el material de la resina epoxy de fibra de carbono. La propuesta que estudia el sustituto del aluminio analiza un material que presenta propiedades mecánicas equivalentes entre ambos, a la par que una densidad menor logrando reducir el peso para un mismo volumen, constituyendo un parámetro fundamental para la obtención de los resultados. Sin embargo, desde el punto de vista ante las posibilidades de reciclado presenta menor rendimiento.

Abordando la comparativa de aplicar las técnicas de reciclado existen notables diferencias entre las opciones más favorables. La PM3 que no aplica procesos de

reciclado ofrece un coste de energía de 1065,16 MJ con una emisión de 61,024 kg de CO₂, mientras que la PM2 aplicando todas las labores de reciclado posibles emplea 554 MJ junto con emisiones en CO₂ de 29,4 kg, reduciendo respectivos parámetros en un 48% y 51,82% consolidando la irrefutable necesidad de gestionar adecuadamente los materiales por medio de sus respectivos tratamientos residuales con el objetivo de reciclar y posteriormente conformar en nuevas materias primas fortaleciendo sus consecuencias, medioambientales y económicas. Desde el punto de vista en la que para la misma PM2 aplicando los procesos de reciclado se reduce un 54,32% de la energía demandada y un 57,453% de emisiones de CO₂.

En la tabla 19 se recoge las diferentes disminuciones que supone la aplicación de los procesos de reciclado sobre cada uno de los diseños estudiados.

Tabla 19 Disminución tras la aplicación de los procesos de reciclado del EoL

	Energía (%MJ)	Emisiones CO ₂ (%kg)
Diseño original	55,03	57,453
PM1	18,6	19,1
PM2	54,32	57,453
PM3	16,92	17,24

En términos medioambientales la reducción de emisiones atmosféricas de gases como el CO₂ repercuten de forma positiva sobre el calentamiento global debido al efecto invernadero, tratándose actualmente de un concepto estandarizado y demandado por la sociedad. Este calentamiento progresivo sobre la superficie terrestre evidenciado por la actividad humana origina diferentes estragos como la incapacidad de disolución del océano por medio de la circulación oceánica y la modificación de patrones climáticos provocando cambios en los ecosistemas actualmente visibles como el deshielo tanto el de los casquetes polares como el que se encuentra acumulado en las cordilleras montañosas, provocando riesgos potencialmente peligrosos tanto para la naturaleza como para la salud humana [39].

Por lo tanto, es fundamental el estudio de la mejora continuada que engloba el conjunto de los procesos de tratamiento de los materiales desde la obtención de la materia prima

hasta la gestión del producto una vez finalizado su vida útil, con el objetivo de idealizar una producción efectiva y sostenible para el medioambiente.

Finalmente, se concluye que en función del emplazamiento de la instalación fotovoltaica se obtiene una media de la energía de irradiación solar por metro cuadrado por día de 4,934 [3,6 MJ/m² · día]. Para una vida útil estimada de la placa fotovoltaica de 25 años y según sus dimensiones de 1,773 m² se podría llegar a producir, en condiciones óptimas climatológicas y del diseño de la instalación, una energía de 287.400 MJ. Comparando esta producción en función de los valores estimados en condiciones prácticas de esta tecnología de un 16,5% para las CSM y de un 13% para las CSP se lograría una producción de 47.420 MJ y 28.740 MJ respectivamente, suponiendo una rentabilidad energética del 98,83% y 98,07% con respecto a la energía necesaria para su fabricación [40, 41].

Ubicación: Almería

Media anual hora solar pico (HSP): 4,934

1 HSP = 3,6 MJ/m² · día

Dimensiones placa solar: 1,747m x 1,015m = 1,773 m²

Uso: 25 años = 9125 días

Energía total: 287.400 MJ

Rendimiento placa solar fotovoltaica silicio monocristalino: 16,5%

Energía total producida placa solar fotovoltaica silicio monocristalino: 47.420 MJ

Rentabilidad energética placa solar fotovoltaica silicio monocristalino: 98,83%

Rendimiento placa solar fotovoltaica silicio policristalino: 13%

Energía total producida placa solar fotovoltaica silicio policristalino: 37.360 MJ

Rentabilidad energética placa solar fotovoltaica silicio policristalino: 98,517%

Trasladando los valores teóricos obtenidos a cerca de la producción energética de la PM2 incluyendo la gestión de los diferentes procesos de reciclado con respecto la energía requerida para su fabricación se determina que para el módulo fotovoltaico de silicio monocristalino se obtendrían beneficios a partir de aproximadamente 4 meses. Mientras que para la placa solar fotovoltaica parte de aproximadamente 5 meses.



Energía requerida para la producción: 554 MJ

Energía total producida placa solar fotovoltaica silicio monocristalino: 47.420 MJ

Tiempo estimado para producir la energía requerida para su conformación: 107 días

Energía total producida placa solar fotovoltaica silicio policristalino: 37.360 MJ

Tiempo estimado para producir la energía requerida para su conformación: 136 días

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Para abordar este proyecto ha resultado imprescindible el uso de la herramienta de diseño en 3D SolidWorks para reproducir los diferentes diseños tras la revisión bibliográfica estudiada acerca de los componentes y materiales que engloba esta tecnología e industria. A partir de este programa, se han podido obtener las cantidades requeridas para la posterior evaluación de impacto ambiental y su análisis.

Por otro lado, el programa CES EduPack resulta igualmente determinante para la elección de los materiales que integran las placas fotovoltaicas. A través de la herramienta ECO-AUDIT se realizan diferentes ecoauditorías para analizar el impacto ambiental que supone la producción del equipo estudiado junto con la implementación de los diferentes procesos de reciclado asociados a estos mismos.

Con respecto a la comparativa de la evaluación del impacto ambiental en el supuesto de obviar los diferentes procesos de reciclado sobre los elementos que integran la placa fotovoltaica se pierde un porcentaje elevado tanto de energía requerida para su producción como de las emisiones de CO₂, fortaleciendo la importancia de la adecuada gestión de los materiales una vez finalizada su vida útil.

Todas las evaluaciones coinciden en que aproximadamente el 80% tanto de la energía consumida como de las emisiones emitidas es debido al procesado de los materiales, por tanto, se subraya la necesidad de profundizar en la investigación de materiales para la obtención de propiedades específicas y costes reducidos para la sostenibilidad de la producción mundial en el mercado con beneficios económicos y medioambientales.

Los resultados obtenidos por las ecoauditorías elaboradas para la evaluación del impacto ambiental sobre los diferentes diseños estudiados confirman que la propuesta con mayor eficiencia energética se trata del diseño de partida con espesores de la oblea de silicio de 50 μm (PM2) aplicando los procesos de reciclado correspondientes con una demanda energética de 554 MJ y emisiones atmosféricas de 29,4 kg de CO₂ para su producción en función de los materiales, pesos, procesos de fabricación y de reciclado y el supuesto de proceder a la instalación del equipo con un traslado vía terrestre de 550 km.

Finalmente, comparando los valores pico entre el diseño de partida y la PM2 aplicando los respectivos procesos de reciclado tras 25 años de vida útil del módulo, se consigue una reducción del impacto ambiental en términos de energía requerida para su conformación medida en MJ del 55,11% y de las emisiones de gases de CO₂ en función de los kg emitidos a la atmósfera del 57,45%. Además de unos beneficios energéticos teóricos, en condiciones óptimas sobre la climatología y la eficiencia de los componentes que integran la instalación solar, entre 4 y 5 meses para módulos con CSM y CSP respectivamente.

Como futuras líneas de trabajo asociadas a este proyecto consistiría en la aplicación práctica de la producción de la placa fotovoltaica que proporciona mejores resultados para su posterior testeo final y comparativa con los resultados teóricos obtenidos.

Por otro lado, podría realizarse el estudio económico sobre los costes de producción en masa y la rentabilidad económica que presente, puesto que en términos medioambientales supone una mejora en cuanto a la evaluación de la huella de carbono con respecto a los valores promedios de mercado expuestos en el proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Simeon y M. Morales, «EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LOS TALLERES DE MECÁNICA AUTOMOTRIZ DEL DISTRITO DE AMARILIS, HUÁNUCO», *Univ. HUÁNUCO Fac. Ing. Esc. Acad. Prof. Ing. Ambient.*, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://200.37.135.58/bitstream/handle/123456789/956/MORALES%20AQUINO%2c%20MILTON%20EDWIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [2] «Evaluación de Impacto Ambiental - Medio ambiente - Portal del Gobierno de La Rioja», *Gobierno de la Rioja*, 2016. <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/prevencion-control-ambiental/evaluacion-impacto-ambiental> (accedido jul. 05, 2020).
- [3] BOE, «I. DISPOSICIONES GENERALES. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental». 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/09/21/dof/spa/pdf>.
- [4] Gonzalez, Víctor, «Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España». Asociación de Empresas de Energías Renovables - APPA Renovables, 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.appa.es/wp-content/uploads/2019/10/Estudio_del_impacto_Macroeconomico_de_las_energias_renovables_en_Espa%C3%B1a_2018_vff.pdf.
- [5] «La energía nuclear en España: 50 años en la base del sistema eléctrico». <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-nuclear-en-espana-50-anos-en-la-base-del-sistema-electrico/> (accedido jul. 12, 2020).
- [6] «Energía Nuclear». <https://energia-nuclear.net/> (accedido jul. 12, 2020).
- [7] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Centrales Nucleares en España». <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx> (accedido jul. 12, 2020).
- [8] «APPA - Asociación de Empresas de Energías Renovables», 2020. <https://www.appa.es/> (accedido jul. 05, 2020).
- [9] «Energía solar térmica: cómo funciona - energiacomprometida.es», *Energya*, may 17, 2018. <https://www.energyavm.es/energia-solar-termica/> (accedido jul. 12, 2020).
- [10] «Componentes de una instalación solar fotovoltaica». McGraw Hill, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>.

- [11]Alonso, M.A., «Sistemas fotovoltaicos». SAPT Publicaciones Técnicas, SL., 2005, [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS.pdf?1438652737=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSistemas_fotovoltaicos_Sistemas_Fotovoltaic.pdf&Expires=1593960428&Signature=AHnO7L1kQ8zjKgUQMzVuQWYVQSCH3CQuBt0e6~l0V~0DsCLUCd~EWLNkIIK-GfVkOXAaehvfxLaMqz1JADUpdz~eDpZTYo1EEhigvPhcWh8bWvjrlVUjy~Mil9bjP8ZuQC3TPx-wNAyRqZQ9hWk6r9DK~QCWgeLdls5Et3GOZQdmjyl7A9ov4G~OulF~e1TM6uGn0oFTYbXkv8W-F5QWvLhy03964kbAG-zUXty3rGcQK95KX5TvoiZ8RhQHvYVrqdP~2cZabf5HLT6aitfjlAc72lBp3mZPjT2qhZu8mx5HRPpIFWyHLI2uplH9a8z4-cMBKI6dkjwTJog~IYLmQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA.
- [12]M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, y E. D. Dunlop, «Solar cell efficiency tables (version 47)», Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 24, n.º 1, pp. 3-11, 2016, doi: 10.1002/pip.2728.
- [13]Barrera M. et al, «FABRICACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS». [En línea]. Disponible en: http://www.fisica.uji.es/priv/web%20master%20SIH007/temes/treballs/1%20fabricaci%F3n_paneles_a.pdf.
- [14]«Autosolar | La Tienda de la Energía Solar», *Autosolar Energía y Servicios S.L.U*, 2020. <https://autosolar.es/> (accedido jul. 05, 2020).
- [15]«What You Need to Know About Solar Cell Busbar: 0BB, 3BB or 5BB - Power From Sunlight», 2017. <https://www.powerfromsunlight.com/need-know-solar-cell-busbar-0bb-3bb-5bb/> (accedido jul. 05, 2020).
- [16]Murillo A. y Sanchis P., «Estudio del proceso de laminación de módulos fotovoltaicos con materiales alternativos». Universidad pública de Navarra, 2016, [En línea]. Disponible en: https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/21699/Murillo_Larrey_Ana-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [17]«CONSTRUCCIÓN DE PANELES SOLARES», *Energía solar fotovoltaica*, mar. 16, 2019. <https://panellisolarifv.com/construccion-de-paneles-solares/> (accedido jul. 12, 2020).

- [18]Y. Chen, «Desarrollo de procesos para formación de contactos con láser para módulos thin film CIGS para aplicaciones fotovoltaicas», phd, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2016.
- [19]Fernández D. y Rodríguez J., «Diseño de una instalación fotovoltaica para conexión a red y recarga rápida de vehículos eléctricos». 2016, [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/44179/1/PFC_DANIEL_FERNANDEZ_DURAN.pdf.
- [20]Huidobro M. y Chacón E., «Diseño de una estructura soporte para un módulo integrado de placa fotovoltaica». Universidad Politécnica de Madrid, 2016, [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/44696/1/TFM_MONICA_HUIDOBRO_PELAYO.pdf.
- [21]Lara A. y Segarra M., «Eco-Auditoría de la EcoPlaza Gastronómica “El Refugio”». 2017, [En línea]. Disponible en: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/113930/1/TFM_MERSE_Andres_Lara_Novillo.pdf.
- [22]Anja Pfennig y HTW Berlin, «CES EduPack “Materials Science comes to life for engineering students”». 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.grantadesign.com/download/pdf/CES-Edupack-2016-Overview.pdf>.
- [23]Rafoso S. y Artilés S., «Reingeniería de procesos: conceptos, enfoques y nuevas aplicaciones», *Cienc. Inf.*, vol. 42, n.º 3, pp. 29-37, 2011.
- [24]«Solar Panels and Solar Suppliers | Trina Solar», *Trina Solar*, 2020. https://static.trinasolar.com/sites/default/files/ES_01_PS-M-0524_A_User_Manual_Duomax_201706.pdf (accedido jul. 19, 2020).
- [25]H. Kataoka, «Películas de sellado para panel solar y panel solar que emplea las películas de sellado», ES2633644T3, sep. 22, 2017.
- [26]«ESPECIFICACIONES TÉCNICAS», *Onyx Solar Group LLC*, 2020. <https://www.onyx-solar.com/es/vidrio-fotovoltaico/especificaciones-vidrio> (accedido jul. 05, 2020).
- [27]Z. Liu et al., «Revisiting thin silicon for photovoltaics: a technoeconomic perspective», *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, n.º 1, pp. 12-23, ene. 2020, doi: 10.1039/C9EE02452B.
- [28]Dominik N., «Bus Wire and Tab Wire - Sinovoltaics - Zero Risk Solar™», *Sinovoltaics - Zero Risk Solar™*, 2018. <https://sinovoltaics.com/learning-center/components/bus-wire-tab-wire/> (accedido jul. 05, 2020).

- [29]Marín, M., «Estudio de factores tecnológicos en procesos de compresión por deformación plástica de materiales metálicos dúctiles por el método de los elementos finitos», *Tesis Dr.*, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://espacio.uned.es:8080/fedora/get/tesisuned:IngInd-Mmmarin/Documento.pdf>.
- [30]Ortiz Bernardin, Alejandro, «Diseño de Elementos Mecánicos ME-5600 Capítulo 5». <https://docplayer.es/15122848-Me-5600-capitulo-5-alejandro-ortiz-bernardin-www-cec-uchile-cl-aortizb-universidad-de-chile.html> (accedido jul. 19, 2020).
- [31]A. Odriozola, I. Ochoa, y M. Gutiérrez, «Moldeo por inyección de cerámicas», *Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr.*, vol. 33, n.o 5, pp. 267-271, 1994.
- [32]M. Saucéau, J. Fages, A. Common, C. Nikitine, y E. Rodier, «New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide», *Prog. Polym. Sci.*, vol. 36, n.o 6, pp. 749-766, jun. 2011, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2010.12.004.
- [33]CIEMAT, «ADRASE - Acceso a datos de radiación solar de España - Inicio», 2020. <http://www.adrase.com/> (accedido jul. 07, 2020).
- [34]P. Moscoso y J. Carlos, «Obtención de compuestos de polidropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión», jun. 2007, Accedido: jul. 12, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/352>.
- [35]«SMC Epoxi-Fibra de Carbono Archivi», *Polynt*. <https://www.polynt.com/es/chemical-products/composites-es/preimpregnados-es/smc-epoxi-fibra-de-carbono-es/> (accedido jul. 12, 2020).
- [36]Grupo Villar Mir, «¿Qué es el Levelized Cost of Energy (LCOE)? - Energya», *Enérgya VM*, 2020. <https://www.energyavm.es/que-es-el-levelized-cost-of-energy-lcoe/> (accedido jul. 05, 2020).
- [37]Laguado L., «UNIDADES TECNOLÓGICAS SANTANDER TECNOLOGÍA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO». 2004, [En línea]. Disponible en: http://www.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/TECNOLOGICAS_20/Metal_Mecanica/100.pdf.
- [38]«Optimización del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos». <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79135> (accedido jul. 19, 2020).
- [39]Caballero M. et al., «Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra», *Rev. Digit. Univ.*, vol. 8, n.º 10,



- 2007, [En línea]. Disponible en:
http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf.
- [40] «Calculadora de HSP de HMSistemas para un diseño propio de su instalación.»,
HMSistemas. Energía solar.
http://www.hmsistemas.es/shop/catalog/calculadora_hsp.php (accedido jul. 19,
2020).
- [41] Ecofener, «¿Qué potencia puede producir un panel solar?», *Blog Ecofener*, 2020.
<https://ecofener.com/blog/potencia-puede-producir-panel-solar/> (accedido jul. 19,
2020).

8. ANEXOS

ANEXOS 1 Materiales

Aluminium, 2017, wrought, T42

CES 2010 EDUPACK		Aluminum, 2017, wrought, T42	
General properties			
Designation			
2017			
UNS number	A92017		
Density	2.78e3	-	2.81e3
Price	*1.32	-	1.45 EUR/kg
Composition overview			
Composition (summary)			
Al/3.5-4.5Cu/40-1.0Mn/40-80Mg/1Cr/25Zn/1.15Ti			
Base	Al (Aluminum)		
Composition detail			
Al (aluminum)	93	-	95 %
Cr (chromium)	0.1	-	%
Cu (copper)	3.5	-	4.5 %
Mg (magnesium)	0.4	-	0.8 %
Mn (manganese)	0.4	-	1 %
Ti (titanium)	0.15	-	%
Zn (zinc)	0.25	-	%
Mechanical properties			
Young's modulus	72	-	75.7 GPa
Flexural modulus	*72	-	75.7 GPa
Shear modulus	28	-	29.4 GPa
Bulk modulus	70.3	-	73.9 GPa
Poisson's ratio	0.33	-	0.343
Shape factor	29	-	
Yield strength (elastic limit)	221	-	244 MPa
Tensile strength	379	-	421 MPa
Compressive strength	221	-	244 MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	221	-	244 MPa
Elongation	12	-	13.9 % strain
Hardness - Vickers	*100	-	120 HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*125	-	139 MPa
Fatigue strength model (stress range)	*89.9	-	109 MPa
Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7			
Fracture toughness	*27	-	37 MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	*1e-4	-	0.002

CES 2010 EDUPACK		Aluminum, 2017, wrought, T42	
Material processing: CO2 footprint			
Casting CO2	*0.142	-	0.157 kg/kg
Forging, rolling CO2	*0.259	-	0.286 kg/kg
Metal powder forming CO2	*1.77	-	1.95 kg/kg
Vaporization CO2	*1.34	-	1.49 kg/kg
Conventional machining CO2 (per unit weight removed)	*0.585	-	0.646 kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit weight removed)	*2.63	-	2.79 kg/kg
Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction			
Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	17.1	-	20.3 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	0.958	-	1.21 kg/kg
Recycle fraction in current supply	40.5	-	44.7 %
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		
A renewable resource?	✗		
Notes			
Typical uses			
general engineering purposes, structural applications in construction and transportation, screw machine products, and fittings.			
Reference sources			
Data compiled from multiple sources. See links to the References table.			

CES 2010 EDUPACK		Aluminum, 2017, wrought, T42	
Thermal properties			
Melting point	513	-	640 °C
Maximum service temperature	110	-	170 °C
Minimum service temperature	-273	-	°C
Thermal conductivity	135	-	146 W/m.°C
Specific heat capacity	963	-	1e3 J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	22.9	-	24 µstrain/°C
Latent heat of fusion	384	-	393 kJ/kg
Electrical properties			
Electrical resistivity	4.95	-	5.3 µohm.cm
Optical properties			
Transparency	Opaque		
Durability: flammability			
Flammability	Non-flammable		
Durability: fluids and sunlight			
Water (fresh)	Excellent		
Water (salt)	Acceptable		
Weak acids	Excellent		
Strong acids	Excellent		
Weak alkalis	Acceptable		
Strong alkalis	Unacceptable		
Organic solvents	Acceptable		
UV radiation (sunlight)	Excellent		
Oxidation at 500C	Unacceptable		
Primary material production: energy, CO2 and water			
Embodied energy, primary production	197	-	218 MJ/kg
CO2 footprint, primary production	11.4	-	12.6 kg/kg
Water usage	495	-	1.49e3 l/kg
Material processing: energy			
Casting energy	*2.36	-	2.61 MJ/kg
Forging, rolling energy	*3.24	-	3.58 MJ/kg
Metal powder forming energy	*22.1	-	24.4 MJ/kg
Vaporization energy	*16.8	-	18.6 MJ/kg
Conventional machining energy (per unit weight removed)	*1.07	-	1.08 MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit weight removed)	*1.67	-	1.49 MJ/kg



Epoxy SMC (Carbon fiber)



Epoxy SMC (carbon fiber)

General properties

Designation

Epoxy (Carbon Fiber, SMC)

Density 1.4e3 - 1.7e3 kg/m³
Price *15.4 - 17 EUR/kg

Tradenames

Carboform; Ferroprog EP; Fiberdux; Fiberite; Scotchply

Composition overview

Composition (summary)

Epoxy + C filler

Base	Polymer
Polymer class	Thermoset plastic
Polymer type	EP
Polymer type full name	Epoxy resin
% filler (by weight)	*15 - 50 %
Filler type	Carbon fiber

Composition detail

Polymer	*50 - 85 %
Carbon (fiber)	*15 - 50 %

Mechanical properties

Young's modulus	69 - 150 GPa
Compressive modulus	*69 - 150 GPa
Flexural modulus	33.5 - 35.2 GPa
Shear modulus	*27.8 - 60.5 GPa
Bulk modulus	*63.4 - 66.6 GPa
Poisson's ratio	0.219 - 0.266
Shape factor	22
Yield strength (elastic limit)	*221 - 276 MPa
Tensile strength	276 - 345 MPa
Compressive strength	207 - 276 MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	517 - 655 MPa
Elongation	0.5 - 2 % strain
Hardness - Vickers	*66.2 - 82.8 HV
Hardness - Rockwell R	*130 - 135
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*109 - 142 MPa
Fracture toughness	*9.45 - 28.4 MPa.m ^{0.5}



Epoxy SMC (carbon fiber)

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	259 - 286 MJ/kg
CO2 footprint, primary production	16.4 - 18.1 kg/kg
Water usage	361 - 1.37e3 l/kg

Material processing: energy

Compression molding energy *3.33 - 3.68 MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Compression molding CO2 *0.266 - 0.294 kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	x
Recycle fraction in current supply	0.1 %
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✓
Heat of combustion (net)	*30.2 - 31.8 MJ/kg
Combustion CO2	*2.59 - 2.72 kg/kg
Landfill	✓
Biodegrade	x
A renewable resource?	x

Notes

Typical uses

Lightweight structural members in aerospace, ground transport and sporting goods; springs; pressure vessels.



Epoxy SMC (carbon fiber)

Page 2

Mechanical loss coefficient (tan delta) *0.0012 - 0.00206

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C 79 - 110 kJ/m²

Thermal properties

Glass temperature	*67 - 167 °C
Heat deflection temperature 0.45MPa	*286 - 343 °C
Heat deflection temperature 1.8MPa	261 - 316 °C
Maximum service temperature	166 - 184 °C
Minimum service temperature	*-123 - -73 °C
Thermal conductivity	5.8 - 6.3 W/m.°C
Specific heat capacity	*1.29e3 - 1.34e3 J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	5.29 - 5.51 µstrain/°C

Processing properties

Linear mold shrinkage	0.091 - 0.11 %
Molding pressure range	3.44 - 13.8 MPa

Electrical properties

Electrical resistivity *100 - 1e6 µohm.cm

Optical properties

Transparency Opaque

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs 1.45 - 1.76 %

Durability: flammability

Flammability Self-extinguishing

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Acceptable
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Limited use
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Limited use
UV radiation (sunlight)	Good
Oxidation at 500C	Unacceptable



EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)



EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)



EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)

Page 2 of 4

General properties

Designation

Ethylene Vinyl Acetate: 25% Vinyl Acetate

Density 945 - 955 kg/m³
Price *1.34 - 1.47 EUR/kg

Tradenames

Elvax

Composition overview

Composition (summary)

Copolymer of 75% ethylene (CH₂CH₂)_n and 25% vinyl acetate (CH₂CHOCOCH₃)_m

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic elastomer : TPE
Polymer type	EVA
Polymer type full name	Ethylene vinyl acetate copolymer
% filler (by weight)	0 %
Filler type	Unfilled

Composition detail

Polymer	100	%
---------	-----	---

Mechanical properties

Young's modulus	0.02 - 0.03	GPa
Compressive modulus	*0.02 - 0.03	GPa
Flexural modulus	*0.02 - 0.03	GPa
Shear modulus	*0.008 - 0.01	GPa
Bulk modulus	*1.5 - 2	GPa
Poisson's ratio	*0.47 - 0.49	
Shape factor	1.6	
Yield strength (elastic limit)	16 - 17	MPa
Tensile strength	16 - 17	MPa
Compressive strength	20 - 30	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	17 - 20	MPa
Elongation	730 - 770	% strain
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*12 - 12.8	MPa
Fracture toughness	*1.37 - 1.49	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	*0.34 - 0.83	

Thermal properties

Glass temperature	*-90 - -82	°C
Maximum service temperature	47 - 52	°C
Minimum service temperature	-86 - -66	°C
Thermal conductivity	0.3 - 0.4	W/m.°C
Specific heat capacity	*2e3 - 2.2e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	160 - 190	µstrain/°C

Processing properties

Mold temperature	20 - 40	°C
------------------	---------	----

Electrical properties

Electrical resistivity	*3.16e21 - 1e22	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.9 - 2.95	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.02 - 0.022	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	26.5 - 27	MV/m
Comparative tracking index	550 - 600	V

Optical properties

Refractive index	1.48 - 1.49
Transparency	Opaque

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs	0.05 - 0.15	%
Water vapor transmission	1.53 - 4.46	g.mm/m ² .day
Permeability (O ₂)	253 - 419	cm ³ .mm/m ² .day.atm

Durability: flammability

Flammability	Highly flammable
--------------	------------------

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Unacceptable
Oils and fuels	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Fair
Oxidation at 500C	Unacceptable



EVA (Shore A85, 25% vinyl acetate)

Primary material production: energy, CO₂ and water

Embodied energy, primary production	86.7 - 95.8	MJ/kg
CO ₂ footprint, primary production	2.88 - 3.18	kg/kg
Water usage	96.4 - 289	l/kg

Material processing: energy

Polymer molding energy	*14.8 - 16.4	MJ/kg
Polymer extrusion energy	*5.83 - 6.42	MJ/kg
Polymer machining energy (per unit wt removed)	1.95 - 2.15	MJ/kg

Material processing: CO₂ footprint

Polymer molding CO ₂	*1.19 - 1.31	kg/kg
Polymer extrusion CO ₂	0.466	kg/kg
Polymer machining CO ₂ (per unit wt removed)	0.156 - 0.172	kg/kg

Material recycling: energy, CO₂ and recycle fraction

Recycle	✓	
Embodied energy, recycling	*39 - 41.6	MJ/kg
CO ₂ footprint, recycling	*1.17 - 1.25	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0.1	%
Downcycle	✓	
Combust for energy recovery	✓	
Heat of combustion (net)	*39.2 - 41.2	MJ/kg
Combustion CO ₂	*2.82 - 2.97	kg/kg
Landfill	✓	
Biodegrade	×	
A renewable resource?	×	

Notes

Typical uses

Stretch film for wrapping, shoe soles, medical equipment, flexible toys, tubing.

Other notes

Standard hardness measurements are impossible to perform on elastomers, as it is very difficult to make a permanent indentation in them.



PTFE (Unfiled)



PTFE (unfiled)

General properties

Designation

Polytetrafluoroethylene (Granular)

Density 2.14e3 - 2.2e3
Price 8.17 - 15.5 EUR/kg

Tradenames

Algonlon; Durafion; Dyneon; Fluon; Fluorocomp; Fluorosint; Fulton; Marathone; Mikroflon; Murflor; Nitoflon; Polyflon; Polymist; Reploflon; RT/Duroid; Rulon; Tarflen; Tecaflon; Tekuform; Turcite; Turcon; Ultralam; Voltalef

Composition overview

Composition (summary)

(CF₂-CF₂)_n

Base Polymer
Polymer class Thermoplastic : semi-crystalline
Polymer type PTFE
Polymer type full name Polytetrafluoroethylene
% filler (by weight) 0 %
Filler type Unfiled

Composition detail

Polymer 100 %

Mechanical properties

Young's modulus 0.4 - 0.552 GPa
Compressive modulus 0.402 - 0.423 GPa
Flexural modulus 0.537 - 0.564 GPa
Shear modulus *0.138 - 0.19 GPa
Bulk modulus *1.53 - 1.6 GPa
Poisson's ratio 0.44 - 0.46
Shape factor 3.7
Yield strength (elastic limit) 19.7 - 21.7 MPa
Tensile strength 20.7 - 34.5 MPa
Compressive strength 11.2 - 12.3 MPa
Flexural strength (modulus of rupture) *29 - 48.3 MPa
Elongation 200 - 400 % strain
Hardness - Vickers *5.9 - 6.5 HV
Hardness - Shore D 55 - 60
Fatigue strength at 10⁷ cycles



PTFE (unfiled)

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh) Excellent
Water (salt) Excellent
Weak acids Excellent
Strong acids Excellent
Weak alkalis Excellent
Strong alkalis Excellent
Organic solvents Excellent
UV radiation (sunlight) Good
Oxidation at 500C Unacceptable

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production 145 - 160 MJ/kg
CO2 footprint, primary production 7.06 - 7.8 kg/kg
Water usage 283 - 850 l/kg

Material processing: energy

Polymer molding energy *20.7 - 22.8 MJ/kg
Polymer extrusion energy *8.03 - 8.85 MJ/kg
Polymer machining energy (per unit wt removed) 0.93 - 2.13 MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer molding CO2 *1.66 - 1.83 kg/kg
Polymer extrusion CO2 0.642 kg/kg
Polymer machining CO2 (per unit wt removed) 0.54 - 0.17 kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle ✓
Embodied energy, recycling *48.1 - 51.5 MJ/kg
CO2 footprint, recycling *1.44 - 1.55 kg/kg
Recycle fraction in current supply 0.672 - 0.742 %
Downcycle ✓
Combust for energy recovery *
Heat of combustion (net) *4.69 - 4.92 MJ/kg
Combustion CO2 *0.859 - 0.903 kg/kg
Landfill ✓
Biodegrade *
A renewable resource? *

Notes

Typical uses



PTFE (unfiled)

Page 2 of

Fracture toughness 5.75 - 7 MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta) *1.32 - 1.8 MPa.m^{0.5}
*0.0725 - 0.1

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C 15 - 17 kJ/m²

Thermal properties

Melting point 315 - 339 °C
Glass temperature 117 - 130 °C
Heat deflection temperature 0.45MPa 71 - 121 °C
Heat deflection temperature 1.8MPa 31 - 62 °C
Maximum service temperature 250 - 271 °C
Minimum service temperature -268 - -200 °C
Thermal conductivity 0.242 - 0.261 W/m.°C
Specific heat capacity 970 - 1.09e3 J/kg.°C
Thermal expansion coefficient 120 - 170 µstrain/°C

Processing properties

Linear mold shrinkage 3 - 6 %
Molding pressure range 13.8 - 34.4 MPa

Electrical properties

Electrical resistivity 3.3e23 - 3e24 µhm.cm
Dielectric constant (relative permittivity) 2 - 2.2
Dissipation factor (dielectric loss tangent) 1.9e-4 - 2.1e-4
Dielectric strength (dielectric breakdown) 18.2 - 19.7 MV/m
Comparative tracking index 600 V

Optical properties

Refractive index 1.31 - 1.36
Transparency Opaque

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs 0.005 - 0.01 %
Water vapor transmission 0.166 - 0.184 g.mm/m².day
Permeability (O₂) 218 - 363 cm³.mm/m².day.atm

Durability: flammability

Flammability Non-flammable



PTFE (unfiled)

Bearings; chemical vessel linings; pipe and valve linings; pumps; impellers; pipes; gaskets; diaphragms; piston rings; high temperature electrical insulation; coating for non-stick applications.

Process information

Due to exceptionally high melt viscosity, not processable by injection molding and other standard thermoplastic methods. Compression molding, sintering, and ram extrusion are used.



SILICON



Silicon

Page



Silicon

Page

General properties

Designation

Si: Pure

Density	2.28e3 - 2.38e3	kg/m ³
Porosity (closed)	0	%
Porosity (open)	0	%
Price	6.76 - 11.2	EUR/kg

Composition overview

Composition (summary)

100% Si

Base Si (Silicon)

Composition detail

Si (silicon) 100 %

Mechanical properties

Young's modulus	140 - 180	GPa
Flexural modulus	*140 - 180	GPa
Shear modulus	60 - 63	GPa
Bulk modulus	95 - 105	GPa
Poisson's ratio	0.265 - 0.275	
Shape factor	15	
Yield strength (elastic limit)	165 - 180	MPa
Tensile strength	165 - 180	MPa
Compressive strength	3.2e3 - 3.46e3	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	180 - 200	MPa
Elongation	*0.09 - 0.13	% strain
Hardness - Vickers	900 - 1.02e3	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*130 - 150	MPa
Fatigue strength model (stress range)	Out Of Range	MPa
<small>Parameters: Stress Ratio = 0</small>		
Fracture toughness	0.7 - 0.9	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	*7e-5 - 1e-4	

Thermal properties

Melting point	1.43e3 - 1.45e3	°C
Maximum service temperature	*530 - 580	°C
Minimum service temperature	-273	°C
Thermal conductivity	150 - 170	W/m.°C

Specific heat capacity

668 - 715 J/kg.°C

Thermal expansion coefficient

2 - 3.2 µstrain/°C

Latent heat of fusion 1.34e3 - 1.49e3 kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity 1e6 - 1e10 µohm.cm

Dielectric constant (relative permittivity) 11 - 12

Dissipation factor (dielectric loss tangent)* 0.001 - 0.005

Dielectric strength (dielectric breakdown)*5 - 12 MV/m

Optical properties

Color Steel Gray

Transparency Opaque

Durability: flammability

Flammability Non-flammable

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh) Excellent

Water (salt) Acceptable

Weak acids Acceptable

Strong acids Limited use

Weak alkalis Acceptable

Strong alkalis Unacceptable

Organic solvents Excellent

UV radiation (sunlight) Excellent

Oxidation at 500C Excellent

Halogens Unacceptable

Metals Limited use

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production 56.8 - 62.8 MJ/kg

CO2 footprint, primary production 3.78 - 4.18 kg/kg

Water usage 18.3 - 55 l/kg

Material processing: energy

Ceramic finishing energy *1 - 2 MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Ceramic finishing CO2 *0.08 - 0.16 kg/kg



Silicon

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗
Recycle fraction in current supply	0.672 - 0.742 %
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✗
Landfill	✓
Biodegrade	✗
A renewable resource?	✗

Notes

Typical uses

Microcircuits; precision instruments; glass; concrete; bricks; lubricants;

Warning

Finely divided silicates or silica cause major damage to lungs. Long term exposure to silicates such as asbestos is a severe health problem.

Other notes

Silicon makes up 25.7% of the earth's crust by weight. It is found largely as silicon oxides such as sand (silica), quartz, rock crystal, amethyst, agate, flint, jasper and opal. In ultra-high purity forms, it is the key material for semiconductors.



SODA LIME



Soda lime - 0080

Page 1



Soda lime - 0080

Page 2 of 3

General properties

Designation

Soda-lime glass, Corning 0080

Density	2.44e3 - 2.49e3	kg/m ³
Porosity (closed)	0	%
Porosity (open)	0	%
Price	*1.05 - 1.23	EUR/kg

Composition overview

Composition (summary)

73% SiO₂/1% Al₂O₃/17% Na₂O/4% MgO/5% CaO

Base Oxide

Composition detail

Al ₂ O ₃ (alumina)	1	%
CaO (calcia)	5	%
MgO (magnesia)	4	%
Na ₂ O (sodium oxide)	17	%
SiO ₂ (silica)	73	%

Mechanical properties

Young's modulus	68.2 - 71.7	GPa
Flexural modulus	*68.2 - 71.7	GPa
Shear modulus	*28 - 29.5	GPa
Bulk modulus	*39.8 - 41.9	GPa
Poisson's ratio	0.21 - 0.22	
Shape factor	15	
Yield strength (elastic limit)	*31 - 34.2	MPa
Tensile strength	31 - 34.2	MPa
Compressive strength	*310 - 342	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	*40.3 - 44.5	MPa
Elongation	*0.04 - 0.05	% strain
Hardness - Vickers	439 - 484	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*29.4 - 32.5	MPa
Fracture toughness	*0.64 - 0.65	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	7.5e-4 - 8.8e-4	

Thermal properties

Glass temperature	442 - 592	°C
Maximum service temperature	110 - 460	°C

Minimum service temperature

Minimum service temperature	-273	°C
Thermal conductivity	*0.7 - 1.3	W/m.°C
Specific heat capacity	*850 - 950	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	9.16 - 9.53	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical resistivity	7.94e17 - 7.94e18	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	6.9 - 7.4	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.0608 - 0.0672	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	*12 - 14	MV/m

Optical properties

Color	Clear
Refractive index	1.5 - 1.52
Transparency	Transparent

Durability: flammability

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Acceptable
Organic solvents	Excellent
UV radiation (sunlight)	Excellent
Oxidation at 500C	Excellent
Halogens	Limited use
Metals	Limited use

Primary material production: energy, CO₂ and water

Embodied energy, primary production	*13.7 - 15.1	MJ/kg
CO ₂ footprint, primary production	*0.738 - 0.816	kg/kg
Water usage	*14.4 - 15.9	l/kg

Material processing: energy

Glass molding energy	*8.22 - 9.09	MJ/kg
----------------------	--------------	-------

Material processing: CO₂ footprint



Soda lime - 0080

Glass molding CO ₂	*0.658 - 0.727	kg/kg
-------------------------------	----------------	-------

Material recycling: energy, CO₂ and recycle fraction

Recycle	✓	
Embodied energy, recycling	*6.01 - 6.64	MJ/kg
CO ₂ footprint, recycling	*0.324 - 0.359	kg/kg
Recycle fraction in current supply	22.7 - 25.1	%
Downcycle	✓	
Combust for energy recovery	✗	
Landfill	✓	
Biodegrade	✗	
A renewable resource?	✗	

Notes

Typical uses

Lamp bulbs



COPPER CAST

Copper, cast, (h.c. copper)		Copper, cast, (h.c. copper)	
General properties		Electrical properties	
Designation		Thermal expansion coefficient	16.8 - 16.9 $\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$
Copper Alloy: ho-Cu		Latent heat of fusion	200 - 208 kJ/kg
Density	8.94e3 - 8.95e3	Temperature dependence of resistivity	5.2 - 5.4 $^\circ\text{C}$
Price	*3.68 - 4.04 EUR/kg	Electrical resistivity	
Composition overview		1.91 - 1.95 $\mu\text{hm}\cdot\text{cm}$	
Composition (summary)		Optical properties	
99.9Cu(min)C		Transparency	
Base	Cu (Copper)	Opaque	
Composition detail		Durability: flammability	
C (carbon)	0 - 0.1 %	Flammability	
Cu (copper)	99.9 - 100 %	Non-flammable	
Mechanical properties		Durability: fluids and sunlight	
Young's modulus	122 - 128 GPa	Water (fresh)	Excellent
Flexural modulus	*122 - 128 GPa	Water (salt)	Excellent
Shear modulus	45.1 - 47.4 GPa	Weak acids	Acceptable
Bulk modulus	*132 - 138 GPa	Strong acids	Unacceptable
Poisson's ratio	0.34 - 0.35	Weak alkalis	Excellent
Shape factor	30	Strong alkalis	Excellent
Yield strength (elastic limit)	28 - 40 MPa	Organic solvents	Excellent
Tensile strength	145 - 160 MPa	UV radiation (sunlight)	Excellent
Compressive strength	28 - 40 MPa	Oxidation at 500C	Limited use
Flexural strength (modulus of rupture)	28 - 40 MPa	Primary material production: energy, CO2 and water	
Elongation	23 - 25 % strain	Embodied energy, primary production	67.4 - 74.5 MJ/kg
Hardness - Vickers	43 - 46 HV	CO2 footprint, primary production	4.98 - 5.5 kg/kg
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*91 - 97 MPa	Water usage	150 - 450 l/kg
Fatigue strength model (stress ratio)	*53.9 - 62.4 MPa	Material processing: energy	
Fracture toughness	*100 - 107 MPa.m ^{0.5}	Casting energy	*2.68 - 2.96 MJ/kg
Mechanical loss coefficient (tan delta)	*0.0025 - 0.0051	Forging, rolling energy	*1.68 - 1.86 MJ/kg
Thermal properties		Metal powder forming energy	*25 - 27.7 MJ/kg
Melting point	1.08e3 $^\circ\text{C}$	Vaporization energy	*17.2 - 19 MJ/kg
Maximum service temperature	77 - 87 $^\circ\text{C}$	Conventional machining energy (per unit removed)	14.68 - 15.06 MJ/kg
Minimum service temperature	-273 $^\circ\text{C}$	Non-conventional machining energy (per unit removed)	13.2 - 13.6 MJ/kg
Thermal conductivity	390 - 398 W/m. $^\circ\text{C}$	Material processing: CO2 footprint	
Specific heat capacity	383 - 387 J/kg. $^\circ\text{C}$	Casting CO2	*0.161 - 0.178 kg/kg
Environmental properties		Forging, rolling CO2	*0.134 - 0.149 kg/kg
Vaporization CO2	*1.38 - 1.52 kg/kg	Metal powder forming CO2	*2 - 2.21 kg/kg
Conventional machining CO2 (per unit removed)	10.00 kg/kg		
Non-conventional machining CO2 (per unit removed)	10.68 - 10.85 kg/kg		
Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction			
Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	16.6 - 18.4 MJ/kg		
CO2 footprint, recycling	1.33 - 1.47 kg/kg		
Recycle fraction in current supply	40.8 - 45 %		
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✗		
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		
A renewable resource?	✗		
Notes			
Typical uses			
Castings; electrical components; fittings for liquid gases.			
Other notes			
(s)=soft; (1/2 h)=half hard; (h)=hard; (xh)=extra hard; (hr) = hot rolled;			
(w)=soln heat-trtd; (wh)=soln heat-trtd & work hdnd; (wp)=soln heat-trtd &			
precip hdnd; (whp)=precip hdnd after cold-wkng; (wph)=work hdnd after			
precip hdng.			

Copper, cast, (h.c. copper)	
Vaporization CO2	*1.38 - 1.52 kg/kg
Conventional machining CO2 (per unit removed)	10.00 kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit removed)	10.68 - 10.85 kg/kg
Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction	
Recycle	✓
Embodied energy, recycling	16.6 - 18.4 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	1.33 - 1.47 kg/kg
Recycle fraction in current supply	40.8 - 45 %
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✗
Landfill	✓
Biodegrade	✗
A renewable resource?	✗

Notes

Typical uses

Castings; electrical components; fittings for liquid gases.

Other notes

(s)=soft; (1/2 h)=half hard; (h)=hard; (xh)=extra hard; (hr) = hot rolled;
(w)=soln heat-trtd; (wh)=soln heat-trtd & work hdnd; (wp)=soln heat-trtd &
precip hdnd; (whp)=precip hdnd after cold-wkng; (wph)=work hdnd after
precip hdng.



SILVER, COMMERCIAL, FINE, SOFT



Silver, commercial purity, fine, soft (annealed)



Silver, commercial purity, fine, soft (annealed)

General properties

Designation

ASTM Standard B742-90: Fine Silver

Density 1.05e4 kg/m³
Price 302 - 332 EUR/kg

Composition overview

Composition (summary)

>99.9Ag/<.1Cu/<.025Pb/<.005Cd/<.005Fe/<.005Zn/<.002Al/<.002Ni/<.001Bi

Base Ag (Silver)

Composition detail

Ag (silver)	99.9	-	100	%
Al (aluminum)	0	-	0.002	%
Bi (bismuth)	0	-	0.001	%
Cd (cadmium)	0	-	0.005	%
Cu (copper)	0	-	0.1	%
Fe (iron)	0	-	0.005	%
Ni (nickel)	0	-	0.002	%
Pb (lead)	0	-	0.025	%
Zn (zinc)	0	-	0.005	%

Mechanical properties

Young's modulus	69	-	73	GPa
Flexural modulus	*69	-	73	GPa
Shear modulus	24	-	28	GPa
Bulk modulus	84	-	98	GPa
Poisson's ratio	0.365	-	0.375	
Shape factor	30			
Yield strength (elastic limit)	45	-	65	MPa
Tensile strength	165	-	207	MPa
Compressive strength	*45	-	65	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	*45	-	65	MPa
Elongation	20	-	30	% strain
Hardness - Vickers	60	-	70	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	*65	-	105	MPa
Fatigue strength model (stress ratio)	*42.3	-	70.6	MPa
Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7				
Fracture toughness	*70	-	95	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	*0.005	-	0.009	



Silver, commercial purity, fine, soft (annealed)

Material processing: CO2 footprint

Casting CO2	*0.118	-	0.131	kg/kg
Forging, rolling CO2	*0.135	-	0.15	kg/kg
Metal powder forming CO2	*1.47	-	1.63	kg/kg
Vaporization CO2	*1.02	-	1.14	kg/kg
Conventional machining CO2 (per unit weight)	0.409			kg/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit weight)	0.263			kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	*16.2	-	18	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	*1.02	-	1.13	kg/kg
Recycle fraction in current supply	5.68	-	6.28	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Electrical contacts; Linings for chemical reactor vessels; Linings for heavy duty journal bearings; Jewelry;

Warning

Drawn wire may develop much higher resistivity than the values given here
Silver is a suspected carcinogen. Silver is attacked by all low-melting point molten metals, e.g. Lead & Mercury.

Other notes

Similar to Grade 99.90 silver (UNS no. P07020), as specified in ASTM Standard B 413-89, but contains more trace impurities, which make it slightly harder, but less ductile.
The recycling energy and CO2 values refer to objects made from the precious metal, not the precious metal when used as a alloying agent or finely-dispersed catalyst (for which the recycling energy and CO2 is much higher).

Thermal properties

Melting point	957	-	962	°C
Maximum service temperature	*97	-	190	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	416	-	422	W/m.°C
Specific heat capacity	230	-	240	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	19.5	-	19.9	µstrain/°C
Latent heat of fusion	100	-	110	kJ/kg
Temperature dependence of resistivity	5.2	-	5.4	/°C

Electrical properties

Electrical resistivity	1.67	-	1.81	µohm.cm
------------------------	------	---	------	---------

Optical properties

Transparency	Opaque			
--------------	--------	--	--	--

Durability: flammability

Flammability	Non-flammable			
--------------	---------------	--	--	--

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Limited use			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Acceptable			
Organic solvents	Excellent			
UV radiation (sunlight)	Excellent			
Oxidation at 500C	Excellent			

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	1.71e3			MJ/kg
CO2 footprint, primary production	*102	-	113	kg/kg

Material processing: energy

Casting energy	*1.97	-	2.18	MJ/kg
Forging, rolling energy	*1.69	-	1.87	MJ/kg
Metal powder forming energy	*18.4	-	20.4	MJ/kg
Vaporization energy	*12.8	-	14.2	MJ/kg
Conventional machining energy (per unit weight)	11			MJ/kg
Non-conventional machining energy (per unit weight)	2.6			MJ/kg



NATURAL RUBBER (15-42% CARBON BLACK)

CES 2010 EQUIPACK Natural rubber (15-42% carbon black)		Page 1 CES 2010 EQUIPACK Natural rubber (15-42% carbon black)		Page 20	
General properties					
Designation					
Natural rubber / Natural cis-1,4-polyisoprene (NR) : 15-42% carbon black					
Density	1.02e3 - 1.2e3	kg/m ³			
Price	*2.31 - 2.54	EUR/kg			
Composition overview					
Composition (summary)					
Natural rubber reinforced with 15-42% carbon black. Here is a typical recipe in this material class on a part per hundred by weight basis for general engineering use: NR 100, process oil 5, stearic acid 2, zinc oxide 5, N-550 carbon black 20-85, phenylamine antioxidant 1.5, sulfur 2.5, cure accelerators 1.1. Cure 20 minutes at 150°C.					
Base	Polymer				
Polymer class	Thermoset elastomer : rubber				
Polymer type	NR				
Polymer type full name	Natural rubber				
% filler (by weight)	15 - 42 %				
Filler type	Carbon powder				
Composition detail					
Polymer	58 - 85	%			
Carbon (powder)	15 - 42	%			
Mechanical properties					
Young's modulus	0.0021 - 0.0084	MPa			
Compressive modulus	*0.0021 - 0.0084	MPa			
Flexural modulus	*0.0021 - 0.0084	MPa			
Shear modulus	7e-4 - 0.0028	GPa			
Bulk modulus	*1.5 - 2	GPa			
Poisson's ratio	0.499 - 0.5				
Shape factor	1.5				
Yield strength (elastic limit)	20 - 27	MPa			
Tensile stress at 100% strain	*1 - 5	MPa			
Tensile stress at 300% strain	3 - 15.8	MPa			
Tensile strength	20 - 27	MPa			
Compressive strength	*24 - 32.4	MPa			
Flexural strength (modulus of rupture)	*35.3 - 45.7	MPa			
Elongation	385 - 690	% strain			
Elongation at yield	385 - 690	% strain			
Hardness - Shore D					
*10 - 27					
Hardness - Shore A					
45 - 77					
Fatigue strength at 10⁷ cycles					
*8 - 10.8 MPa					
Fracture toughness					
*0.87 - 1.15 MPa.m ^{0.5}					
Mechanical loss coefficient (tan delta)					
*0.1 - 0.25					
Compression set at 23°C					
1 - 9 %					
Compression set at 70°C					
10 - 32 %					
Compression set at 100°C					
21 - 51 %					
Tear strength					
28 - 112 N/mm					
Impact properties					
Impact strength, notched 23 °C					
190 - 200 kJ/m ²					
Impact strength, notched -30 °C					
190 - 200 kJ/m ²					
Thermal properties					
Glass temperature					
-78 - -63 °C					
Maximum service temperature					
97 - 120 °C					
Minimum service temperature					
-65 - -50 °C					
Thermal conductivity					
0.2 - 1 W/m.°C					
Specific heat capacity					
*1.4e3 - 1.7e3 J/kg.°C					
Thermal expansion coefficient					
150 - 200 µstrain/°C					
Electrical properties					
Electrical resistivity					
*1e9 - 1e16 µohm.cm					
Optical properties					
Transparency					
Opaque					
Absorption, permeability					
Water absorption @ 24 hrs					
*0.01 - 0.02 %					
Water vapor transmission					
*11 - 21 g.mm/m ² .day					
Permeability (O₂)					
*985 - 1.64e3 cm ³ .mm/m ² .day.atm					
Durability: flammability					
Flammability					
Highly flammable					
Durability: fluids and sunlight					
Water (fresh)					
Excellent					
Water (salt)					
Excellent					
Weak acids					
Acceptable					
Strong acids					
Unacceptable					
Weak alkalis					
Excellent					
Strong alkalis					
Acceptable					
Organic solvents					
Limited use					
Oils and fuels					
Unacceptable					
UV radiation (sunlight)					
Good					
Oxidation at 500C					
Unacceptable					
Primary material production: energy, CO₂ and water					
Embodied energy, primary production					
*96.6 - 107 MJ/kg					
CO₂ footprint, primary production					
*3.6 - 3.98 kg/kg					
Material processing: energy					
Polymer molding energy					
*14.7 - 16.2 MJ/kg					
Polymer machining energy (per unit wt removed)					
*1.96 - 2.17 MJ/kg					
Material processing: CO₂ footprint					
Polymer molding CO₂					
*1.18 - 1.3 kg/kg					
Polymer machining CO₂ (per unit wt removed)					
*0.57 - 0.174 kg/kg					
Material recycling: energy, CO₂ and recycle fraction					
Recycle					
x					
Recycle fraction in current supply					
0.1 %					
Downcycle					
✓					
Combust for energy recovery					
✓					
Heat of combustion (net)					
*38.1 - 40 MJ/kg					
Combustion CO₂					
*3.22 - 3.38 kg/kg					
Landfill					
✓					
Biodegrade					
x					
A renewable resource?					
x					
Notes					
Typical uses					
Car tires, seals, belts, anti-vibration mounts, tubing, rubber lining pipes and pumps.					
Other notes					