

MÁSTER UNIVERSITARIO EN Dirección de proyectos

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO ENERGÉTICO DE UN PANEL SOLAR

Estudiante	Aguirre Telleria, Iker
Director	Jimbert Lacha, Pedro Jose
Subdirectora	Iturrondobeitia Ellacuria, Maider
Departamento	Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería
Curso académico	2021-2022

Bilbao, 20 de Julio de 2022

Resumen

Analizando los problemas medioambientales actuales, la crisis energética existente y la necesidad de ser energéticamente eficiente, la metodología de ACV (análisis de ciclo de vida) es una herramienta adecuada para llevar a cabo este tipo de proyectos. En este proyecto de final de Máster universitario se muestra el estudio energético de un panel solar mediante la metodología ACV. El proyecto comienza con el análisis del proceso de fabricación del panel solar, uniendo este proceso con el análisis ACV y se complementará con los datos aportados de una instalación de paneles solares para uso doméstico. Este estudio se realiza mediante la herramienta openLCA para poder obtener una estimación de la energía necesaria e impactos ambientales de su desarrollo. Al acabar el estudio se analiza la viabilidad económica del proyecto y, por último, se explican las conclusiones obtenidas.

Abstract

Analyzing the current environmental problems, the existing energy crisis and the need to be energy efficient, the LCA (life cycle analysis) methodology is an appropriate tool to carry out this type of project. In this final project of master's degree, the energy study of a solar panel is shown using the LCA methodology. The project begins with the analysis of the manufacturing process of the solar panel, linking this process with the LCA analysis and will be complemented with the data provided from an installation of solar panels for domestic use. This study is carried out using the openLCA tool in order to obtain an estimate of the energy required and the environmental impacts of its development. At the end of the study, the economic viability of the project is analyzed and, finally, the conclusions obtained are explained.

Laburpena

Gaur egungo ingurumen-arazoak, egungo energia-krisia eta energetikoki eraginkorra izateko beharra aztertuta, BZAren metodologia (bizi-zikloaren analisisa) tresna egokia da horrelako proiektuak gauzatzeko. Unibertsitateko masterraren amaierako proiektu honetan, eguzki-panel baten azterketa energetikoa erakusten da, BZA metodologiaren bidez. Eguzki-panela fabrikatzeko prozesuaren analisiarekin hasten da proiektua, prozesu hori BZA analisiarekin lotuz eta etxean erabiltzeko eguzki-panelen instalazio bateko datuekin elikatuz. Azterketa hori openLCA programaren bidez egiten da, behar energetikoa eta ingurumen-inpaktuen zenbatespena lortzeko. Azterketa bukatzean proiektuaren bideragarritasun ekonomikoa aztertzen da eta, azkenik, ateratako ondorioak azaltzen dira.

Índice de Contenido

1.	Introducción	7
1.1	Contexto	14
2.	Objetivo y alcance del trabajo	15
2.1	Beneficios que aporta el trabajo	15
2.2	Descripción de la solución propuesta.....	16
3.	Metodología del proyecto	17
3.1	Diagrama de Gantt	18
3.2	Análisis del proceso de fabricación	18
3.3	ACV (Análisis del ciclo de vida)	21
3.3.1	Objetivos y alcance.....	21
3.3.2	Inventario	21
3.3.3	Cálculos open LCA	25
3.4	Análisis de Stakeholders	31
3.4.1	Tipos de instalaciones	31
3.4.2	Tipos de paneles solares	34
3.4.3	Instalación Real	35
4.	Resultados	38
4.1	Panel Solar	38
4.2	ACV	39
4.3	Stakeholders	43
5	Conclusiones.....	44
6	Aspectos económicos.....	45
7.	Bibliografía	46
8.	Anexos	48
8.1	Tabla de impactos.....	48
8.2	Gráficos de impactos	49

Índice de Imágenes

Figura 1. Esquema de la metodología de las instalaciones fotovoltaicas realizadas en el estudio de Valencia.	10
Figura 2. Resumen de los procesos de fabricación, operación, reciclaje y eliminación de un panel solar	16
Figura 3. Diagrama de Gantt del proyecto	18
Figura 4. Estructura de un panel solar	19
Figura 5. Desglose del proceso de fabricación	21
Figura 6. Diagrama de Flujo del proceso	22
Figura 7. Instalación fotovoltaica de autoconsumo	32
Figura 8. Modelos híbridos de paneles solares.....	34
Figura 9. Instalación de paneles solares de Liendo.....	35
Figura 10. Plan de instalación fotovoltaica de Liendo	36
Figura 11. Plan de instalación fotovoltaica de Liendo	37

Índice de Tablas

Tabla 1. Alternativas de paneles solares en el estudio de instalaciones de Valencia.	11
Tabla 2. Alternativas de inversores en el estudio de instalaciones de Valencia.....	11
Tabla 3. Inventario de procesos de obtención de Silicio.....	23
Tabla 4. Inventario de procesos fabricación-reciclado	24
Tabla 5. Categorías de impactos openLCA	27
Tabla 6. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo	32
Tabla 7. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo	35
Tabla 8. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo	36
Tabla 9. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de Silicio Metalúrgico	40
Tabla 10. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de Silicio Metalúrgico	40
Tabla 11. Emisión de CO2 Subprocesos Producción moldeada de Mix-Si.....	41
Tabla 12. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de obleas.....	41
Tabla 13. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de celdas	41

Tabla 14. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de panel solar	42
Tabla 15. Emisión de CO2 Subprocesos Reciclado	42
Tabla 16. Presupuesto de la implantación de la metodología ACV	45
Tabla 17. Datos de impactos por proceso	48

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Emisiones MJ por Proceso	27
Gráfico 2. Kg CO ₂ Producción de Silicio Metalúrgico (subprocesos).....	28
Gráfico 3. Kg CO ₂ Purificación de Silicio Metalúrgico (subprocesos).....	28
Gráfico 4. Kg CO ₂ Producción moldeada de Mix-Silicio (subprocesos).....	29
Gráfico 5. Kg CO ₂ Producción de obleas (subprocesos)	29
Gráfico 6. Kg CO ₂ Producción de celdas (subprocesos)	30
Gráfico 7. Kg CO ₂ Producción de Paneles Solares (subprocesos)	30
Gráfico 8. Kg CO ₂ Reciclado (subprocesos)	31
Gráfico 9. Comparación emisiones Cd-Te y Si (MJ).....	39
Gráfico 10. Emisiones de CO2 en el proceso de fabricación de un panel de Si.....	39
Gráfico 11. Categorías de impactos por proceso	49
Gráfico 12. Formación de partículas pequeñas	50
Gráfico 13. Escasez de Recursos fósiles	50
Gráfico 14. Ecotoxicidad en agua dulce	51
Gráfico 15. Eutrofización en agua dulce	51
Gráfico 16. Toxicidad cancerígena en humanos	52
Gráfico 17. Toxicidad no cancerígena en humanos	52
Gráfico 18. Radiación Ionizante	53
Gráfico 19. Uso de la tierra	53
Gráfico 20. Ecotoxicidad marina	54
Gráfico 21. Eutrofización marina.....	54
Gráfico 22. Escasez de Recursos minerales.....	55
Gráfico 23. Formación de ozono, Salud humana	55

Gráfico 24. Formación de ozono, Ecosistema terrestre.....	56
Gráfico 25. Agotamiento del ozono estratosférico.....	56
Gráfico 26. Agotamiento del ozono estratosférico.....	57
Gráfico 27. Ecotoxicidad terrestre	57
Gráfico 28. Consumo de Agua.....	58

MEMORIA

1. Introducción

El desarrollo de este proyecto final de máster está estrechamente ligado a la crisis energética del mundo actual y a la necesidad de implementar energías verdes en todos los sectores en los que sea posible. Una de las soluciones para lidiar con esta crisis pasa por el ahorro energético y el aprovechamiento de los recursos existentes, para poder contribuir al cuidado del medioambiente.

En Europa **las emisiones de gases por efecto invernadero** anuales por persona (GEI) equivalen a 10t CO₂. En España por otra parte, el valor de emisiones se reduce hasta las 7t anuales según los datos de 2018.

La solución más óptima para minimizar este impacto pasa por el ahorro energético y la sustitución de combustibles fósiles por energías renovables (principalmente eléctricas). Prueba de ello es que las empresas del sector de automoción no podrán comercializar versiones de vehículos no electrificadas (modelos híbridos, híbridos enchufables o eléctricos) a partir del año 2025.

La energía solar fotovoltaica es una energía verde o de origen renovable que utiliza la radiación solar para la generación de electricidad. El funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico con el que algunos materiales absorben fotones y los liberan en forma de corriente eléctrica.

El elemento empleado a modo de semiconductor se conoce celda y puede ser de diferentes materiales como, silicio monocristalino, policristalino o amorfo, o bien otros materiales semiconductores (teluro de cadmio).

Las celdas de silicio monocristalino se obtienen a partir de un único cristal de silicio puro y la máxima eficiencia se consigue entre el 18 % y el 20 % de media. Las de silicio policristalino se elaboran en bloque a partir de varios cristales y tienen una eficiencia media de entre el 16 % y el 17,5 %. Por último, las de silicio amorfo presentan una red cristalina desordenada, lo que conlleva peores prestaciones (eficiencia media de entre un 8 % y un 9 %) aunque el precio se reduce. (Iberdrola, s.f.)

El interés y el apoyo a la energía solar está creciendo salvajemente (Europa especialmente) para solventar el problema existente del cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles. El apoyo de las administraciones públicas por esta energía renovable cada vez es más visible en edificios urbanos, aunque se espera que tenga mucha más importancia en el futuro gracias a políticas y regulaciones que impulsen su implantación. Esta normativa conocida como, **La directiva revisada de energías renovables 2018/2001/UE**, se está llevando a cabo en diferentes ciudades Europa y del resto del mundo.

Esta normativa revisada el 2018 ha marcado nuevos objetivos para los próximos años, por ejemplo, en el año 2030 el 27% de la energía necesaria para abastecer Europa deberá ser de origen renovable (EEE, 2018).

Para lograr este objetivo a nivel nacional, las placas fotovoltaicas desempeñan un papel muy importante y su uso en áreas urbanas (bloques de edificios o viviendas unifamiliares) no es nada despreciable dado a que las condiciones climáticas de España favorecen mucho su uso.

En España la regulación para el autoconsumo de energía en viviendas unifamiliares ha sido modificada dos veces desde 2015 dando la oportunidad de configurar instalaciones fotovoltaicas con conexión a la red de abastecimiento de las empresas eléctricas existentes (Ministerio de industria energía y Turismo, 2015). Sin embargo, la instauración del Real Decreto RD 900/2015 no fue suficiente para que la población viera el proyecto con buena viabilidad debido a que el excedente de energía generado no era compensado económicamente, los usuarios se veían obligados a instalar sistemas antirretroceso (sistema para evitar dar energía sobrante a la red de abastecimiento de las empresas eléctricas) y no se explotaba el uso de la energía fotovoltaica en su plenitud. En los años 2018 y 2019, la regulación cambio de nuevo (vigentes actualmente).

- RD-L 15/2018 establece los principios de las instalaciones de autoconsumo: el reconocimiento del derecho al autoconsumo de energía eléctrica sin cargo, el derecho del autoconsumo compartido de uno o varios consumidores y el principio de responsabilidad administrativa y simplificación técnica (orientado a instalaciones con sistemas de potencia instalada inferior a 100kW). (BOE, 2018)
- RD 244/2019 establece que la energía de autoconsumo de origen renovable está exenta de todo tipo de tasas y establece un mecanismo de compensación simplificado para los sistemas que no superan los 100kW. Este proceso consiste en ingresos económicos por los excesos energéticos generados por instalaciones de paneles solares (el valor económico del exceso no puede ser mayor que el valor económico de la energía consumida de la red durante el periodo de facturación). Adicionalmente, las instalaciones con una producción de energía igual o inferior de 15kW (situadas en suelo urbanizado) están exentas de solicitar permiso de acceso y conexión a la red eléctrica. (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019)

Analizando diferentes proyectos de instalaciones fotovoltaicas de uso doméstico desarrolladas en la comunidad autónoma de Valencia (España) el diseño de una instalación sigue la siguiente metodología:

- Primero, se analiza la generación de potencial de energía (kW) considerando el área disponible para la ubicación de paneles fotovoltaicos en los tejados y la irradiación incidente. Al analizar la generación de potencial de energía se evalúan las posibles pérdidas por sombras. Para cada caso se define el consumo y la tarifa contratada.
- Segundo, una vez recopilados los datos, se elige el número de paneles fotovoltaicos e inversores junto a sus características, para suplir los gastos de energía eléctrica requerida en la vivienda. Estos datos se utilizan como entrada, análisis y comparación de diferentes alternativas.

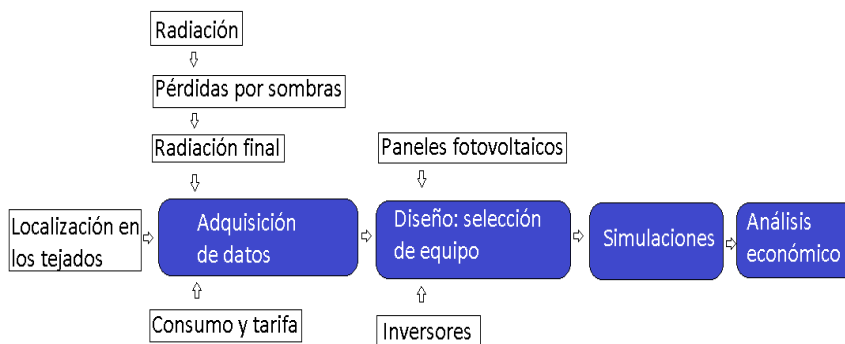


Figura 1. Esquema de la metodología de las instalaciones fotovoltaicas realizadas en el estudio de Valencia.

Los datos de radiación se obtienen de PVGIS® (una herramienta en línea desarrollada por el centro común de investigación de la Comisión Europea). Dada la ubicación, el acimut (El ángulo de acimut solar es el ángulo de acimut de la posición del Sol. Esta coordenada horizontal define la dirección relativa del Sol a lo largo del horizonte local, mientras que el ángulo cenital solar define la altitud aparente del Sol) (Wikipedia, 2022) y la pendiente, PVGIS proporciona la irradiación solar global promedio por metro cuadrado a la inclinación elegida. Esta plataforma da la opción de tomar información de diferentes bases de datos, por lo que la radiación solar global proporcionada puede ser comparada.

Después de obtener los datos de radiación, las pérdidas por sombras deben ser consideradas para la ubicación específica de los paneles. Estas pérdidas se estiman utilizando 2 herramientas, Huellasolar® y CE3X®. La plataforma Huellasolar® permite la visualización de mapas de radiación solar en las ciudades y CE3X® permite lograr el patrón de sombras.

Los paneles solares seleccionados para estas instalaciones se eligieron comparando diferentes alternativas disponibles en el mercado.

Model	A (m ²)	PV "Panel Cost" (€)	Cost VAT incl. (€)	P _{peak} (W)	η (%)	€/W (VAT incl.)
500W TSM-DE18M VERTEX, TRINA SOLAR	2.39	142	172	490	20.51	0.35
400W mono Red solar PERC SRP-400-BMA-HV	2.02	119	144	400	19.81	0.36
400W mono Red solar. SR-M672400HL	2.01	135	163	400	19.88	0.41
370W-72 M.Red Solar	1.94	129	157	370	19.07	0.42
350W Trina Solar Poli	2.01	125	151	350	17.40	0.43
335W Red Solar Poli	1.98	123	149	335	16.92	0.44
330W-144P.Red Solar RED330-72P	1.98	127	154	330	16.67	0.47

Tabla 1. Alternativas de paneles solares en el estudio de instalaciones de Valencia.

Model	Rated Power (kW)	Cost (€)	Cost VAT included (€)	€/kW
SMA STP25000TL 3Ph	25	2120	2566	103
INGETEAM Sun 3play 3Ph	20	1845	2233	112
SolaX X3 MIC-15.0-T 3Ph	15	1698	2055	137
SolaX X1 Boost 5 kW 1Ph	5	600	726	145
SolaX X3 MIC-10.0-T 3Ph	10	1336	1617	162
SolaX X3 MIC-12.0-T 3Ph	12	1703	2061	172
SolaX X1 Boost 4.2 kW 1PH	4.2	569	688	164
SolaX AIR 3kVA 1Ph	3	448	542	181
SolaX X3 MIC-8.0-T 3Ph	8	1225	1482	185
SolaX X1 Boost 3.6 kW 1 Ph	3.6	560	678	188
SolaX X3 MIC-9.0-T 3Ph	9	1415	1712	190
SolaX AIR 3.3kVA 1Ph	3.3	520	630	191
INGETEAM Sun 1 play 1Ph	6	976	1181	197
SolaX AIR 2.5kVA 1Ph	2.5	407	492	197
SolaX X1 Boost 3.3 kW 1Ph	3.3	542	656	199
SMA STP8000TL 3Ph	8	1321	1598	200
SolaX X3 MIC-7.0-T 3Ph	7	1181	1429	204
INGETEAM Sun 1 play 1Ph	5	878	1062	212
SolaX X1 Boost 3 kW 1Ph	3	530	641	214
SolaX X3 MIC-6.0-T 3Ph	6	1151	1393	232
SolaX X3 MIC-5.0-T 3Ph	5	1018	1232	246
INGETEAM Sun 1 play 1Ph	3.68	764	925	251

Tabla 2. Alternativas de inversores en el estudio de instalaciones de Valencia.

(Alfonso Solar, Vargas Salgado, Aparisi Cerdá, & Gómez Navarro, 2022)

En el estudio de las instalaciones desarrolladas en Valencia se utilizaron paneles con una eficiencia cercana al 20% debido a las limitaciones para la instalación de sistemas fotovoltaicos en un entorno urbano y su coste por kW/panel. Para la instalación de Valencia el panel seleccionado es el Vertex TSM-DE18M de 500W y su coste es de 0,35€/W IVA incluido.

De la misma forma se han comparado diferentes tipos de inversores como se puede apreciar en la figura 3. El precio del inversor y la selección depende del tamaño del sistema fotovoltaico seleccionado y el tipo de red donde se realiza la instalación (monofásica o trifásica). El precio se calcula en función de la potencia máxima instalada y se calcula mediante una simulación. (Alfonso Solar, Vargas Salgado, Aparisi Cerdá, & Gómez Navarro, 2022)

Por otra parte, el Análisis de ciclo de Vida (ACV) es una metodología de evaluación ambiental que ofrece la posibilidad de analizar y medir diferentes aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Esta metodología está regulada por la norma ISO 14040.

La evolución en la mentalidad de la sociedad respecto a la importancia de la protección ambiental y el cuidado del medio ambiente ha dado pie al desarrollo de métodos para analizar y tratar impactos derivados de productos o servicios, así como su manufactura. (ISO 14040:2006)

El ACV permite calcular el perfil ambiental de un solo producto o servicio y también permite comparar los resultados ofreciendo la posibilidad de variar variables dentro del proceso. Dentro de esta información ACV contribuye con lo siguiente:

- La identificación de oportunidades de mejora del desempeño ambiental del producto en las fases de diseño y desarrollo.
- El establecimiento de prioridades en la planificación estratégica del producto.
- La elección de indicadores de desempeño ambiental, entre los que se incluyen técnicas de medición.

Dentro del marco de proyectos de metodología ACV existe gran variedad de proyectos que han tenido el objetivo de analizar diferentes procesos para poder modelizar los impactos generados en el mismo.

Los estudios realizados por (Fthenakis & Kim, 2010) y (Michela Vellini, 2017) muestran como existen antecedentes en el área de estudios de ACV realizados sobre paneles Fotovoltaicos.

El artículo de (Fthenakis & Kim, 2010) ofrece como resumen la instantánea de la rápida evolución del rendimiento del ACV de las tecnologías fotovoltaicas y subraya la importancia de actualizar esta metodología con las mejores tecnológicas que se desarrollen. Por otra parte, menciona que, durante el ciclo de vida de la energía fotovoltaica, las emisiones al medio ambiente se producen principalmente por el uso de energía basada en combustibles fósiles para generar los materiales de las células, los módulos y los sistemas solares.

Estos estudios se focalizan en los diferentes materiales existentes en el mercado y se basan en la realización de un contraste de los impactos que generan estos materiales en el cómputo global de la fabricación mediante un ACV. Dentro de este estudio se comparan los habituales Silicio monocristalino, Silicio multicristalino y el Teluro de cadmio para acabar sacando conclusiones de las emisiones menos perjudiciales.

1.1 Contexto

Este proyecto se centra en el análisis teórico del proceso de fabricación, reciclaje y eliminación de un panel solar para uso doméstico de silicio. Este análisis de fabricación se complementa con un análisis mediante la metodología ACV para calcular el impacto ambiental generado durante los diferentes procesos.

La motivación para la elección de este material por encima de otras alternativas en el mercado como el Cd-Te (teluro de cadmio) ha sido su posicionamiento en el mercado junto a su mayor eficiencia energética.

Este proyecto también trae consigo un análisis de Stakeholders en el que se muestra información de una empresa especializada en este tipo de proyectos de instalaciones fotovoltaicas.

Por otra parte, el proyecto se complementará con los datos de una instalación de paneles solares de una vivienda unifamiliar situada en la localidad de Liendo (Cantabria) realizada en el año 2022. Mediante este estudio se podrán ver los datos reales de la energía generada por parte de la instalación fotovoltaica y los paneles instalados dependiendo de los kilovatios necesarios en este tipo de residencia.

Como última parte se plantea analizar la viabilidad económica de la implementación de la metodología de ACV dentro de este tipo de proyectos.

2. Objetivo y alcance del trabajo

Este proyecto tiene como primer objetivo, implementar y demostrar que la metodología ACV regulada por la norma ISO 14040 es útil dentro del marco de proyectos de ingeniería.

El segundo objetivo que plantea este proyecto es, poner en práctica la metodología ACV para realizar un análisis del proceso de fabricación, eliminación y reciclaje de un panel solar de silicio demostrando sus beneficios.

El tercer objetivo de este proyecto es analizar la viabilidad económica de la metodología ACV dentro del proyecto.

2.1 Beneficios que aporta el trabajo

Este proyecto se encuentra dentro del marco de proyectos relacionados con las energías renovables y ofrece un análisis de una vivienda energéticamente sostenible con intención de mostrar una alternativa energética a la crisis energética del mundo moderno.

Por otra parte, este proyecto busca mostrar la viabilidad económica de la metodología ACV para otros proyectos de ingeniería.

Por último, El estudio de paneles solares busca ser una réplica teórica de la instalación de paneles solares desarrollada en Liendo y así para así poder completar los datos del estudio ACV con los de la instalación.

2.2 Descripción de la solución propuesta

Este proyecto se basa en el análisis del proceso de fabricación mediante la metodología ACV y el SW openLCA. Una vez desarrollado el análisis se muestran los resultados obtenidos y se ponen en común con la documentación de la instalación de Liendo.

Para llevar a cabo este análisis es necesario analizar cada uno de los sub procesos que tiene dentro la fabricación de un panel solar de silicio.

Un panel solar de este material se forma por 10 procesos de fabricación teniendo en cuenta que la primera parte de la producción se centra en la fabricación del panel desde la obtención del silicio y las últimas etapas se centran en su funcionamiento, eliminación de residuos y reciclaje.

Una vez analizado cada proceso se desarrollará un diagrama de flujo que se utilizará a modo de guía en el SW openLCA para poder desarrollar el ACV.

Por último, se realizará un análisis económico de la implementación de esta metodología y así poder valorar de forma más real su uso en proyectos de ingeniería.



Figura 2. Resumen de los procesos de fabricación, operación, reciclaje y eliminación de un panel solar

Metodología

3. Metodología del proyecto

Este proyecto se divide en las siguientes fases:

- Diagrama de Gantt.
- Análisis del proceso de fabricación, operación, eliminación de un panel solar.
- ACV (Análisis de ciclo de vida) de la fabricación de un panel solar.
 - Objetivos y alcance del análisis.
 - Inventario.
 - Diagrama de flujo.
 - Tablas de inventario.
 - Cálculos openLCA.
 - Bases de datos utilizadas.
- Análisis de stakeholders especializados en transformación de urbanizaciones energéticamente sostenibles.
- Presentación de proyecto de instalación real y datos energéticos de la instalación de paneles solares.

3.1 Diagrama de Gantt

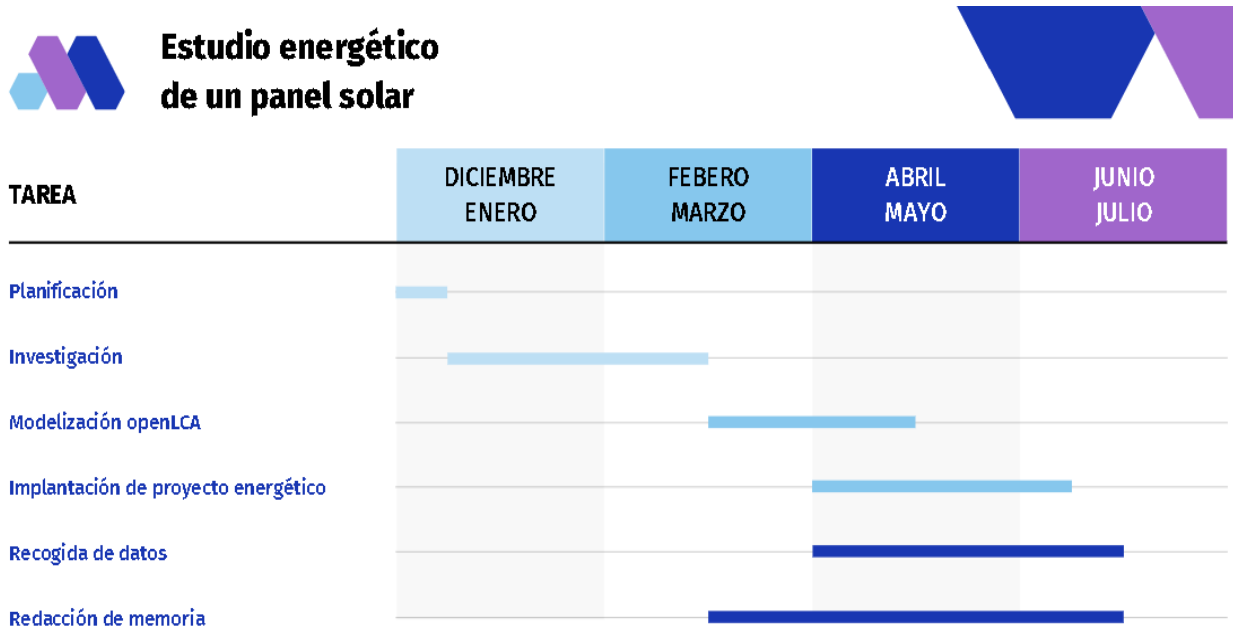


Figura 3. Diagrama de Gantt del proyecto

3.2 Análisis del proceso de fabricación

Dentro del análisis del proceso de fabricación, producción, eliminación y reciclaje de los paneles solares se mostrará una breve descripción con los datos más relevantes recopilados.

Existen diferentes tipos de paneles para la fabricación de paneles solares. El estudio posterior recoge el proceso de fabricación de un panel solar compuesto de silicio, aunque existen otros paneles comercializados con menor eficiencia como el de Cd-Te (teluro de cadmio).

Por otra parte, en la fase del ACV se mostrarán las diferentes tablas de inventario en las que se señalizan las entradas y salidas de los procesos junto a un diagrama de flujo que muestre el proceso analizado de forma simplificada.

El montaje del panel solar queda reflejado en el modelo explosionado que se encuentra en la Figura 4.

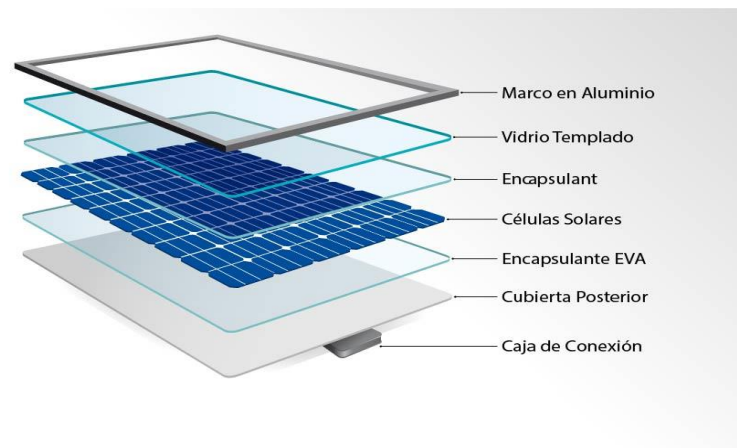


Figura 4. Estructura de un panel solar
(Miranda, s.f.)

- **Extracción de Silicio:** Dentro de los diferentes materiales utilizados para la fabricación de los paneles solares el silicio sigue siendo el material más empleado para la fabricación de los paneles solares debido a su abundancia (segundo material más abundantes en la corteza terrestre).
- **Producción de Silicio Metalúrgico:** El proceso de producción más utilizado es mediante un horno de arco eléctrico. Este proceso se resume en la reacción del cuarzo a temperatura alta junto a la reducción del carbón y otros agentes. Las salidas de este proceso son la propia aleación de *Silicio Metalúrgico* y calor en forma de emisión.
- **Purificación de Silicio Metalúrgico:** Los paneles fotovoltaicos de Silicio son unos de los más comercializados y para ello se desarrolló una nueva tecnología para su producción llamada Siemens. La ventaja principal conseguida es reducción de consumo energético debido a la pureza de Silicio necesaria (inferior a la de los procesos anteriormente empleados).

- **Producción Moldeado de Mix-Silicio:** Según el artículo publicado por (Michela Vellini, 2017) la composición de esta mezcla de silicio ronda un 80,14% en Silicio de grado solar, un 14,61% en Silicio de grado electrónico y un 5,25% en Silicio de grado electrónico.
- **Producción de obleas:** La fabricación de obleas se centra en un corte sobre el lingote de Silicio obtenido previamente mediante una sierra de alambre. Una vez realizado, se corta en mediante una sierra de varios hilos y se procede a limpiar con ácido clorhídrico, ácido acético, etc....
- **Producción de celdas:** Tras limpiar las obleas se produce un tratamiento químico para limpiar las impurezas mediante un proceso para generar la unión P-N. Tras realizar esta conexión se conectan partes metálicas a forma de conductor y posteriormente se aplica un revestimiento anti reflectante con el fin de mejorar la eficiencia.
- **Producción de paneles:** El panel fotovoltaico está hecho de varias capas como se aprecia en la figura 4.
 - Cubierta posterior (película de poliéster y fluoruro de polivinilo)
 - Celdas conexionadas mediante conexiones de cobre e incrustadas en capas de acetato de etilvinilacetato (parte delantera y otra en la parte posterior).
 - Cubierta frontal (hoja de vidrio con un bajo contenido de hierro) y marco de aluminio.
- **Eliminación:** Una vez acabada la etapa de uso del panel y haber cumplido su ciclo de vida los elementos que no entran en el plan de reciclaje son removidos.
- **Reciclaje:** Este proceso tiene gran valor porque se encuentra alineado con el uso del ACV. Dentro de este proceso las obleas se reutilizan, componiéndose el mismo de dos etapas: la primera, un proceso térmico realizado desmontando el módulo y la segunda, en una recuperación del silicio en polvo mediante el uso de procesos químicos.
 - Utilizar KOH acuoso al 30%, para poder eliminar los refuerzos de aluminio del marco (temperatura: 60-80°C, 2-3').
 - Realizar una mezcla compuesta por 250 ml de HNO₃ (65%), 150 ml de HF (40%), 150ml de CH₃COOH (99,5%) +3 ml de Br₂ para poder eliminar los refuerzos de Ag, AR y las juntas de la unión P-N (temperatura 40°C, 9').

3.3 ACV (Análisis del ciclo de vida)

Dentro del análisis del ciclo de vida se muestra el diagrama de flujo del proceso junto las tablas de inventario en las que se detallan las diferentes entradas y salidas de los procesos. El proceso seguido hace referencia al proceso de la cuna a la tumba mostrado en el artículo publicado por (Michela Vellini, 2017).

3.3.1 Objetivos y alcance

El estudio ACV realizado abarca un análisis de impacto ambiental y emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero) en el que se focaliza en los datos de emisiones de CO₂. El planteamiento seguido para el estudio es la realización de una comparativa de cada uno de los procesos que forman el desarrollo de un panel solar para así mostrar que proceso es el más crítico a nivel de emisiones y ofrecer una respuesta.

3.3.2 Inventario

El Diagrama de Flujo se forma por los procesos previamente descritos en el análisis de fabricación. Es necesario mencionar que el funcionamiento y la eliminación no se han estudiado debido a que existen muchos factores a tener en cuenta (Vida útil del panel, gama del panel analizado...). Por otra parte, la extracción del silicio genera impacto en las siguientes operaciones por lo que no se ha analizado como proceso propio del desarrollo del panel solar.

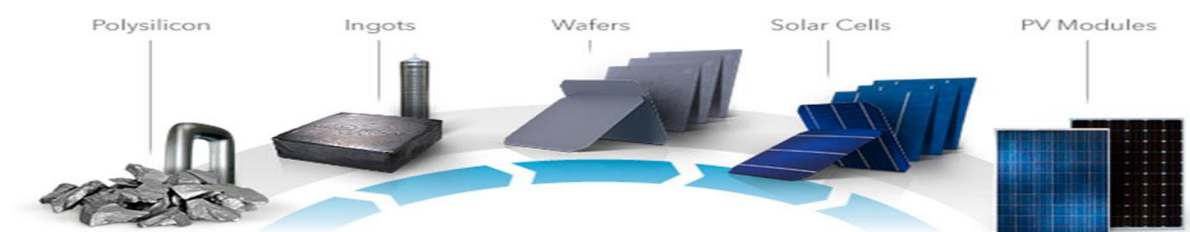


Figura 5. Desglose del proceso de fabricación
(Solar, s.f.)

En el proceso de inventario se sigue el proceso de la Figura 5, pero con otra distribución de pasos. Mas concretamente, se resume en un Inventario formado por 7 Procesos, aunque el estudio realizado por (Michela Vellini, 2017) haga referencia a 10 procesos.

- *Diagrama de flujo*

El diagrama de flujo del proceso de la cuna a la tumba del panel teniendo en consideración su reciclaje como parte del propio proceso.



Figura 6. Diagrama de Flujo del proceso

- *Tablas de inventario*

En el siguiente apartado se muestran las tablas de inventario que resumen el proceso de desarrollo de un panel solar mediante las entradas, salidas y energía necesaria en cada apartado. En la tabla 3 se describen los procesos que se le realizan al Silicio y en la tabla 4 se muestran el resto de procesos hasta el reciclaje.

Proceso	Energía (MJ)	Materiales (entrada)	Salida Principal	Salida Energía (MJ)
Producción de Silicio Metalúrgico	Electricidad 39.6MJ Diésel 23.1 MJ	Arena de sílice 2.7 kg Coque de petróleo 0.5 kg Astillas de madera 2.35 kg Carbón 0.17 kg Electrodos de grafito 0.1 kg Oxígeno 0.02 Kg	Silicio Metalúrgico 1 kg	Calor (emisiones) 71,3 MJ
Purificación de Silicio Metalúrgico	Electricidad 806,4 MJ	Silicio Metalúrgico 2.13 kg Ácido hidroclicórico 3.6 kg Agua 43.5 kg Hidróxido de sodio 0.79 kg Hidrógeno 0.11 kg	Tetracloruro de silicio 1,2 kg Silicio de grado electrónico 0,7604 kg Silicio de grado solar 1 kg	Calor (emisiones) 670 MJ
Producción Moldeada de Mix-Silicio	Electricidad 69.5 MJ	Silicio de grado electrónico 0,23 kg Silicio de grado solar 0,91 kg Azulejos de cerámica 0.34 kg Argón 0.27 kg Nitrógeno 0.05 kg	Silicio Fundido Mix 1 kg	Calor (emisiones) 69,5 MJ

Tabla 3. Inventario de procesos de obtención de Silicio

Proceso	Energía (MJ)	Materiales (entrada)	Salida Principal	Salida Energía (MJ)
Producción de obleas	Electricidad 28,8MJ Diésel 4 MJ	Silicio Fundido Mix 1.14 kg sulfonato de alquilbenceno 0,24 kg carburo de silicio 0,49 kg Poliestireno 0,2 kg Agua suavizada 65 kg Acero 1,48 kg trefilado 1,49 kg Éter monometálico de dipropilenglicol 0,3 kg	Oblea de Mix-Silicio 1 m ²	Calor (emisiones) 28,8 MJ
Producción de Celdas	Electricidad 108,8 MJ Diésel 5,9MJ	Oblea 1.06 m ³ Agua 1 m ³ Nitrógeno líquido 1.85 kg Hidróxido de sodio 0.16 kg Oxígeno 0,1 kg	Celda fotovoltaica 1 m ²	Calor (emisiones) 109 MJ
Producción de paneles	Electricidad 17 MJ Diesel 5,4 MJ	Celda fotovoltaica 1 m ² Vidrio templado plano 10.1kg Vidrio solar, bajo en hierro 10.1kg Aleación de aluminio 2.63 kg lámina de etilvinilacetato 1 kg	Panel fotovoltaico 1 m ²	Calor (emisiones) 17 MJ
Reciclado	Electricidad 76 MJ	Panel fotovoltaico 1 m ² Agua 0.223 kg Fluoruro de hidrógeno 0.0678 kg Ácido acético 5.92 kg	Panel fotovoltaico 0,889 m ²	

Tabla 4. Inventario de procesos fabricación-reciclado

3.3.3 Cálculos open LCA

En este apartado se plantea mostrar el impacto de cada uno de los procesos de desarrollo para un panel solar de Silicio junto a su huella de CO₂.

Dentro de las categorías de impacto que se pueden analizar mediante el SW openLCA se usará la categoría de impacto **Calentamiento global (GWP100a)** debido a la conexión de los datos que se quieren recabar en este proyecto.

El cambio climático puede definirse como la modificación de la temperatura global provocada por el efecto invernadero que genera la liberación de "gases de efecto invernadero" por la actividad humana. En la actualidad existe un consenso científico de que el aumento de estas emisiones está teniendo un efecto notable en el clima. Se espera que este aumento de la temperatura global provoque alteraciones climáticas, desertificación, aumento del nivel del mar y propagación de enfermedades. y la propagación de enfermedades.

El cambio climático es uno de los principales efectos medioambientales de la actividad económica, y uno de los más difíciles de manejar debido a su amplia escala.

El modelo de caracterización de los perfiles ambientales se basa en los factores desarrollados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU. Los factores se expresan como Potencial de Calentamiento Global en un horizonte temporal de diferentes años, siendo el más común 100 años (GWP100), medido en la unidad de referencia, kg de CO₂ equivalente. (Acero, Rodríguez, & Ciroth, 2017)

Para ello este estudio utiliza la base de datos Ecoinvent como base de datos para inventario y ReCiPe 2016 Midpoint como base de datos de metodología de impactos.

Por otra parte, se mostrarán los resultados de los 18 impactos calculables mediante la herramienta detallados:

Nombre de la categoría de impacto	Resumen
Cambio climático	Gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global (GEP), por ejemplo, metano, hexafluoruro de azufre, etc.
Eutrofización en agua dulce	La eutrofización es la acumulación de una concentración de nutrientes químicos en un ecosistema que conduce a una productividad anormal. Esto provoca un crecimiento excesivo de plantas como las algas en los ríos que provoca una grave reducción de la calidad del agua y de las poblaciones animales.
Eutrofización marina	
Ecotoxicidad en agua dulce	La toxicidad ambiental se mide en tres categorías de impacto distintas que examinan agua dulce, marino y terrestre. La emisión de algunas sustancias, como los metales pesados, pueden tener impactos en el ecosistema.
Ecotoxicidad Terrestre	
Ecotoxicidad marina	
Acidificación terrestre	Los gases ácidos, como el dióxido de azufre (SO ₂), reaccionan con el agua en la atmósfera para formar la "lluvia ácida", proceso conocido como deposición ácida. Cuando esta lluvia cae, a menudo a una distancia considerable de la fuente original del gas, provoca un deterioro de los ecosistemas de diverso grado, dependiendo de la naturaleza de estos. Los gases que provocan la deposición ácida son el (NH ₃), (NO _x) y (SO _x).
Toxicidad cancerígena en humanos	El potencial de toxicidad en humanos es un índice calculado que refleja el daño potencial de una unidad de producto químico liberado en el medio ambiente, y se basa tanto en la toxicidad inherente de un compuesto y su dosis potencial. Estos subproductos, principalmente el arsénico, el dicromato de sodio y el fluoruro de hidrógeno, en su mayor parte son causados, por la producción de electricidad a partir de fuentes fósiles.
Toxicidad no cancerígena en humanos	
Radiación ionizante	La radiación ionizante es una categoría de impacto en el ACV relacionada con el daño a la salud humana y los ecosistemas que se relacionan con las emisiones de radionúclidos a lo largo del ciclo de vida de un producto o edificio.
Uso de la tierra	El estudio se basa en el marco de evaluación del uso del suelo del PNUMA/SETAC y se centra en los impactos de la ocupación.
Formación de ozono, Salud humana	El ozono es protector en la estratosfera, pero a nivel del suelo es tóxico para el ser humano en altas concentraciones. El ozono fotoquímico, también llamado "ozono a nivel del suelo", se forma

Formación de ozono, Ecosistema terrestre	por la reacción de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno en presencia de calor y luz solar.
Agotamiento del ozono estratosférico	Los gases que agotan la capa de ozono causan daños en el ozono estratosférico o "capa de ozono". Existe una gran incertidumbre sobre los efectos combinados de los diferentes gases en la estratosfera. Todos los compuestos clorados y bromados que son lo suficientemente estables como para llegar a la estratosfera pueden tener un efecto.
Formación de partículas pequeñas	Son una mezcla compleja de partículas extremadamente pequeñas. La contaminación por partículas puede estar formada por una serie de componentes, entre los que se incluyen ácidos (los nitratos y los sulfatos), productos químicos orgánicos, metales y partículas de suelo o polvo.
Escasez de recursos minerales	De manera general, esta categoría de impacto se refiere al consumo de recursos no biológicos como los combustibles fósiles minerales, metales, agua, etc.
Escasez de recursos fósiles	
Consumo de Agua	

Tabla 5. Categorías de impactos openLCA

- *Emisiones MJ por proceso*

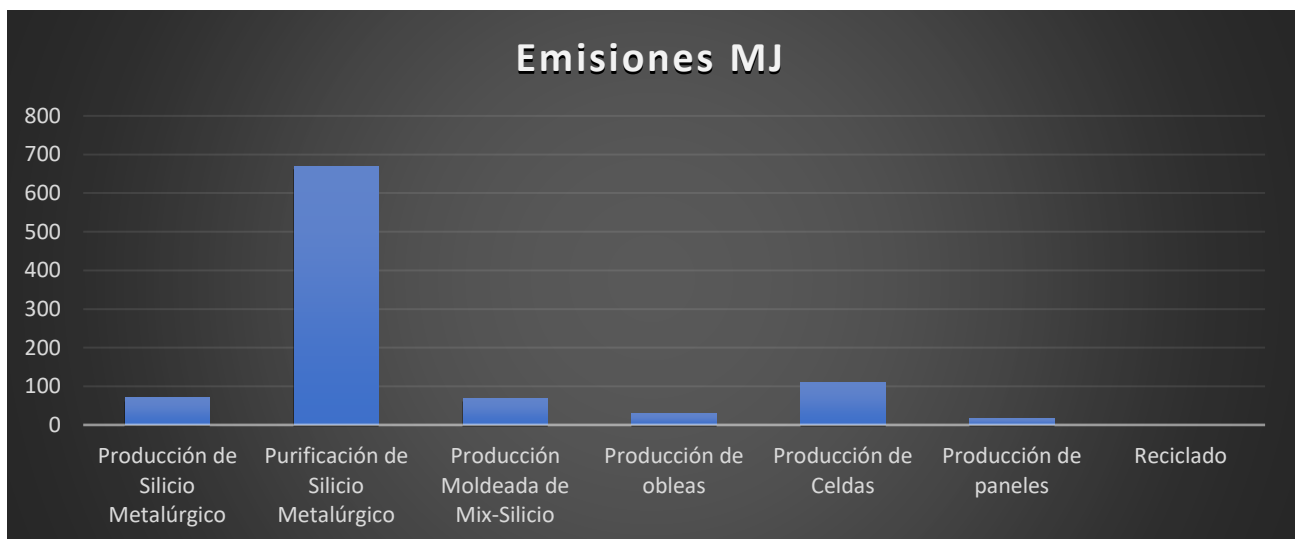


Gráfico 1. Emisiones MJ por Proceso

- *Emisiones Kg CO₂ por proceso*

- Producción de Silicio Metalúrgico

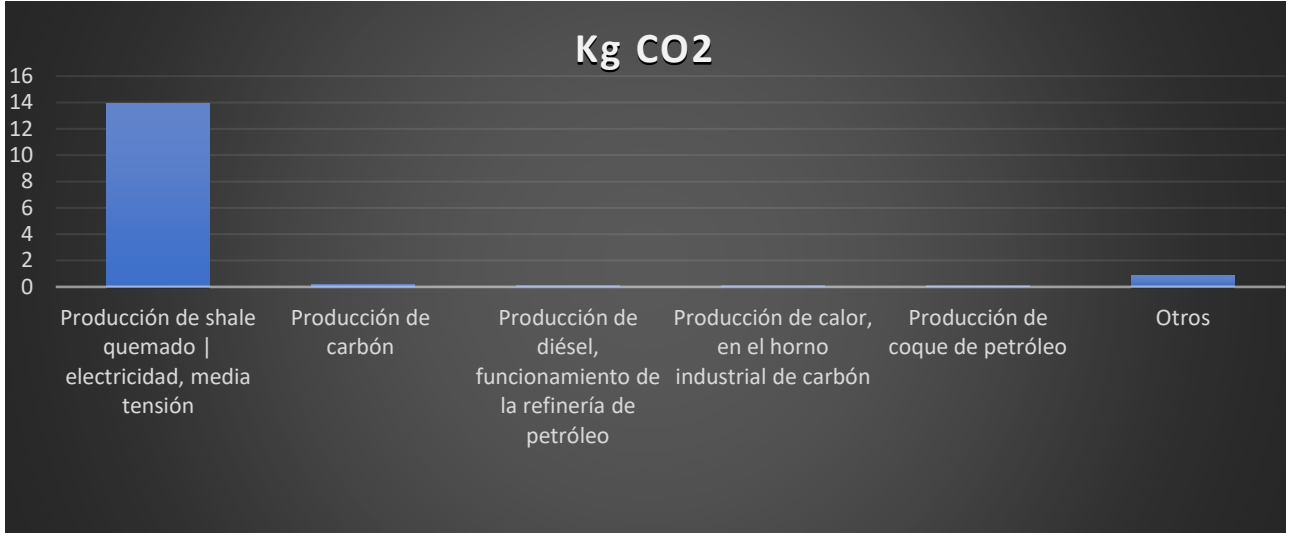


Gráfico 2. Kg CO₂ Producción de Silicio Metalúrgico (subprocesos)

- Purificación de Silicio metalúrgico

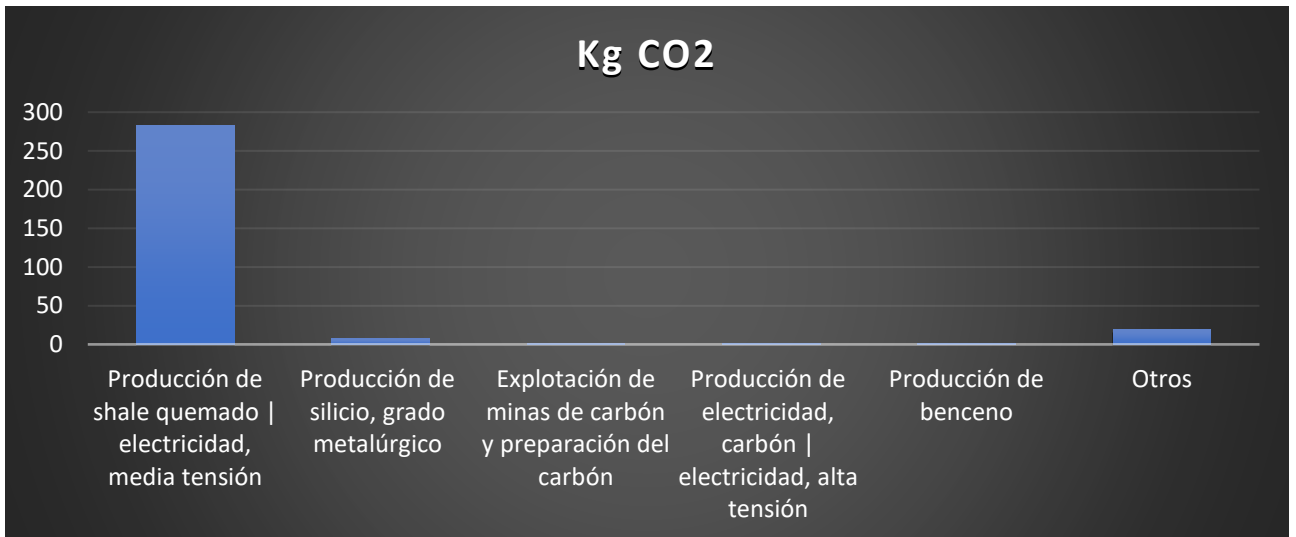


Gráfico 3. Kg CO₂ Purificación de Silicio Metalúrgico (subprocesos)

○ Producción moldeada de Mix-Silicio

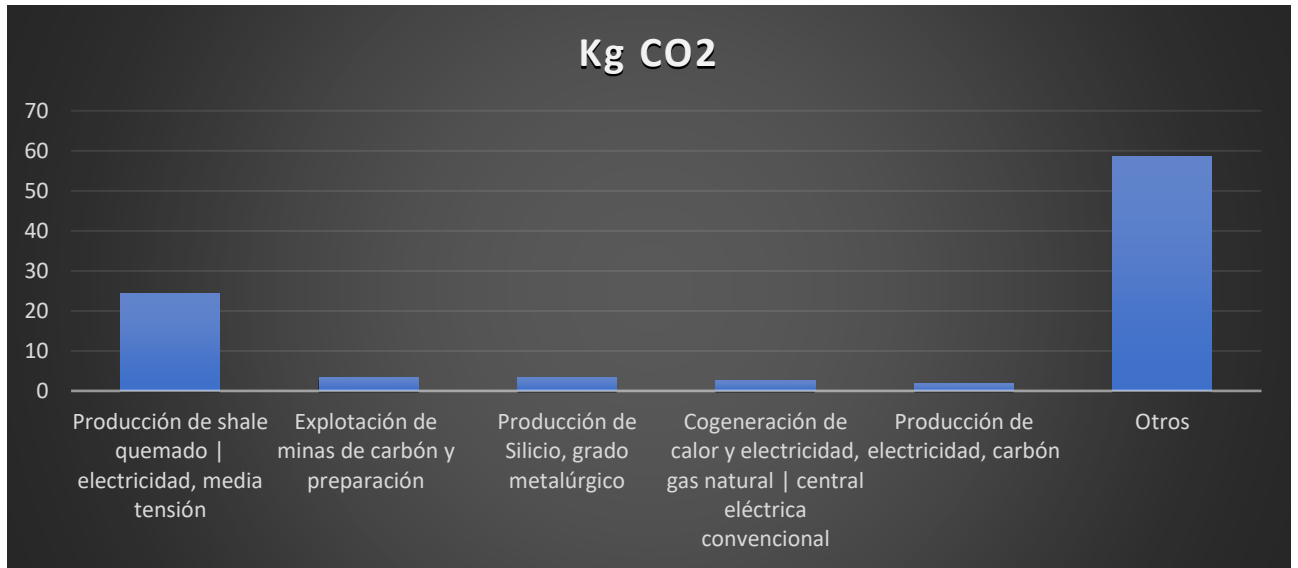


Gráfico 4. Kg CO₂ Producción moldeada de Mix-Silicio (subprocesos)

○ Producción de obleas



Gráfico 5. Kg CO₂ Producción de obleas (subprocesos)

○ Producción de celdas

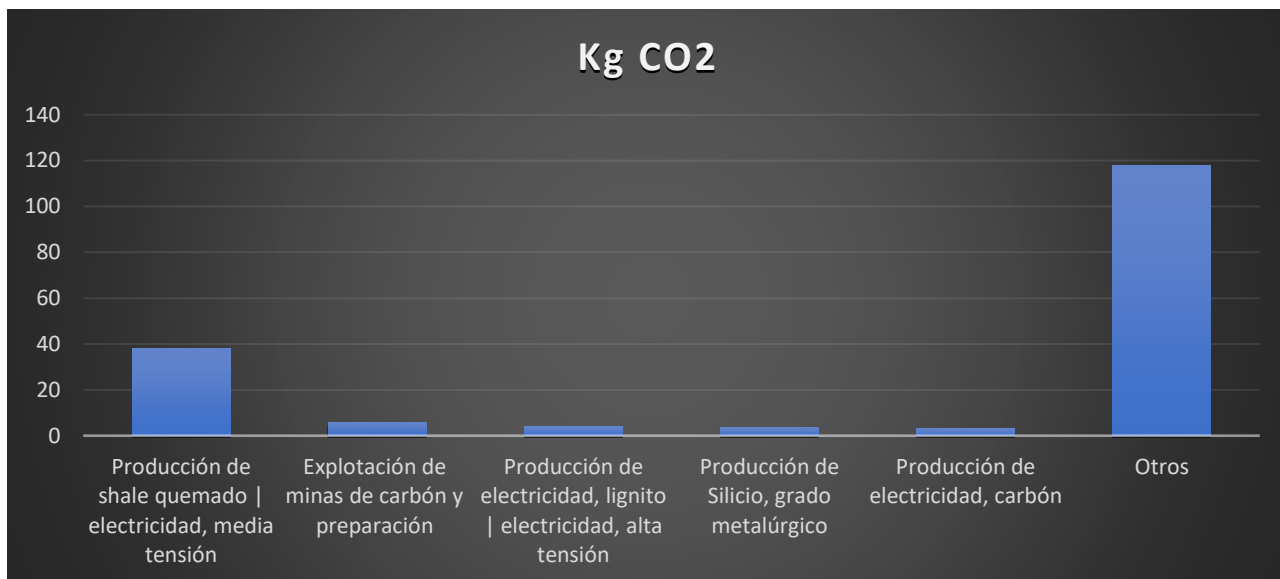


Gráfico 6. Kg CO₂ Producción de celdas (subprocesos)

○ Producción de Paneles Solares

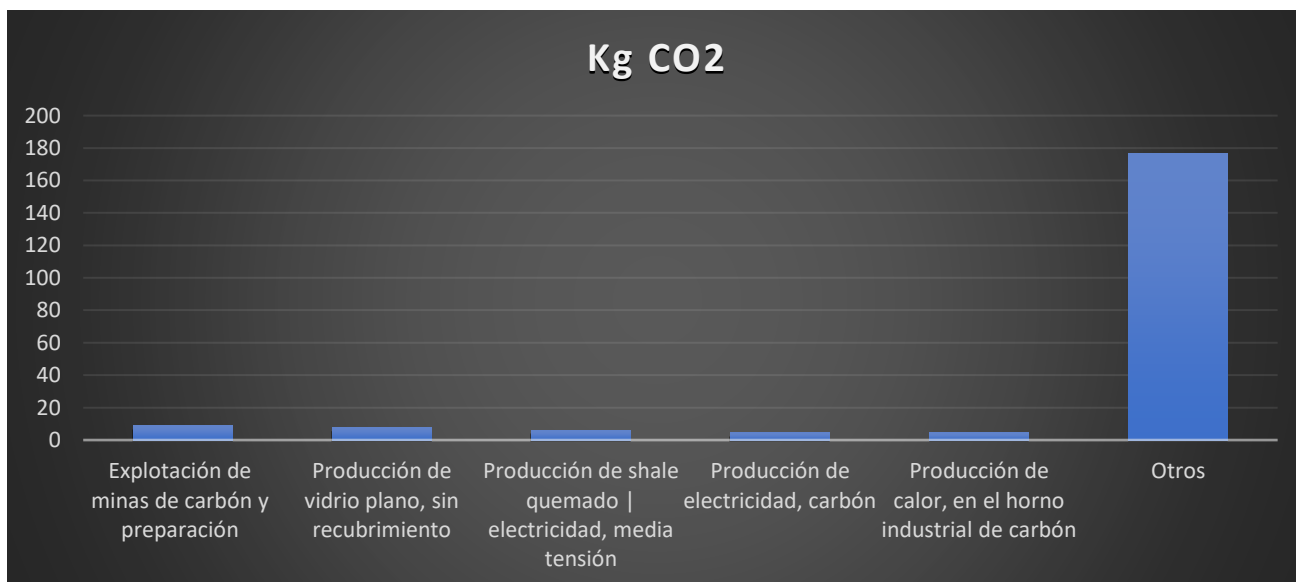


Gráfico 7. Kg CO₂ Producción de Paneles Solares (subprocesos)

○ Reciclado

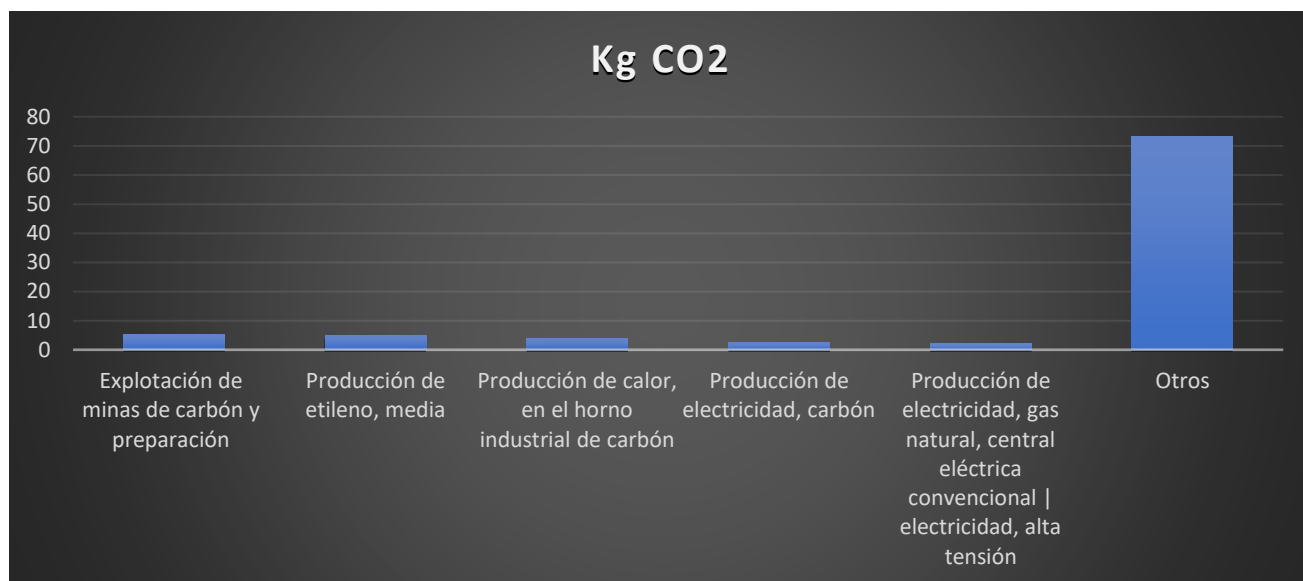


Gráfico 8. Kg CO₂ Reciclado (subprocesos)

3.4 Análisis de Stakeholders

Las instalaciones energéticamente sostenibles ofrecen diferentes posibilidades a la hora de modificar una vivienda. Por otra parte, este tipo de instalaciones son más habituales en viviendas unifamiliares que en bloques de pisos. Sin embargo, existen instalaciones solares de autoconsumo de zonas comunes y compartidas para este tipo de viviendas.

3.4.1 Tipos de instalaciones

La empresa **Endef Solar Solutions** (Zaragoza) ofrece 4 tipos de instalaciones fotovoltaicas para las viviendas además de otro tipo de instalaciones personalizadas para viviendas que así lo necesiten (Endef Solar Solutions, s.f.).

- *Instalación fotovoltaica de autoconsumo*

En este tipo de instalaciones la vivienda se mantiene conectada a la red de abastecimiento de las empresas suministradoras de energía eléctrica. La instalación consume la energía eléctrica generada por las placas durante el día y utiliza la red para la energía necesaria durante la noche (no es necesario el uso de baterías en este tipo de instalaciones). De esta forma, se paga únicamente por la energía obtenida por la red y se recibe una compensación por la energía generada por los paneles solares que se ha devuelto a la red al no consumirse.



Figura 7. Instalación fotovoltaica de autoconsumo
(Endef Solar Solutions, s.f.)

Letra	Explicación
A	Paneles solares (Receptor de energía)
B	Inversor eléctrico (transformador de Corriente continua a Corriente alterna)
C	Contador eléctrico (Contador de electricidad obtenida por la red eléctrica y de la electricidad devuelta a la red por la instalación)
D	Contador de consumo (Contador de energía obtenida de la red y la devuelta a la red por la instalación doméstica)

Tabla 6. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo

- *Instalación fotovoltaica aislada*

En este tipo de instalaciones la vivienda se encuentra desconectada de la red de abastecimiento de las empresas suministradoras de energía eléctrica. Durante la noche se consume energía eléctrica generada por las placas y recolectada en baterías. Este tipo de instalaciones se recomiendan en segundas viviendas por la dependencia que existe al clima.

- *Instalación solar térmica*

En este tipo de instalaciones se utiliza la energía solar a través de una instalación térmica. Mas concretamente se aprovecha el calor generado por los rayos solares mediante una caldera de aerotermia para abastecer la demanda de agua caliente sanitaria (ACS). Estas instalaciones no contienen placas solares fotovoltaicas.

- *Instalación solar híbrida*

En este tipo de instalaciones los paneles generan electricidad como se ha explicado en las dos primeras instalaciones para abastecer la necesidad eléctrica de la vivienda. Por otra parte, se acumula calor mediante una caldera de aerotermia para abastecer la demanda de (ACS) de la vivienda. Este tipo de instalaciones son las más innovadoras en el mercado actual de viviendas energéticamente sostenibles y son las que más ahorro suponen en los gastos fijos de una vivienda.

3.4.2 Tipos de paneles solares

Dentro de los paneles solares suministrados por Endef Solar Solutions se encuentran los modelos Ecovolt y Ecomesh como se aprecia en la imagen inferior (Endef Solar Solutions, s.f.). La diferencia radica en el uso de estos paneles frente a otros más convencionales es la posibilidad de unir el proceso eléctrico de una célula fotovoltaica con el proceso térmico necesario para el uso de una caldera de aerotermia.

- Panel Ecovolt: El voltaje máximo por panel es de 1500 Voltios de corriente continua. Las especificaciones térmicas son peores en este tipo de paneles ya que se encuentran más orientados a climas cálidos.
- Panel Ecomesh: El Voltaje máximo por panel es de 1000 Voltios de corriente continua. Las especificaciones térmicas son mejores en este tipo de paneles porque se encuentran más orientadas a climas más fríos.



Figura 8. Modelos híbridos de paneles solares.

(Endef Solar Solutions, s.f.)

3.4.3 Instalación Real

La instalación realizada en la vivienda unifamiliar de Liendo Cantabria muestra una instalación de 6 paneles solares como se puede ver en la imagen inferior.



Figura 9. Instalación de paneles solares de Liendo

La empresa encargada del proyecto muestra unos datos de partida del consumo energético que tiene la vivienda inicialmente y los compara con los datos de partida de la instalación propuesta.

Consumo anual de la vivienda	2,678kWh
Número de paneles	6
Tipo de estructura	Coplanar
Potencia de la instalación	2,7kWh
Superficie ocupada	12m2
Almacenamiento en baterías	No
Gestión de excedentes	Completa Simplificada

Tabla 7. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo

Una vez presentada la propuesta inicial se presenta un plan de mejoras que aporta la instalación a la situación actual.

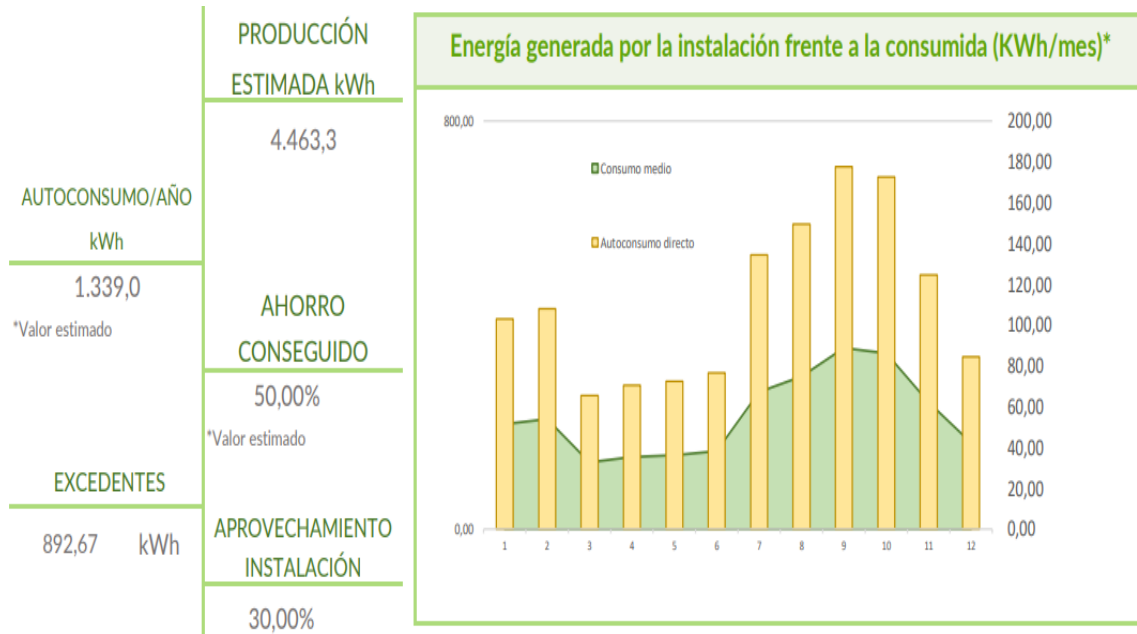


Figura 10. Plan de instalación fotovoltaica de Liendo

Una vez entregado el plan se muestra documentación complementaria sobre la garantía y la vida útil de la instalación.

Módulos fotovoltaicos de primeras marcas. Tier 1
Garantía de fabricación entre 12-20 años en función de la marca asignada al proyecto.
Garantía de producción de hasta 25 con un 18% máximo de degradación
Inversores fotovoltaicos de primeras marcas.
Se asignará marca y modelo en función de las características técnicas de la instalación.
Posibilidad de incorporar baterías a su propuesta de autoconsumo
Baterías de litio de primeras marcas.
Garantía de fábrica de 8 años.

Tabla 8. Tabla explicativa de instalación fotovoltaica de autoconsumo

Por último, se muestra un presupuesto con el tiempo de amortización de la inversión y el beneficio planteado en contraste con la vida útil planteada anteriormente.

Descripción	Uds
*Módulos fotovoltaicos Canadian Solar 450 W o similar (Tier 1)	6
*Inversor solar fotovoltaico SMA de 3 kW o similar, monofásico/trifásico según condiciones del punto de suministro. Incluye sistema de monitorización	1
Material auxiliar de instalación (Incluye cableado, protecciones y material auxiliar)	1
**Estructura para fijación de paneles a la cubierta, se incluyen todos los elementos auxiliares necesario para un correcto anclaje.	1
Mano de obra, legalización y pequeño material	1

La garantía de los diferentes productos descritos en el presupuesto tendrán la definida por el fabricante

Potencia pico de la instalación predimensionada: 2,7 kWp
Plazo de amortización (payback estimado): 17,51 años
Ahorro estimado en 25 años: 5.088,20 €

Total (sin IVA)	4.455,00 €
Total (con IVA)	5.390,55 €

Figura 11. Plan de instalación fotovoltaica de Liendo

4. Resultados

4.1 Panel Solar

Dentro de los resultados logrados en el análisis del proceso del panel solar y los estudios leídos se han analizado diferentes tipos de paneles solares, aunque este estudio solo recoja los datos del panel solar de Silicio.

La decisión de centrar el estudio en este tipo de panel ha sido debido al estudio de mercado realizado (material más comercializado en el sector de la energía fotovoltaica). Dentro de esta investigación de tipos de paneles solares el estudio de (Michela Vellini, 2017) muestra que la contaminación generada por el panel de Cd-Te (teluro de cadmio) es inferior.

Los datos reflejan que, en la comparación entre las dos tecnologías todos los impactos, principalmente los relacionados con las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, son mucho menores para los paneles de Cd-Te porque el consumo total de energía para su producción es menor. También los impactos ambientales relacionados con el agotamiento de los recursos son mucho menores en el caso de los paneles de Cd-Te.

Dentro del estudio del mejor material se aprecia como resultado que la eficiencia energética de un panel de Cd-Te es inferior a la de un panel de Silicio, aunque el impacto ambiental derivado del proceso sea mejor en los paneles de teluro de cadmio.

Por otra parte, según el estudio realizado por (Michela Vellini, 2017) el impacto a nivel de emisiones de calor (MJ) es superior en el caso del panel de Silicio también como se puede ver en el gráfico 9.

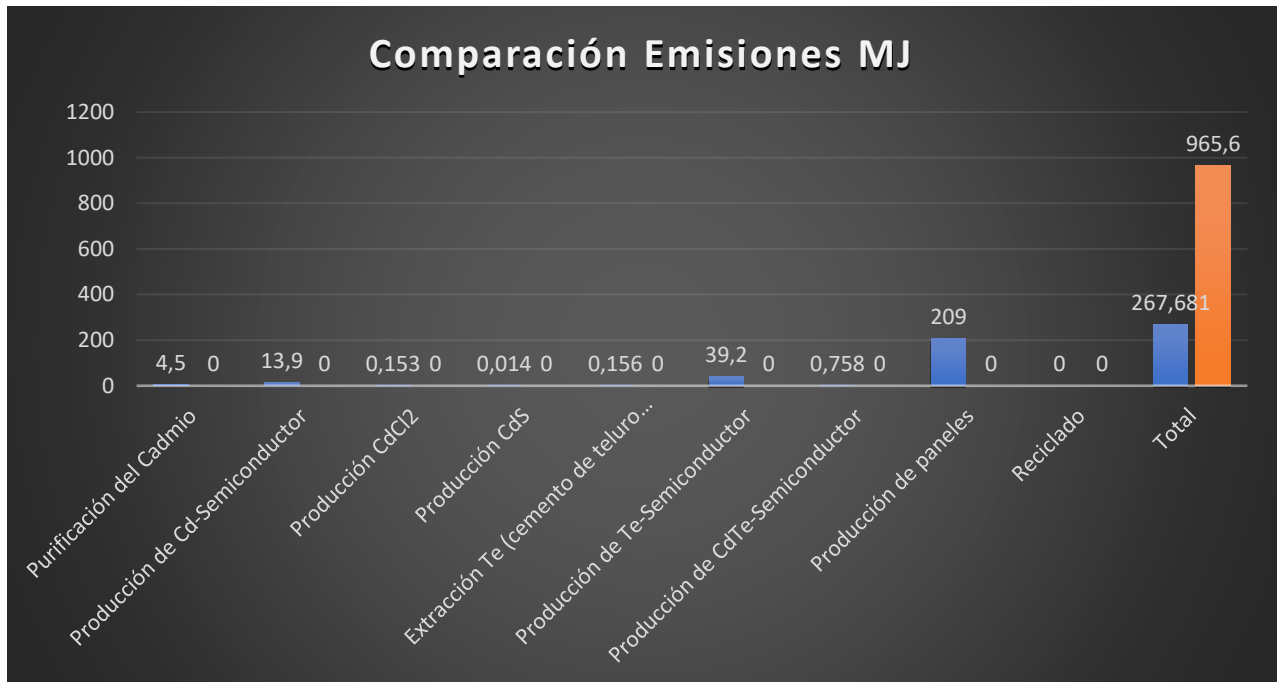


Gráfico 9. Comparación emisiones Cd-Te y Si (MJ)

4.2 ACV

Dentro de los datos obtenidos por el ACV se pone especial foco en las emisiones de CO₂ producidas en cada proceso y así poder ver el punto crítico del estudio analizado.

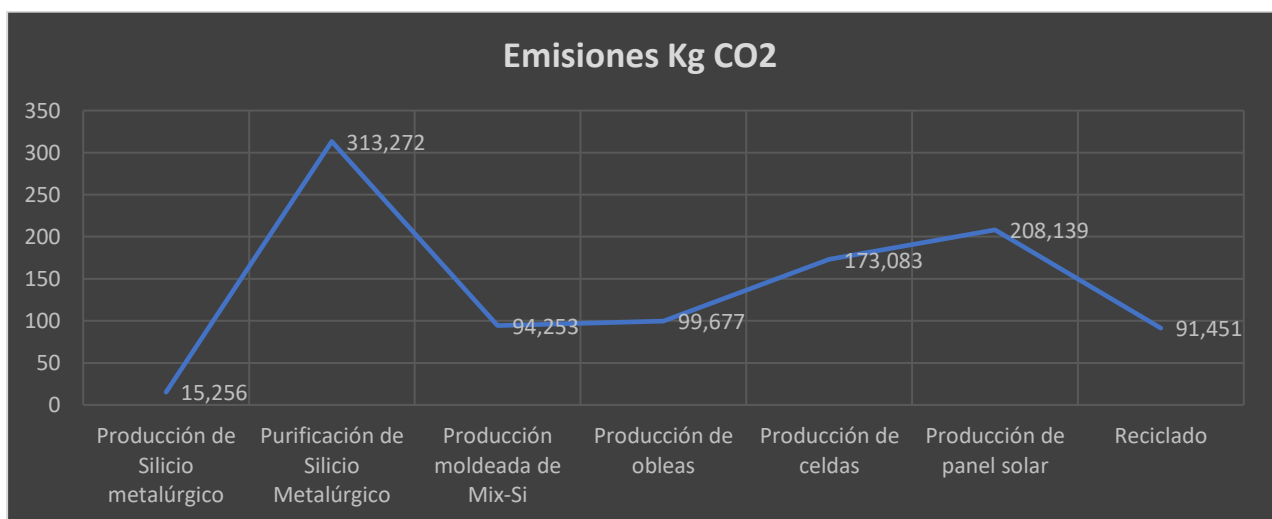


Gráfico 10. Emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación de un panel de Si

Después de mapear el proceso de la cuna a la tumba y la huella de CO₂ que genera mediante el gráfico 10 se pondrá el foco en el proceso de **purificación de Silicio metalúrgico** al tratarse del proceso con mayor incidencia.

Analizando cada uno de los procesos en profundidad se puede ver que subproceso genera el mayor impacto de Kg CO₂ como se puede apreciar en las siguientes tablas de resultados:

Producción de Silicio metalúrgico	
Subprocesos	kg CO₂
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	13,914 kg
Producción de carbón	0,192 kg
Producción de diésel, funcionamiento de la refinería de petróleo	0,123 kg
Producción de calor, en el horno industrial de carbón	0,101 kg
Producción de coque de petróleo	0,082 kg
Otros	0,844 kg
Total	15,256 kg

Tabla 9. Emisión de CO₂ Subprocesos Producción de Silicio Metalúrgico

Purificación de Silicio Metalúrgico	
Subprocesos	Kg CO₂
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	283,3 kg
Producción de silicio, grado metalúrgico	7,627 kg
Explotación de minas de carbón y preparación del carbón	1,444 kg
Producción de electricidad, carbón electricidad, alta tensión	0,573 kg
Producción de benceno	0,561 kg
Otros	19,767 kg
Total	313,272 kg

Tabla 10. Emisión de CO₂ Subprocesos Producción de Silicio Metalúrgico

Producción moldeada de Mix-Si	
Subprocesos	Kg CO ₂
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	24,419 kg
Explotación de minas de carbón y preparación	3,47 kg
Producción de Silicio, grado metalúrgico	3,42 kg
Cogeneración de calor y electricidad, gas natural central eléctrica convencional	2,6 kg
Producción de electricidad, carbón	1,846 kg
Otros	58,498 kg
Total	94,253 kg

Tabla 11. Emisión de CO2 Subprocesos Producción moldeada de Mix-Si

Producción de obleas	
Subprocesos	Kg CO ₂
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	10,119
Producción de electricidad, lignito electricidad, alta tensión	4,763
Producción de Silicio, grado metalúrgico	3,527
Explotación de minas de carbón y preparación	3,449
Producción de electricidad, carbón	2,487
Otros	75,332
Total	99,677

Tabla 12. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de obleas

Producción de celdas	
Subprocesos	Kg CO ₂
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	38,228 kg
Explotación de minas de carbón y preparación	5,955 kg
Producción de electricidad, lignito electricidad, alta tensión	4,11 kg
Producción de Silicio, grado metalúrgico	3,74 kg
Producción de electricidad, carbón	3,15 kg
Otros	117,9 kg
Total	173,083 kg

Tabla 13. Emisión de CO2 Subprocesos Producción de celdas

Producción de panel solar	
Subprocesos	Kg CO₂
Explotación de minas de carbón y preparación	8,799 kg
Producción de vidrio plano, sin recubrimiento	7,848 kg
Producción de shale quemado electricidad, media tensión	5,973 kg
Producción de electricidad, carbón	4,536 kg
Producción de calor, en el horno industrial de carbón	4,483 kg
Otros	176,5 kg
Total	208,139 kg

Tabla 14. Emisión de CO₂ Subprocesos Producción de panel solar

Reciclado	
Subprocesos	Kg CO₂
Explotación de minas de carbón y preparación	5,131 kg
Producción de etileno, media	4,898 kg
Producción de calor, en el horno industrial de carbón	3,902 kg
Producción de electricidad, carbón	2,437 kg
Producción de electricidad, gas natural, central eléctrica convencional electricidad, alta tensión	2,03 kg
Otros	73,053 kg
Total	91,451 kg

Tabla 15. Emisión de CO₂ Subprocesos Reciclado

Mediante la discretización presentada en las tablas superiores se ve como la purificación de Silicio metalúrgico es el proceso con más impacto de CO₂ presentando el 31,48% de las emisiones totales del proceso. Por otra parte, también es el proceso más crítico a nivel de emisiones (MJ) por calor abarcando el 69,38% del total.

La purificación de silicio metalúrgico es el gran causante del impacto por las necesidades eléctricas que trae consigo dicho proceso. Mas concretamente se puede ver como el 90,43% de las emisiones vienen como resultado de las necesidades eléctricas de la producción de shale.

En los otros dos procesos más críticos como son la fabricación de las celdas y el panel solar el impacto queda más distribuido y por lo tanto es más difícil acotar a la hora de poder plantear una solución eficiente.

4.3 Stakeholders

En el análisis realizado de los Stakeholders del proyecto los resultados obtenidos son derivados del tipo de panel empleado en sus instalaciones. Esta empresa responsable de la instalación presentada en el apartado 3.4 únicamente trabaja con paneles de Silicio debido a que los paneles de Cd-Te les suponen más gastos debido a su menor eficiencia y la necesidad de instalar un mayor número de paneles encareciendo los proyectos.

Por otra parte, la necesidad de aumentar la cantidad de paneles juega un papel perjudicial dependiendo de la superficie útil en el tejado para su instalación también.

5 Conclusiones

Este proyecto ofrece la oportunidad de poder analizar como la energía fotovoltaica solar siendo una energía verde genera un impacto ambiental bastante amplio dentro de su proceso de fabricación. Muchas veces se puede pensar el hecho de las cero emisiones generadas por este tipo de energía cuando realmente la realidad es otra. La realidad muestra como una instalación de 6 paneles solares como sería el caso de la instalación de Liendo generaría un impacto de 5.793,6 kg de CO₂. Evidentemente es necesario mencionar que esta tecnología es menos contaminante que la energía generada mediante combustibles fósiles.

Respecto a la metodología es necesario mencionar que es un procedimiento muy útil dentro del mundo de la dirección de proyectos debido a la necesidad de analizar los impactos generables y el alcance de estos a la hora de poder buscar alternativas más eficientes.

Analizando las conclusiones del ACV, respecto a los datos obtenidos se puede concluir diciendo que, aunque la energía generada por la instalación acabe siendo libre de emisiones, la energía eléctrica necesaria para su desarrollo genera un gran impacto energético y de CO₂ por lo que una alternativa podría ser el empleo de paneles de Cd-Te aunque los residuos que generen sean más críticos por su toxicidad. Después de este análisis se puede concluir con la perspectiva que una instalación basada en renovables siempre será mejor dado a que se encuentra alineada con los objetivos de la agenda 2030 y un mundo más sostenible energéticamente.

Finalmente se puede concluir diciendo que este tipo de proyectos tienen mucho margen de crecimiento si se analizan las herramientas que se están desarrollando dentro del País Vasco como podría ser el caso del proyecto Bideratu o la iniciativa Net-Zero Basque SuperCluster (iniciativa para la descarbonización de la industria vasca para los años 2030-2050).

6 Aspectos económicos

Respecto a los aspectos económicos se analizan los recursos necesarios para la implementación de un ACV en el marco de los proyectos de ingeniería. Mas concretamente en este proyecto dado a que la cantidad de horas de trabajo necesarias es conocida.

Nombre	Horas	Precio	total
Técnico de desarrollo para el ACV	104	50€/hora	5200€
Licencia	-	-	-
Base de datos Ecoinvent	-	6000€/año	6000€
Base de datos ReCiPe 2016 Midpoint (SimaPro)	-	-	350€
Total	-	-	11550€

Tabla 16. Presupuesto de la implantación de la metodología ACV

7. Bibliografía

- Acero, A. P., Rodríguez, C., & Ciroth, A. (20 de febrero de 2017). GreenDelta. *LCIA methods*.
- Alfonso Solar, D., Vargas Salgado, C., Aparisi Cerdá, I., & Gómez Navarro, T. (21 de Enero de 2022). Can photovoltaic systems be profitable in urban areas? Analysis of regulation scenarios for four cases in Valencia city (Spain). *Solar Energy*, págs. 461-477.
- artaraz, M. (2012). Ingurumena. En *Eustat* (pág. 585).
- BOE. (5 de octubre de 2018). *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-13593>
- Ecológica, M. p. (2019). Memoria anual 2019.
- EEE. (11 de Diciembre de 2018). *EUR-Lex*. Obtenido de EUR-Lex - 32018L2001: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj?locale=es>
- Endef Solar Solutions*. (s.f.). Obtenido de <https://endef.com/>
- Energy, G. E. (s.f.). *Youtube*. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=w3Eernn_sVY&ab_channel=GenerationEcoEnergy
- Eusko Jarularitza. (24 de martxoa de 2022). *Energiaren Euskal Erakundea*. Obtenido de <https://www.eve.eus/Jornadas-y-Noticias/Noticias/Euskadi-sera-sede-europea-de-la-energia-renovable?lang=eu-es>
- Fthenakis, V., & Kim, H. (23 de febrero de 2010). Photovoltaics: Life-cycle analyses. Columbia, Estados Unidos.
- Generation Eco-Energy*. (s.f.). Obtenido de <https://www.generationee.com/servicios-ambientales>
- Iberdrola. (s.f.). *Sostenibilidad*. Obtenido de Que es la energía solar fotovoltaica: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>
- ISO. (s.f.). Norma ISO 14040:2006.
- LKS Consultores. (2000). *CSCEKKGK*. Obtenido de Historia del Cooperativismo Vasco: <https://www.csce-ekgk.coop/es/publicaciones/cooperativismo/>

Michela Vellini, M. G. (Julio de 2017). Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTepanels.

Ministerio de industria energía y Turismo. (9 de octubre de 2015). *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-10927>

Miranda, A. (s.f.). *123RF*. Obtenido de https://es.123rf.com/photo_71094106_gr%C3%A1fico-que-muestra-partes-de-un-panel-solar-energ%C3%ADa-renovable-imagen-vectorial.html

Planas, O. (s.f.). *energía Solar*. Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio>

Rodriguez, E. (s.f.). *Areatecnologia*. Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

Solar, E. A. (s.f.). *Efen AR Solar*. Obtenido de <http://www.efenarsolar.com/index.php/es/efenar-solar/fabrica>

Wikipedia. (11 de Marzo de 2022). Obtenido de Ángulo de acimut solar: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_de_acimut_solar

8. Anexos

8.1 Tabla de impactos

Categoría de impacto	1. Producción de Silicio metalúrgico	2. Purificación de Silicio Metalúrgico	3. Producción moldeada de Mix-Silicio	4. Producción de Obleas	5. Producción de Celdas	6. Producción del Panel Solar	7. Reciclado	Unidad de referencia
Formación de partículas pequeñas	0,016569683	0,19327312	0,155706574	0,16921178	0,281944946	0,429780084	0,198750073	kg PM2.5 eq
Escasez de recursos fósiles	3,410592908	47,98511134	21,80732829	25,75127458	43,95911092	56,00901009	26,79776648	kg oil eq
Ecotoxicidad en agua dulce	3,062307244	0,77154459	1,365860061	2,253522885	4,440967517	28,19862494	19,7979539	kg 1,4-DCB
Eutrofización en agua dulce	0,003820806	0,012196281	0,027636173	0,047835382	0,062417309	0,116499897	0,041610615	kg P eq
Cambio climático	14,96014146	310,638753	88,68695227	93,0240812	162,8914751	195,5206877	83,62791978	kg CO2 eq
Toxicidad cancerígena en humanos	9,99033741	72,4584231	155,3178554	287,246305	516,45679	1036,974597	836,0286827	kg 1,4-DCB
Toxicidad no cancerígena en humanos	8268,846553	3867,610305	8308,348624	13578,89824	21589,81999	144234,4967	34549,39295	kg 1,4-DCB
Radiación ionizante	0,380375806	4,037024544	8,867259689	17,61523534	18,63750981	25,87665535	9,239665427	kBq Co-60 eq
Uso de la tierra	0,040294557	0,025008514	-0,010081977	0,024739212	0,037758568	0,796073341	-0,01687741	m2a crop eq
Ecotoxicidad marina	10467,5382	4866,347162	10449,70802	16958,60797	27288,22435	179134,3135	48250,53157	kg 1,4-DCB
Eutrofización marina	0,000365152	0,000892092	0,002078472	0,003495122	0,007645391	0,017371878	0,002984287	kg N eq
Escasez de recursos minerales	0,000587026	0,004482006	0,009716966	0,017585749	0,022458214	0,371447068	0,216334463	kg Cu eq
Formación de ozono, Salud humana	0,025295833	0,439749738	0,186754338	0,199778763	0,340075888	0,565062835	0,230181816	kg NOx eq
Formación de ozono, Ecosistema terrestre	0,025715478	0,443251887	0,189401105	0,203606431	0,345678384	0,593051917	0,235883123	kg NOx eq
Agotamiento del ozono estratosférico	5,25248E-06	2,50829E-05	4,2785E-05	5,88429E-05	8,21653E-05	0,000142048	4,94888E-05	kg CFC11 eq
Acidificación terrestre	0,049534041	0,55233333	0,268563982	0,306129383	0,509209252	0,815106817	0,369912117	kg SO2 eq
Ecotoxicidad terrestre	177,4277869	33,73776511	62,66870775	90,31000773	193,863539	5865,921873	436,7684623	kg 1,4-DCB
Consumo de Agua	8,791556135	146,4413066	3390,3225	3620,317607	4037,102613	4302,230908	600,2179066	m3

Tabla 17. Datos de impactos por proceso

8.2 Gráficos de impactos

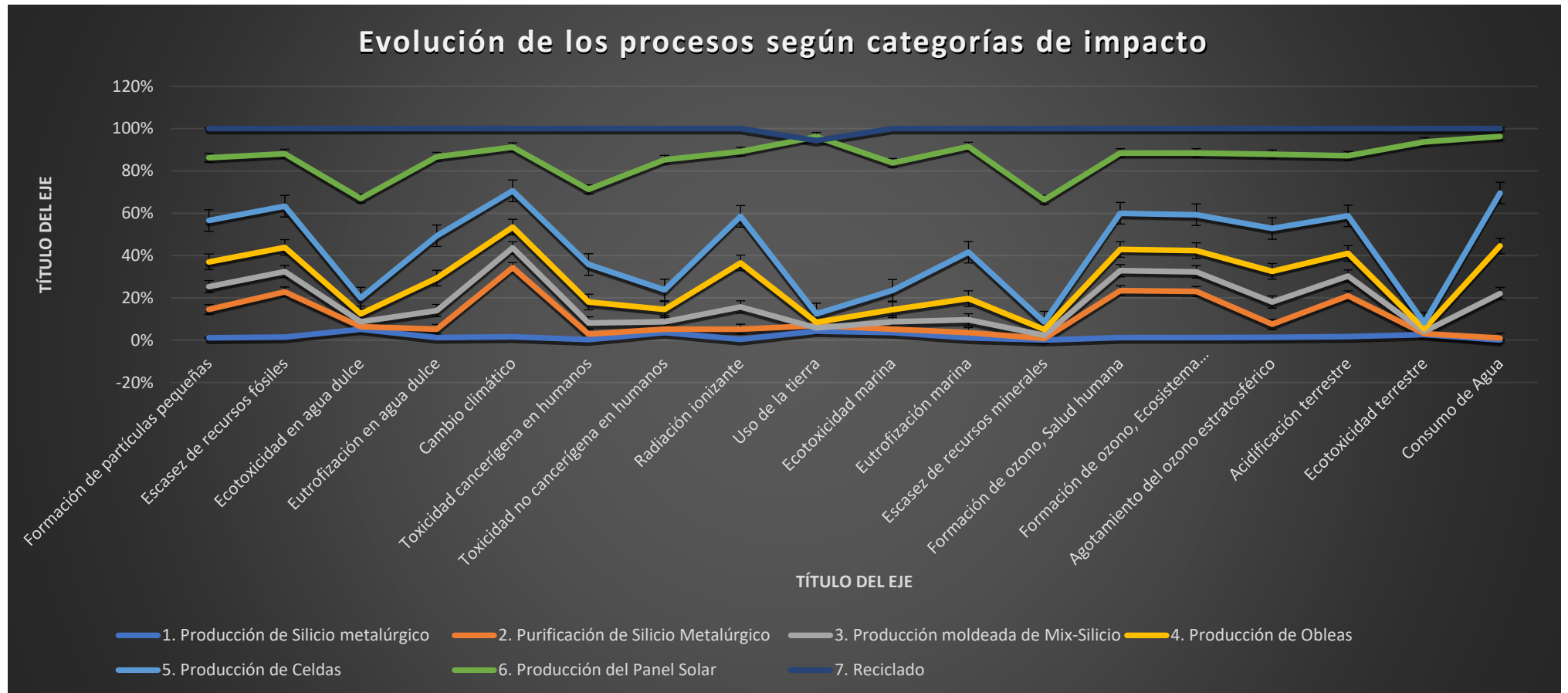


Gráfico 11. Categorías de impactos por proceso

Formación de partículas pequeñas

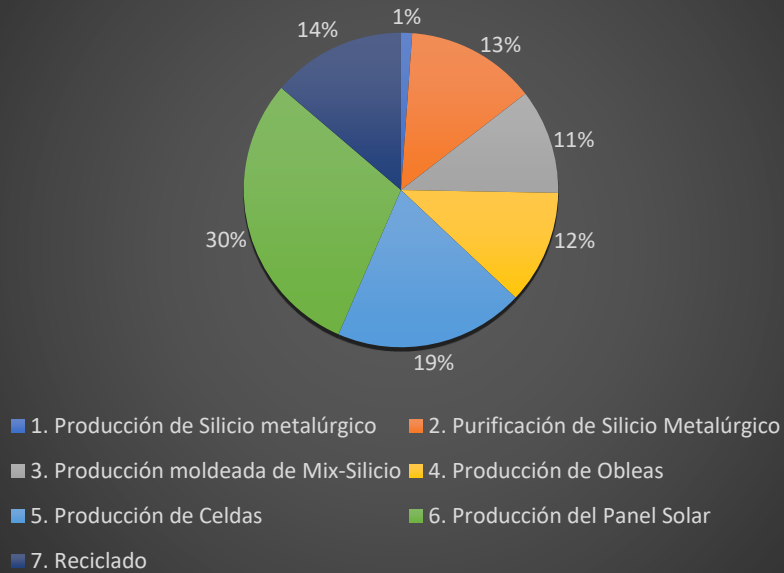


Gráfico 12. Formación de partículas pequeñas

Escasez de recursos fósiles

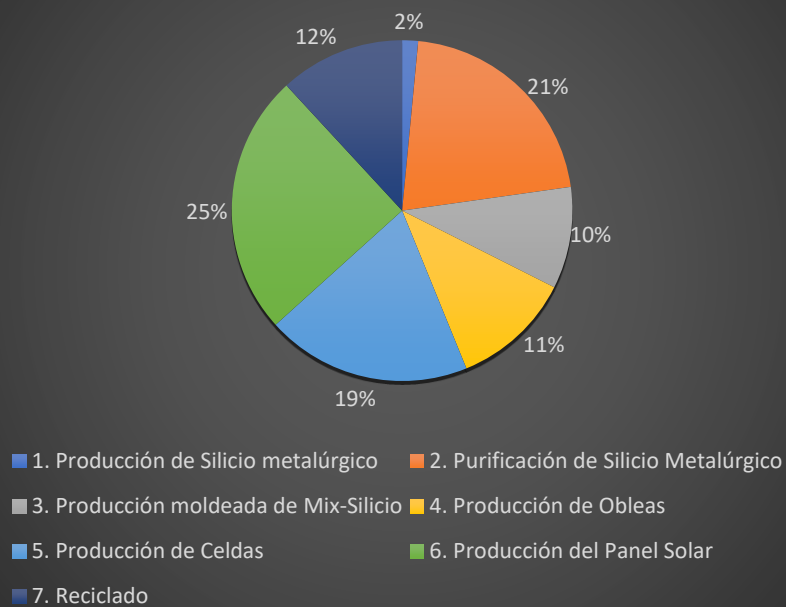
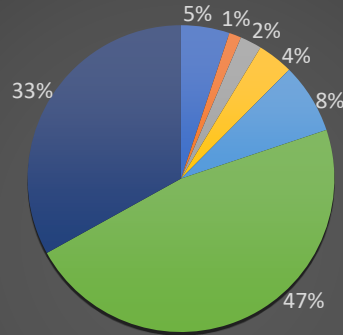


Gráfico 13. Escasez de Recursos fósiles

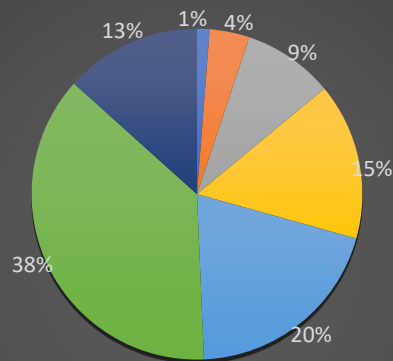
Ecotoxicidad en agua dulce



- 1. Producción de Silicio metalúrgico
- 2. Purificación de Silicio Metalúrgico
- 3. Producción moldeada de Mix-Silicio
- 4. Producción de Obleas
- 5. Producción de Celdas
- 6. Producción del Panel Solar
- 7. Reciclado

Gráfico 14. Ecotoxicidad en agua dulce

Eutrofización en agua dulce



- 1. Producción de Silicio metalúrgico
- 2. Purificación de Silicio Metalúrgico
- 3. Producción moldeada de Mix-Silicio
- 4. Producción de Obleas
- 5. Producción de Celdas
- 6. Producción del Panel Solar
- 7. Reciclado

Gráfico 15. Eutrofización en agua dulce

Toxicidad cancerígena en humanos

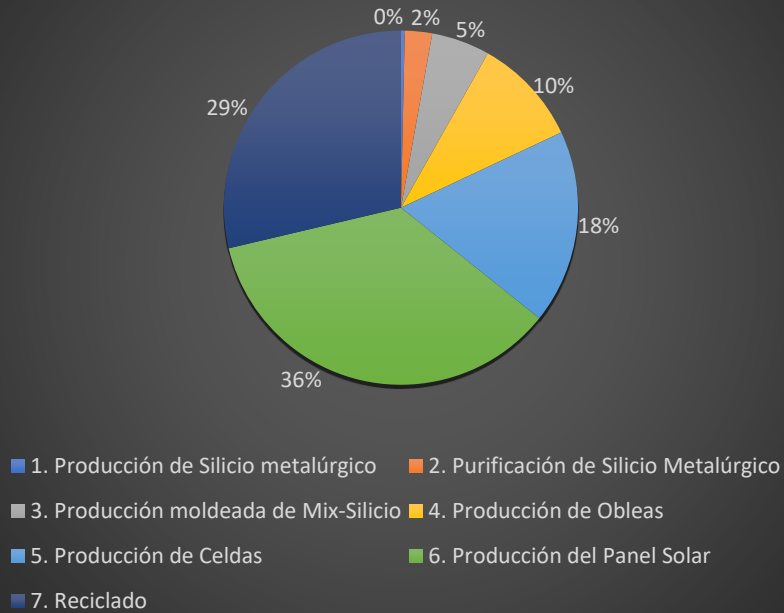


Gráfico 16. Toxicidad cancerígena en humanos

Toxicidad no cancerígena en humanos

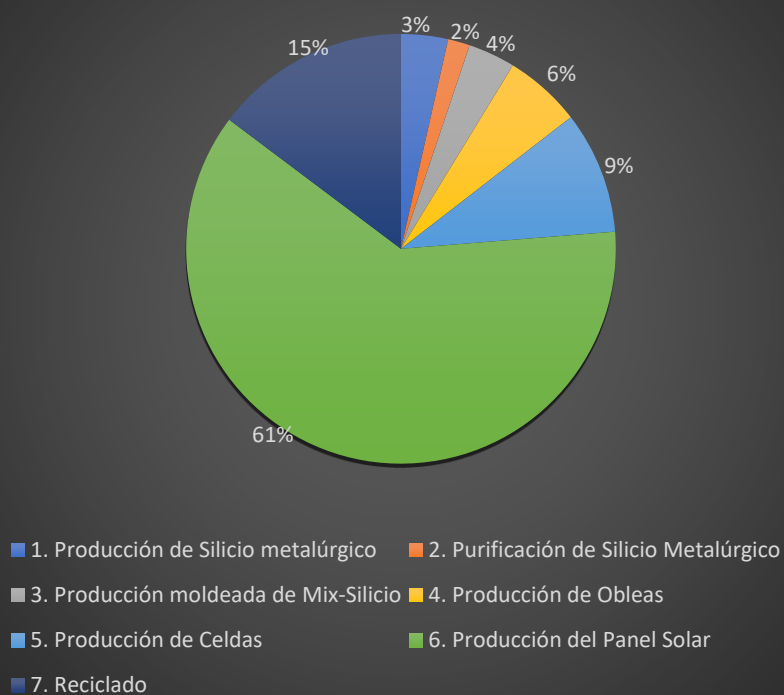


Gráfico 17. Toxicidad no cancerígena en humanos

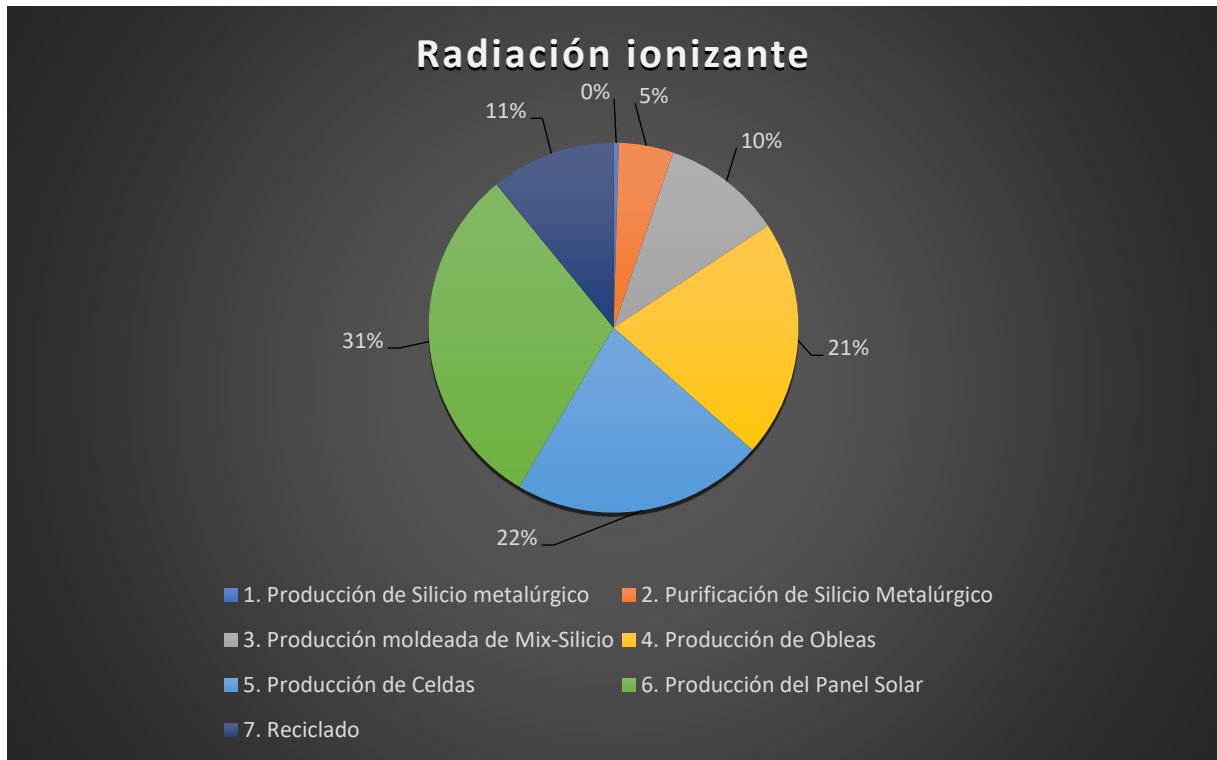


Gráfico 18. Radiación Ionizante



Gráfico 19. Uso de la tierra

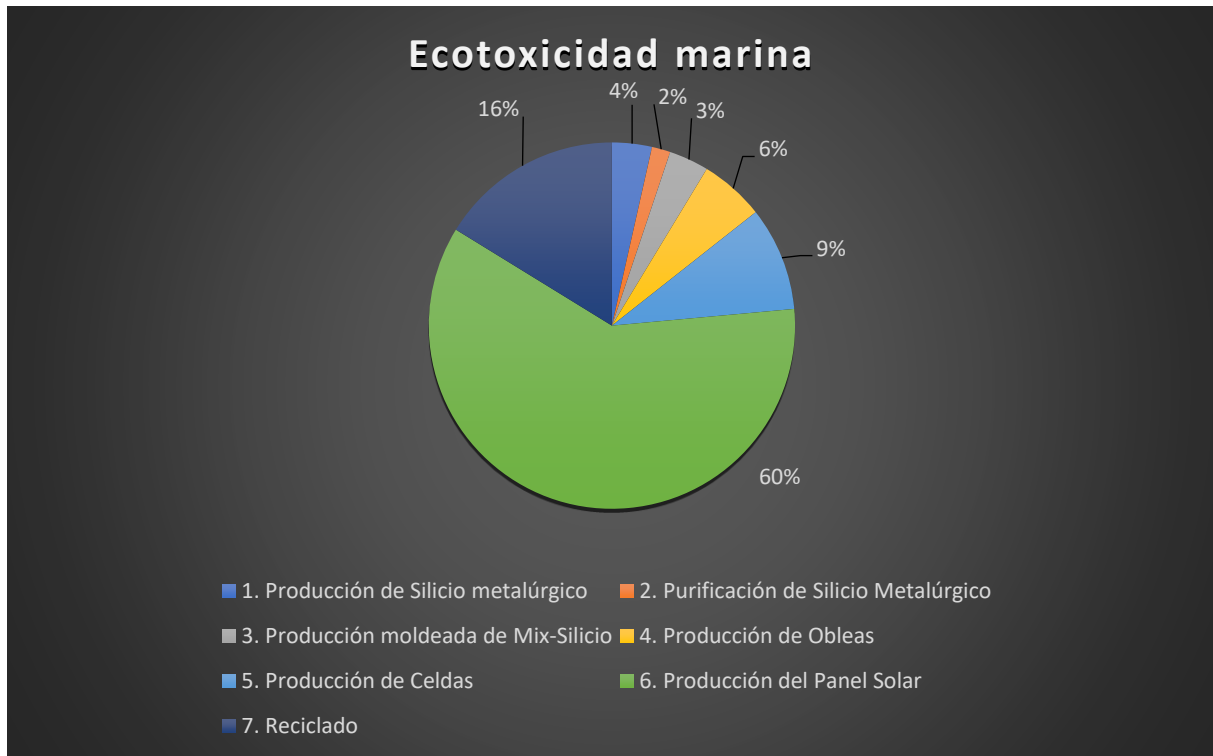


Gráfico 20. Ecotoxicidad marina

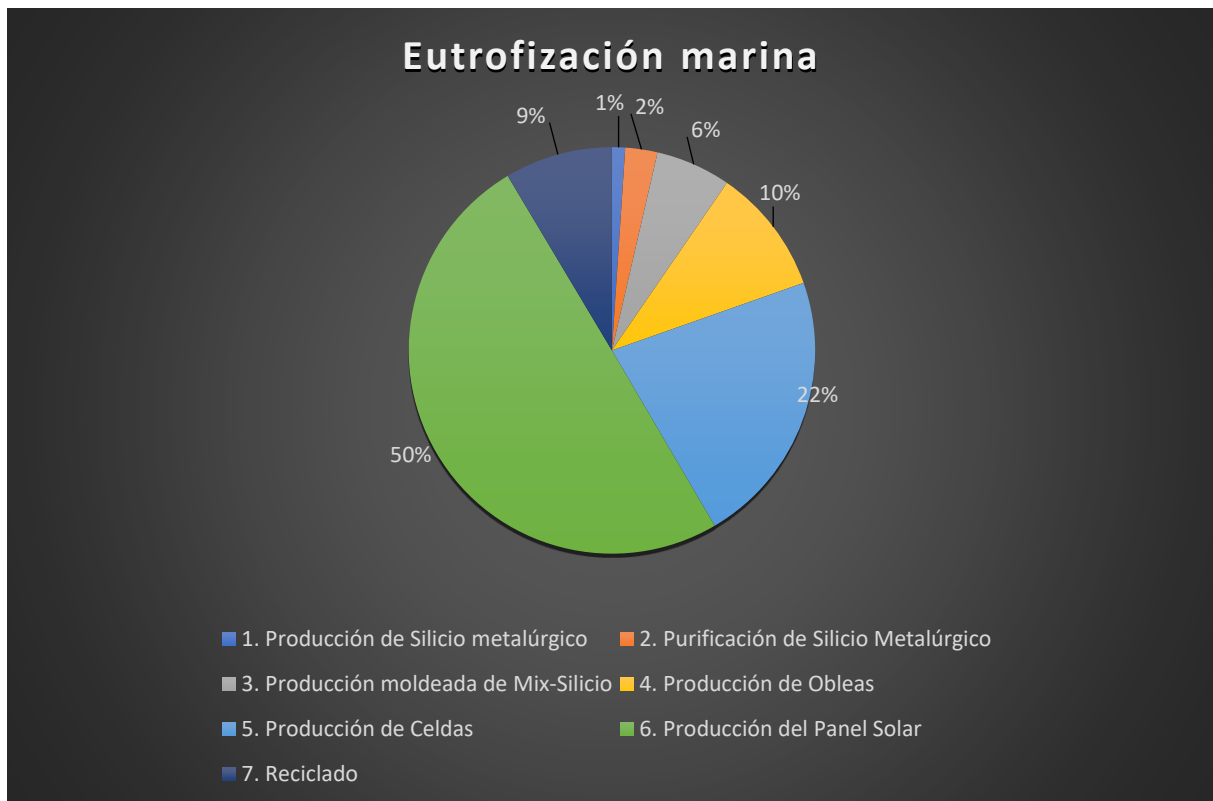
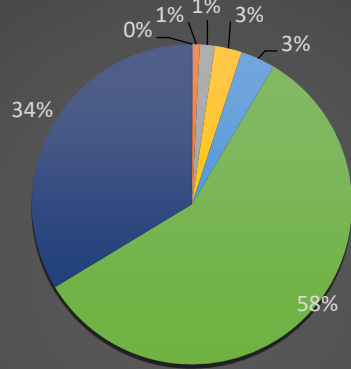


Gráfico 21. Eutrofización marina

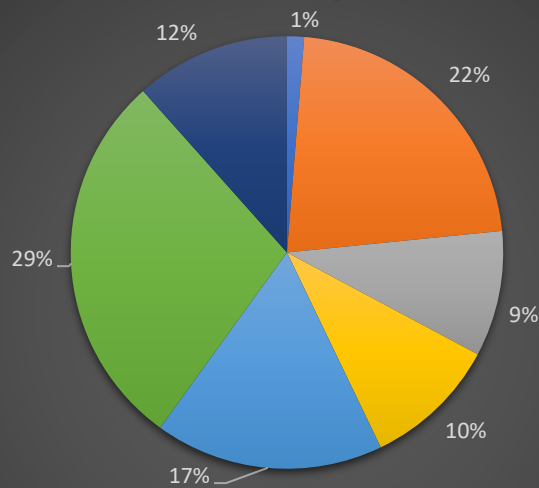
Escasez de recursos minerales



- 1. Producción de Silicio metalúrgico
- 2. Purificación de Silicio Metalúrgico
- 3. Producción moldeada de Mix-Silicio
- 4. Producción de Obleas
- 5. Producción de Celdas
- 6. Producción del Panel Solar
- 7. Reciclado

Gráfico 22. Escasez de Recursos minerales

Formación de ozono, Salud humana



- 1. Producción de Silicio metalúrgico
- 2. Purificación de Silicio Metalúrgico
- 3. Producción moldeada de Mix-Silicio
- 4. Producción de Obleas
- 5. Producción de Celdas
- 6. Producción del Panel Solar
- 7. Reciclado

Gráfico 23. Formación de ozono, Salud humana

Formación de ozono, Ecosistema terrestre

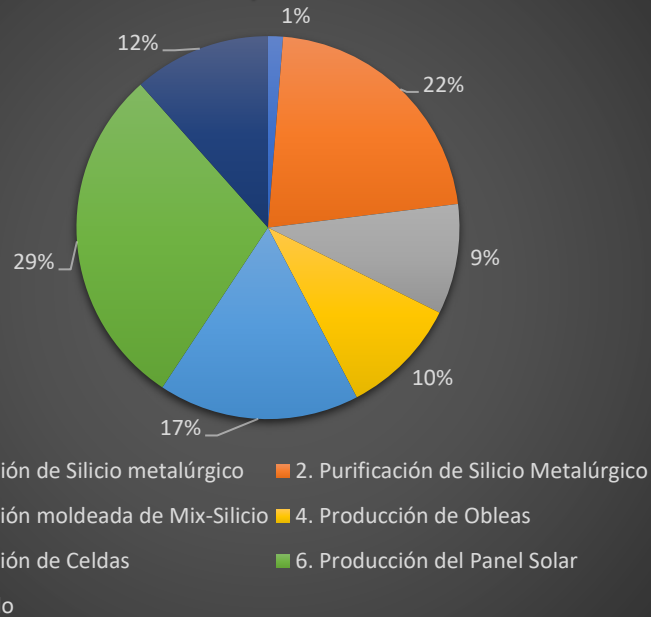


Gráfico 24. Formación de ozono, Ecosistema terrestre

Agotamiento del ozono estratosférico

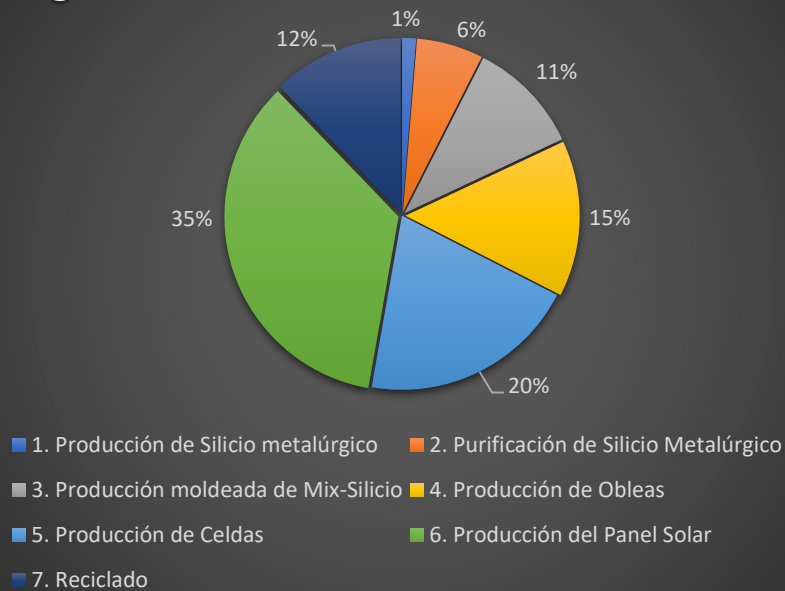


Gráfico 25. Agotamiento del ozono estratosférico

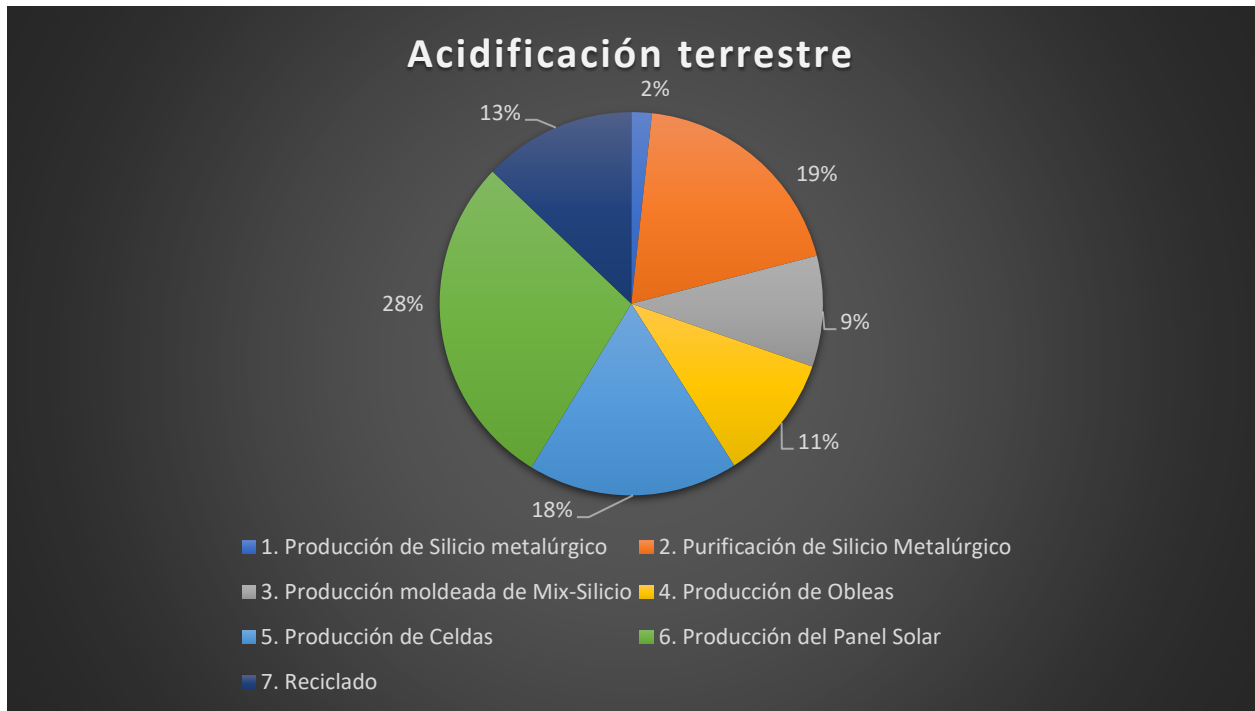


Gráfico 26. Agotamiento del ozono estratosférico

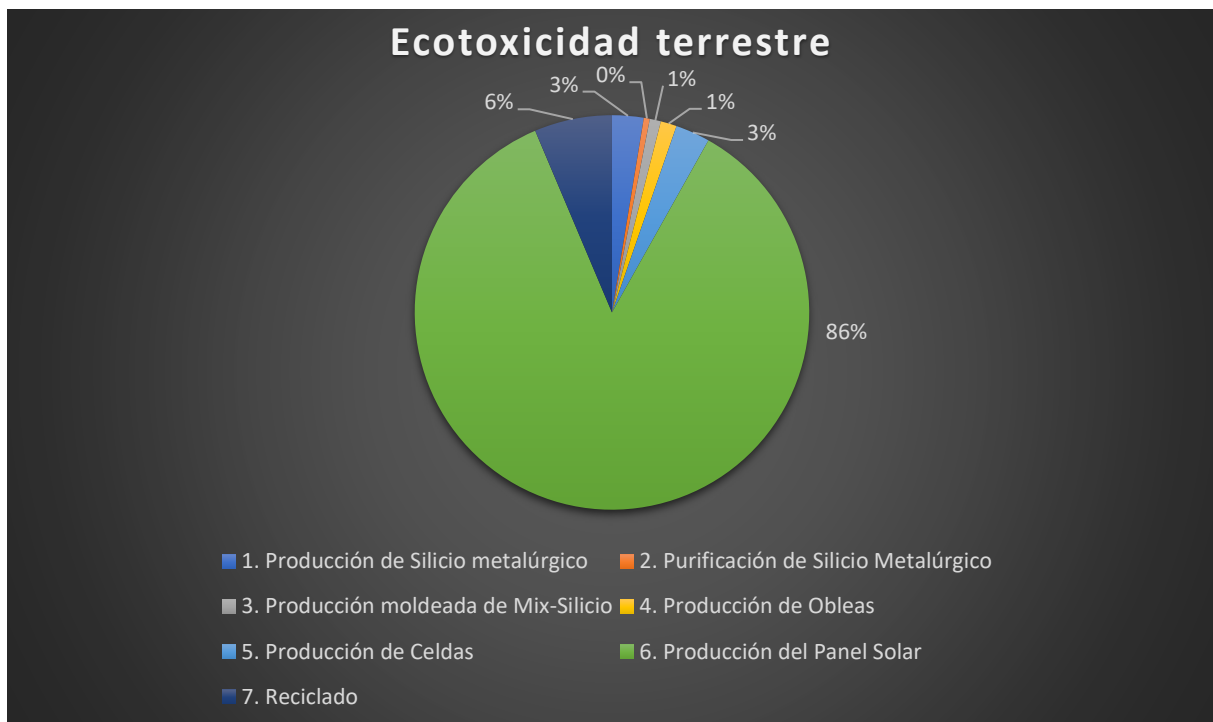


Gráfico 27. Ecotoxicidad terrestre

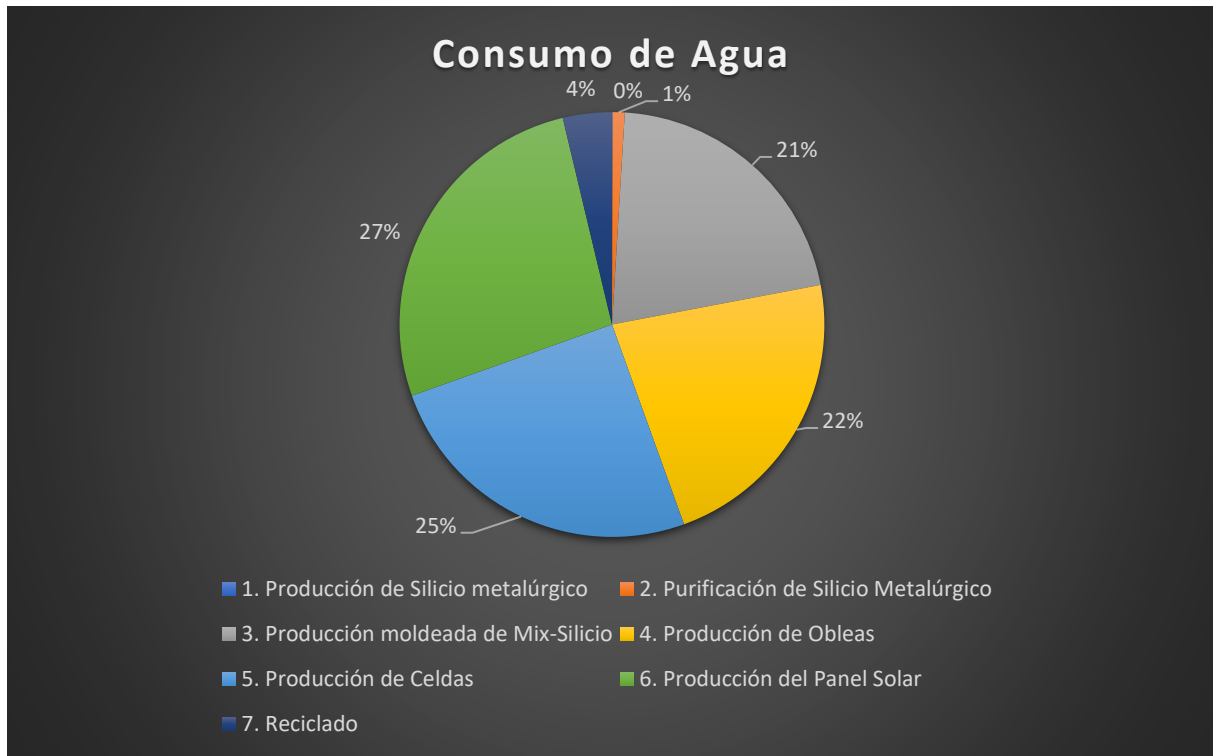


Gráfico 28. Consumo de Agua

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO