

# **Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

**Oscar Enguita Rovira**

Director: Marco Raugei

Tutor: Enric Velo

**En cooperación educativa con:**

Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático

*Escuela Superior de Comerç Internacional (ESCi) – Universitat Pompeu  
Fabra*

**Proyecto Final de Master (PFM)**

**Master en Sostenibilidad**

**Setiembre 2012 - UPC**

# Índice

1.	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS .....	1
1.1	Objetivo general .....	1
1.2	Objetivos específicos.....	1
2.	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES .....	2
2.1	Cambio climático .....	2
2.2	Pico del petróleo.....	3
2.3	El enfoque de ciclo de vida .....	5
2.4	Energías renovables.....	6
3.	MARCO DE REFERENCIA .....	9
3.1	Proyecto Renia .....	9
3.2	Estado del arte .....	11
3.3	La comunicación ambiental .....	12
3.4	Declaraciones Ambientales de Producto .....	13
3.5	Viabilidad.....	15
4.	METODOLOGÍA .....	16
4.1	Análisis de bibliografía .....	17
4.2	Bases de datos .....	18
4.3	Artículos científicos .....	18
4.4	Documentos de referencia.....	27
5.	METODOLOGÍA ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....	30
5.1	Breve historia .....	30
5.2	Descripción general del Análisis de Ciclo de Vida.....	32
5.3	Fases (ISO, 2006a).....	32
5.3.1	Definición de objetivos y alcance .....	33
5.3.2	Análisis de inventario .....	34
5.3.3	Evaluación de impacto .....	36
6.	DESARROLLO DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA ESPECÍFICO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE 100 KWP .....	37
6.1.	Objetivo.....	37
6.2.	Destinatarios previstos .....	37
6.3.	Descripción del producto analizado .....	37

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

6.4.	Alcance del estudio .....	39
6.5.	Unidad funcional .....	39
6.6.	Vida útil de referencia .....	40
6.7.	Límites del sistema.....	40
6.8.	Criterios para la inclusión de entradas y salidas.....	41
6.9.	Hipótesis y limitaciones .....	41
6.10.	Requisitos de calidad de los datos.....	44
6.11.	Comparaciones entre sistemas .....	45
6.12.	Multifuncionalidad y asignación de cargas .....	46
6.13.	Reciclaje en bucle abierto .....	46
6.14.	Energía desplazada mediante los sistemas estudiados .....	47
6.15.	Energy Payback Time (EPBT).....	48
6.16.	Tipos de impacto y metodología de evaluación de impacto.....	49
6.16.1.	Selección de categorías de impacto, categorías de indicadores y modelos de caracterización.....	49
6.16.2.	Indicadores de categoría.....	53
6.16.3.	Modelos de caracterización.....	53
6.17.	Análisis de Inventario.....	55
6.18.	Evaluación de impacto .....	65
6.18.1.	Categorías de impacto .....	65
6.18.2.	Clasificación y caracterización de los resultados de inventario .....	65
6.19.	Interpretación de resultados .....	69
6.19.1.	Comentarios a las categorías de impacto .....	69
	Reducción de recursos minerales abióticos.....	69
	Reducción de recursos energéticos abióticos .....	70
	Potencial de acidificación.....	70
	Potencial de eutrofización .....	70
	Potencial de calentamiento global.....	70
	Potencial de agotamiento del ozono estratosférico .....	70
	Potencial de formación de ozono fotoquímico.....	70
6.19.2.	Comparación caso base de estudio de la base de datos Ecoinvent.....	71
6.19.3.	Evaluación fase de uso .....	71
6.20.	Verificación de los resultados .....	73
6.20.1.	Exactitud .....	73

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

6.20.2.	Alcance.....	73
6.20.3.	Homogeneidad .....	73
6.20.4.	Reproducibilidad .....	73
6.20.5.	Representatividad .....	73
6.20.6.	Cobertura temporal.....	73
6.20.7.	Cobertura geográfica .....	73
6.20.8.	Cobertura técnica.....	74
6.20.9.	Análisis de integridad.....	74
6.20.10.	Análisis de sensibilidad.....	74
	Mix eléctrico obtención del silicio grado solar .....	74
	Espesor wafer .....	76
6.21.	Análisis de consistencia .....	76
6.22.	Valoración .....	77
7.	DESARROLLO DE LAS RCP .....	77
7.1.	Límites del sistema y etapas del ciclo de vida a incluir .....	78
7.1.1.	Módulos A1- A3. Fabricación del producto.....	80
7.1.2.	Módulos A4 y A5. Construcción y/o instalación .....	80
7.1.3.	Módulos B1- B7. Uso y mantenimiento.....	80
7.1.4.	Módulos C1- C4. Fin de vida .....	80
7.1.5.	Módulo D. Beneficios y cargas ambientales .....	81
7.2.	Unidad declarada y unidad funcional.....	82
7.3.	Vida útil de referencia .....	82
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
9.	REFERENCIAS.....	84
Anexo 1	Factores de caracterización de las categorías de impacto aplicadas .....	88
	Agotamiento de recursos abióticos .....	88
	Acidificación .....	97
	Calentamiento global.....	97
	Potencial de eutrofización.....	98
	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos.....	99
	Potencial de destrucción del ozono estratosférico.....	102

## Índice tablas

Tabla 1 Sistemas internacionales de creación de DAPs.....	15
Tabla 2 Datos del inventario para el sistema estudiado .....	20
Tabla 3 Recopilación de resultados de ACVs realizados de fotovoltaica multicristalina .....	22
Tabla 4 Características técnicas del panel fotovoltaico utilizado.....	39
Tabla 5 Producción mundial de silicio solar .....	42
Tabla 6 Mix eléctrico Taiwan .....	43
Tabla 7 Cálculos de producción de la instalación estudiada .....	44
Tabla 8 Calidad de los datos utilizados en el estudio .....	45
Tabla 9 Categorías de impacto aplicadas .....	55
Tabla 10 Valores generales. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico.....	58
Tabla 11 Flujos de entrada. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. ....	59
Tabla 12 Flujos de entrada materiales auxiliares. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. ....	60
Tabla 13 Flujos de entrada de energía. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. ..	61
Tabla 14 Flujos de salida. Producción anual de paneles fotovoltaicos. Fabricante solar fotovoltaico .....	61
Tabla 15 Flujos de entrada. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos. .	63
Tabla 16 Flujos energéticos. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos. 64	
Tabla 17 Flujos de salida. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos.....	64
Tabla 18 Flujos de residuos. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos. 64	
Tabla 19 Procesos incorporados procedentes deecoinvent .....	65
Tabla 20 Impacto ambiental del sistema solar fotovoltaico estudiado.....	66
Tabla 21 Impactos potenciales de la fabricación del panel fotovoltaico. Unidad funcional: 1kWp de instalación.....	68
Tabla 22 Impactos relativos generados en comparación con el caso base de Ecoinvent .....	71
Tabla 23 Impactos potenciales del sistema incluyendo la etapa de uso con la irradiación solar de Barcelona.....	72
Tabla 24 Impactos potenciales del sistema incluyendo la etapa de uso con la irradiación solar de Málaga.....	72
Tabla 25 Energy Payback Time de los dos escenarios.....	72
Tabla 26 Mixes eléctricos considerados y kg CO2 generado por kWh .....	75
Tabla 27 Variación de los impactos generados en función del país de fabricación del wafer ....	75
Tabla 28 Variación de los impactos generados en función del espesor del wafer utilizado .....	76

## Índice figuras

Figura 1 Emisiones de dióxido de carbono de actividades humanas, 1750-2004 .....	3
Figura 2 Producción de gas y petróleo, Caso base 2005 .....	4
Figura 3 Reservas mundiales de combustibles fósiles .....	5
Figura 4 Evolución capacidad mundial instalada de fotovoltaica .....	7
Figura 5 Irradiación del cinturón solar en el mundo .....	8
Figura 6 Metodología de trabajo para el desarrollo de una DAP .....	17
Figura 7 Resultados análisis de sensibilidad del estudio.....	19
Figura 8 Resultados del EPBT y categoría cambio climático de los productos estudiados .....	21
Figura 9 Resultados del metanálisis realizado en el estudio .....	23
Figura 10 Límites del sistema estudiado .....	24
Figura 11 Resultados de las tecnologías estudiadas.....	24
Figura 12 Distribución del consumo energético de los procesos estudiados .....	25
Figura 13 Distribución del consumo energético de los procesos estudiados .....	25
Figura 14 Evolución del EPBT en función de la cantidad de silicio utilizada .....	26
Figura 15 Evolución del EPBT i de las emisiones de cambio climático según los escenarios estudiados.....	27
Figura 16. Ciclo de vida de un producto .....	31
Figura 17. Herramientas de ciclo de vida utilizadas en todo el mundo.....	32
Figura 18 Fases y estructura del ACV .....	33
Figura 19 Límites del sistema en un ACV .....	34
Figura 20 Etapas de la evaluación de impacto de un ACV .....	36
Figura 21 Diagrama de flujos del sistema solar fotovoltaico estudiado.....	41
Figura 22 Modelo de asignación de cargas en los residuos utilizado en el estudio .....	46
Figura 23 Flujos del sistema.....	46
Figura 24 Esquema de expansión del sistema .....	47
Figura 25 Ejemplo que representa la diferencia entre el enfoque de punto medio (midpoint) y punto final (endpoint).....	53
Figura 26 Subsistemas involucrados en la cadena de producción de instalaciones solares fotovoltaicas .....	56
Figura 27 Resultado obtenido para las diferentes categorías de impacto consideradas .....	66
Figura 28 Impactos relativos de la fabricación del panel fotovoltaico. Unidad funcional: 1 kWp de instalación.....	69
Figura 29 Diferentes alcances de las DAP en función de las etapas del ciclo de vida tenidas en cuenta .....	79

## AGRADECIMIENTOS

*A todos en la Cátedra UNESCO-ESCI, por qué son unos profesionales muy grandes de los que no paro de aprender, igual que unos compañeros geniales con los que pasar un buen rato.*

*Especialmente a:*

*Cristina y Pere, por creer en mí y darme todas las facilidades, dentro de lo posible, para tirar adelante este proyecto*

*Marco, por estar dispuesto a ser mi tutor y encontrar siempre un momento, aunque fuera difícil, para asesorarme.*

*A mi familia por aguantar mis dolores de cabeza e intentar darme siempre buenos consejos aunque no sepan del tema.*

*A todos mis amigos y personas por el apoyo prestado y que de alguna forma han tenido relación conmigo durante el período que realizaba este proyecto.*

*A mi tutor de la UPC, Enric Velo, por aceptar ayudarme y guiarme en la gestión del doctorado.*

## RESUMEN

El panorama mundial económico, energético y medioambiental está cambiando. En la actualidad, se está observando una tendencia creciente de problemas medioambientales, como pueden ser el cambio climático o la escasez de recursos energéticos fósiles. Esto crea una necesidad de transición hacia una sociedad más sostenible basada en energías renovables y en una conciencia real sobre las afectaciones de nuestra actividad humana sobre el medio ambiente.

Es por esto que el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), ofrece una metodología rigurosa para la toma de decisiones informadas a la hora de escoger las mejores tecnologías disponibles y minimizar desde su diseño el impacto ambiental de los productos analizados, cubriendo todas las etapas, desde la obtención de las materias primas, hasta el fin de vida.

El proyecto Renia, pretende crear un software para la evaluación y comunicación ambiental de placas solares térmicas y fotovoltaicas, y con el presente proyecto final de máster se realiza el estudio del caso base para los sistemas solares fotovoltaicos, que se utilizará para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto (RCP) para que los fabricantes e instaladores del sector puedan desarrollar las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de sus productos para mejorar su comunicación ambiental.

Como resultados principales se observa que para todas las categorías de impacto analizadas, la fase de fabricación del panel solar es la de mayor impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del panel solar estudiado. Esto es debido principalmente a que la obtención del silicio multicristalino, es un proceso muy intensivo energéticamente. Otros procesos que generan un gran impacto aunque no en todas las categorías son, el inversor, el vidrio solar y la metalización de la celda.

Aunque la creación de la PCR no se ha llevado a cabo finalmente, si se han realizado las recomendaciones de los principales parámetros a considerar y las especificaciones necesarias obtenidas del estudio realizado como caso base para su posterior desarrollo.

## RESUM

El panorama mundial econòmic, energètic i mediambiental està canviant. En l'actualitat, s'està observant una tendència creixent de problemes mediambientals, com ara el canvi climàtic o l'escassetat de recursos energètics fòssils. Això crea una necessitat de transició cap a una societat més sostenible basada en energies renovables i en una consciència real sobre les afectacions de la nostra activitat humana sobre el medi ambient.

És per això que l'Anàlisi del Cicle de Vida (ACV), ofereix una metodologia rigorosa per a la presa de decisions informades a l'hora d'escollir les millors tecnologies disponibles i minimitzar des del seu disseny l'impacte ambiental dels productes analitzats, cubrint totes les etapes, desde l'obtenció de las materias primeres, fins el final de vida.

El projecte Renia, pretén crear un programari per a l'avaluació i comunicació ambiental de plaques solars tèrmiques i fotovoltaïques, i amb aquest projecte final de màster es realitza l'estudi del cas base per als sistemes solars fotovoltaïcs, que s'utilitzarà per al desenvolupament de les Regles de Categoria de Producte (RCP) perquè els fabricants i instal·ladors del sector puguin desenvolupar les Declaracions Ambientals de Producte (DAP) dels seus productes per millorar la seva comunicació ambiental.

Com resultats principals s'observa que per a totes les categories d'impacte analitzades, la fase de fabricació del panell solar és la de major impacte ambiental al llarg del cicle de vida del panell solar estudiat. Això és degut principalment a que l'obtenció del silici multicristalí, és un procés molt intensiu energèticament. Altres processos que generen un gran impacte encara que no en totes les categories son, l'inversor, el vidre solar i la metal·lització de la cel·la.

Tot i que la creació de la PCR no s'ha dut a terme finalment, si que s'han realitzat les recomanacions dels principals paràmetres a considerar i les especificacions necessàries obtingudes de l'estudi realitzat com a cas base per al seu posterior desenvolupament.

## ABSTRACT

The global economic, energy and the environment outlook is changing. Nowadays, we are witnessing an outlook of increasing environmental problems such as climate change and scarcity of fossil energy resources. This creates a need of transition to a more sustainable society based on renewable energy and a real awareness about the damages of our human activity on the environment.

The Life Cycle Analysis (LCA) offers a rigorous methodology for making informed decisions when choosing the best available technologies since the design stage and minimize the environmental impacts of the studied products, covering all stages, from the procurement of raw materials to the end of life.

The Renia project aims to create a software for the environmental assessment and reporting of solar thermal and photovoltaic systems. This thesis is based on the development of the case study for solar photovoltaic systems, to be used for the development of the Product Category Rules (PCR) for manufacturers and installers of the sector helping them to develop the Environmental Product Declarations (EPD) of its products to improve their environmental communication.

As main results obtained, for all the impact categories analyzed, the solar panel manufacturing is the most environmental impact throughout the life cycle of the solar panel studied. This is mainly because the multicrystalline silicon obtaining, is an high energy-intensive process. Other processes that generate important impacts, but not all categories, are the inverter, the solar glass and the metallization of the cell.

Although the creation of the PCR has not been finally carried out, the main recommendations have been made for the principal parameters to be considered and the necessary specifications obtained from case study as a basis for further development.

## **1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo general**

El objetivo general de este proyecto final de másteres es la aplicación de la metodología de análisis del ciclo de vida (ACV) para desarrollar el caso base de estudio para crear unas Reglas de Categoría de Producto (RCP) para la generación de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) de sistemas solares fotovoltaicos utilizados en edificios.

Esta aplicación, por lo tanto, debe ayudar a los fabricantes de estos sistemas a:

- Identificar los puntos críticos (materiales, procesos...) a lo largo de todo el ciclo de vida de sus productos
- Recibir recomendaciones sobre cómo optimizar sus productos y reducir sus impactos ambientales y económicos a lo largo de todo su ciclo de vida
- Desarrollar declaraciones ambientales de sus productos

El presente proyecto desarrolla todo el proceso de análisis para la posterior generación de las RCP y todo el proceso necesario para la obtención y certificación según los órganos competentes en la materia.

Las DAPs se desarrollan considerando los impactos ambientales producidos por los productos durante todo el ciclo de vida útil de los equipos y siguiendo las directrices de las normas ISO 14040 y 14044 (de Análisis de Ciclo de Vida), ISO 14025 y 21930 (específicas sobre DAPs) y la reciente EN 15804:2012 centrada en la generación de DAPs para la categoría de productos de la construcción.

### **1.2 Objetivos específicos**

Para conseguir un correcto cumplimiento y desarrollo del proyecto debe promover y conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Analizar en detalle los procesos productivos clave que los fabricantes utilizan para fabricar y distribuir los equipos. Esto permitirá conocer el impacto ambiental de los equipos durante la etapa de producción, igualmente, el conocimiento de los impactos ambientales asociados a cada uno de los procesos productivos permitirá a las empresas fabricantes detectar qué áreas de mejora afectan más significativamente al impacto ambiental de sus productos y servirá de ayuda para priorizar acciones de mejora
- Estudiar los diferentes tipos de materias primas que se utilizan en la fabricación de estos equipos: procedencia, tipo de material, impacto asociado al mismo, etc. Todo ello con la finalidad de evaluar y cuantificar el impacto ambiental que las materias primas utilizadas tienen sobre el producto final
- Analizar el proceso de instalación de éstos equipos que las ingenierías y empresas de mantenimiento/usuario final realizan sobre la instalación operativa

- Favorecer el intercambio de información y conocimiento entre los diferentes agentes que participan en la cadena de valor: proveedores de materias primas, fabricantes, ingenierías, empresas de mantenimiento y usuarios finales

Este proyecto queda enmarcada dentro de la colaboración con la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF) y del proyecto Renia, que persigue la creación de un software para la evaluación y comunicación ambiental de placas solares térmicas y fotovoltaicas, aportando una metodología de ecodiseño que permite evaluar e identificar puntos débiles de los productos estudiados y propone escenarios de ecodiseño para realizar mejoras y recomendaciones tanto a fabricantes como instaladores de las mismas.

Debe suponer un avance cualitativo en el diseño, desarrollo y comercialización de los productos, siendo un elemento diferenciador e innovador respecto a productos fabricados en otros países con un menor coste de mano de obra y con legislación menos restrictiva. Los beneficios derivados de la creación de una ecoetiqueta para los fabricantes del sector se traducirá en:

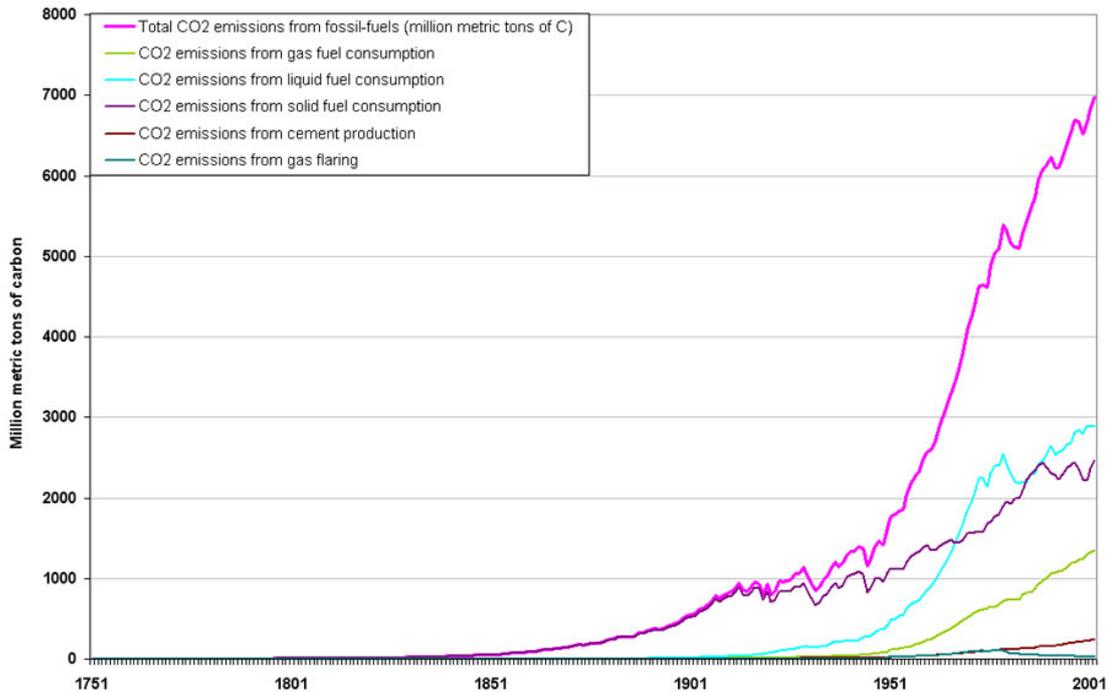
- Posibilidad de identificar y evaluar diferentes alternativas de eco-diseño aplicables para la mejora del producto: uso de diferentes materias primas, nuevos procesos productivos, rediseño de producto, nuevos procesos de instalación, etc
- Capacidad de ofrecer información rigurosa, creíble y certificada a sus clientes y al público en general sobre los impactos ambientales de sus productos a lo largo de todo su ciclo de vida
- Mejor posicionamiento estratégico gracias a una comunicación ambiental más rigurosa y cuantificada

## **2. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES**

El panorama mundial económico, energético y medioambiental está cambiando. En la actualidad, se está observando un panorama creciente de problemas medioambientales provocados por nuestra sociedad. Esto está motivado por varias razones:

### **2.1 Cambio climático**

Hoy en día casi todo el mundo tiene consciencia del problema del cambio climático, su origen antropogénico y sus posibles consecuencias: emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, el aumento de las temperaturas, derretimiento de los casquetes de hielo, crecimiento de zonas de desertificación, ... [Bolin B. et. Al., 1995]. En el siguiente gráfico se muestran las emisiones globales de dióxido de carbono generadas en el período 1750-2004, donde se puede observar su gran crecimiento a partir de la era de la industrialización.

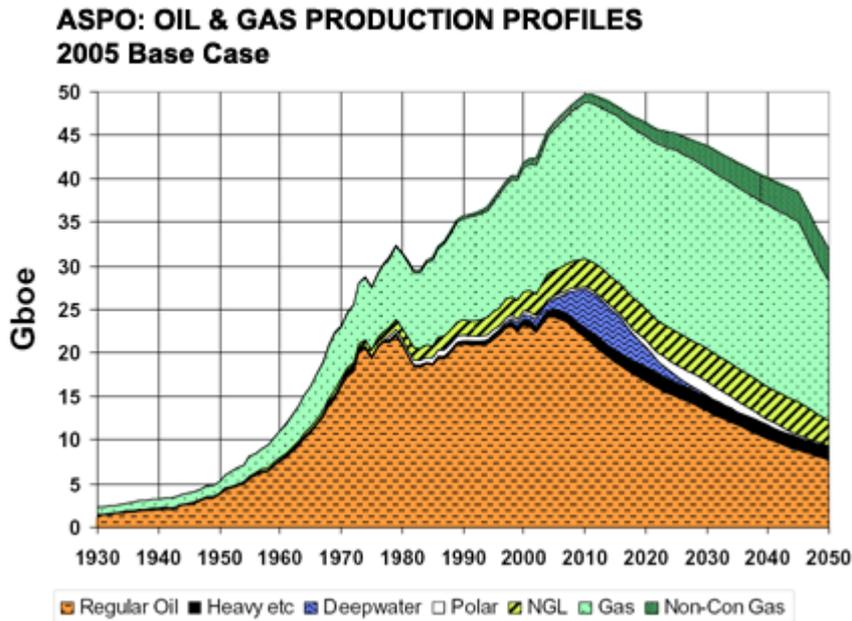


**Figura 1 Emisiones de dióxido de carbono de actividades humanas, 1750-2004**

Fuente: IPCC (*International Panel on Climate Change*)

## 2.2 Pico del petróleo

El pico teórico del petróleo, como lo definió H. King Hubbert en *Nuclear energy and fossil fuels* en 1956 y de otros combustibles fósiles está llegando, como se puede observar en el gráfico de producción de los distintos combustibles fósiles. Éste es causado principalmente por el alto y creciente consumo de energía producido por nuestro estilo de vida [Maggio G., Cacciola, G., 2012], [Hubbert, M.K., 1949]. Si tomamos en consideración que la población mundial está creciendo, este problema va a ser cada vez más importante [Pimentel, D., Pimentel M., 2006]. También el World Energy Council refleja en uno de sus estudios, *Deciding the future: Energy policy scenarios to 2050* [World Energy Council, 2007], que para satisfacer la demanda energética de todos los hogares del mundo, los suministros de energía deberían duplicarse para el año 2050.

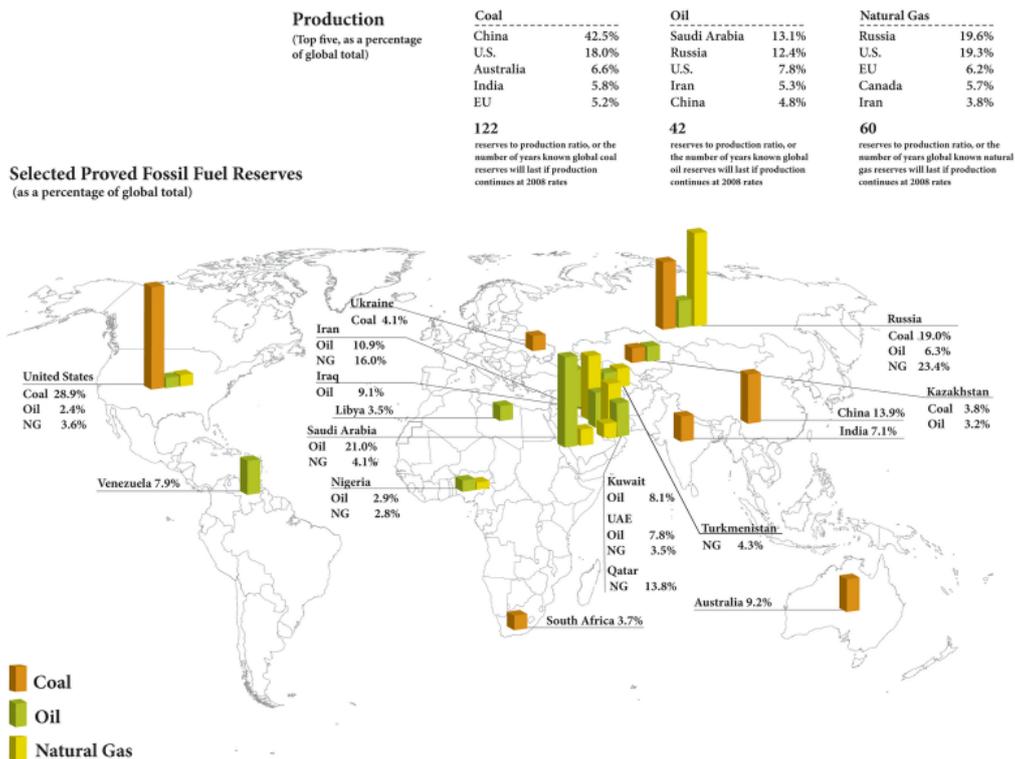


**Figura 2 Producción de gas y petróleo, Caso base 2005**

*Fuente: ASPO (Association for the Study of Peak Oil and gas)*

El modelo energético actual es insostenible. En pocos siglos, los humanos están agotando la mayoría de combustibles fósiles que han costado a la Tierra millones de años producir [Crutzen, P.J., 2002]. Hay una dependencia demasiado importante de los combustibles fósiles [Comisión de las Comunidades Europeas, 2001]. Este punto debilita muchas economías nacionales ya que no disponen de sus propias fuentes de energía, retardando su desarrollo y haciéndolos dependientes de otros países. En la siguiente figura, se puede observar la distribución concentrada en ciertas zonas de las reservas de petróleo en todo el mundo, que conllevan el control del mercado energético por parte de unos pocos países.

## Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación



**Figura 3 Reservas mundiales de combustibles fósiles**

Fuente: BP, *Statistical Review of World Energy 2009*

Tratar de resolver estos problemas, es un punto clave que parece indiscutible, una economía más verde es necesaria [Unep, 2011]. Ésta se debe caracterizar por un aumento sustancial de las inversiones en los sectores económicos estratégicos que se basan en un desarrollo sostenible sin poner a prueba el desarrollo de generaciones futuras o que basan su evolución en reducir la escasez ecológica y los riesgos ambientales. Estos sectores incluyen las energías renovables, los edificios energéticamente eficientes, tecnologías limpias de producción, la reducción y gestión adecuada de los residuos generados, la agricultura sostenible, entre muchos otros...

### 2.3 El enfoque de ciclo de vida

En la última década también se ha demostrado la necesidad de trasladar el foco de atención de las políticas ambientales centrado específicamente en los procesos productivos, a los productos, considerando además todo su ciclo de vida [Comisión de las Comunidades Europeas, 2003], [Stø E., et. Al., 2002], [Dalhammar C., 2007]. Este nuevo alcance en los estudios ambientales implica otras partes que antes no se veían involucradas, los gobiernos necesitan que el sector industrial y otras partes interesadas colaboren en su implementación [Berkhout F., Howes R., 1997].

El enfoque de ciclo de vida (*life cycle thinking*) implica que para estudiar el impacto ambiental que genera un producto se deben considerar todos los procesos que intervienen en su fabricación, distribución, uso y fin de vida. En el contexto de una política integrada de producto, el enfoque de ciclo de vida también implica que los diferentes actores involucrados entiendan y compartan la responsabilidad de disminuir el impacto ambiental que ocasionan los productos ([Rebitzer G., et. Al. 2004], [Fullana-i-Palmer P., 2011], [Gazulla C., 2012].

El concepto de declaración ambiental de producto se definió como un documento escrito donde se exponen las características ambientales significativas de un producto destinado a sus usuarios, y, finalmente, se describió como uno de los pasos necesarios para ampliar la responsabilidad de los fabricantes sobre sus productos, argumentando que el simple hecho de realizar el estudio y tener que publicarlo, motivaba la implementación de medidas de optimización y a un mayor cuidado de los aspectos ambientales negativos que se pudieran generar indirectamente de la fabricación del producto estudiado [Lindhqvist T., 1989], [Lindhqvist T., 2000], [Johansson D., 2000].

A partir del año 1993 cuando ISO crea un subcomité técnico para trabajar específicamente en las ecoetiquetas y declaraciones ambientales y, en 1999, sale a la luz la publicación del informe técnico ISO/TR 14025. Se optó por un informe técnico al considerarse que los conocimientos y experiencias prácticas eran aún insuficientes para publicar una norma internacional [Bogeskär M., et. Al. 2002] hasta que finalmente en 2006, se aprobó ya como norma internacional. [Gazulla, C. 2012]

## **2.4 Energías renovables**

Centrándonos en energía, las energías renovables poco a poco van ganando importancia en el mercado energético. Esto ha llevado a un creciente interés en la investigación de energía alternativa como el biodiesel, la energía solar, la tecnología de pila de combustible, la energía geotérmica, la energía eólica, entre otras fuentes de producción energética de origen renovable.

En los beneficios de las energías renovables se incluyen: [Goldemberg, J., 2004]:

- El uso de los recursos locales disponibles y renovables
- Reducir la dependencia referente a la importación de combustible y los consiguientes efectos en el comercio exterior
- La creación de puestos de trabajo locales y oportunidades de inversión
- Reducción de la pobreza en países en vías de desarrollo mediante el acceso a la energía y mejora de los impactos relativos a la salud humana.
- Mejorar el abastecimiento energético y la seguridad mediante la diversificación de la cartera energética, la mejora de la estabilidad de precios en tiempos de aumento de los costes de los combustibles fósiles y reducir los riesgos asociados a la inestabilidad en el futuro energético mundial
- Mejorar la capacidad de distribución de la producción, modificando los modelos de la red de hoy en día y reducir la costosa extensión de la red a ciertos lugares
- Beneficios ambientales, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el agotamiento abiótico de recursos, la contaminación del agua y los impactos generados en el uso intensivo del suelo

La discusión sobre como transformar el suministro energético mundial en un modelo alternativo más sostenible y con unos precios menos volátiles hace tiempo que se lleva a cabo en la comunidad científica [Zwaana, B., Gerlagh R, 2006], [Kessides I., Wadeb D., 2011].

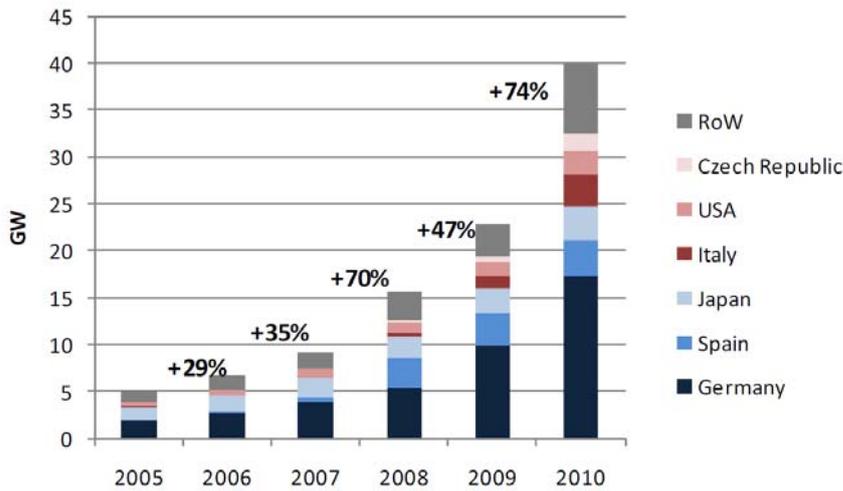
El punto clave no es si una generación energética 100% renovable es posible, sino más bien ¿En qué plazo de tiempo se puede alcanzar? ¿A qué precio, teniendo en cuenta la escasez de petróleo como materia prima?

En este paradigma, la energía solar es una tecnología clave para la generación energética futura. Es una opción tecnológicamente y económicamente viable hoy en día. Los recursos de energía solar en Europa y en todo el mundo son abundantes y no puede ser monopolizados por un solo país o lobbies de poder [European Commission, 2011].

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

La radiación solar útil varía según la ubicación geográfica, la cobertura de nubes, las horas de luz solar cada día,... Ésta es mayor en el ecuador, especialmente en las zonas de climas despejados, como por ejemplo el desierto.

En la siguiente figura se muestra la capacidad mundial instalada de producción fotovoltaica de 2005 a 2010, donde se puede observar un crecimiento muy rápido en la capacidad total de



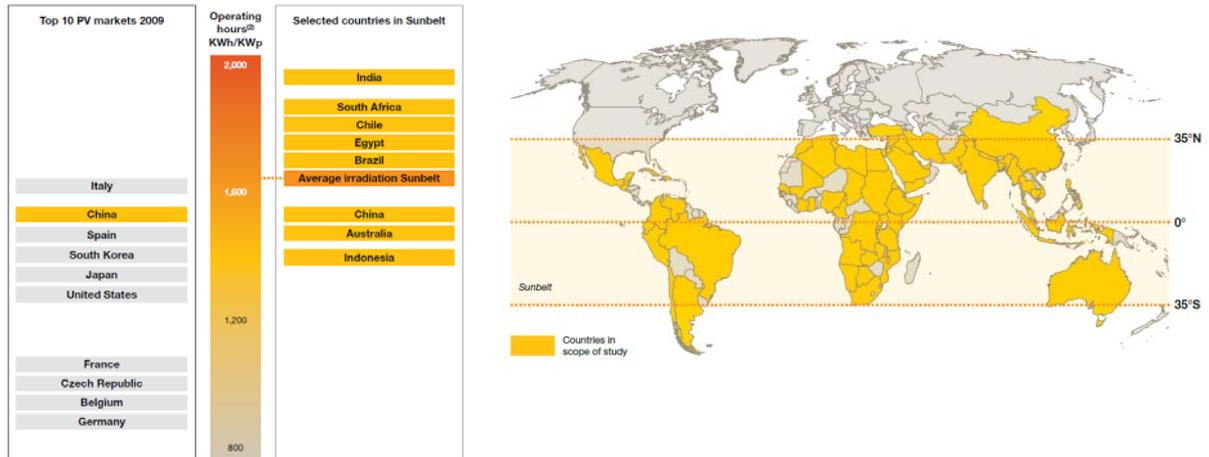
generación.

**Figura 4 Evolución capacidad mundial instalada de fotovoltaica**

Fuente: Derived from IEA data and IEAPVPS (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program), BP, BNEF, ErDF (Électricité Réseau Distribution France) y BNA.

Paradójicamente, este crecimiento de la tecnología que se está experimentando se ha producido principalmente en países de fuera del llamado “cinturón solar” en el mundo, como puede verse en el gráfico, de hecho, el crecimiento de la energía fotovoltaica podría acelerarse enormemente, si se trabajara más en esta zona [European Photovoltaic Industry Association, 2011 a].

IRRADIATION SUNBELT VS. TOP 10 PV MARKETS 2009<sup>(1)</sup>



(1) For systems larger than 1 MWp; 85% performance ratio

**Figura 5 Irradiación del cinturón solar en el mundo**

Fuente: NASA, IEA Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, EPIA Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014, A.T. Kearney analysis

Focalizándonos en España, el uso de las distintas energías renovables ha ido creciendo en los últimos 30 años a través de la implantación de instalaciones que comenzaron su andadura impulsadas por el apoyo de las Administraciones Públicas. A través de ayudas a la inversión, estas tecnologías eran más competitivas en un mercado en el que su demanda era todavía muy baja debido a la poca concienciación medioambiental y a la existencia de energías fósiles convencionales muy baratas. Estas primeras instalaciones fueron, por lo tanto, pioneras en España y funcionaban casi como prototipos de tecnologías emergentes.

Consecuencia de los requisitos impuestos por el Protocolo de Kioto y de la voluntad de reducirla dependencia energética española de países externos, se han lanzado iniciativas para impulsar definitivamente el uso de las energías renovables, sobre todo en el sector de la edificación en el que las posibilidades de ahorro eran importantes. Entre las iniciativas legales destacan:

- RD 2818/ 1998 de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración, que establecía un objetivo mínimo de al menos el 12% para que la energía del país procediera de fuentes renovables en el año 2010, de acuerdo con el objetivo de la Unión Europea
- RD 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. En este RD se establecía que cualquier persona física o jurídica se podía convertir en productor de energía a través del aprovechamiento de la energía solar
- El “Plan de Energías Renovables en España 2005-2010” (PER) marcó como objetivo alcanzar en 2010, 4.900.000 m<sup>2</sup> de colectores solares térmicos instalados. Aunque el nuevo plan hasta 2020 suspende todo tipo de ayuda a las renovables
- RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el nuevo Código Técnico de la Edificación. El Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) tiene como

objetivo conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, estableciendo la obligación de incorporar criterios de eficiencia energética y el uso de energía solar, térmica o fotovoltaica, en los nuevos edificios o en aquellos que se vayan a rehabilitar

- RD 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial
- RD 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Este RD establece el marco para mejorar la eficiencia de las instalaciones en el sector de la edificación.

Pero en el 2008 la normativa que regula las primas para la producción en instalaciones fotovoltaicas (ITC/3860/2007) cambió, debido a la crisis y a una política de subvenciones muy generosa que distorsionó el mercado, haciendo que disminuyera la demanda de este tipo de instalaciones y se paralizara el mercado de energía fotovoltaica en España [European Photovoltaic Industry Association, 2011 b].

Por otro lado, la solar térmica tuvo un fuerte impulso en septiembre de 2006, a partir del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE), en el que todos los edificios de nueva construcción y rehabilitación deberán contar con instalaciones de energía solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria. Aunque, el parón en el sector de la construcción de los últimos años también hizo que este sector se volviera ralentizar de forma considerable.

### **3. MARCO DE REFERENCIA**

Este proyecto queda enmarcado dentro del proyecto Renia y se hace en cooperación educativa con uno de los miembros del consorcio, la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF).

A continuación se describe brevemente el proyecto y los socios participantes sin los cuales no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto.

#### **3.1 Proyecto Renia**

El proyecto Renia nace de la necesidad fundamental de encontrar soluciones innovadoras a nivel de ecodiseño y elementos diferenciadores que permitan el mejoramiento y la optimización de tecnologías relacionadas con la energía solar en la edificación, por medio de la reducción de los impactos asociados al ciclo de vida de los sistemas involucrados haciendo uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que permite de una manera integrada la revelación de información importante que no se ve a simple vista o con otras herramientas más sencillas.

Las principales características del proyecto se describirán a continuación, y son extraídas de la propuesta técnica del proyecto [Memoria Renia, 2010].

- Título del proyecto: Proyecto Renia □ Diseño y desarrollo de una aplicación informática para la evaluación, ecodiseño y comunicación ambiental de sistemas solares utilizados en edificación.
- Financiado por: Programa Innpacto, Ministerio de Economía y Competitividad (antes de Ciencia e Innovación) durante las anualidades 2010 a 2014.

- El **objetivo general** del proyecto es el diseño y desarrollo de una aplicación informática para la evaluación, ecodiseño y comunicación ambiental de equipos de captación de energía solar utilizados en edificios, instalaciones de energía solar térmica y fotovoltaica. Esta aplicación, por lo tanto, ayudará a los fabricantes de estos sistemas a: identificar los puntos críticos (materiales, procesos...) a lo largo de todo el ciclo de vida de sus productos, recibir consejos sobre cómo optimizar sus productos y reducir sus impactos ambientales y económicos a lo largo de todo su ciclo de vida, y desarrollar declaraciones ambientales de sus productos (DAP, en adelante).
- Objetivos específicos:
  - Intercambio de información y contacto con diferentes actores de la cadena de valor
  - Estudio de las materias primas.
  - Estudio de los procesos productivos clave.
  - Procesos de instalación y mantenimiento.
  - Desmantelamiento.
  - Alimentación de las bases de datos.
  - Análisis de tecnologías disponibles y estrategias de ecodiseño.
- El resultado de este proyecto supondrá un avance cualitativo en el diseño, desarrollo y comercialización de productos suponiendo para el sector un elemento diferenciador e innovador respecto a productos fabricados en otros países con un menor coste de mano de obra y con legislación menos restrictiva.
- Beneficios para fabricantes e instaladores:
  - Aplicación adaptada a su sector que les resultará sencilla de utilizar y que les ofrecerá una valiosa información que podrán explotar desde el punto de vista estratégico/ comercial/ marketing y/u operativo.
  - Posibilidad de identificar y evaluar diferentes alternativas de ecodiseño aplicables para la mejora del producto: uso de diferentes materias primas, nuevos procesos productivos, rediseño de producto, nuevos procesos de instalación, etc.
  - Capacidad de ofrecer información rigurosa y creíble a sus clientes y al público en general sobre los impactos ambientales y económicos de sus productos a lo largo de todo su ciclo de vida.

El consorcio del proyecto Renia está formado por las siguientes entidades:

*Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF)*

La *Escola Superior de Comerç Internacional* (ESCI) fue creada en 1993 como una iniciativa conjunta de la Generalitat de Catalunya y la Universitat Pompeu Fabra (UPF). El Grupo de Investigación en Gestión Ambiental (GiGa) dentro de ESCI se crea formalmente en el año 2004 para estudiar los temas relacionados con el producto y el medio ambiente. En 2010, GiGa se convierte en la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático cuyo objetivo es desarrollar y transmitir los conocimientos de sostenibilidad y ecodiseño que ayuden a las organizaciones en sus modelos de internacionalización y respeto al medio ambiente.

*SEMANTIC SYSTEMS*

Es una PYME de alta tecnología dedicada al desarrollo e integración de soluciones avanzadas TI y basadas en el conocimiento, para la industria de fabricación. Coordina el proyecto Renia.

#### ***INGHOFM***

INGHO FM, es una empresa independiente que desde el año 2004 se compromete con sus clientes a trabajar en servicios de consultoría y asesoría en el ámbito de las instalaciones, las infraestructuras, el medio ambiente, la alta tecnología y la gestión de los servicios (*facility management*) ofreciendo un producto de calidad y útil para las organizaciones para las que trabaja.

#### ***TERMICOL***

Termicol es una empresa nacional líder en la fabricación de captadores y sistemas solares térmicos, que fabrican de manera integral en sus instalaciones en Sevilla, con una completa gama de captadores solares planos bajo los más altos estándares de calidad, lo que los ha hecho merecedores de la certificación ISO 9001.

#### ***TECNALIA***

Tecnalia es una Fundación privada sin ánimo de lucro, cuyo objetivo es el desarrollo social y mejora de la competitividad en sus sectores de actuación, mediante la Investigación e innovación tecnológica.

#### ***IAT***

El Instituto Andaluz de Tecnología –IAT- es un Centro Tecnológico de “Ingeniería y Gestión del Conocimiento”, y está reconocido como tal tanto por la Administración General del Estado, como por la Junta de Andalucía. Su misión es acompañar a empresas e instituciones en la mejora de sus resultados, de forma sostenible, aportándoles valor mediante soluciones innovadoras.

### **3.2 Estado del arte**

A pesar de que la energía solar está considerada como una fuente de energía “limpia”, ésta se encuentra relacionada directamente con importantes cantidades de materiales, procesos de manufactura, transportes, escenarios de utilización y disposición final. Todos estos procesos tienen lugar en el medio ambiente y sus consecuencias ambientales incluyen la explotación de recursos naturales, emisión de gases de efecto invernadero y lluvia ácida, entre otros, haciendo urgente la necesidad de evaluar los sistemas de tecnología solar y teniendo en cuenta los impactos indirectos que causan a lo largo de su vida útil.

En los últimos años, estos productos han sido optimizados substancialmente, de manera que se ha reducido, en general, tanto sus impactos ambientales como sus costes de producción y, por lo tanto, sus períodos de amortización. A pesar de esta mejora, existen importantes diferencias según la tecnología utilizada y el margen de mejora y optimización se considera todavía amplio [Memoria Renia, 2010].

El enfoque de ciclo de vida ayuda a la toma de decisiones informadas a la hora de escoger las mejores tecnologías disponibles y minimizar desde su diseño el impacto ambiental de los productos [ISO 14044:2006]. A menudo determinados productos que se presentan como “ecológicos” porque mejoran aspectos ambientales muy concretos en determinadas etapas del ciclo de vida (la etapa de uso generalmente) esconden tras de sí grandes sorpresas cuando se analizan de una manera más integrada y se consideran otras etapas del ciclo de vida (fabricación, mantenimiento o eliminación final); en estos casos estas soluciones, que a priori

podrían parecer ventajosas, pierden su elemento diferenciador en comparación a otras. De igual manera, productos que se presentan como baratos a medio plazo, pueden tener elevados costes de mantenimiento o de gestión de residuos; o productos altamente tecnológicos, que llevan asociados altos costes productivos muy elevados que no llegan a amortizarse. Por todo ello, es fundamental aplicar la visión de ciclo de vida y tener en cuenta tanto los costes económicos como los ambientales a la hora de identificar las tecnologías más eficientes [Memoria Renia, 2010].

A pesar que estos productos y sistemas han sido objeto de investigación y mejoras continuas durante los últimos años [Ardente, F. et al 2005], [Battisti R. y A. Corrado. 2005], [Tsoutsos, T. et al, 2005], [Fthenakis, V. et al, 2009] [Fthenakis, V., et al, 2008], [Raugei, M. et al, 2007], aún existe un amplio margen de mejora, que hace urgente encontrar ideas innovadoras y elementos que permitan a las empresas fabricantes e instaladoras diferenciarse de las demás.

Para esto es necesario el uso de herramientas integrales como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y su correcta comunicación, que permiten realizar recomendaciones sobre el diseño, materiales y procesos involucrados en los sistemas solares, por medio de un análisis de sus principales impactos a lo largo de todo el ciclo de vida. Los resultados de los estudios de ACV permiten además realizar recomendaciones sobre cambios en el diseño de estos sistemas que permitan disminuir los principales impactos ambientales asociados.

Tal y como comenta Fullana-i-Palmer en una entrevista, la evaluación ambiental rigurosa (ACV) que nos permite una mejora ambiental bien enfocada (ecodiseño y ecoinnovación), debe ir seguida de una atractiva comunicación ambiental (ecoetiquetas e informes ambientales) para aumentar la efectividad y las ventas para la empresa [Fullana-i-Palmer P., 2011].

### **3.3 La comunicación ambiental**

Las herramientas de comunicación ambiental informan a los consumidores sobre el carácter ambiental de los productos, para esta función, el medio más empleado es el ecoetiquetado, en cualquiera de sus versiones.

Adheridas o impresas en los embalajes o incluso en los propios productos, intentan alentar la demanda de bienes que perjudican menos al medio ambiente y estimular así el potencial para una mejora ambiental continua.

Actualmente existe un amplio abanico de sistemas de información y comunicación ambiental de producto, éstos se pueden clasificar en diferente grupos: voluntarios u obligatorios; auto-certificados o certificados por tercera parte; de contenido negativo, positivo o neutro; etc. [Gazulla C., 2012].

Una clasificación de los sistemas existentes de comunicación es la propuesta por [StØ E. et al, 2005]. Ésta incluye no sólo sistemas relacionados con el producto, sino también para las corporaciones. A continuación, se detalla la clasificación (extraído de [Gazulla C., 2012]):

a) **Sistemas obligatorios:** emanantes de la legislación y verificados por terceras parte.

- Declaración de la composición de los productos.
- Información sobre riesgos para la salud o el medio ambiente durante el uso o gestión del producto en su fin de vida.
- Etiquetado de producto que mediante símbolos informa sobre sus características específicas (por ejemplo, peligrosidad).
- Certificación de conformidad del cumplimiento de determinados requisitos (por ejemplo, marcado CE)

b) **Sistemas voluntarios:** en este caso, son los productores los que deciden si quieren o no desarrollarlos. Desde la década de los 80, estos sistemas auto-regulatorios se expandieron como alternativa a los de mando y control (command-and-control) [van Amstel M., 2008]. ISO los clasifica en tres grandes grupos:

- Ecoetiquetas tipo I: en el contexto de un programa voluntario multicriterio gestionado por una tercera parte que autoriza su uso, indican que un producto es ambientalmente preferible en función de una serie de consideraciones basadas en su ciclo de vida. Ofrecen al consumidor información concisa y cualitativa que le ayuda a tomar decisiones rápidas de compra. Estas ecoetiquetas están estandarizadas por la norma ISO 14024:2001. Son ejemplos de este tipo de ecoetiquetas el Blue Angel (o Blauer Engel) alemán, la Ecoetiqueta Europea (o EU Ecolabel), el Nordic Swan escandinavo o el Distintiu de Garantia de Qualitat Ambiental catalán. En el desarrollo de los criterios de este tipo de ecoetiqueta se utiliza la metodología del ACV [Clift R 1993].
- Ecoetiquetas tipo II: declaraciones hechas por el propio fabricante, importador o vendedor del producto sin necesidad de una certificación por tercera parte. Pueden consistir en afirmaciones, símbolos o gráficos que aparecen en el propio producto o en su envase, catálogo, publicidad, etc. Normalmente solo consideran una etapa del ciclo de vida y un único aspecto ambiental (por ejemplo, que el producto está hecho con material reciclado o que es biodegradable). Estas ecoetiquetas están estandarizadas por la norma ISO 14021:2002.
- Ecoetiquetas tipo III o Declaraciones Ambientales de Producto (DAP): consisten en la comunicación de datos ambientales cuantitativos calculados de un producto según unos parámetros pre-fijados, así como en información ambiental adicional relevante. Estas ecoetiquetas están estandarizadas por la norma ISO 14025:2006 y requieren de un estudio de ACV.

Existen otras ecoetiquetas certificadas fuera de esta clasificación, similares a las de Tipo I, pero que no abarcan todo el ciclo de vida del producto, o se limitan a un único aspecto ambiental.

### **3.4 Declaraciones Ambientales de Producto**

Las DAPs son un instrumento de comunicación que tienen como finalidad aportar información cuantitativa de los impactos ambientales que comporta un producto a lo largo de su ciclo de vida. Éstas facilitan la comunicación objetiva, comparable y creíble de los productos en aspectos ambientales. Las DAP no ofrecen criterios sobre la preferencia ambiental de un producto ni establecen unos requisitos mínimos a cumplir. No obstante, el hecho de estudiar un producto en profundidad siempre lleva a la detección de alternativas de mejora [Gazulla C., 2012]. Generalmente, la información contenida en una DAP ha sido verificada por una tercera parte independiente y, consiste en datos relevantes sobre los impactos ambientales generados por un producto a lo largo de su ciclo de vida (categorías de impacto y consumo de materias primas y producción de emisiones y residuos relevantes). Para que las DAP realizadas por distintos fabricantes sean coherentes entre sí es fundamental que sigan las mismas directrices sobre cómo aplicar la metodología del ACV [G. Benveniste, 2011].

Tal y como expone [Gazulla C., 2012], las DAP pueden ayudar a superar las barreras de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), relativas a comunicar información ambiental detallada y compleja sobre el impacto ambiental que ocasionan los productos. Últimamente, los científicos y profesionales dedicados al ACV se ha centrado más en mejorar aspectos metodológicos, que en cómo comunicar la información de los estudios de ciclo de vida realizados y su utilidad para las empresas y administraciones públicas en los procesos de toma

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

de decisiones o cuál es su impacto en las actitudes y comportamientos de los clientes y consumidores finales [Molina-Murillo S.A. et al, 2009], [Fullana-i-Palmer P. et al, 2011].

El objetivo principal de las DAPs es estimular la oferta-demanda de productos y servicios que causen un menor impacto en el medio ambiente y, de esta manera, estimular la tendencia del mercado hacia una compra verde. Dichas etiquetas y declaraciones se basan en la comunicación de información fiable y concreta, no engañosa, de aspectos medioambientales de determinados productos y servicios. Las etiquetas y las declaraciones medioambientales dan información sobre un producto o servicio en términos medioambientales. Ésta puede ser específica o en aspectos generales.

Dicha información pasa a formar parte de la información que se presenta al consumidor, que la puede utilizar como factor de elección entre distintos productos.

A continuación se detallan los sistemas internacionales existentes para la generación de DAPs:

<b>Nombre del sistema</b>	<b>Administrador</b>	<b>País</b>
SIA (asociación suiza de ingenieros y arquitectos)	Declaración de las características ecológicas de los productos utilizados en la construcción	Suiza
The International EPD® System	The International EPD Consortium (IEC)	Suecia
BRE	BRE Environmental Profiles Certification	Reino Unido
MRPI® (información ambiental relevante de producto)	NVTB (asociación holandesa de productos de la construcción)	Holanda
Umwelt-Deklarationen (EPD)	Institut Bauen und Umwelt (IBU)	Alemania
Programme de Déclaration Environnementale et Sanitaire pour les produits de construction (Programme FDE & S)	AFNOR	Francia
RTS Environmental Declaration	The Building Information Foundation RTS	Finlandia
EDP Environmental Declaration of Products	Ministeri de Medi Ambient	Corea del Sur
EPD- Norge	Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner	Noruega
EcoLeaf	JEMAI (Japan Environmental Management Association For Industry)	Japón
Sistema DAPc	Col·legi d'Aparelladors, Arquitectes Tècnics i Enginyers d'Edificació de Barcelona	Cataluña

**Tabla 1 Sistemas internacionales de DAPs**

Fuente: [Gazulla C., 2012]

### 3.5 Viabilidad

Este proyecto está fuertemente relacionada con un proyecto real, como se ha expuesto en el apartado anterior, por lo tanto la viabilidad del proyecto queda avalada por todas las empresas y centros de investigación que actualmente se encuentran trabajando en el proyecto Renia [Memoria Renia, 2010].

Más específicamente el proyecto Renia va dirigido a fomentar la mejora de los equipos y productos destinados a responder a la demanda de energía térmica y eléctrica de los edificios a partir de energía solar. La aplicación informática que se prevé desarrollar es un producto de software que será comercializado a aquellas empresas fabricantes que quieran ofrecer una

ventaja competitiva diferenciándose del resto gracias a la incorporación de aspectos ambientales en sus actividades de diseño y comunicación. Esto les permitirá no sólo conocer el estado actual de sus indicadores de impacto ambiental, sino que además podrán mejorar sus productos considerando en su “cuenta de resultados” no sólo el impacto económico sino también el ambiental.

Actualmente existe en Europa y España una mayor preocupación ambiental respecto a los productos que consumimos, esto se traducirá en que el usuario requiera cada vez una mayor cantidad de información acerca del impacto ambiental que tienen los productos ofrecidos por un fabricante, pasando esta información a formar parte importante en la toma de decisiones del usuario final. Esta mayor concienciación ambiental ya se deja notar en sectores como por ejemplo, el de los aparatos eléctricos y electrónicos o el de la automoción; en este último, se habla ya del consumo de los vehículos en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso de materiales reciclados o con menor impacto en el medio ambiente, etc. Esta tendencia se está expandiendo al resto de sectores de la sociedad y requerirá de los fabricantes una mayor transparencia en el impacto ambiental de sus productos a través del uso de etiquetados certificables por organismos independientes. Los fabricantes que empiecen a declarar sus impactos ambientales pueden obtener una ventaja competitiva respecto al resto y convertirse en el mejor tractor para la implantación generalizada en el sector de esta aplicación.

Por otra parte, el sector de la construcción es responsable en la actualidad del 40% del consumo de energía y del 35% de las emisiones [Unión Europea, 2002]. En este sentido, la UE ha decidido plantear como reto para el año 2020, que todos los edificios de nueva construcción sean edificios cero energía, éstos deberán producir tanta energía como la que consuman durante su fase de uso. Para llegar a este objetivo será necesario el empleo de instalaciones de energía renovable.

Se pretende estar alineado con las tendencias y necesidades que el sector va a tener en el corto plazo, para ello se desarrollará esta aplicación que permitirá a los fabricantes evaluar los impactos ambientales de sus productos, aplicar estrategias de ecodiseño para mejorarlos y, además, desarrollar sus propias Declaraciones Ambientales de Producto. La combinación de estas tres funcionalidades les ayudará a situarse a la vanguardia de las necesidades del mercado. Todo ello beneficiará al sector en España de manera global, ya que se mejorarán los productos nacionales y se tendrán empresas más competitivas en el extranjero.

La metodología desarrollada para realizar la captación de los datos en las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos junto con la aplicación desarrollada, serán puestas en valor por los diferentes socios que conforman el consorcio que representa esta iniciativa.

Finalmente, la aplicación que se desarrolle en el marco de este proyecto podrá ser exportada a otros tipos de productos (mini eólica, geotermia, etc.) a través de su parametrización aunque su adaptación exigirá el análisis detallado de los diferentes productos, procesos productivos, materias primas, etc...

Este trabajo podrá ser objeto de futuros proyectos, ampliando el campo de aplicación y la versatilidad de la herramienta desarrollada, mejorando al mismo tiempo la competitividad de la empresa desarrolladora del software.

#### **4. METODOLOGÍA**

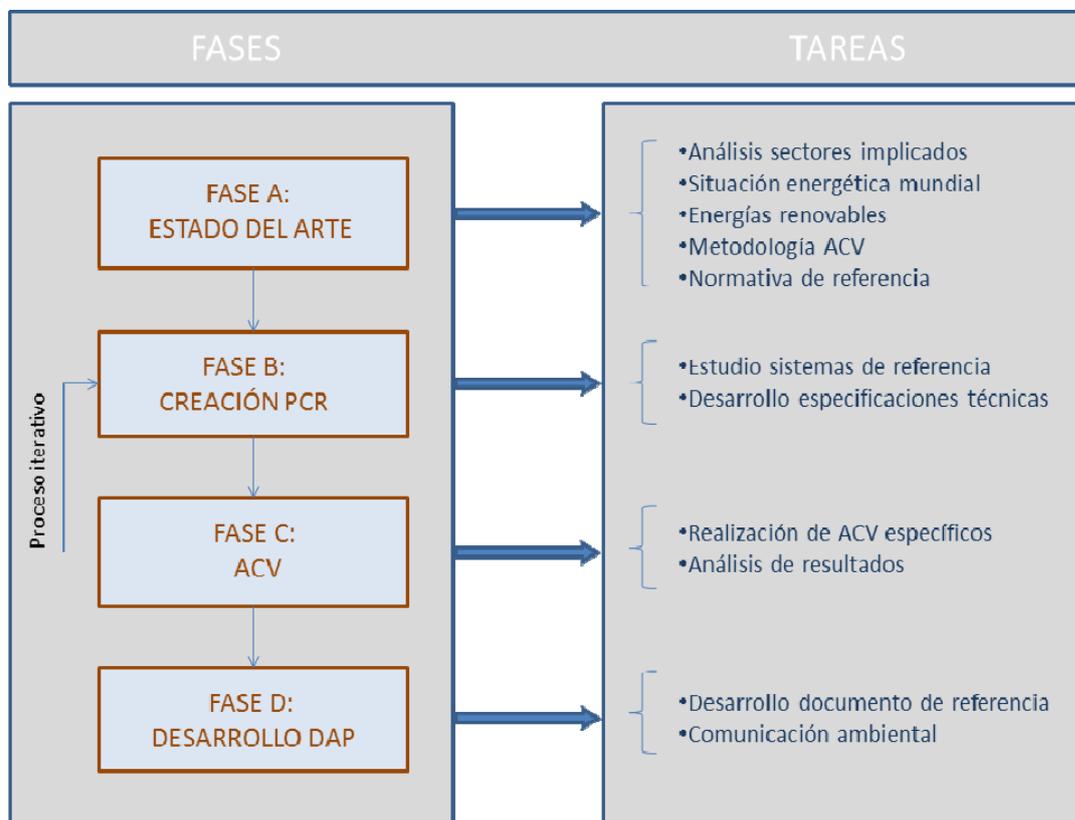
El presente proyecto se ha estructurado en cuatro grandes bloques, tal y como se puede observar en la figura 6, que responden a los objetivos específicos planteados. Como en todo proceso de desarrollo de estudios, primero de todo es necesario conocer el estado del arte acerca

## **Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

de la temática relacionada. A continuación se detalla la metodología específica aplicable al caso de estudio, en este caso, como ya se ha comentado anteriormente, la metodología es la de los análisis del ciclo de vida. Una vez conocida esta, se deberán desarrollar las normas de categoría de producto (PCR) que hacen referencia explícita al sector industrial de los sistemas solares. Cuando la metodología está perfectamente definida se procede a la elaboración del ACV de productos específicos i, finalmente, la DAP en función de las normas definidas con anterioridad.

Detallar que las fases B y C son iterativas, esto significa que el desarrollo de la RCP queda condicionada por las posibles conclusiones obtenidas de los ACVs realizados, pudiendo incorporar nuevas especificaciones debidas al estudio más exhaustivo realizado con posterioridad.

Destacar que por falta de datos y colaboración de ciertas empresas en el proyecto, se han retrasado algunas de las etapas que estaba previsto terminar antes de la presentación de este proyecto. Por lo tanto, la fase B y D serán desarrolladas en futuras investigaciones continuación del presente proyecto. Aunque la creación de la PCR no se ha llevado a cabo, si que quedan establecidos los parámetros y especificaciones necesarias en la fase C para su posterior desarrollo.



**Figura 6 Metodología de trabajo para el desarrollo de una DAP**

*Fuente: Elaboración propia*

Durante el desarrollo de la investigación, se han utilizado diferentes herramientas metodológicas como pueden ser la revisión bibliográfica de publicaciones científicas y documentos de referencia en el sector, análisis de la normativa existente, consulta a expertos en las distintas materias, visitas a plantas de producción, desarrollo de trabajo experimental y encuestas, y entrevistas con distintos representantes de empresas y asociaciones sectoriales.

### **4.1 Análisis de bibliografía**

Para llegar a tener un buen conocimiento específico sobre el sector solar en España se ha consultado toda la información que se ha creído vinculante para la elaboración del proyecto. Entre estos, bases de datos, artículos científicos, normativas y documentos de referencia elaborados por varias instituciones internacionales como pueden ser la IEA (International Energy Agency), ISO (International Standards Organization), International EPD System o Ecoinvent Center, entre muchos otros.

## **4.2 Bases de datos**

Cabe destacar la existencia de bases de datos ambientales, reconocidas internacionalmente, que incluyen procesos o materiales relacionados con los distintos sectores industriales:

- European Life Cycle Database (ELCD) de la Comunidad Europea. Esta base de datos está promovida por la Comisión Europea y es pública y gratuita. Incluye datos sobre materiales y procesos básicos y que han sido suministrados o aprobados por el sector industrial.
- International Reference Life Cycle Data System (ILCD) de la Comunidad Europea. La red de datos ILCD, ha sido creada a partir de la base de datos europea ELCD. Los datos incluidos provienen de la industria, de proyectos de análisis de ciclo de vida nacionales e internacionales, colaboraciones con grupos de investigación y expertos en Inventario de datos (LCI) y análisis de impacto (LCIA) y consultores entre otros.
- Ecoinvent de Ecoinvent Centre. Sus datos están basados en información recogida a nivel científico, académico e industrial. Contiene datos de inventario sobre provisión de energía, extracción de recursos, materiales, compuestos químicos, metales, agricultura, gestión de residuos y transporte.
- GaBi Database de LBP (Universidad de Stuttgart) y PE International. Incluyen datos relativos al mix eléctrico de 60 países, la base de datos ELCD (EAA, ECI, EUROFER, FEFCO y PlasticsEurope) y datos propios elaborados por PE y la Universidad de Stuttgart. Los datos incluidos cubren diferentes sectores industriales (aceros, aluminios, plásticos y productos químicos orgánicos e inorgánicos, etc).

Ecoinvent es la base de datos más completa actualmente en el mercado. Por este motivo se ha escogido como referencia para la elaboración del estudio. Algunas de las características claves de Ecoinvent son:

- Cubre una gran variedad de datos en constante actualización
- Está bien documentado. Extensos informes de fondo están disponibles
- Especificación constante de datos inciertos como distribución logarítmica normal con desviación estándar

## **4.3 Artículos científicos**

### **Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems**

Autores: Sergio Pacca, Deepak Sivaraman y Gregory A. Keoleian

Año: 2009

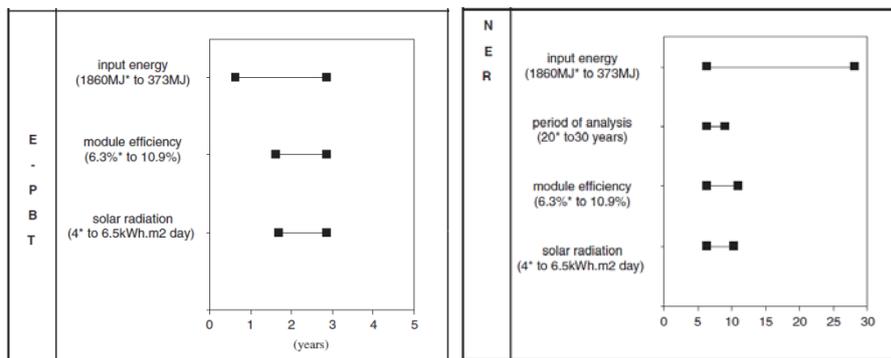
Revista científica: Energy Policy

Este artículo evalúa los parámetros de modelización que afectan el perfil ambiental de dos tipos de tecnologías fotovoltaicas, la capa fina laminada y unos módulos multicristalinos. Se han

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

tomado como indicadores del análisis el EPBT, el NER y las emisiones de CO<sub>2</sub> eq., todo basado en la metodología ACV

- Con el estudio se observan que los siguientes parámetros tienen un efecto importante sobre el resultado final:
  - Irradiación solar
  - La posición de los módulos
  - La intensidad energética en la producción de éstos y el correspondiente mix energético consumido
  - La eficiencia de producción
- En la siguiente tabla se observan los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros clave seleccionados para el caso del silicio multicristalino:



**Figura 7 Resultados análisis de sensibilidad del estudio**

- Finalmente valora los indicadores seleccionados, el NER tiene en cuenta el funcionamiento del sistema durante un período determinado, normalmente el tiempo de vida de los módulos, y el EPBT, se basa en estimar la producción de energía necesaria para recuperar la energía invertida en su fabricación

## **Life cycle impacts and cost of photovoltaics systems: Current state of art and future outlooks**

Autores: Marco Raugei y Paolo Frankl

Año: 2009

Revista científica: Energy

Este artículo presenta un estado del arte de los sistemas fotovoltaicos en la actualidad, también realiza tres escenarios posibles de penetración en el mercado eléctrico para 2050, y finalmente, presenta una comparación en g. de CO<sub>2</sub> eq. entre 4 tipos de tecnologías de generación fotovoltaica.

- Crecimiento exponencial de la capacidad instalada desde las primeras instalaciones en 1990
- Diferenciación de 4 tipologías de instalaciones, que difieren en las distintas necesidades del 'balance of system' dependiendo de la tipología de instalación
- Gran consumo energético de la obtención del silicio, existiendo cada vez tecnologías más eficientes y consiguiendo cada vez capas más finas, sobretodo en casos como el CIS o CdTe

- Prácticamente el mercado fotovoltaico está basado en las tecnologías que utilizan Silicio multicristalino (45,2%) y el monocristalino (42,2%)
- Comparando con el mix eléctrico europeo (UCPTE) las emisiones de gases de efecto invernadero, las tecnologías presentadas son inferiores en un orden de magnitud
- Se han obtenido reducciones de costes del 80% en las últimas dos décadas, de seguir así, predecían la paridad con el grid en 2010 para el sur de Europa
- Se prevé un aumento de la eficiencia hasta un 25% a medio plazo
- Una contribución notable al sector se realizará mediante la integración en edificios, siendo ya una alternativa real
- Para conseguir una mayor penetración en el grid es necesario el desarrollo de sistemas de almacenamiento energético a gran escala, y, de esta manera, poder cubrir de forma más óptima la curva de demanda
- En los escenarios planteados se pronostican unos crecimientos del subministro mediante esta tecnología de un 2% en el pesimista, hasta un 69% en el optimista.
- Referente al ACV, se han seleccionado tres tecnologías que se considera que tienen un buen potencial de crecimiento, estimando unas reducciones ya del 50% en 2025 comparando con un sistema monocristalino.

**Photovoltaics: Life-cycle analyses**

Autores: V.M. Fthenakis y H.C. Kim

Año: 2010

Revista científica: Solar Energy

Este artículo realiza un ACV de distintas tecnologías fotovoltaicas y sus diferentes componentes, igual que un repaso previo de bibliografía existente relacionada, que sirve como caso base. También se aportan datos de un análisis de riesgo y de comparativas con otras tecnologías de generación energética.

- Describe la metodología de ACV como herramienta básica para desarrollar perfiles ambientales de productos y la importancia de la actualización de datos e informes debido a la rápida evolución que presenta
- De estudios previos se extraen varios datos de referencia:
  - La energía primaria consumida por módulos fotovoltaicos, utilizando silicio multicristalino, varía de 2400 a 7600 MJ/m<sup>2</sup>, para el caso de capa fina de 710 a 1980 MJ/m<sup>2</sup> y para CdTe se estima en 993 MJ/m<sup>2</sup>
  - El EPBT varía de 2,5 a 3,5 años, en función de la irradiación en la zona geográfica del estudio
- En la siguiente tabla presentan los principales datos del inventario del módulo:

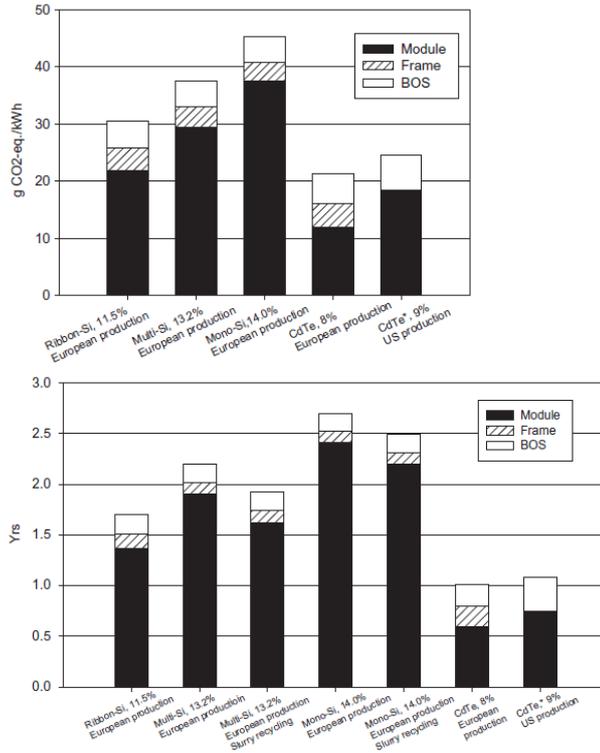
Materials and energy inputs for PV systems to produce 1 m<sup>2</sup> of module including process loss, updated for 2006 (excluding the frame for Si modules).

Category	Inputs	Ribbon-Si	Multi-Si	Mono-Si	CdTe
Components (kg)	Cell materials	0.9	1.6	1.5	0.065
	Glass	9.1	9.1	9.1	19.2
	Ethylene vinyl acetate	1.0	1.0	1.0	0.6
	Others	1.8	1.8	1.8	2.0
Consumables (kg)	Gases	6.1	2.2	7.8	0.001
	Liquid	2.2	6.8	6.6	0.67
	Others	0.01	4.3	4.3	0.4
Energy	Electricity (kWh)	182	248	282	59
	Oil (l)	0.05	0.05	0.05	0.05
	Natural gas (MJ)	166	308	361	-

**Tabla 2 Datos del inventario para el sistema estudiado**

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

- Para el BOS, se estima una cantidad de aluminio de 3,8 kg/m<sup>2</sup> para sistemas de silicio, los transformadores y el inversor tienen una vida de 30 años, pero necesitando cambiar partes cada 10 años, contabilizando un 10% de la masa.
- En las siguientes tablas se observan el EPBT y las emisiones de gases de efecto invernadero de los distintos productos estudiados



**Figura 8 Resultados del EPBT y categoría cambio climático de los productos estudiados**

- Los mayores riesgos potenciales son debidos al uso de varias sustancias peligrosas, debido a ciertos procesos industriales. En comparación con datos de US EPA's RMP, se concluye que la tecnología fotovoltaica es mucho más segura que fuentes convencionales de generación eléctrica
- Finalmente destaca el rápido desarrollo de la industria fotovoltaica y la necesidad continua de actualización e investigación

**Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation**

Autores: David D. Hsu, Patrick O'Donoghue, Vasilis Fthenakis, Garvin A. Heath, Hyung Chul Kim, Pamala Sawyer, Jun-Ki Choi, Damon E. Turney

Año: 2012

Revista científica: Industrial Ecology

Este artículo hace un repaso extensivo a todos los estudios de ACV acerca de la generación de energía mediante sistema solares de silicio cristalino. Llegando a revisar hasta 397 estudios, es una de las mayores recopilaciones realizadas.

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

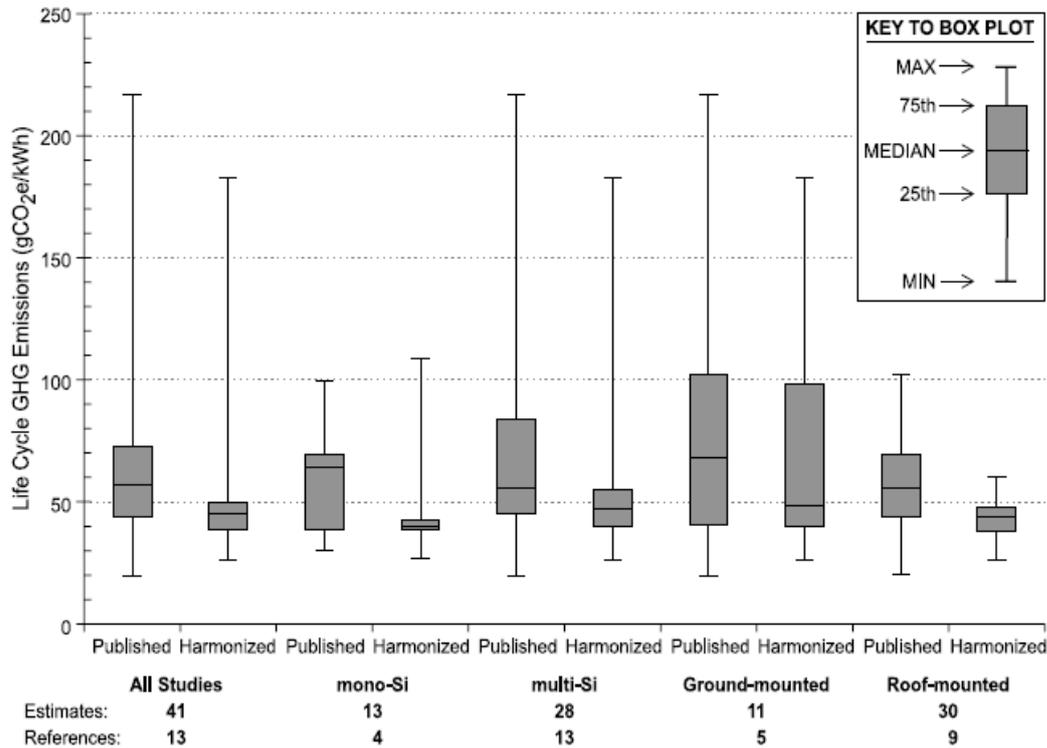
- Se realiza una meta análisis en función de parámetros como la irradiación, el tiempo de vida, la eficiencia y rendimiento del sistema para poder evaluar correctamente la influencia de estos en estudios previos.
- Para el caso del Silicio multicristalino, se presentan los siguientes resultados:

**Table 2** Multicrystalline PV LCA studies that passed final screening, with parameter values and characteristics from those studies.

Author	Year	Published GHG emissions (g CO <sub>2</sub> e/kWh)	Solar irradiation (kWh/m <sup>2</sup> /yr)	Module efficiency (%)	Performance ratio	System lifetime (years)	Mounting type (ground-mounted/rooftop)	Region
Alsema and de Wild-Scholten	2000	60	1,700	13	0.75	30	Ground-mounted	Western Europe
		30	1,700	15	0.75	30	Ground-mounted	
Alsema	2006	20	1,700	17	0.75	30	Ground-mounted	Southern Europe
		35	1,700	13.2	0.75	30	Ground-mounted	
Frankl et al.	2005	82	900	13	0.93	25	Ground-mounted	Central Europe
		44	1,800	13	0.87	25	Ground-mounted	Southern Europe
		93	900	13	0.86	25	Rooftop	Central Europe
		50	1,800	13	0.79	25	Rooftop	Southern Europe
		88	900	13	0.92	25	Rooftop	Central Europe
		47	1,800	13	0.86	25	Rooftop	Southern Europe
		85	900	13	0.88	25	Rooftop	Central Europe
		46	1,800	13	0.83	25	Rooftop	Southern Europe
Fthenakis and Alsema	2006	36	1,700	13.2	0.75	30	Rooftop	Europe
Hondo	2005	53	1,314	14	0.77	30	Rooftop	Japan
		44	1,314	14	0.77	30	Rooftop	
Jungbluth et al.	2009	57	1,117	13.2	0.75	30	Rooftop	Switzerland
Lenzen et al.	2006	62	1,117	13.2	0.75	30	Rooftop	Australia
		106	2,060	13	0.85	25	Rooftop	
		217	2,060	12	0.8	20	Rooftop	
		53	2,060	14	0.9	30	Rooftop	
Pacca et al.	2006	72	1,359	12.92	0.95	30	Rooftop	Michigan, USA
Pehnt et al.	2002	102	950	13.4	0.85	25	Rooftop	Central Europe
		57	1,700	13.4	0.85	25	Rooftop	North Africa
Pehnt	2006	104	1,100	13.4	0.85	25	Rooftop	Germany
Stoppato	2008	20	1,697	16	0.83	28	Ground-mounted	Turkey
Tripanagnostopoulos et al.	2006	55	1,644	12.4	0.85	30	Rooftop	Greece
		51	1,644	12.4	0.85	30	Rooftop	
		62	1,644	12.4	0.85	30	Rooftop	

**Tabla 3 Recopilación de resultados de ACVs realizados de fotovoltaica multicristalina**

- Los resultados del meta análisis muestran una reducción de incertidumbre en los resultados previamente presentados, tal y como se observa en el gráfico presentado:



**Figura 9 Resultados del metánesis realizado en el estudio**

- Se destaca la importancia del consumo energético en la fase de producción y su afectación a los impactos generados, pudiendo variar hasta un 50% en la categoría de cambio climático cambiando de un mix con hidroeléctrica y gas natural a el mix eléctrico de Estados Unidos.

**Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production**

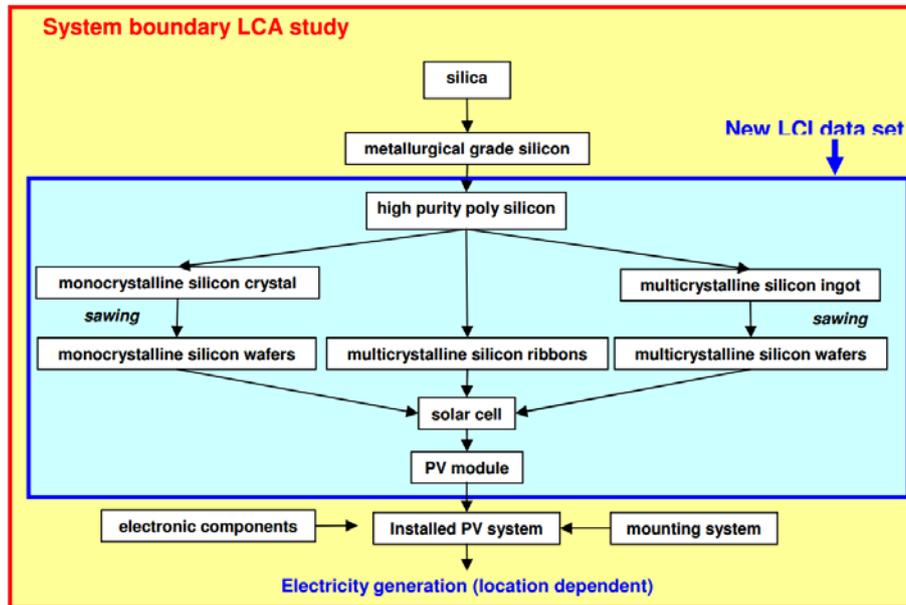
Autores: Erik A. Alsema y Mariska J. de Wild-Scholten

Año: 2006

Congreso: 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering

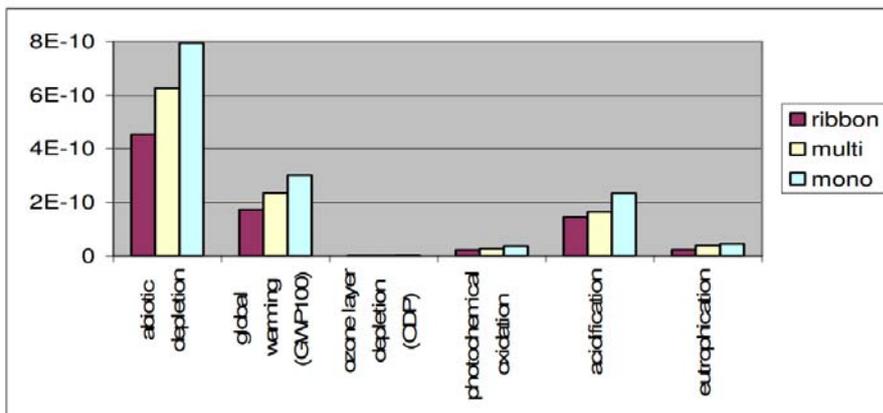
Artículo realizado con la colaboración de 11 empresas del sector fotovoltaico con el objetivo de hacer un LCI representativo de las tecnologías de producción de módulos de silicio cristalino cogiendo como base de estudio el año 2004, teniendo en cuenta el multi y monocristalino, y la capa fina.

- Destaca la importancia de escalar los valores de los wafers, tanto dimensión como espesor, debido a las variaciones que se producen en los materiales y la energía consumida
- Como condiciones generales del estudio se establece un módulo de 72 celas, un vidrio de 3.6 mm de espesor, un marco de aluminio de 3.6 kg y con una eficiencia de 13.2% para el caso del multicristalino. Todo referenciado a la unidad funcional de 1 kW<sub>p</sub>, aunque para las comparaciones con otras tecnologías de generación se tomara 1 kWh generado.
- En la figura siguiente se observan los límites del sistema tenidos en cuenta para el estudio:



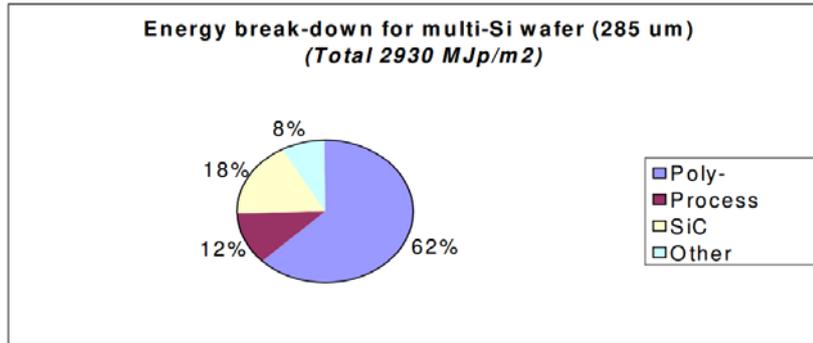
**Figura 10 Límites del sistema estudiado**

- Los resultados comparativos de las 3 tecnologías estudiadas son los siguientes:



**Figura 11 Resultados de las tecnologías estudiadas**

- También presentan la distribución del consumo energético en la producción de los distintos componentes que forman un módulo con silicio multicristalino, donde se observa el gran consumo en el wafer, respecto a los otros componentes.



**Figura 12 Distribución del consumo energético de los procesos estudiados**

- Para una radiación de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año, se estiman unos EPBT de 1.7 para la capa fina, 2.2 para el multicristalino y 2.7 para el monocristalino. Para radiaciones inferiores (1000 kWh/m<sup>2</sup>/año) el EPBT va desde 2.8 a 4.6 años. Los gramos de CO<sub>2</sub> eq. por kWh generado se sitúan en un rango de 30 a 45.
- Finalmente se prevé una optimización del proceso de obtención del silicio multicristalino para reducir de forma significante los impactos. Se pronostica también un aumento de la eficiencia, sin aumentar el consumo energético para conseguirla y apuntan que los módulos sin marco serán la tecnología estándar de producción.

**Reduction of the environmental impacts in crystalline silicon module manufacturing**

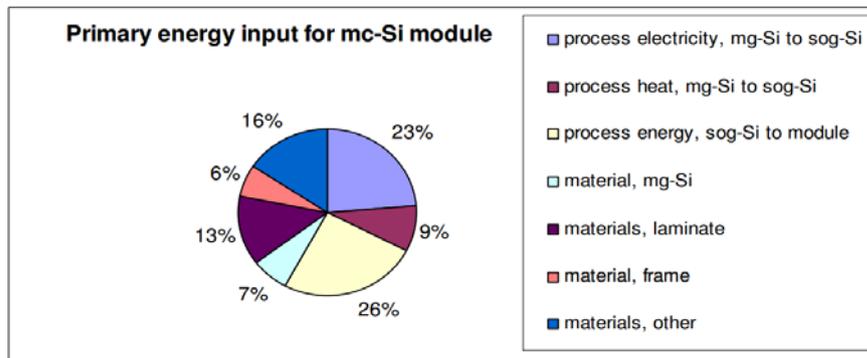
**Autores: E.A. Alsema y M.J. de Wild-Scholten**

Año: 2007

Revista: Renewable Energies

En este trabajo se revisan las opciones más importantes para reducir los impactos ambientales de la de la fabricación de módulos cristalinos de silicio, igual que las principales barreras para su implementación.

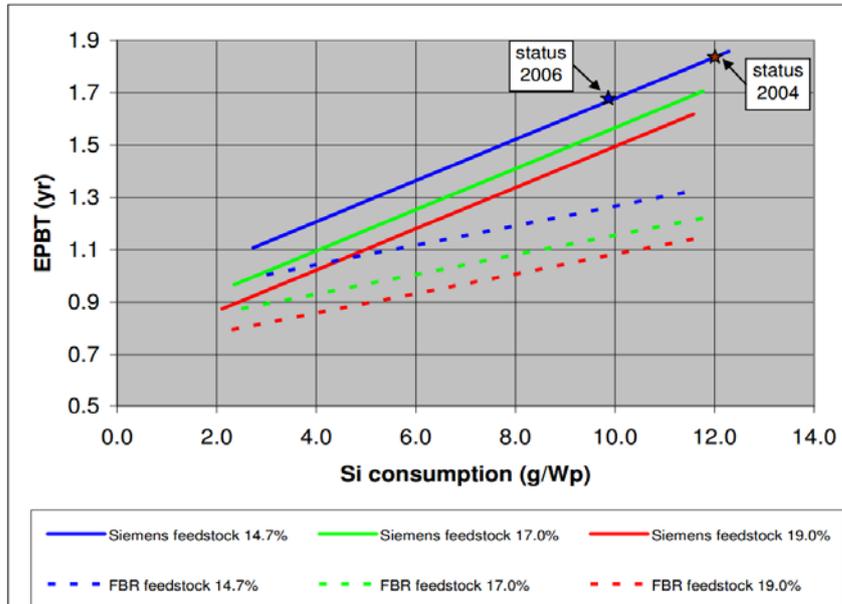
- Después del estudio previo con bibliografía de referencia, se concluye que las emisiones relativas al consumo energético son muy elevadas, más del 70% en calentamiento global y acidificación, por ejemplo. A continuación se ve la distribución del consumo energético en los procesos existentes en la producción del módulo.



**Figura 13 Distribución del consumo energético de los procesos estudiados**

De aquí se desprenden dos opciones de mejora evidentes:

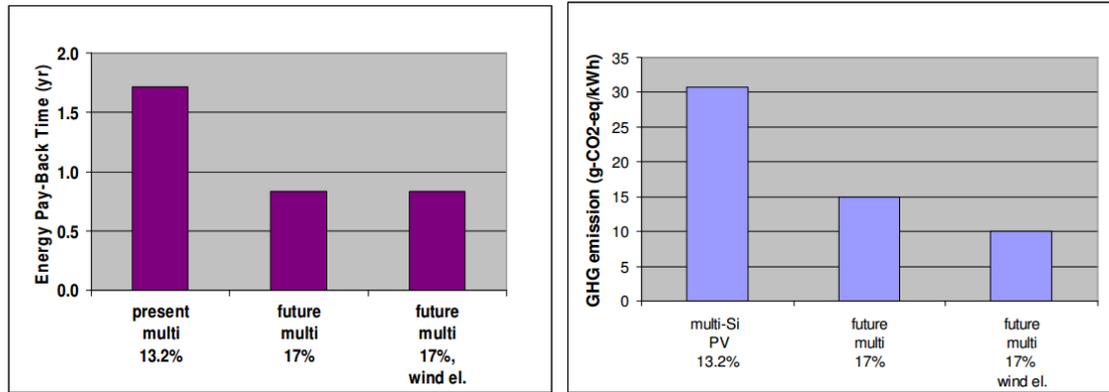
- Reducción del consumo energético en la producción del Silicio o aumento de la eficiencia. Procesos de producción como el uso de reactores de lecho fluidizado pueden representar una disminución del 70% de energía eléctrica consumida, aunque se requiere un mayor desarrollo todavía. En la gráfica se muestra la afectación de estos cambios al EPBT:



**Figure 4:** The Energy Pay-Back Time as a function of silicon consumption, for different combinations of a silicon feedstock process (Siemens, FBR) and multi-Si cell efficiency (resp. 14.7%, 17%, 19%). It is assumed that all other material and energy consumption for the module does not change, except that it is directly proportional to the module area. Module type: multi-Si module, frameless. System: roof-top system installed in S-Europe (1700 kWh/m<sup>2</sup>/y) with PR =0.75.

**Figura 14 Evolución del EPBT en función de la cantidad de silicio utilizada**

- Reducción de la cantidad de Silicio por módulo. Se estima llegar a un consumo de 4-6 g/Wp en pocos años y se destaca la opción del desarrollo del reciclaje de los restos de corte del silicio, reduciendo el consumo energético también de forma importante
- Otras medidas que se destacan en el estudio también son el reciclaje de fangos utilizados, aumento de la eficiencia en la manufactura y montaje de las celas y módulos, o la optimización del fin de vida, reutilizando o reciclando componentes
- Finalmente se resumen los posibles resultados esperados de las distintas medidas de mejora planteadas en cuanto a EPBT y g CO<sub>2</sub> eq. / kWh



**Figura 15** Evolución del EPBT i de las emisiones de cambio climático según los escenarios estudiados

#### 4.4 Documentos de referencia

Varias instituciones dentro del sector energético elaboran periódicamente informes, guías y normativas sectoriales, de las cuales se han analizado las que tienen afectación sobre el sector estudiado.

#### **ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia**

Normativa creada en 2006 referente a la realización de Análisis del Ciclo de Vida. Proporciona el alcance y los puntos de referencia necesarios para el correcto desarrollo de este tipo de estudios. También ofrece una visión general de la práctica, aplicaciones y limitaciones del ACV en relación a un amplio rango de usuarios potenciales. Esta norma es detallada de forma extensa en el apartado metodología del Análisis del Ciclo de Vida, por lo que no se explicará en este apartado.

#### **ISO 14006:2011. Gestión ambiental del proceso de diseño y desarrollo Ecodiseño**

Esta norma especifica los requisitos a aplicar en el proceso de diseño y desarrollo para la mejora de los productos y servicios de una organización, a través de un sistema de gestión ambiental. Su implantación facilita a la organización, en particular a los componentes de los equipos de diseño, la incorporación en sus tareas diarias de una sistemática para identificar, controlar y mejorar de forma continua los aspectos ambientales de los productos y servicios que diseñan, sin transferir los impactos de una etapa a otra del ciclo de vida.

Los principales objetivos de la norma son:

- Minimizar los impactos ambientales generados por productos o servicios desde su diseño, promoviendo un enfoque preventivo
- Sensibilizar al mercado sobre la importancia del impacto ambiental generado por productos o servicios, impulsando la información activa por parte de las empresas productoras, tanto a los usuarios como a otros agentes clave a lo largo del ciclo de vida, como por ejemplo los recicladores
- Fomentar el cambio de perspectiva, pasando de un enfoque basado en los aspectos ambientales asociados a la fabricación del producto, a una identificación más amplia en la que se incluyen los generados en otras etapas del ciclo de vida

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

- Establecer una sistemática que asegure la mejora ambiental continua en el diseño de productos y servicios, es decir, que todos los productos diseñados o rediseñados incorporen alguna mejora ambiental
- Facilitar un distintivo a las empresas que garantizan los mínimos establecidos en la norma, mediante la certificación, que les suponga una ventaja competitiva en el mercado.

En la norma se especifican los requisitos a aplicar en el proceso de diseño y desarrollo, para la mejora de los productos y servicios de una organización, a través de un sistema de gestión ambiental.

Su implantación facilita a la organización, en particular a los componentes de los equipos de diseño, la incorporación en sus tareas diarias de una sistemática para identificar, controlar y mejorar de forma continua los aspectos ambientales de los productos y servicios que diseñan.

En ella se establecen las bases de un sistema de gestión ambiental del proceso de diseño y desarrollo, integrable con otros sistemas de gestión, que permite a las organizaciones demostrar mediante la certificación, el cumplimiento voluntario de unos requisitos que les diferenciarán de otras empresas.

Se certifica que en todo el proceso de diseño y desarrollo se han tenido en cuenta las afecciones ambientales del producto para reducirlas. De esta forma todos los productos diseñados o rediseñados por la organización incorporan alguna mejora ambiental, sin transferir los impactos de una etapa a otra del ciclo de vida.

### **EN 15804:2012. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto**

La norma, en su último borrador pendiente de la aprobación final, establece los criterios para desarrollar las reglas de categoría de producto (RCP) para todos los productos y servicios relacionados con la construcción, basada en la ISO:14025:2010, que trata las etiquetas y declaraciones ambientales de tipo III.

Proporciona una estructura para garantizar que todas las Declaraciones ambientales de producto (DAP) de los productos de construcción, servicios de construcción y procesos de construcción se obtienen, verifican y presentan de una forma armonizada.

Las principales características de las RCP que define la norma son:

- Definen los parámetros a declarar y la forma en que se recopilan y consignan en el informe
- Describen qué etapas del ciclo de vida de un producto se consideran en la DAP y qué procesos se van a incluir en las etapas del ciclo de vida
- Definen las reglas para el desarrollo de escenarios
- Incluyen las reglas para el cálculo del inventario del ciclo de vida y la evaluación del impacto del ciclo de vida en que se apoya la DAP, incluyendo la especificación de la calidad de los datos a aplicar
- Incluyen las reglas para consignar la información ambiental y sanitaria predeterminada, que no está cubierta por el ACV de un producto, proceso y servicio de construcción, cuando sea necesario
- Definen las condiciones en las que los productos de construcción se pueden comparar sobre la base de la información proporcionada por las DAP.

La norma define cuatro posibles etapas en el ciclo de vida del edificio a tener en cuenta:

- A1-3. Etapa de producto, que incluye a su vez tres submódulos: extracción y procesado de materias primas, transporte al productor y manufactura del producto. Estos tres submódulos son obligatorios en cualquier tipo de DAP que se desarrolle
- A4-5. Etapa de construcción, que incluye el transporte de los productos de construcción a obra y el propio proceso de construcción del edificio
- B1-7. Etapa de uso, incluyendo el consumo de agua y energía del edificio y energía del edificio y definiendo las condiciones de mantenimiento, reparación, sustitución y renovación de elementos constructivos en el mismo
- C1-4. Etapa de fin de vida, que incluye la demolición del edificio y las posibles fases de procesado, transporte y depósito final de los residuos generados

### **Código técnico de edificación en España (CTE, 2009). Documento Básico HE - Ahorro de energía**

Se pretende establecer un marco para conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

La correcta aplicación de cada sección supone el cumplimiento de la exigencia básica correspondiente. La correcta aplicación del conjunto del DB supone que se satisface el requisito básico "Ahorro de energía" necesario para la legalización.

El módulo que afecta al presente estudio es el HE 5. Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

En los edificios que así se establezca en este CTE se incorporarán sistemas de captación y transformación de energía solar en energía eléctrica por procedimientos fotovoltaicos para uso propio o suministro a la red. Los valores derivados de esta exigencia básica tendrán la consideración de mínimos, sin perjuicio de valores más estrictos que puedan ser establecidos por las administraciones competentes y que contribuyan a la sostenibilidad, atendiendo a las características propias de su localización y ámbito territorial.

### **IEA PVPS Task 12, LCA Report:2009. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity**

Este programa de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) tiene como misión mejorar los esfuerzos internacionales de trabajo y colaboración, para poder acelerar el desarrollo y despliegue de la energía solar fotovoltaica como una opción importante de energía renovable y sostenible, creando un marco teórico y metodológico sobre la forma de llevar a cabo el inventario del análisis del ciclo de vida y las evaluaciones de impacto de los sistemas solares fotovoltaicos de producción de energía.

Los objetivos generales son los siguientes:

- Cuantificar el perfil ambiental de la energía fotovoltaica en comparación con otras tecnologías de generación energética
- Definir y hacer frente a los aspectos ambientales, de seguridad y a las cuestiones de sostenibilidad que son importantes para el crecimiento del mercado fotovoltaico
- Definir unas recomendaciones sobre consideraciones y requisitos técnicos a tener en cuenta para un correcto ACV de los sistemas en estudio

## **5. METODOLOGÍA ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología válida para determinar, clasificar y cuantificar los impactos ambientales de un producto o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas que lo constituyen hasta que se convierte en un residuo (es por ello, que también es conocido como el análisis “desde la cuna a la tumba”).

Tal y como queda reflejado en la norma ISO 14044:2006, la metodología ACV permite determinar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto a lo largo de su ciclo de vida: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos potenciales asociados a estas entradas y salidas e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación a los objetivos del estudio.

### **5.1 Breve historia**

El ACV es un instrumento relativamente reciente que ha crecido rápidamente hasta convertirse en un procedimiento estándar para los científicos e ingenieros ambiental, es útil para investigar, evaluar y optimizar el desempeño ambiental de cualquier producto o proceso productivo.

Los orígenes del ACV se remontan a estudios realizados en la década de los 70, destinados a optimizar el consumo de energía en un contexto en el que éste representaba altos costes a ciertos sectores industriales. Estos fueron acompañados de estudios más amplios teniendo en cuenta también los consumos de materias primas, y, finalmente, también las emisiones producidas.

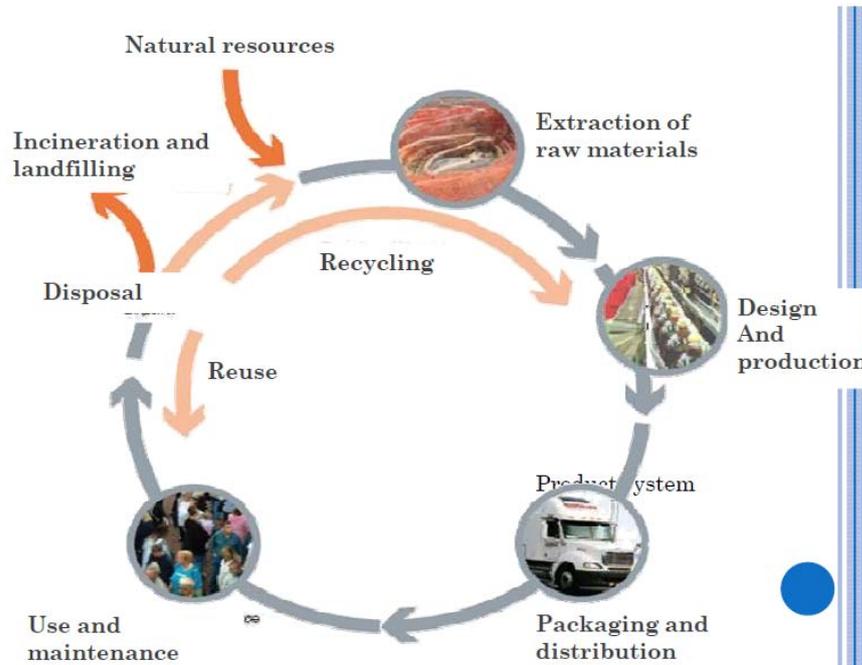
Probablemente pionero en el tipo de análisis multi-criterio, teniendo en cuenta una amplia gama de indicadores ambientales, incluyendo la extracción de materias primas y posibles escenarios de eliminación de residuos. El primero estudio que se llevó a cabo fue realizado por H.E. Teastley para la empresa Coca-Cola en 1969, que, contra toda expectativa, argumentó que las botellas de plástico eran ambientalmente preferibles a las de vidrio.

En los años siguientes, el ACV se convirtió gradualmente en una herramienta más sofisticada, y se estandarizó, finalmente, por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) en 1993 [Consoli et al., 1993]. De acuerdo con la definición original de SETAC, modificada posteriormente por LCA-Nordic [Lindfors et al, 1995.], un Análisis del Ciclo de Vida es: "Un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas y los impactos generados por un producto o actividad mediante la identificación y descripción cuantitativa de la energía consumida, los materiales utilizados y los residuos liberados al medio ambiente. La evaluación incluye el ciclo de vida del producto o actividad, que abarca desde la extracción y transformación de materias primas, fabricación, distribución, uso, reutilización y mantenimiento, hasta el reciclaje o gestión final del producto, conocido con la frase “de la cuna a la tumba”. Este análisis se ocupa de los impactos ambientales del sistema estudiado en las áreas de los ecosistemas, la salud humana y el agotamiento de los recursos.

## **Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Una ampliación de este primer concepto lleva a otra conocida frase dentro del ACV "de la cuna a la cuna", en la que se hace hincapié a la fase de reciclado de los componentes del sistema como la forma primera y más importante para limitar la carga generada sobre el medio ambiente.

A continuación se muestra una ilustración del ciclo de vida de un producto:



**Figura 16. Ciclo de vida de un producto**

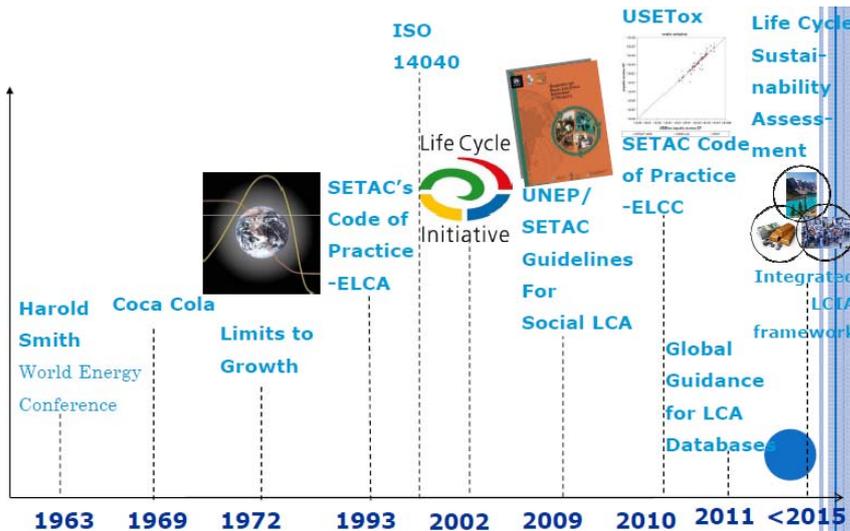
*Fuente: [Valdivia, S. et al, 2010]*

A finales de la década de 1990 la Oficina de Normalización Internacional (ISO) inició un gran esfuerzo para la normalización completa de los ACVs, con la creación de un conjunto de cuatro normas: ISO 14040 (1997), 14.041 (1998), 14042 y 14043 (2000). Actualmente ya sustituidas por las nuevas normas ISO 14040 y 14044 (2006).

A partir del año 2000 también se empieza a hablar de ACV en una perspectiva de gestión del ciclo de vida más integral, incorporando no solo los aspectos e impactos ambientales sino también consideraciones económicas y sociales. Es en este momento cuando despegó el planteamiento y desarrollo metodológico del Life Cycle Costing (LCC) y del Social Life Cycle assessment (S-LCA).

Posteriormente aparecen diversas iniciativas internacionales con el objetivo de difundir y armonizar el ACV como la European Platform on LCA, la UNEP-SETAC Life Cycle Initiative y la Internacional Life Cycle Database (ILCD), referentes hoy en día dentro del sector.

A continuación se muestra una ilustración sobre la evolución cronológica de algunas herramientas de ciclo de vida usadas en todo el mundo.



**Figura 17. Herramientas de ciclo de vida utilizadas en todo el mundo**

Fuente: [Valdivia, S. et al, 2010]

## 5.2 Descripción general del Análisis de Ciclo de Vida

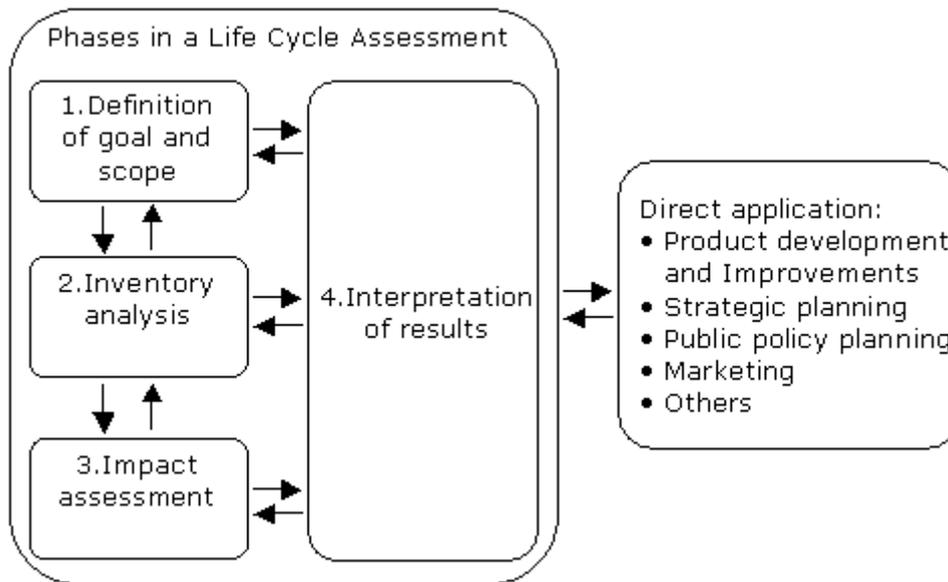
Los ACV pueden describirse por medio de las siguientes características [ISO, 2006a]:

- Perspectiva de ciclo de vida: tienen en cuenta toda la vida del producto, desde la extracción de materias primas, energía y materiales en la producción y la manufactura, el uso y mantenimiento, y el final de la vida útil y desmantelamiento.
- Enfoque ambiental. Los ACV pueden combinarse con otras herramientas para evaluar aspectos económicos y sociales.
- Enfoque en una unidad funcional: el estudio se estructura a partir de una unidad funcional que define qué es lo que está siendo estudiado.
- Enfoque iterativo: elaboración por fases y entre fases.
- Transparencia: garantiza una apropiada interpretación de resultados.
- Comprensión: los ACV consideran aspectos del ámbito natural, medio ambiente, salud humana y recursos. Considerando todos estos aspectos en un estudio pueden identificarse potenciales trade offs.
- Prioridad en el enfoque científico.

## 5.3 Fases (ISO, 2006a)

Los ACV consisten en cuatro fases principales como se muestra en la figura siguiente:

1. Definición de objetivos y alcance
2. Análisis de inventario
3. Evaluación de impactos
4. Interpretación



**Figura 18 Fases y estructura del ACV**

*Fuente: (ISO, 2006a)*

### 5.3.1 Definición de objetivos y alcance

En esta primera etapa se deben identificar las razones que llevan a aplicar el Análisis de Ciclo de Vida y también establecer el contexto en el cual va a desarrollarse. Para esto último se deben definir:

- El sistema del producto: es la suma del producto y de todo el conjunto de elementos que se relacionan con el mismo a lo largo de su ciclo de vida, permitiendo que llegue a desarrollar su función.
- La unidad funcional: medida de la función de un producto. Todos los datos del sistema se referirán a esta unidad.
- Límites del sistema: debe especificarse claramente cuál de los componentes o procesos que forman el sistema del producto serán incluidos en el análisis y cuáles quedarán fuera.
- Las reglas de asignación de las cargas ambientales: deben repartirse las cargas ambientales totales del sistema entre los distintos productos o funciones que se incluyen en el mismo.
- La categorías de impacto y la metodología de evaluación de impacto que serán utilizadas
- La calidad de los datos: cobertura temporal, geográfica o tecnológica de estos datos.
- Las hipótesis consideradas: estas pueden afectar sensiblemente a los resultados del análisis y por este motivo deben estar justificadas.



**Figura 19 Límites del sistema en un ACV**

*Fuente: Cátedra UNESCO-ESCI a partir de (ISO, 2006a)*

### 5.3.2 Análisis de inventario

Esta fase conlleva la resolución de los balances de energía y de materia del sistema, de forma que los datos finales del inventario se recojan en tablas y estén referidos a la unidad funcional. Se trata de la fase del ACV que más tiempo lleva debido a que, normalmente, el número de parámetros a considerar es numeroso. Esta etapa incluye:

- Identificación y cuantificación de las entradas y salidas que tienen lugar en todas las etapas del ciclo de vida, esto es, balances de energía y de materia.
- Trazado de diagramas de flujo.
- Descripción de cada operación unitaria y relación de los parámetros del inventario correspondientes a cada una, junto con las unidades en que se expresan.
- Listado de las unidades de medida.
- Descripción de las técnicas empleadas para la recogida de los datos y de cálculo.

El análisis del inventario (ICV) se basa en los principios del análisis de sistemas. Un sistema se define como una serie de operaciones que efectúan una función definida con precisión. El resultado o producto de un sistema puede considerarse también como un servicio.

El análisis del Inventario del ciclo de vida (ICV) cuantifica los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua derivados de todos los procesos que están dentro de los límites del sistema. Los resultados de un estudio de ese tipo generan un inventario de cargas medioambientales asociadas a la unidad funcional.

Tres tipos de datos de aprovisionamiento son posibles, en orden descendente de fiabilidad preferencias según la norma, desde:

- Los datos obtenidos a través de mediciones directas, realizadas por el analista de LCA que él / ella o por los fabricantes de los productos analizados. Estos suelen ser

los datos más confiables de todo, sin embargo, pueden ser muy específica para el proceso en estudio, y no debe ser descuidada transferidos a otros análisis.

- Los datos de estudios anteriores disponibles en la literatura científica y, más concretamente, en puesta al día y controlaron de forma cruzada internacional de bases de datos LCI (véase la sección 1.4). El analista tiene menos control directo sobre ellos, pero tienen la ventaja de haber sido revisados por expertos antes de los analistas, y con frecuencia son un promedio ponderado de varios procesos similares.
- Datos inferidos por medio de conjeturas y estimaciones, con base en los análisis previos y la experiencia del analista. Estos son inevitablemente afectada por la mayor incertidumbre, sin embargo, si el analista tiene la suficiente experiencia en el campo, que a menudo pueden seguir siendo muy aceptable.

En los límites del sistema generalmente se incluyen:

- La secuencia de producción principal, es decir, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación final del producto, inclusive, siempre dependiendo del alcance del estudio.
- Operaciones de transporte
- Producción y uso de combustibles
- Generación de energía, es decir, electricidad y calor
- Eliminación de todos los residuos del proceso
- Fabricación del embalaje de transporte

En los límites del sistema generalmente se excluyen:

- Fabricación y mantenimiento de equipos de producción
- Mantenimiento de plantas de fabricación, es decir, calefacción e iluminación
- Factores comunes a cada uno de los productos o procesos en estudio

El "final" del ciclo de vida puede definirse, según se afirma comúnmente, como el momento en que todos los residuos del sistema se devuelven a la tierra. En el caso de la evaluación del reciclaje y la incineración, ambas prácticas deberían ser consideradas sobre la base de hipótesis de que ocurriría si. En otras palabras, el reciclaje debe ser considerado en el contexto de las cargas/impactos ambientales evitados por los materiales vírgenes ahorrados. De forma similar, la incineración con recuperación de energía debería ser evaluada considerando las cargas/impactos ambientales que se evitan mediante la generación de calor y energía por medios como la incineración de combustibles fósiles.

Una vez que se han fijado los límites de un estudio determinado, la siguiente fase es recopilar los datos que constituirán la base para todos los cálculos.

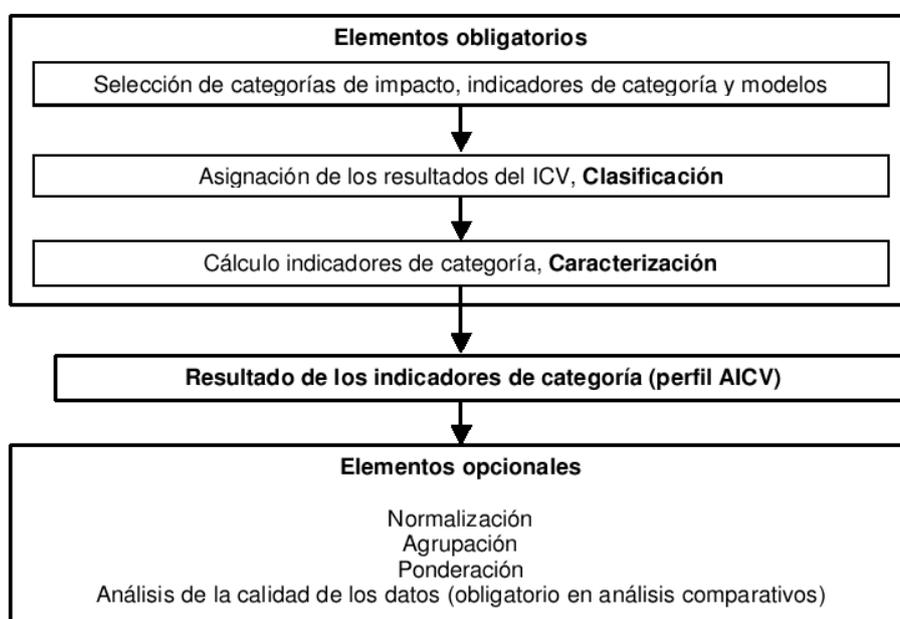
El propósito, alcances y límites de inventario ayudan a determinar el nivel o el tipo de información necesaria. Los objetivos de la calidad de los datos son las especificaciones de desempeño necesarias para la información de un inventario del ciclo de vida. Los indicadores de

la calidad de los datos constituyen características cualitativas o cuantitativas de los mismos e incluyen la aceptabilidad, el sesgo, la representatividad, así como otros atributos que miden el beneficio y la posible aplicación de los datos.

### 5.3.3 Evaluación de impacto

Los resultados del inventario son analizados para identificar y caracterizar los efectos potenciales que el sistema analizado tiene sobre el medio ambiente. Esta evaluación se desarrolla en diferentes etapas en las cuales los resultados del inventario se van reduciendo en cantidad y complejidad, haciendo más fácil su interpretación. Sin embargo, cada una de estas etapas van disminuyendo la objetividad inicial de los datos, pudiéndose llegar si se quiere a un único indicador que integra todos los impactos ambientales asociados al sistema.

Las etapas de las que puede constar una evaluación de impacto se encuentran en la figura y son descritas posteriormente.



**Figura 20** Etapas de la evaluación de impacto de un ACV

*Fuente: (ISO, 2006a)*

- Clasificación: los datos del inventario (entradas y salidas) se agrupan en diversas categorías en función del tipo de impacto ambiental al cual pueden contribuir
- Caracterización: dentro de cada categoría de impacto, los datos del inventario son agregados considerando el grado en que cada uno de ellos contribuye a aumentar el impacto ambiental correspondiente. Esto se realiza aplicando factores de caracterización que sean científicamente justificables y aceptados internacionalmente. Estos factores muestran la contribución relativa de un contaminante a una determinada categoría de impacto y en relación a un determinado compuesto al que se le da el valor de referencia “1” (por ejemplo, el CO<sub>2</sub> en el caso del cambio climático).
- Normalización: Se basa en un análisis de la importancia relativa de cada impacto considerado, mediante un proceso denominado “análisis técnico de significancia” (término propuesto por ISO), o “normalización” (término propuesto por SETAC). Esta etapa consiste en el cálculo de la contribución relativa del total de las cargas del producto/proceso en estudio a un impacto en un área y en un tiempo dado, de otra

forma, los datos de la caracterización se normalizan dividiéndolos por la magnitud esperada de cada una de las categorías de impactos para un área geográfica y en un momento temporal determinado (por ejemplo, la cantidad media de dióxido de carbono generada por una persona durante el día). Si bien ISO no considera obligada esta etapa, para SETAC la normalización es necesaria debido al hecho de que los valores que se obtienen durante la caracterización están expresados en diferentes unidades y la normalización hace posible su traslado a unidades que permitan su comparación y su interpretación posterior.

- **Valoración:** El objetivo es obtener un gradiente de importancia de los impactos considerados en la caracterización. Para ello se realiza un análisis cualitativo o cuantitativo de ellos, con el fin de establecer prioridades, debiendo incluirse puntos de vista políticos, valores sociales, valores de expertos ambientales, valores del que toma la decisión,... Esto lleva implícito cierto grado de subjetividad, aunque el procedimiento para incorporar factores de valoración puede tener en cuenta conocimientos científicos y los resultados, en principio, pueden ser empíricamente verificables. Esta etapa no es obligatoria, incluso no es recomendable, debido a la pérdida de objetividad y a la obtención de resultados muy agregados que no permiten una valoración detallada.

## **6. DESARROLLO DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA ESPECÍFICO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE 100 KWP**

### **6.1. Objetivo**

El objetivo del estudio es evaluar los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del producto estudiado, detectando los factores clave que los determinan en mayor medida (como, fases del ciclo de vida, componentes, etc.). Esta información ayudará a la empresa a impulsar acciones de mejora y a los responsables del proyecto RENIA a desarrollar una aplicación informática para la evaluación, ecodiseño y comunicación ambiental de sistemas solares utilizados en edificación. Más específicamente será uno de los casos bases que se utilizaran como referencia para el desarrollo de las reglas de categoría de producto (RCP) sobre sistemas solares en edificios, perteneciente a su vez al plan Nacional de investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2008-2011.

También servirá como caso base de estudio del presente proyecto de final de máster. Por motivos de confidencialidad, las empresas colaboradoras prefieren mantenerse en el anonimato.

### **6.2. Destinatarios previstos**

Este estudio ha sido realizado para la presentación del presente proyecto final de máster, aprovechando los datos facilitados por el fabricante del producto evaluado destinados al desarrollo del proyecto Renia. Además, los responsables del proyecto utilizarán los resultados, datos y conclusiones extraídas del mismo en el desarrollo de una aplicación informática para la evaluación, ecodiseño y comunicación ambiental de sistemas solares utilizados en edificación.

### **6.3. Descripción del producto analizado**

Los sistemas solares fotovoltaicos tienen como finalidad la producción de electricidad a partir de la radiación solar que incide sobre ellos. Su instalación puede ser conectada a la red para volcar la energía producida a ésta o, aislada, donde se almacena la energía producida en una serie de baterías para su posterior consumo. Este último caso no se ha tenido en cuenta para

el presente proyecto, considerando que el sistema productivo de electricidad es exactamente igual que en el caso de conexión a red, solo incorporando como elementos adicionales las baterías de almacenamiento.

Genéricamente un sistema solar fotovoltaico conectado a red se compone de los siguientes elementos:

- **Los paneles**

En un panel fotovoltaico están montadas un número de células solares con un área total de 1,0 - 2 m<sup>2</sup> y un laminado de vidrio encapsula las células solares para su protección.

- **Cableado**

Necesario para transmitir la energía eléctrica generada de la instalación a la red. La sección de cable viene en general determinada por el criterio más restrictivo entre caída de tensión y máxima intensidad admisible.

- **La estructura de montaje**

En la mayoría de los casos se añade un marco de aluminio alrededor de los bordes exteriores, aunque también existen otros sin marco o realizados con materiales alternativos.

- **Convertidor DC/AC**

El convertidor AC/AC consta de un rectificador de alta frecuencia, un filtro y un inversor. Éste es el encargado de convertir la energía en corriente continua proveniente de las células fotovoltaicas a alterna, para ser volcada a la red.

- **Equipos de consumo**

Es necesario conocer la tensión nominal y la potencia de funcionamiento para dimensionar la instalación.

El parámetro estandarizado para clasificar este tipo de instalaciones es la potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación de 1000 W/m<sup>2</sup>
- Temperatura de célula de 25 °C

El producto evaluado es un sistema solar fotovoltaico de generación de energía eléctrica con una potencia nominal de 100 kWp, basado en seis estructuras inclinadas de 90 paneles solares cada una. A continuación se detallan las principales características técnicas facilitadas por el fabricante.

Modelo comercial	-----
Tecnología	Células policristalinas
Dimensiones (mm)	1680 x 990 x 40
Peso (kg)	22
Potencia nominal PMPP (W)	245
Tensión MPP (V)	30,43
Intensidad MPP (A)	8,05
Tensión de vacío (V)	37,65
Corriente de cortocircuito (A)	8,6
Células (unidades)	60
Vidrio	Vidrio solar texturizado de 4mm
Backsheet	Lámina multicapas de PVF y PET
Marco	Aluminio anodizado
Conexión	2 x 1,2 m de cable

**Tabla 4 Características técnicas del panel fotovoltaico utilizado**

*Fuente: Fabricante / Propia*

#### **6.4. Alcance del estudio**

A continuación se recogen los aspectos, tanto generales como específicos, que definen el alcance del presente estudio.

#### **6.5. Unidad funcional**

Se ha escogido una unidad funcional de tipo físico: “1 kWp de una instalación fotovoltaica de silicio multicristalino de 100 kWp durante toda su vida útil”. Así todos los impactos generados irán referenciados a 1 kWp de la potencia pico de la instalación.

Para el análisis de la fase de uso se referenciarán los impactos a “1 kWh generado por una instalación fotovoltaica de silicio multicristalino de 100 kWp durante toda su vida útil”, incorporando de esta manera dos escenarios de generación en situaciones geográficas distintas, Málaga y Barcelona, con sus respectivas radiaciones solares.

Normalmente en la metodología de ACV se referencian todos los resultados a una única unidad funcional. En este caso concreto de estudio, se ha considerado importante separa las fases de fabricación del sistema y la etapa de uso debido a que es un sistema productor de energía y los impactos evitados en la fase de uso compensan los generados en la mayoría de

casos durante las otras etapas. De esta forma presentando los resultados de forma separada se puede elaborar una valoración más detallada del sistema estudiado.

## **6.6. Vida útil de referencia**

A continuación se describen los tiempos de referencia establecidos para los productos y subproductos estudiados según el documento Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, elaborado por la IEA:

- Módulos: 30 años para las tecnologías de módulos más maduras (por ejemplo, encapsulación vidrio-Tedlar), la esperanza de vida suele ser menor en la encapsulación en papel de aluminio solamente, por ejemplo.
- Inversores: 15 años para las plantas pequeñas residenciales.
- Estructura: 30 años para instalación montadas e integradas en tejado o fachada.
- Cableado: 30 años
- Bienes de equipo: El tiempo de vida se establece en 30 años, aunque debido al rápido desarrollo de la tecnología, puede ser inferior.

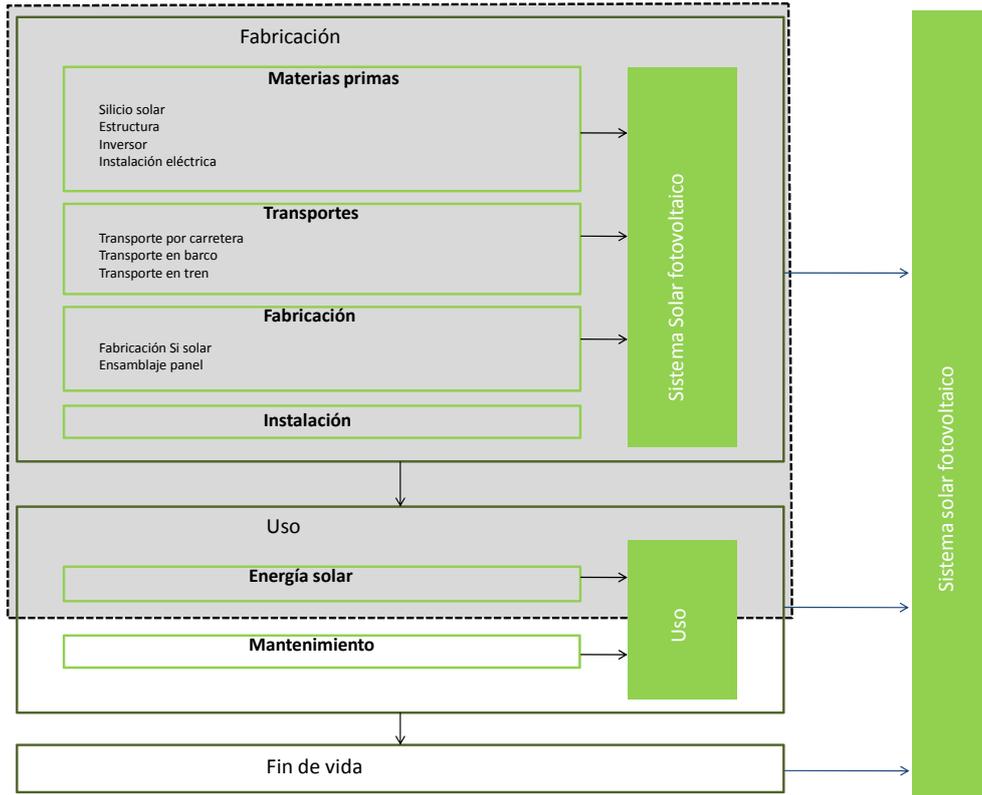
Finalmente se ha modificado la vida útil del panel y la instalación, en 25 años, ya que así lo establece el productor en las especificaciones técnicas del producto.

## **6.7. Límites del sistema**

Los límites del sistema aplicados incluyen las siguientes etapas:

- **Fabricación**
  - Suministro de materias primas
  - Transporte materias primas
  - Fabricación producto
    - Preparación materias primas
    - Montaje
    - Transporte y tratamiento de residuos
    - Confeccionado y empacado
- **Instalación**
  - Transporte
  - Procesos de instalación y construcción
- **Uso**
  - Uso de la energía operacional
  - Uso del agua operacional

A continuación se muestra el diagrama de flujos “*de la cuna a la tumba*” del sistema estudiado:



**Figura 21 Diagrama de flujos del sistema solar fotovoltaico estudiado**

*Fuente: Propia*

Respecto al alcance del ciclo de vida, el objetivo es cubrir el ciclo “De la cuna a la tumba”. Inicialmente se propuso la posibilidad de que se abarcaría el ciclo de vida completo incluyendo la fase de uso, el desmantelamiento y post-procesado de los elementos que componen las instalaciones.

Sin embargo dado que en el caso del sector fotovoltaico, el fin de vida de los materiales está todavía poco estandarizado, y puede suponer una dificultad a la hora de obtener datos representativos e incluirlo en el análisis, se ha optado por limitar el estudio de análisis de ciclo de vida hasta la fase de uso inclusive, dejando fuera también el mantenimiento, dado que no se tienen datos de primera mano por parte de las empresas colaboradoras.

## 6.8. Criterios para la inclusión de entradas y salidas

Se ha incluido más del 99% de todas las entradas y salidas de masa y energía del sistema quedando fuera únicamente el fin de vida del sistema fotovoltaico, como se ha comentado anteriormente, así como las emisiones difusas generadas en fábrica debido a la dificultad de contabilización.

## 6.9. Hipótesis y limitaciones

A continuación se detallan las principales hipótesis que ha sido necesario tomar para el correcto desarrollo del modelo del producto realizado. Para inventariar las cargas ambientales asociadas a la extracción y transporte de las materias primas, consumos energéticos y emisiones generadas, se ha utilizado la base de datos Ecoinvent 2.0. Ésta es una de las bases de datos para inventarios de ACV más utilizadas internacionalmente, tiene la confianza de la comunidad

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

científica y en ella se pueden encontrar más de 4000 procesos modelados en colaboración con distintos centros de investigación y sectores industriales.

Para el desarrollo del modelo se ha utilizado como caso base el proceso “*3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, on roof*” de la base de datos Ecoinvent 2.0, que se refiere a un sistema solar fotovoltaico de generación de electricidad con una potencia pico de 3kWp montado en el tejado de un edificio. Para ello se han escalado todos los procesos, existentes en la base de datos, a los datos de primera mano facilitados por el fabricante.

Para los consumos energéticos que se producen en las distintas etapas de producción se ha realizado un análisis de contribución, ya que se conoce que el proceso de producción de módulos fotovoltaicos es muy intensivo energéticamente. Se ha llegado a la conclusión que es importante llegar a conocer donde se ha producido el silicio solar, material encargado de realizar la transformación fotoquímica de la luz en electricidad, ya que la mayor parte del consumo energético es debido a la obtención de éste, afectando de forma significativa el mix específico del país donde se produce.

Según el informe realizado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), se obtiene la siguiente tabla, donde se puede observar la producción de Silicio solar en la primera columna de la tabla clasificada por países y toneladas de producción.

Country (1)	Solar PV Grade Si Feedstock production (tonnes)	Production of Ingots (tonnes)	Production of wafers (MW)	Cell Production (all types, MW)	Cell production capacity (MW/year)	Module production (MW) (2)		
						wafer based (sc-Si & mc-Si)	thin film (a-Si & other)	Module production capacity (MW/year)
AUS	–	–	–	8	50	8	–	38
AUT	–	–	–	65	117	112	–	na
CAN	8 (3)	–	–	0,3	na	110	0,3	>506
CHE	–	900	120	>11	>40	12	>2,2	>40
CHN	45000	na	na	9000	na	10000 (4)	na	na
DEU	30 100	1200	1990	2700	3280	1800	660	3200
DNK	–	–	–	–	–	2	–	2
ESP	–	na	na	100	335	699	na	2004
FRA	Pilot (5)	680	70	na	71	na	na	525
ITA	na	–	–	>91	215	>305	–	495
JPN	6302	3795	669	2311	>2629	>1957	347	3545
KOR	20 000	na	800	770	1355	925	–	1890
MEX	–	–	–	60	–	172	60	275
MYS	–	–	–	na	1559	na	na	1182
NOR	<6000	na	1410	na	225	–	–	–
PRT	–	–	–	5,5	40	70	5,5	185
SWE	–	–	–	–	–	181	–	291
TUR	–	–	–	–	–	21	–	27
USA	42561	na	624	1133	2112	798	467	2029

Notes:

(1) Although a number of IEA PVPS countries are reporting on production of feedstock, ingots and wafers, cells and modules, the picture from the national survey reports of the PV industry supply chain is by no means complete and consequently these data are provided more as background information.

(2) mc-Si (multicrystalline silicon) includes modules based on EFG and String Ribbon cells. ‘Other’ refers to technologies other than silicon based. The total module production and module production capacity data for some countries were not available.

(3) Plus 350 metric tonnes Cadmium Telluride production that is exported for the fabrication of thin-film CdTe modules

(4) Figure includes both wafer based and thin film modules

(5) Pilot plant with 200t/yr capacity

**Tabla 5 Producción mundial de silicio solar**

*Fuente: Trends in photovoltaic applications Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010*

## **Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Por lo tanto, se han utilizado de forma proporcional los mixes energéticos de los países especificados por el fabricante, como se detallará mas adelante con el inventario de datos.

El productor de los paneles, en este caso, realiza la compra de celas fotovoltaicas a Taiwan i Estados Unidos. Se ha tenido que crear el mix eléctrico de Taiwan, no disponible en las bases de datos existentes. Para ello se ha obtenido la información pertinente de la web de la oficina de energía de Taiwan. Resultando los siguientes porcentajes para 2010:

	%
Carbón	32,10%
Petróleo	49,00%
Gas	10,20%
Nuclear	8,30%
Hidro	0,00%
Otros	0,50%

**Tabla 6 Mix eléctrico Taiwan**

*Fuente: <http://www.moeaboe.gov.tw>*

Mediante estas contribuciones se ha desarrollado el mix eléctrico de Taiwan, basado en los procesos ya existentes de producción de electricidad en otros países.

Para el caso del inversor de tensión necesario en los sistemas fotovoltaicos para la transformación de la electricidad de continua a alterna, encontramos varios modelos en la base de datos:

- Inverter 500W, at plant
- Inverter 2500W, at plant
- Inverter 500 kW, at plant

De éstos se descarta el de 500 kW, debido a que está destinado a grandes instalaciones, no realizadas en edificios. Para la correcta modelización de este componente se han escalado todos los inputs en función de la potencia, ya que se ha comprobado su relación proporcional con los impactos generados. Se toma de referencia para el escalado el inversor de 2500W.

Para la modelización de los transportes de materias primas y/o productos intermedios se han utilizado los hallados en el proceso de base utilizado de la base de datos ecoinvent, que son:

- Transport, freight, rail
- Transport, transoceanic freight ship
- Transport, lorry 20-28t, fleet average
- Transport, lorry >16t, fleet average
- Transport, van <3.5t

Dada la dificultad por parte de los fabricantes de conocer la tipología de vehículos utilizados muchas veces por transportistas o proveedores, se consideran suficientemente representativos estos modelos de transporte. Cada transporte ha sido modelado en función de la cantidad de material transportada y la distancia desde la cual ha sido transportada, dado que estos datos si están disponibles.

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Para facilitar la obtención de datos de los fabricantes de ciertos valores requeridos, se han tomado datos teóricos de la base de datos Ecoinvent 2.0 para las entradas con una contribución inferior al 1% en masa, valorando particularmente la contribución al impacto general del producto. Igualmente si el fabricante no ha podido facilitar cierta información necesaria también se han tomado algunos valores teóricos de referencia, ya que no siempre se tiene información directa, debido a las largas cadenas de proveedores e intermediarios que existen hoy en día en la fabricación de productos.

Para la etapa de uso, se asume un rendimiento del sistema (Performance ratio) de 0,75 definido por la IEA [IEA, 2011], y se presentan dos escenarios de producción posibles, situados en dos situaciones geográficas distintas con valores de radiación diferentes, obtenidos del Código Técnico de Edificación, del Ministerio de Fomento de España [Ministerio de fomento de España, 2006]. En la siguiente tabla se observan detalladas:

	Radiación [kWh/m <sup>2</sup> día]	Radiación [kWh/(m <sup>2</sup> ·año)]	PR	Producción anual instalación [kWh/(m <sup>2</sup> ·año)]	Producción total (20 años al 100% y 5 años al 80%)
Barcelona	3,8	1387	0,75	104025	2496600
Málaga	4,6	1679	0,75	125925	3022200

**Tabla 7 Cálculos de producción de la instalación estudiada**

*Fuente: Código Técnico Edificación / Propia*

Por otra parte se considera una pérdida de rendimiento con el tiempo. Considerándose una capacidad de producción del 100% los primeros 20 años, y de un 80% en los últimos 5 años de vida.

### **6.10. Requisitos de calidad de los datos**

Los datos utilizados en el estudio de ACV deben cumplir una serie de requisitos en cuanto a precisión, integridad, coherencia y representatividad que aseguren una buena calidad.

<b>Exactitud</b>	Siempre que sea posible se mostrará la variabilidad de los datos utilizados.
<b>Alcance</b>	Se utilizarán medidas directas o bien se desarrollarán modelos basados en información básica sobre el proceso siempre que sea posible, si no fuera así se deberán especificar las hipótesis tomadas
<b>Homogeneidad</b>	La aplicación de la metodología del estudio será uniforme para todos los sistemas analizados
<b>Reproducibilidad</b>	Se describirán los métodos y los datos utilizados de manera que puedan ser reproducidos por parte de un profesional independiente
<b>Integridad</b>	Se pretende incluir todos los procesos relevantes de los diferentes tipos paneles disponibles y que representen la situación específica de cada uno de ellos.
<b>Coherencia</b>	Para asegurar la coherencia sólo se utilizarán datos con el mismo nivel de detalle y desarrollados bajo las mismas consideraciones metodológicas.
<b>Representatividad</b>	Se procurará reflejar la población real de interés (ámbito geográfico, temporal y tecnológico)
<b>- cobertura temporal</b>	Se utilizarán datos con una antigüedad máxima de 10 años.
<b>- cobertura geográfica</b>	Se aplicarán modelos referentes al área geográfica de los procesos productivos.
<b>- cobertura técnica</b>	En la producción de cualquier material, fuente energética o utilidad se considerarán tecnologías actuales.

**Tabla 8 Calidad de los datos utilizados en el estudio**

*Fuente: Cátedra Unesco del Ciclo de Vida y Cambio Climático*

Para cumplir con estos requisitos y asegurar que los resultados sean fiables se utilizarán datos suministrados por las empresas colaboradoras referentes al año 2011, así como con información ambiental consistente incluida en la base de datos Ecoinvent 2.0. En el Inventario de Ciclo de Vida se documentarán las fuentes de la información utilizadas en cada caso.

### **6.11. Comparaciones entre sistemas**

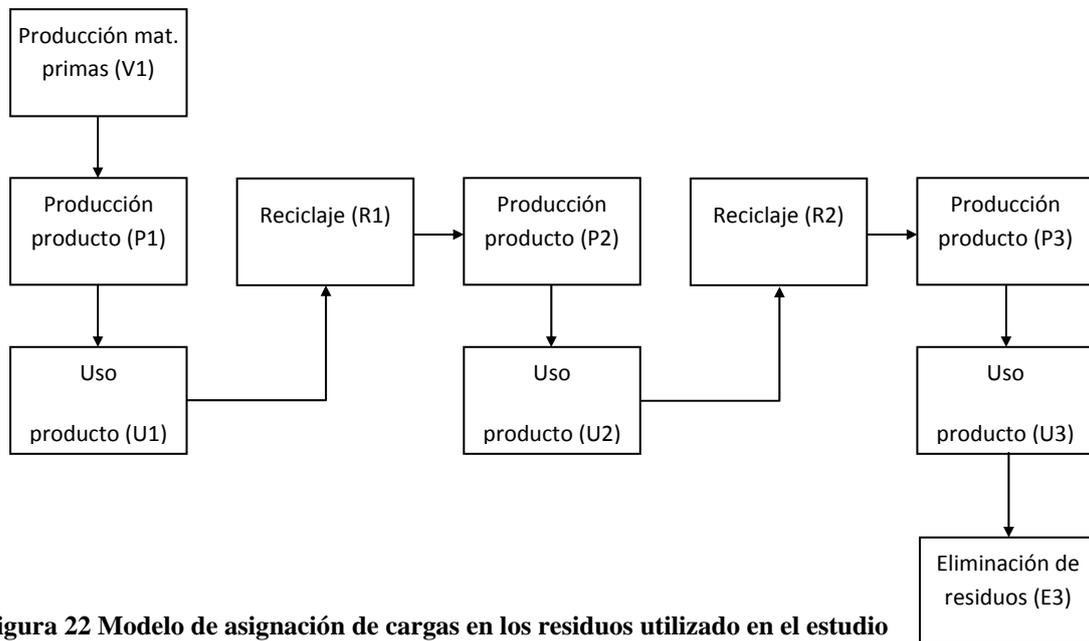
En el caso de estudios comparativos es necesario que para los distintos sistemas se utilicen: la misma función, unidad funcional, límites del sistema, calidad de los datos, procedimientos de asignación y reglas de decisión en la evaluación de entradas y salidas y de impacto. Cualquier diferencia existente en relación a estos parámetros se deberá indicar. En el presente caso se realiza una comparación con el caso teórico de la base de datos ecoinvent. Siendo esta, totalmente consistente en cuanto a límites del sistema y requisitos de calidad de datos.

## 6.12. Multifuncionalidad y asignación de cargas

En el caso de los sistemas productivos estudiados se han detectado varios procesos que presentan problemas de asignación y cuya solución puede afectar significativamente el resultado. A continuación se describen las soluciones adoptadas:

## 6.13. Reciclaje en bucle abierto

Para la correcta asignación de cargas en lo que concierne a la generación de residuos y/o la utilización de éstos como materia prima, se utiliza el bucle abierto, reconocido como el mejor método para realizar la asignación como norma general.



**Figura 22 Modelo de asignación de cargas en los residuos utilizado en el estudio**

*Fuente: Cátedra Unesco del Ciclo de Vida y Cambio Climático*

Existen diferentes métodos para asignar las cargas de los procesos comunes a los distintos sistemas (producción de materias primas V1, reciclaje R1 y R2, eliminación de residuos E3). Los autores han optado por aplicar el conocido como “cut-off”, de manera que el reciclaje de residuos se asigna al ciclo del segundo producto [4]. Este método penaliza en mayor grado a aquellos sistemas que son incapaces de reintroducir el material utilizado en el sistema productivo. Así, según este método las cargas ambientales (C) se reparten entre los tres productos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 C1 &= V1 + P1 + U1 \\
 C2 &= R1 + P2 + U2 \\
 C3 &= R2 + P3 + U3 + E3
 \end{aligned}$$

**Figura 23 Flujos del sistema**

*Fuente: Cátedra Unesco del Ciclo de Vida y Cambio Climático*

Por lo tanto, en el caso de utilización de material reciclado se incluyen los procesos posteriores a la disposición de los residuos a reciclar (a partir de los cuales se obtendrá el material secundario):

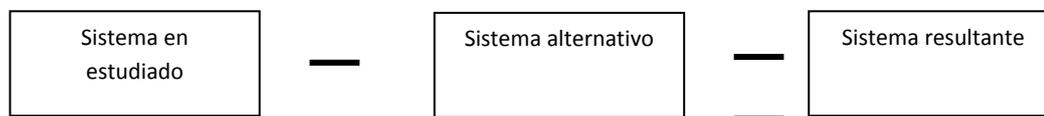
- transporte hasta una planta de selección,
- operaciones de separación y clasificación de materiales reciclables
- transporte hasta la planta de reciclaje
- transformación del residuo hasta la obtención del material secundario.

En consecuencia, en el caso de la gestión de residuos a lo largo del ciclo de vida de los sistemas estudiados no se incluirán los procesos asociados al reciclaje en caso que los hubiera, sino que el sistema finaliza en la disposición del residuo. En cambio, sí se incluirán los procesos de recogida, transporte y gestión asociados a la incineración y al vertido de aquellos residuos que no se reciclen (caso C3).

Por tanto, en el caso de los componentes del sistema fabricados en parte con material reciclado, se incluirá en su sistema la obtención y procesado del material reciclado. Por otro lado, no se incluirá el proceso de recogida y tratamiento de aquellos residuos generados a lo largo del ciclo de vida que se destinen al reciclaje.

#### **6.14. Energía desplazada mediante los sistemas estudiados**

Los procesos estudiados son sistemas diseñados para la producción de energía mediante fuentes renovables. Debido a esto, los sistemas desplazan la producción de energía mediante otras fuentes de generación más convencionales.



**Figura 24 Esquema de expansión del sistema**

*Fuente: Cátedra Unesco del Ciclo de Vida y Cambio Climático*

Para sistemas solares fotovoltaicos, se evita el consumo de energía eléctrica de la red. El problema que surge en el momento de realizar la expansión del sistema es que la electricidad se puede producir utilizando diferentes tecnologías con impactos ambientales muy distintos. Por otro lado, el perfil energético nacional de producción de electricidad no es representativo de los cambios marginales que se puedan producir en la demanda. Únicamente se verán afectadas aquellas tecnologías que sean elásticas a los cambios en la demanda (Weidema, B. et al, 2003).

Es fundamental, por tanto, escoger correctamente la tecnología desplazada por el sistema, es decir, la tecnología marginal de producción de electricidad en España en la actualidad. En trabajos previos de la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático, se han identificado las tecnologías marginales de producción de electricidad [Grupo de Investigación en Gestión Ambiental, Escola Superior de Comerç Internacional (UPF), 2008]. Así, algunas de las tecnologías de producción de electricidad se encuentran limitadas por motivos políticos, naturales, de calidad o una combinación de los mismos (Weidema, B. et al, 2003).

A continuación se analizan los tipos de centrales operativas en régimen ordinario en España y su retirabilidad<sup>1</sup> en la actualidad (Hernández, F., 2006):

- **Nuclear:** las centrales nucleares tienen unos costes de arranque y parada muy elevados, mientras que los costes variables son muy bajos. Funcionan como centrales de base, independientemente del precio de mercado. Se trata de una fuente “no retirable” de la producción del mercado.
- **Hidráulica:** su utilización depende del momento en que se produce la aportación natural de agua, así como del nivel de los embalses. Dado su bajo coste de generación y al ser una energía renovable se considera “no retirable”.
- **Carbón:** el uso del carbón nacional se establece en el “Plan nacional de reserva estratégica de carbón 2006-2012” (MITYC; 2006). Mientras este compromiso se mantenga vigente, esta tecnología se considerará “no retirable”. En cambio, la importación de carbón no está sujeta a ninguna obligación de compra, por lo que se considera “retirable”.
- **Fuel/gas:** las centrales térmicas de fuel y gas tienen unos costes de funcionamiento elevados y se ponen en marcha en situaciones de demanda elevada. Por lo tanto, pueden considerarse como “retirables”.
- **Ciclo combinado:** las centrales de ciclo combinado tienen unos costes de funcionamiento muy bajos. Su producción es muy flexible, aunque se ve limitada por el contrato de aprovisionamiento de gas. En la mayoría de los casos, se pueden considerar “retirables”.

En cuanto a las centrales operativas en régimen especial en España, cabe tener en cuenta que el “Plan de energías renovables en España 2005-2015” [MITYC; 2005] tiene el objetivo de promover su crecimiento en los próximos años. Por ello, se considera que estas energías son “no retirables”.

Finalmente, se ha analizado la evolución mensual de la cobertura de la demanda energética eléctrica durante el año 2007 (REE, F., 2006). Se puede ver como la fuente energética que presentó una mayor flexibilidad ante las variaciones en la demanda fueron las centrales de fuel/gas.

En base a toda esta información, se ha identificado como tecnología marginal la termoeléctrica a partir de fuel/gas. La Red Eléctrica Española (REE) no muestra en sus estadísticas el porcentaje de uso de fuel y de gas; para estimarlo, se han utilizado datos del Eurostat sobre el uso de combustibles fósiles en la producción de electricidad (EUROSTAT, 2007). El resultado obtenido es que estas centrales funcionan en un 67,3% con gas natural y en un 32,7% con fuel.

## **6.15. Energy Payback Time (EPBT)**

La producción de electricidad mediante un sistema fotovoltaica casi no emite contaminación durante su funcionamiento, no produce gases de efecto invernadero, y no utiliza recursos finitos del medio. Pero dentro de la metodología del ACV expuesta, se deben considerar todas las etapas referentes a un producto, y la producción del sistema fotovoltaico sí requiere energía y materiales (por ejemplo, durante la purificación y cristalización del silicio se

---

<sup>1</sup> Citando a [Hernández, F., 2006] “la retirabilidad o no retirabilidad hace referencia a la capacidad de retirar producción del mercado de forma rentable y está en función de los costes variables y las características técnicas de las diferentes tecnologías de producción. Por lo tanto, las centrales económicamente retirables son aquellas cuyo coste incremental es inferior, aunque cercano al precio de mercado (competitivas) y la producción puede ser reducida sin costes significativos (técnicamente retirables)”

produce un gran consumo energético, no exento de impactos), como también luego su eliminación a finales de su vida útil.

El Energy Payback Time se define como el tiempo que tarda un sistema en devolver la energía empleada en su ciclo de vida. Se calcula como el ratio entre la energía primaria alimentada al ciclo de vida del sistema fotovoltaico y la energía primaria equivalente a la electricidad producida por el sistema fotovoltaico en un año. Para calcular esta energía primaria equivalente, se suele emplear la eficiencia de conversión promedio del mix eléctrico nacional, considerando todo su ciclo de vida.

$$\text{Entonces EPBT} = E_e \text{ [MJp]} / E_p \text{ [MJp/año]},$$

Donde  $E_e$  es el aporte de energía primaria durante el ciclo de vida del módulo, que incluye todas las fases del ciclo de vida, consumo de energía para la fabricación, instalación, uso, mantenimiento, y la energía necesaria para su gestión de fin de vida; y

$E_p$  representa la energía generada por el módulo fotovoltaico en un año, expresada en términos de energía primaria equivalente.

Para sistemas de energía fotovoltaica, el EPBT depende entonces de una serie de factores:

- La tecnología de las placas fotovoltaicas (tipo de células, su eficiencia, instalación, etc.)
- La irradiación de la zona
- El mix eléctrico nacional que se toma como referencia para calcular la energía primaria equivalente a la electricidad producida por el sistema FV.

Según se ha expuesto en la metodología ACV, se suele considerar que un sistema de producción de energía mediante fuentes renovables, como los sistemas FV, solo desplaza las tecnologías convencionales de tipo marginal. Hay que notar que esto es inconsistente como se suele definir y calcular el EPBT. Siendo conscientes de ello, se exponen los dos casos y sus pertinentes conceptos, con sus alcances respectivos, debido a que el indicador EPBT, ha sido comúnmente utilizado por toda la comunidad científica, incluso antes que la metodología del ACV<sup>2</sup>.

## **6.16. Tipos de impacto y metodología de evaluación de impacto**

### **6.16.1. Selección de categorías de impacto, categorías de indicadores y modelos de caracterización**

Según la norma EN 15084:2012 creada para el desarrollo de Reglas de Categoría de Producto de la construcción, los resultados de los indicadores del análisis del impacto del ciclo de vida que se deben incluir son los siguientes:

- Cambio climático
- Reducción de la capa de ozono en la estratosfera
- Acidificación de suelos y de fuentes de agua
- Eutrofización
- Formación de oxidantes fotoquímicos
- Reducción de recursos energéticos fósiles
- Reducción de recursos minerales

---

<sup>2</sup> Fuente: comunicación personal del Dr. Marco Rauegi, investigador de la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF) y representante técnico en el programa de sistemas de energía fotovoltaica en la Agencia Internacional de Energía (IEA - PVPS), el día 19 de junio de 2012.

En cuanto a los métodos de evaluación de impactos, el último borrador de la norma (en fase de publicación) especifica que se deberán seguir las recomendaciones y respectivas actualizaciones realizadas por la plataforma europea de ACV (Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Comisión Europea) en su International Reference Life Cycle Data System (ILCD) deben ser seguidas e incorporadas. Uno de los documentos que integran el manual ILCD recoge las recomendaciones sobre las metodologías de evaluación de impacto a aplicar para cada categoría de impacto [Comisión de las Comunidades Europeas, 2011]. Sin embargo, algunas de las metodologías propuestas utilizan métodos de cálculo y unidades de referencia que son diferentes a lo indicado en la norma EN 15804:2012 (como por ejemplo, sucede con el potencial de acidificación), debido a que el desarrollo de la norma y del capítulo de la guía ILCD han sucedido en paralelo. El manual ILCD se basa en las mejores metodologías disponibles, mientras que la norma pretende fomentar el uso de métodos probados y para los que exista un consenso científico y técnico suficiente (de manera que, por ejemplo, los software de ACV los hagan disponibles a los analistas de ACV). Para solventar esta incoherencia, el comité CEN TC 350, encargado del desarrollo de la EN 15804:2012, ha decidido modificar la regla sobre el método de evaluación de impactos a utilizar y obligar el uso del conocido como CML-2010<sup>3</sup>.

En el **software GaBi**, utilizado para realizar todo el estudio de ACV, existen diferentes métodos para el cálculo de los indicadores anteriormente descritos, entre ellos el CML 2010, antes comentado. Este método utiliza datos que provienen de información recopilada en el Instituto de ciencias ambientales en la Universidad de Leiden en Holanda. Este instituto además, ha publicado un libro guía (handbook) donde explica los indicadores y flujos correspondientes [Guineé et al. 2001]. El método CML 2010, es usado en su última versión de noviembre del 2010, y como método de evaluación restringe la modelación cuantitativa a etapas relativamente tempranas en la cadena de causa y efecto para limitar la incertidumbre, y agrupa los resultados del inventario de ciclo de vida en mecanismos comunes (e.g cambio climático) o en grupos normalmente aceptados [GaBi Software, 2011].

A continuación se describen brevemente las categorías de impacto tal utilizadas:

▪ **Agotamiento de recursos abióticos**

El origen básico de todos los bienes materiales son los recursos naturales (materia y energía procedentes del medio ambiente). Los recursos no renovables son los que se renuevan mediante ciclos naturales extremadamente lentos (combustibles fósiles) o no se renuevan en ciclos naturales (depósitos minerales). El crecimiento de la población, el aumento del consumo individual y la mala gestión llevan al agotamiento de los recursos naturales. El agotamiento de recursos se define como la relación entre la cantidad extraída y las reservas recuperables. Los recursos “abióticos” son aquellos de tipo natural y de naturaleza no viva. Se pueden clasificar en tres tipos:

- a) los depósitos: aquellos no regenerados durante la vida de los seres humanos (por ejemplo, combustibles fósiles, minerales, etc.)
- b) los fondos: regenerados a escala de la vida humana (suelo, aguas subterráneas, etc.)
- c) los flujos: en constante regeneración (viento, agua fluvial, energía solar, etc.)

Existen diferentes métodos para evaluar el potencial de agotamiento de los recursos. El utilizado en este estudio se basa en las reservas máximas y la tasa de extracción del recurso como indicadores de la gravedad de su agotamiento. La unidad de referencia de esta categoría de impacto es la cantidad de antimonio equivalente.

---

<sup>3</sup> Comunicación personal de la Dra. Cristina Gazulla, subdirectora de la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF) y vocal del comité AENOR CTN 198 (comité espejo de Aenor del CEN TC 350), el día 20 de agosto de 2012.

- **Acidificación**

La acidificación del suelo y el agua ocurre fundamentalmente a causa de la transformación de los contaminantes atmosféricos en ácidos. Esto conlleva a la disminución del valor del pH del agua de lluvia y la niebla de 5.6 a 4, o incluso menos. El dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno, así como sus respectivos ácidos ( $H_2SO_4$  y  $HNO_3$ ) contribuyen de manera relevante a la acidificación del medio. Esto daña a los ecosistemas, siendo la destrucción de bosques el impacto más conocido.

La acidificación provoca daños directos e indirectos (como el “lavado” de nutrientes o el incremento de la solubilidad de los metales en el suelo). También se ven afectados los materiales constructivos y los edificios; los metales y la piedra natural se corroen o desintegran a un ritmo creciente.

A pesar de que la acidificación es un problema global, sus efectos locales o regionales pueden variar.

El potencial de acidificación se mide en cantidad de dióxido de azufre equivalente ( $SO_2$ -Eq.) y se describe como la habilidad de ciertas sustancias para crear y liberar iones  $H^+$ .

- **Eutrofización**

La eutrofización consiste en el enriquecimiento de nutrientes en un determinado lugar. Puede darse en sistemas acuáticos o terrestres. Los contaminantes atmosféricos, las aguas residuales y los fertilizantes agrícolas contribuyen a la eutrofización aportando demasiado nitrógeno o fósforo.

En el caso del agua, el resultado es un crecimiento acelerado, debido al exceso de nutrientes, de algas en la superficie que a su vez evita la llegada de luz solar a aguas más profundas. Esto lleva a una disminución de la fotosíntesis y de la producción de oxígeno. Además, la descomposición de las algas que mueren rápidamente, consume mucho oxígeno y en las capas superiores del agua existe una gran deficiencia de oxígeno. Esta disminución de la concentración de oxígeno en el agua puede provocar la muerte de organismos en una posición elevada de la cadena trófica y la descomposición anaeróbica. En consecuencia se produce sulfuro de hidrógeno y metano que pueden llevar a la destrucción del ecosistema.

En suelos eutrofizados se observa una mayor susceptibilidad de las plantas ante enfermedades y plagas, así como una degradación de las plantas. Si el nivel de nutrientes excede las cantidades de nitrógeno necesarias de una cosecha, esto puede llevar a un enriquecimiento de nitratos. Mediante la lixiviación estos nitratos llegarán a las aguas subterráneas, pudiendo afectar a su potabilidad.

Los nitratos en bajas concentraciones son menos peligrosos en cuanto a su toxicidad. Sin embargo, los nitritos que pueden llegar a producir son tóxicos para los humanos. El potencial de eutrofización se calcula en unidades de fosfatos equivalentes ( $PO_4$  Eq). Los efectos de la eutrofización pueden variar de una región a otra.

- **Cambio climático**

El “efecto invernadero” se inicia cuando la radiación de onda corta procedente del sol entra en contacto con la superficie de la tierra. Esta radiación es parcialmente absorbida (provocando un calentamiento directo) y parcialmente reflejada como radiación infrarroja. La parte reflejada es absorbida en la troposfera por los llamados gases de efecto invernadero que la reemiten en todas las direcciones, incluyendo de nuevo la de la superficie terrestre. El resultado de este efecto es el calentamiento de la superficie terrestre.

Las actividades humanas refuerzan el efecto invernadero natural. Se considera que los gases de efecto invernadero cuya cantidad se ha visto incrementada por razones antropogénicas son el dióxido de carbono, el metano y los CFCs.

El potencial de calentamiento global se calcula en unidades de dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2</sub>-Eq.). Es decir que el potencial de efecto invernadero de una emisión se mide en relación al CO<sub>2</sub>. Puesto que el tiempo de residencia de los gases en la atmósfera se tiene en cuenta a la hora de calcular este potencial, se debe especificar el rango temporal aplicado en el análisis. El período más habitual es el de 100 años.

▪ **Agotamiento de Ozono estratosférico**

Casi el 99% de la radiación ultravioleta del Sol que alcanza la estratosfera se convierte en calor mediante una reacción química que continuamente recicla moléculas de ozono (O<sub>3</sub>). Cuando la radiación ultravioleta impacta en una molécula de ozono, la energía escinde a la molécula en átomos de oxígeno altamente reactivos; casi de inmediato, estos átomos se recombinan formando ozono una vez más y liberando energía en forma de calor. A pesar de que todo el ozono atmosférico en CNPT sería una capa de sólo unos 3 mm. de grosor, su concentración es suficiente para absorber la radiación solar de longitud de onda de 200 a 300 nm. Así, la capa de ozono funciona como un escudo que protege de la radiación UV.

La formación y destrucción del ozono por procesos naturales es un equilibrio dinámico que mantiene constante su concentración en la estratosfera. Se han registrado amplias variaciones interanuales y estacionales en todas las regiones del planeta en la densidad del ozono estratosférico; se verificó que en el hemisferio austral la concentración pasa por un mínimo en primavera y luego se regenera. Desde mediados de los años 1970, los científicos se han preocupado por los efectos nocivos de ciertos clorofluorocarbonos (CFC) en la capa de ozono. Otro grupo de compuestos que pueden destruir el ozono de la estratosfera son los óxidos de nitrógeno (representados como NO<sub>x</sub>), como NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. La radiación solar descompone una cantidad considerable de otros óxidos de nitrógeno en óxido nítrico (NO), que también actúa como catalizador en la destrucción del ozono. El NO<sub>2</sub> es el intermediario, pero también puede reaccionar con el monóxido de cloro, formando nitrato de cloro (ClONO<sub>2</sub>). Este último es más o menos estable y sirve como “depósito de cloro”, otro factor que también contribuye a la destrucción del ozono estratosférico en los polos norte y sur.

▪ **Formación de ozono fotoquímico:**

La formación de foto-oxidantes consiste en la síntesis de compuestos químicos reactivos, como el ozono, debido a la acción de la luz del sol sobre ciertos contaminantes atmosféricos primarios. Los compuestos foto-oxidantes pueden dañar la salud humana y los ecosistemas y también a las cosechas.

Los foto-oxidantes se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, debido a la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y el monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

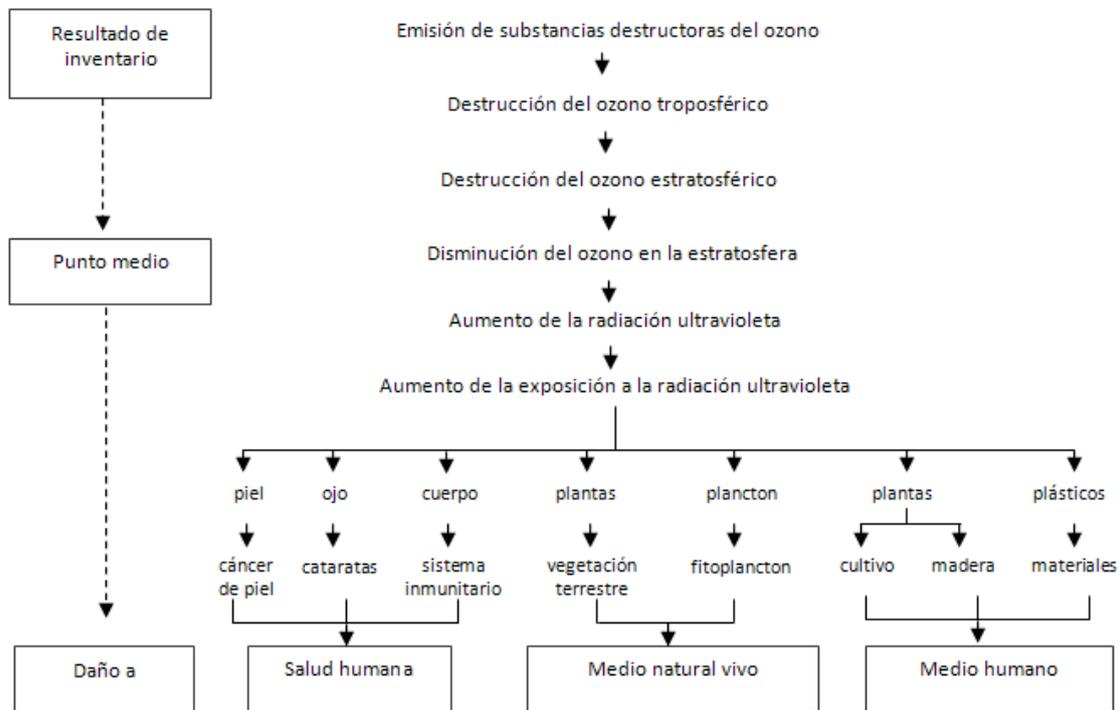
Se considera que el ozono es el principal compuesto oxidante, así como el peroxiacetilnitrato (PAN). La formación de foto-oxidantes también se conoce como “summer smog”. El potencial de formación de foto-oxidantes se mide en unidades de etileno equivalente (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Eq).

Los resultados aquí obtenidos son expresiones relativas y no predicen impactos en categorías de punto final, la superación de unos niveles, márgenes de seguridad ni riesgos. Los resultados mostrados incluyen tanto las salidas y entradas directas de fábrica, como las

procedentes de procesos anteriores que se llevan a cabo a lo largo del ciclo de vida del producto. Así pues, se incluyen las emisiones de, por ejemplo, la extracción y el tratamiento de las materias primas así como las de los diferentes transportes requeridos.

### 6.16.2. Indicadores de categoría

Los resultados de inventario se clasifican en categorías de impacto, cada una de las cuales se cuantifica mediante un indicador de categoría. Este indicador puede referirse a cualquier punto de la cadena causa-efecto que relaciona los resultados de inventario (consumo de recursos y emisiones de contaminantes) y el daño final provocado sobre el medio ambiente o la salud humana.



**Figura 25** Ejemplo que representa la diferencia entre el enfoque de punto medio (midpoint) y punto final (endpoint)

*Fuente: Cátedra UNESCO-ESCI a partir de Jolliet, O. et al 2004*

Existen dos grandes tipos de métodos a la hora de proponer en qué lugar de la cadena se debe evaluar el indicador de impacto. Por un lado, se sitúan los llamados métodos enfocados al problema que utilizan indicadores intermedios (midpoint) y por el otro, se utilizan los métodos orientados al daño, basados en el punto final (endpoint) de la cadena causa-efecto [Jolliet, O. et al 2004].

A pesar de que los métodos orientados al daño son más fáciles de interpretar al utilizar indicadores más cercanos a las preocupaciones sociales, presentan una mayor incertidumbre dada la dificultad de modelar las complejas relaciones causa-efecto. Es por esta razón, que en este estudio se ha optado por aplicar un método basado en indicadores intermedios, tal y como recomienda la EN 15804:2012.

### 6.16.3. Modelos de caracterización

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

Los factores de caracterización utilizados para convertir los resultados del inventario en los indicadores de categoría de impacto se muestran en el *Anexo 1 Categorías de impacto aplicadas*. Para obtener una descripción y justificación de los modelos de caracterización utilizados en la obtención de dichos factores [Guinée, J. et al; 2010]. La siguiente tabla resume las categorías de impacto seleccionadas, así como los indicadores de categoría y los modelos de caracterización.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (PARA)</b>
Resultado del inventario:	extracción de minerales y combustibles fósiles (en kg)
Modelo de caracterización:	aproximación que considera la concentración de reservas y el ritmo de extracción
Indicador de categoría:	agotamiento de las reservas máximas en relación al uso anual del recurso
Factor de caracterización	potencial de agotamiento para cada extracción de minerales y combustibles fósiles (kg de Sb equivalente/kg extraídos)
Resultado del indicador:	kg de Sb equivalente
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Acidificación (PA)</b>
Resultado del inventario:	emisiones de sustancias acidificantes (en kg)
Modelo de caracterización:	modelo RAINS10, desarrollado en IIASA <sup>4</sup> , describiendo el destino y la deposición de las sustancias acidificantes y adaptado al ACV
Indicador de categoría:	carga crítica de deposición/acidificación
Factor de caracterización	potencial de acidificación de cada emisión ácida (kg de SO <sub>2</sub> equivalente/kg de emisión ácida)
Resultado del indicador:	kg de SO <sub>2</sub> equivalente
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Calentamiento Global (PCG)</b>
Resultado del inventario:	emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero (en kg)
Modelo de caracterización:	modelo desarrollado por el IPCC ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ) que define el potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero
Indicador de categoría:	densidad de flujo de energía radiante infrarroja (W/m <sup>2</sup> )
Factor de caracterización	potencial de calentamiento global de cada gas de efecto invernadero en un horizonte temporal de 100 años (kg de CO <sub>2</sub> equivalente/kg de gas de efecto invernadero)
Resultado del indicador:	kg de CO <sub>2</sub> equivalente
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Eutrofización (PE)</b>
Resultado del inventario:	emisiones de nutrientes al aire, agua o suelo (en kg)
Modelo de caracterización:	proceso estequiométrico para identificar la equivalencia entre nitrógeno y fósforo tanto en sistemas terrestres como acuáticos
Indicador de categoría:	deposición de nitrógeno/fósforo en la biomasa

<sup>4</sup> Internacional Institute for Applied Systems Analysis

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

Factor de caracterización	potencial de eutrofización de cada emisión eutrofizante en el aire, agua o suelo (kg de PO <sub>4</sub> equivalente/kg de emisión eutrofizante)
Resultado del indicador:	kg de PO <sub>4</sub> equivalente
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico (PAOE)</b>
Resultado del inventario:	Emisiones de sustancias al aire (en kg)
Modelo de caracterización:	Modelo Solomon & Albritton, 1992, para las “Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment, Nord 1995:20”
Indicador de categoría:	Agotamiento del ozono estratosférico
Factor de caracterización	Potencial de agotamiento de cada emisión en el aire (kg de R11 equivalente/kg de emisión)
Resultado del indicador:	kg de triclorofluorometano (R11) equivalente
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Potencial de Formación de Ozono Fotoquímico (PFOF)</b>
Resultado del inventario:	emisiones de sustancias (VOC, CO) al aire (en kg)
Modelo de caracterización:	modelo UNECE <sup>5</sup>
Indicador de categoría:	formación de ozono troposférico
Factor de caracterización	potencial de formación de ozono fotoquímico de cada emisión de VOC o CO al aire (kg de etileno equivalente/kg de emisión foto-oxidante)
Resultado del indicador:	kg de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) equivalente

**Tabla 9 Categorías de impacto aplicadas**

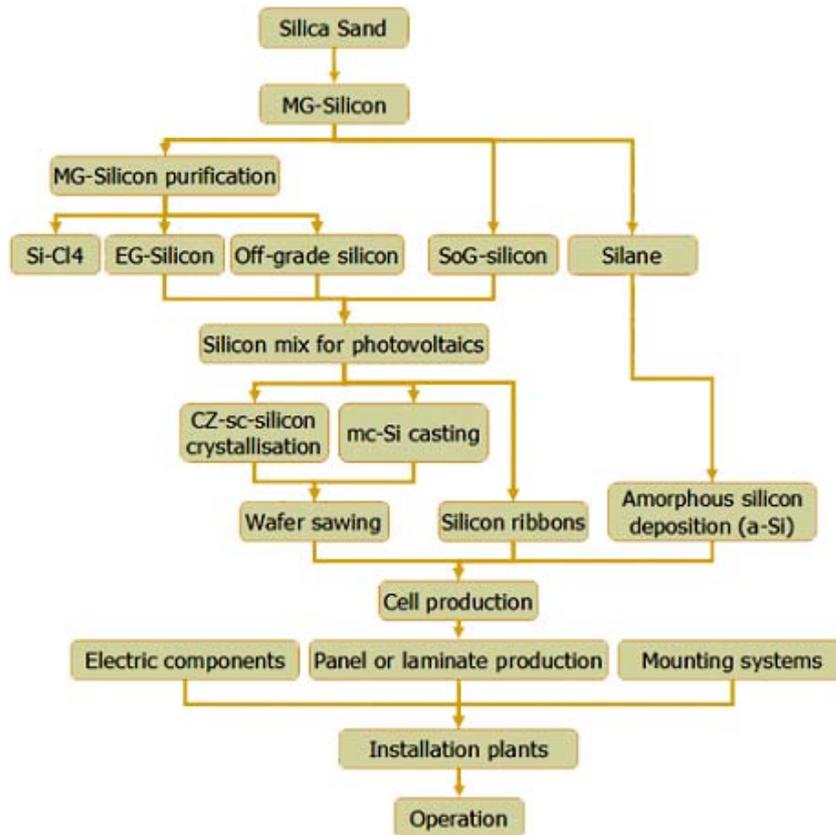
*Fuente: Cátedra Unesco del Ciclo de Vida y Cambio Climático*

## **6.17. Análisis de Inventario**

En este apartado se describen los datos cualitativos y cuantitativos de los diferentes procesos y etapas que transcurren a lo largo el ciclo de vida de los sistemas solares fotovoltaicos y que serán demandados a las empresas del sector. Los datos para su consideración en el inventario se han obtenido a partir de conjuntos de procesos. La mayoría de los datos aquí presentados se han obtenido directamente de las empresas colaboradoras, mientras que en algún caso se ha tenido que recurrir a medias bibliográficas o a la extrapolación de procesos similares existentes en la base de datos utilizada. Los datos requeridos serán aquellos de acuerdo a las limitaciones e hipótesis que han sido consideradas en apartados anteriores.

En primera aproximación se considera de acuerdo con [Jungbluth N., et. al., 2010], todo el conjunto de procesos que conforme a la tecnología actual pueden tener lugar desde la extracción de todos los materiales hasta la puesta en marcha de las instalaciones fotovoltaicas.

<sup>5</sup> United Nations Economic Commission for Europe



**Figura 26 Subsistemas involucrados en la cadena de producción de instalaciones solares fotovoltaicas**

*Fuente: Ecoinvent energy systems report*

Más del 90% de la producción de generadores fotovoltaicos es realizada hoy en día con silicio cristalino. El silicio es el elemento, tras el oxígeno, más abundante en nuestro planeta, pero no se encuentra aislado sino combinado con oxígeno. El silicio para uso industrial parte de la cuarcita, que es en un 90% óxido de silicio  $\text{SiO}_2$ .

El silicio se separa de la cuarcita en un proceso metalúrgico de reducción, introduciéndola en hornos de arco eléctrico junto al carbón para romper los enlaces entre el silicio y el oxígeno. De esta forma se obtiene un silicio de pureza de más del 99%. Este silicio así obtenido se denomina de grado metalúrgico y es adecuado para la industria que obtiene con él aleaciones especiales, pero no lo es para la industria de los semiconductores que requiere una alta pureza, ni tampoco para la industria solar fotovoltaica que requiere una pureza intermedia del orden de 10 ppm.

Estas altas purzas se consiguen en dos pasos, primero pasando el silicio metalúrgico a gas mediante un proceso químico y, en un segundo paso, se extrae del gas de silicio (triclorosilano), el silicio ultrapuro, al depositarse éste alrededor de un soporte semilla de silicio. Este proceso consiste generalmente en hacer que el silicio se deposite sobre la barra base de silicio dentro de un reactor que está a alta temperatura, y en el que se introduce el triclorosilano con hidrógeno (proceso Siemens).

El silicio depositado que se saca del horno, es lo que denominamos polisilicio, el cual tiene ya la pureza deseada. Este polisilicio así producido de forma tan compleja por la industria química, es la materia prima para hacer las obleas de la industria electrónica y solar fotovoltaica.

Durante las primeras décadas del desarrollo fotovoltaico, la industria solar no ha necesitado pasar por los procesos complejos anteriormente descritos, porque, para sus

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

necesidades, ha tenido suficiente con el rechazo al final de esos procesos realizados para otras aplicaciones y, sobre todo, con el rechazo de la propia industria electrónica. Al ser rechazo, la industria solar podía disfrutar de unos precios relativamente bajos. Pero a finales de los noventa, se observó que el ritmo de crecimiento de las necesidades de silicio solar iban creciendo de forma rápida y que iban a ser mayores que la suma del rechazo de la industria electrónica y su capacidad extra de producir silicio.

Una vez obtenida la célula fotovoltaica, la siguiente fase en la cadena de producción es el montaje del panel, la incorporación al mismo de los componentes eléctricos y el montaje de la estructura. Finalmente se incorporan otros elementos auxiliares y se pone en funcionamiento la planta.

Tal y como se ha expuesto, son varias las hipótesis consideradas que simplifican el esquema de producción de sistemas fotovoltaicos y que permiten reducir la cantidad de datos de inventario de ciclo de vida al reducir las variables del sistema. Bajo estas hipótesis se han elaborado cuestionarios teniendo en cuenta las actividades realizadas.

El cuestionario para la parte de fabricación de los módulos se ha realizado en los siguientes bloques:

- Valores generales
- Flujos de entrada
  - Materias primas
  - Materias primas auxiliares
  - Energía
- Flujos de salida
  - Emisiones
  - Residuos
- Proceso de fabricación
- Detalle de la maquinaria

A continuación se describen a continuación los datos demandados para cada uno de estos bloques:

- **Valores generales**

Bajo este epígrafe se piden valores generales de los paneles solares:

Producción anual de paneles	35.641	Nº unidades producidas / año
Peso por Unidad de panel	22	kg
Dimensiones panel	1,68 x 0,99	anchura x altura (m)
Vida útil del panel	25	años
Potencia pico panel	250	Wp

**Tabla 10 Valores generales. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico.**

*Fuente: Renia*

- **Flujos de entrada de materias primas**

En esta sección del cuestionario se obtiene información relativa a todos los flujos de materiales que son empleados para la fabricación de los paneles solares. Además de las cantidades ya sea en masa, unidades o volumen, es imprescindible para hacer un adecuado análisis de ciclo de vida conocer el origen de dichas materias primas así como el medio de transporte en el que han sido transportadas ya que puede repercutir de manera importante en los impactos ambientales asociados. Es importante destacar que en los casos en los que la materia prima es adquirida a través de un proveedor, no es correcto asumir como distancia de transporte aquella entre el proveedor y el fabricante de sistemas solares. En estos casos se hará necesario obtener la información de origen a través de proveedor. En las situaciones en las que esto no sea posible, se asigna como distancia transportada aquella entre el país o países donde más volumen de fabricación exista y España.

Teniendo en cuenta las materias primas más empleadas los datos que se piden son los que muestran en la siguiente tabla:

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Entradas de materiales anuales	Material	Cantidad	Unidades	Modo de transporte				Distancia desde el origen (Km)
				Camión	Tren	Barco	Avión	
Wafers silicio		2.138.460	Nº			20	80	Taiwán / USA
Capas fijadoras de los wafers	EVA	59.782	kg	x				Alicante
Aislante	Pet	21.420	kg	x				Italia
Vidrio solar	Vidrio solar	591.640	kg	x				Bélgica
Marco	Aluminio	213.846	kg	x				Málaga
Caja conexión eléctrica	Plástico	3.564	kg	x				Andalucía
Otros (especificar)								

**Tabla 11 Flujos de entrada. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. Colaboradora**  
Fuente: Renia

Como se observa en la anterior tabla se pide por columnas, el nombre genérico del material y/o componente, la materia prima de la que está compuesta, la cantidad bien sea en cantidad másica, volumétrica o unidades, el tipo de transporte (no tiene por qué ser único) y la distancia desde el origen de fabricación de estos materiales.

- **Flujos de entrada de materiales primas auxiliares**

En este campo se piden, de forma análoga al caso de materias primas, todos aquellos materiales que son complementarios para llevar a cabo los procesos de fabricación requeridos o bien componentes que se incorporan al panel. Los datos requeridos se muestran a continuación:

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Entradas materiales auxiliares anuales	Material	Cantidad	Unidades	Modo de transporte				Distancia desde el origen (Km)	Comentarios
				Camión	Tren	Barco			
Juntas			kg	x					
Cables (especificar espesor)	4mm <sup>2</sup>	78410	m	x			China		
Cajas de conexión	100gr caja de	35641	ud	x			Málaga		
Soldaduras	hilos soldadura 2mm	6058	kg	x			Madrid		
Material 1 de embalaje	cartón	7128	kg	x					
Material 2 de embalaje	cartón		kg	x					
Pintura			kg	x					
Otros (especificar)				x					
Estaño		1782	kg			x	Asia, 10.000 km		
Silicona		7199	l	X			Europa, 1500 km		

**Tabla 12 Flujos de entrada materiales auxiliares. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. Colaboradora**

*Fuente: Renia*

- **Flujos de entrada de energía**

En este campo se pide el valor agregado de consumo anual por fuente de energía.

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Entradas energía consumida anual	Cantidad	Unidad	Comentarios
Electricidad	347.920	kWh	
Energía Térmica:		kWh	
Carbón		kg	
Fuel		l	
Gas natural		m <sup>3</sup>	
Aire comprimido		Nm <sup>3</sup>	
Agua	267	m <sup>3</sup>	
Madera		kg	
Otros (especificar)			

**Tabla 13 Flujos de entrada de energía. Cuestionario adaptado. Fabricante solar fotovoltaico. Colaboradora**  
Fuente: Renia

- **Flujos de salida**

Como flujos de salida se toman en consideración bien emisiones al ambiente derivadas de los distintos procesos que tienen lugar o bien material residual generado en dichos procesos. Además de lo anterior, se toma como flujo de salida la producción anual de paneles.

Salida productos	Cantidad	Unidad	Comentarios
Producción anual de paneles	35.641	Nº unidades producidas / año	

**Tabla 14 Flujos de salida. Producción anual de paneles fotovoltaicos. Fabricante solar fotovoltaico**  
Fuente: Renia

El cuestionario para la parte de la instalación del sistema se ha realizado en los siguientes bloques:

- Valores generales
- Flujos de entrada
  - Entradas de materiales
  - Entradas energía consumida por instalación acabada
- Flujos de salida
  - Salida productos
  - Emisiones
  - Residuos
- Detalle de la maquinaria

A continuación se describen los datos demandados para cada uno de estos bloques:

▪ **Valores generales**

En este subapartado se solicita la capacidad de la instalación a modelar.

Potencia total instalación: 100 kWp

▪ **Flujos de entrada**

- Entradas de materiales

En esta sección del cuestionario se obtiene información relativa a todos los flujos de materiales que son empleados para la puesta en obra e instalación del sistema fotovoltaico. Las especificaciones a tener en cuenta son las mismas que en los cuestionarios anteriormente explicados.

Teniendo en cuenta las materias primas más empleadas los datos que se piden son los que muestran en la siguiente tabla:

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Materiales	Cantidad	Unidades	Modo de transporte			Distancia desde el origen (Km)	Comentarios
			Camión	Tren	Barco		
Cubierta inclinada						0 km	
Acero galvanizado	3.000	Kg	x			180 km	
		Kg					
cajas DC (pvc 500gr/u)	6	u	x			180 km	
Cuadros AC (pvc 2500g/u)	2	u	x			180 km	
Canalización PVC (350g/m)	500	mtrs				180 km	
Canalización metal			x			180 km	
Pica tierra	2	0,02*0,02*2 m / unidad (acero)	x			180 km	
INGETEAM	100.000	Potencia (W)	x			180 km	
6mm	2.200	m	x			180 km	
10mm	45	m	x			180 km	
25mm	25	m	x			180 km	
50mm	125	m	x			180 km	
MS-GYS-180C	540		x			180 km	
1,575x0,86		Anchura x altura (m)	x			180 km	
90 paneles/estructura	6 estructuras	540 paneles	x			180 km	

**Tabla 15 Flujos de entrada. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos.**

*Fuente: Renia*

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

- Entradas energía consumida por instalación acabada

Entradas energía consumida por instalación acabada	Cantidad	Unidades	Comentarios
Electricidad	630	kWh	
Energía Térmica:	-	kWh	

**Tabla 16 Flujos energéticos. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos.**

Fuente: Renia

- **Flujos de salida**

Como flujos de salida se toman en consideración bien emisiones al ambiente derivadas de los distintos procesos que tienen lugar o bien material residual generado en dichos procesos. Además de lo anterior, se toma como flujo de salida la instalación fotovoltaica realizada.

Salida productos	Cantidad	Unidad	Comentarios
Instalación solar fotovoltaica	1	unidades	
Emisiones al aire controladas	Cantidad	Unidad	Comentarios
	-		
Emisiones al agua	Cantidad	Unidad	Comentarios
	-		
Agua Residual		Unidad	Comentarios
	-	m <sub>3</sub>	

**Tabla 17 Flujos de salida. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos.**

Fuente: Renia

Respecto a los residuos materiales, los datos requeridos son:

Desglose de Residuos generados por instalación	Kg de residuo (según clasificación)					Especificar tratamiento final				
	Residuos similares a domésticos o comerciales	Residuos líquidos peligrosos	Residuos sólidos peligrosos	No clasificados	Unidad	Vertedero	Incineradora	Reutilización interna	Reciclaje	Comentarios
Embalajes, restos de materiales o componentes, residuos domésticos, piezas rotas, ...										
embalajes madera y cartón	150 kg					x				

**Tabla 18 Flujos de residuos. Cuestionario adaptado. Instalador sistemas solares fotovoltaicos.**

Fuente: Renia

Tal y como se ha comentado, en los casos en los que la empresa desconozca algunos de los valores requeridos o si éstos representan menos del 1% en masa, se asumirán valores recogidos en las bases de datos empleadas para el estudio. A continuación se detallan los procesos que se han cogido directamente de la base de datos.

Materiales		Unidades
CH: desposar, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration [municipal incineration]	0,03	kg
CH: methanol, at regional storage [organics]	0,00216	kg
GLO: nickel, 99.5%, at plant [Benefication]	0,000163	kg
GLO: photovoltaic panel factory [production of components]	0,000004	pcs.
RER: 1-propanol, at plant [organics]	0,00814	kg
RER: acetone, liquid, at plant [organics]	0,013	kg
RER: lubricating oil, at plant [organics]	0,00161	kg
RER: vinyl acetate, at plant [monomers]	0,00164	kg

**Tabla 19 Procesos incorporados procedentes deecoinvent**

*Fuente: Renia*

## 6.18. Evaluación de impacto

En este estudio se han llevado a cabo los elementos que, según la norma ISO 14044:2006, son obligatorios en una evaluación de impacto del ciclo de vida:

1. Selección de las categorías de impactos, de los indicadores de categoría y de los modelos de caracterización
2. Asignación de los resultados del inventario de ciclo de vida (clasificación)
3. Cálculo de los resultados de los indicadores de categoría (caracterización)

No se han aplicado los elementos voluntarios – normalización, agrupación y ponderación- debido a que tienen un elevado grado de subjetividad, incrementan la incertidumbre..

### 6.18.1. Categorías de impacto

A continuación se especifican las categorías de impacto (incluyendo sus indicadores y modelos de caracterización) e indicadores seleccionados.

Como se ha comentado anteriormente, las categorías escogidas, y sus respectivos indicadores, son las recomendadas por la norma EN 15804:2012, existentes en el método de caracterización CML 2010:

- Cambio climático
- Reducción de la capa de ozono en la estratosfera
- Acidificación de suelos y de fuentes de agua
- Eutrofización
- Formación de oxidantes fotoquímicos
- Reducción de recursos energéticos fósiles
- Reducción de recursos minerales

### 6.18.2. Clasificación y caracterización de los resultados de inventario

A continuación se presentan los resultados del inventario clasificados y caracterizados, respecto a la unidad funcional de 1 kWp de instalación. Cabe recordar que estos resultados no

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

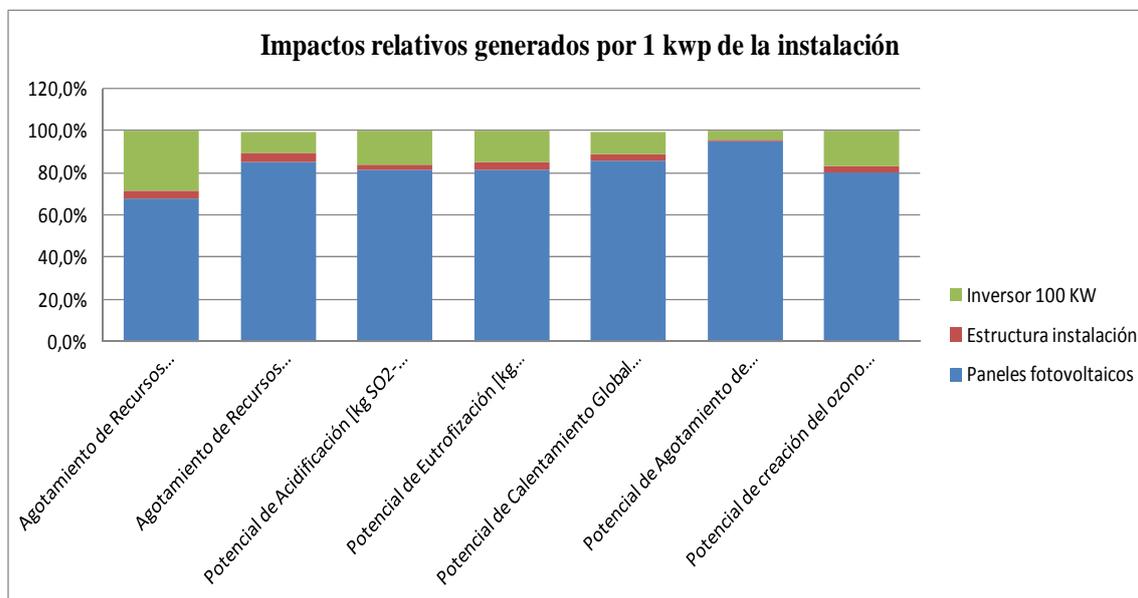
predicen impactos sobre el receptor o receptores finales de los mismos, sino que se trata de expresiones relativas.

Categoría de impacto	Impacto total	Paneles fotovoltaicos		Estructura instalación		Inversor 100 KW	
		Valor	Porcentaje	Valor	Porcentaje	Valor	Porcentaje
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	2,11E-01	1,43E-01	68%	7,34E-03	3%	6,06E-02	29%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	2,06E+04	1,75E+04	85%	8,38E+02	4%	2,12E+03	10%
Potencial de Acidificación [kg SO <sub>2</sub> -Eq.]	9,77E+00	7,94E+00	81%	2,27E-01	2%	1,55E+00	16%
Potencial de Eutrofización [kg de PO <sub>4</sub> eq.]	1,26E+00	1,03E+00	81%	4,70E-02	4%	1,83E-01	15%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	1,58E+03	1,36E+03	86%	5,28E+01	3%	1,66E+02	11%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	3,25E-04	3,09E-04	95%	2,33E-06	1%	1,33E-05	4%
Potencial de Formación de Ozono Fotoquímico [kg Etileno-Eq.]	1,26E+00	1,01E+00	80%	4,14E-02	3%	2,05E-01	16%

**Tabla 20 Impacto ambiental de 1 kWp del sistema solar fotovoltaico estudiado**

Fuente: Renia

Es importante destacar que la etapa de uso se presenta de forma separada. Debido a que el producto estudiado es generador de energía, por lo tanto va a producir impactos positivos durante su fase de uso, se considera necesario conocer esta etapa de forma independiente. De esta forma se pueden valorar de forma independiente los impactos generados por la instalación fotovoltaica, en sus etapas de obtención de materiales, fabricación, ... y los dos escenarios creados para la fase de uso.



**Figura 27 Resultado obtenido para las diferentes categorías de impacto consideradas**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 27 se muestran los impactos ambientales relativos asociados a los diferentes procesos de la fabricación. A la hora de interpretar estos resultados, se especifican los impactos generados específicamente generados por los paneles fotovoltaicos, ya que, como se puede observar en el gráfico, se lleva aproximadamente el 80% del impacto en todas las categorías.

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

A continuación se presentan los resultados específicamente del panel fotovoltaico solo, sin la parte de la instalación, para poder llegar a un análisis de los impactos potenciales más específico, ya que, como se ha comentado, la fabricación del panel es el proceso con mayores impactos asociados.

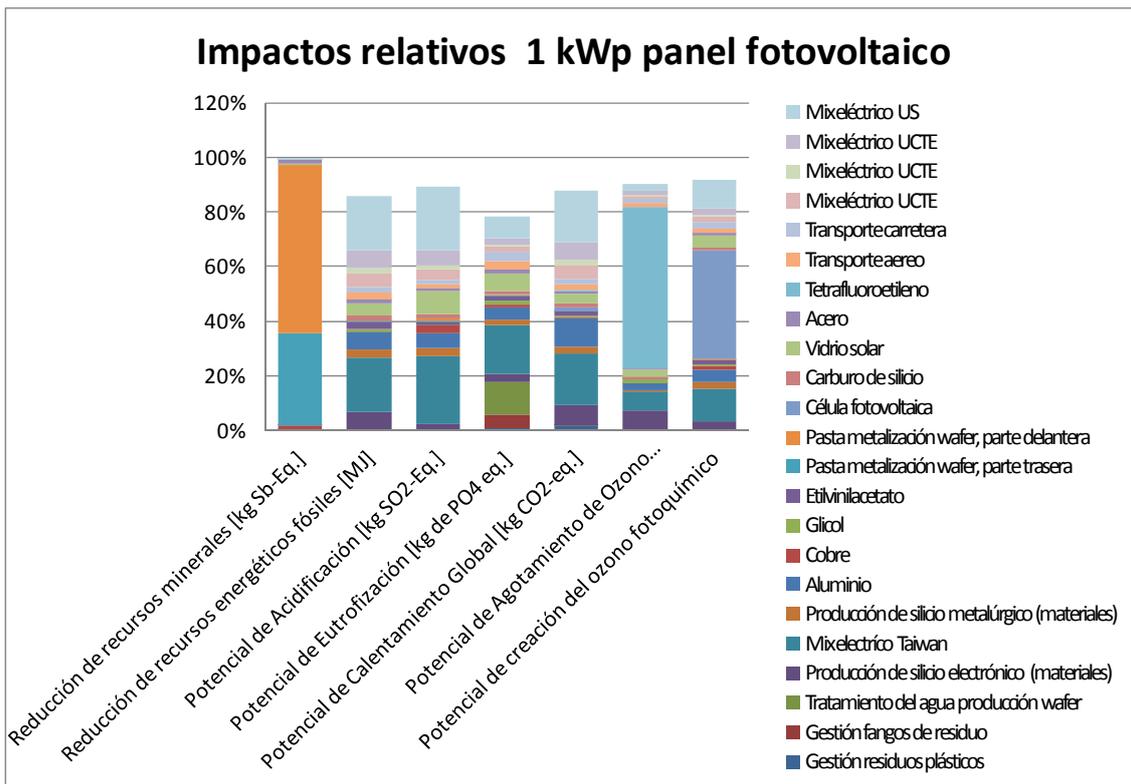
**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

1 kWp panel fotovoltaico	Total	Gestión residuos plásticos	Gestión fangos de residuo	Tratamiento del agua producción wafer	Producción de silicio electrónico (materiales)	Mix eléctrico Taiwan	Producción de silicio metalúrgico (materiales)	Aluminio	Cobre	Glicol	Etilvinilacetato	Pasta metalización wafer, parte trasera
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	1,43E-01	4,26E-06 0%	2,62E-07 0%	1,02E-05 0%	6,36E-05 0%	5,41E-05 0%	2,09E-05 0%	6,91E-04 0%	1,95E-03 1%	9,33E-05 0%	4,89E-05 0%	4,76E-02 33%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	1,76E+04	5,48E+00 0%	3,12E+00 0%	1,01E+01 0%	1,20E+03 7%	3,62E+03 20%	5,47E+02 3%	1,13E+03 6%	4,36E+01 0%	1,54E+02 1%	4,98E+02 3%	2,37E+01 0%
Potencial de Acidificación [kg SO2-Eq.]	7,97E+00	4,69E-03 0%	9,86E-04 0%	5,69E-03 0%	1,62E-01 2%	2,07E+00 25%	2,12E-01 3%	4,57E-01 6%	2,39E-01 3%	3,17E-02 0%	6,08E-02 1%	4,28E-02 1%
Potencial de Eutrofización [kg de PO4 eq.]	1,03E+00	1,02E-02 1%	4,84E-02 5%	1,30E-01 12%	2,81E-02 3%	1,86E-01 18%	2,12E-02 2%	4,98E-02 5%	8,48E-03 1%	1,79E-02 2%	1,38E-02 1%	3,25E-03 0%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO2-eq.]	1,36E+03	2,53E+01 2%	5,85E-01 0%	2,04E+00 0%	9,81E+01 7%	2,63E+02 19%	3,51E+01 3%	1,45E+02 10%	3,43E+00 0%	8,05E+00 1%	1,80E+01 1%	1,95E+00 0%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	3,09E-04	3,82E-08 0%	2,86E-08 0%	3,43E-07 0%	2,05E-05 7%	1,95E-05 7%	2,28E-06 1%	6,36E-06 2%	2,57E-07 0%	3,59E-06 1%	8,30E-07 0%	1,52E-07 0%
Potencial de creación del ozono fotoquímico	1,01E+00	6,36E-04 0%	1,37E-04 0%	5,22E-04 0%	3,06E-02 3%	1,23E-01 12%	2,49E-02 2%	4,63E-02 5%	1,23E-02 1%	5,95E-03 1%	1,24E-02 1%	2,91E-03 0%

1 kWp panel fotovoltaico	Pasta metalización wafer, parte delantera	Célula fotovoltaica	Carburo de silicio	Vidrio solar	Acero	Tetrafluoroetileno	Transporte aéreo	Transporte carretera	Mix eléctrico UCTE	Mix eléctrico UCTE	Mix eléctrico UCTE	Mix eléctrico US
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	8,85E-02 62%	0,00E+00 0%	8,05E-06 0%	2,95E-04 0%	2,18E-03 2%	1,87E-06 0%	6,04E-06 0%	9,60E-05 0%	1,07E-05 0%	3,90E-06 0%	1,39E-05 0%	5,18E-05 0%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	4,35E+01 0%	0,00E+00 0%	3,61E+02 2%	8,08E+02 4%	2,49E+02 1%	2,80E+00 0%	4,13E+02 2%	3,96E+02 2%	9,13E+02 5%	3,32E+02 2%	1,18E+03 7%	3,62E+03 20%
Potencial de Acidificación [kg SO2-Eq.]	7,93E-02 1%	1,31E-03 0%	1,15E-01 1%	7,01E-01 9%	6,72E-02 1%	2,57E-03 0%	1,20E-01 1%	1,46E-01 2%	3,27E-01 4%	1,19E-01 1%	4,24E-01 5%	1,94E+00 24%
Potencial de Eutrofización [kg de PO4 eq.]	6,03E-03 1%	3,70E-05 0%	1,32E-02 1%	6,61E-02 6%	1,40E-02 1%	7,63E-05 0%	3,12E-02 3%	3,75E-02 4%	1,97E-02 2%	7,17E-03 1%	2,56E-02 2%	8,46E-02 8%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO2-eq.]	3,60E+00 0%	1,86E+01 1%	2,11E+01 2%	4,51E+01 3%	1,57E+01 1%	5,82E+00 0%	3,10E+01 2%	2,67E+01 2%	6,83E+01 5%	2,48E+01 2%	8,86E+01 6%	2,61E+02 19%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	2,80E-07 0%	0,00E+00 0%	2,38E-06 1%	7,01E-06 2%	6,90E-07 0%	1,69E-04 59%	3,91E-06 1%	4,34E-06 2%	3,38E-06 1%	1,23E-06 0%	4,39E-06 2%	7,31E-06 3%
Potencial de creación del ozono fotoquímico [kg ethene Eq.]	5,40E-03 1%	4,01E-01 40%	8,79E-03 1%	4,32E-02 4%	1,23E-02 1%	1,62E-04 0%	1,51E-02 2%	2,30E-02 2%	1,96E-02 2%	7,12E-03 1%	2,54E-02 3%	1,03E-01 10%

**Tabla 21 Impactos potenciales de la fabricación del panel fotovoltaico. Unidad funcional: 1 kWp de instalación**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 28 Impactos relativos de la fabricación del panel fotovoltaico. Unidad funcional: 1 kWp de instalación**

Fuente: Elaboración propia

## 6.19. Interpretación de resultados

Según la norma ISO 14044:2006 mediante la interpretación del ciclo de vida se identifica, cualifica, controla y evalúa la información de los resultados del inventario y de la evaluación de impactos.

La interpretación de resultados se ha estructurado en tres apartados:

- Identificación de los aspectos significativos (análisis de significancia)
- Comprobación de la integridad, sensibilidad y coherencia de los resultados (verificación de los resultados)
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

### 6.19.1. Comentarios a las categorías de impacto

#### Reducción de recursos minerales abióticos

El valor del potencial de agotamiento de recursos minerales abióticos a lo largo del ciclo de vida del producto es  $2,11E-01$  kg Sb eq ( $1,43E-01$  kg Sb eq. para la fabricación del panel). Los recursos que más contribuyen al agotamiento de recursos minerales abióticos son los provenientes del panel, con un 68%, más específicamente la metalización de la célula fotovoltaica debido a los materiales utilizados.

### **Reducción de recursos energéticos abióticos**

El valor del potencial de agotamiento de recursos energéticos abióticos a lo largo del ciclo de vida del producto es 2,06E04 MJ (1,75E04 MJ para la fabricación del panel). Los recursos que más contribuyen al agotamiento de recursos energéticos abióticos son los provenientes del panel, con un 58%, más específicamente estas contribuciones vienen del consumo energético en las plantas de producción de los wafers en Taiwan y Estados Unidos. Debido a que su producción es un proceso muy intensivo energéticamente. De aquí la importancia del lugar de fabricación de este subproducto.

### **Potencial de acidificación**

El valor del potencial de acidificación a lo largo del ciclo de vida del producto es 9,77E00 kg SO<sub>2</sub> eq (7,94E00 kg SO<sub>2</sub> eq para la fabricación del panel). Los compuestos contribuyentes a esta categoría se emiten básicamente durante la etapa de fabricación del panel (81%), provenientes del consumo energético de las plantas de producción de wafers principalmente (40%), también contribuyen, en menor medida, el vidrio solar (7%) y el marco de aluminio (5%). Por otra parte el inversor del sistema tiene un 16% de contribución total a la acidificación.

### **Potencial de eutrofización**

El valor del potencial de eutrofización a lo largo del ciclo de vida del producto es 1,26E00 kg fosfato-eq (1,03E00 fosfato-eq para la fabricación). Las emisiones se producen, una vez más, en las etapas fabricación del panel (81%), debido principalmente a los consumos energéticos y su ciclo de vida, dentro del panel, también tiene una contribución notable (10%) el flujo de agua utilizado en la fabricación de los wafers. El inversor, finalmente tiene una contribución relativa del 15%.

### **Potencial de calentamiento global**

El valor del potencial de calentamiento global a lo largo del ciclo de vida del producto es 1,58E03 kg de CO<sub>2</sub> eq (1,36E+00 kg de CO<sub>2</sub> para la fabricación del panel). Dentro de la etapa de fabricación, tienen una mayor contribución los consumos energéticos de las plantas de producción de los wafers (33%), debido a la relación entre esta categoría y el consumo de combustibles fósiles. También contribuye, aunque en menor medida, el marco de aluminio (9%). Finalmente el inversor tiene un 11% de contribución a la categoría.

### **Potencial de agotamiento del ozono estratosférico**

El valor del potencial de agotamiento de ozono estratosférico a lo largo del ciclo de vida del producto es 3,25E-04 kg R11 eq (3,09E-04 kg R11 eq. para la fabricación). Dentro de la fabricación del panel (95%), el tetrafluoretileno utilizado en la producción de los wafers es el proceso con mayor impacto (58%), seguido de los consumos energéticos, también en la producción de los wafers (10%).

### **Potencial de formación de ozono fotoquímico**

El valor del potencial de formación de ozono fotoquímico a lo largo del ciclo de vida del producto es 1,26E00 kg etano eq (1,01E00 kg etano eq. para la fabricación del panel). Los procesos que generan una mayor emisión de compuestos formadores de ozono fotoquímico son aquellos en los que se utiliza energía eléctrica y térmica, por lo tanto, los consumos energéticos

## ***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

en la fabricación del wafer vuelven a ser los que más contribuyen a la categoría (63%), especialmente el flujo de calor residual generado en planta (40%).

### **6.19.2. Comparación caso base de estudio de la base de datos Ecoinvent**

Categoría de impacto	Ecoinvent	Renia	Variación
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	2,11E-01	2,42E-01	15%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	2,06E+04	2,12E+04	3%
Potencial de Acidificación [kg SO2-Eq.]	9,77E+00	8,37E+00	-14%
Potencial de Eutrofización [kg de PO4 eq.]	1,26E+00	1,33E+00	6%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO2-eq.]	1,58E+03	1,71E+03	8%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	3,25E-04	3,81E-04	17%
Potencial de Formación de Ozono Fotoquímico [kg Etileno-Eq.]	1,26E+00	1,39E+00	11%

**Tabla 22 Impactos relativos generados en comparación con el caso base de Ecoinvent**

*Fuente: Elaboración propia*

Se puede observar en los resultados presentados una desviación media de los impactos, en referencia al caso base de estudio de ecoinvent, 1kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, on roof, de un 6% en total. Dentro de esta destacar un crecimiento de la categoría de agotamiento de ozono estratosférico en un 17% y una disminución del 14 % en la acidificación, respeto al caso base.

Estas desviaciones encontradas, se consideran aceptables dado alcance del estudio y la metodología y los pertinentes análisis de verificación realizados.

La principal causa de la desviación es el consumo energético en la producción del silicio solar, ya que en el caso de base de ecoinvent se considera que el 40% está producido con una hidroeléctrica y el 60% restante mediante sistemas de cogeneración, tecnologías de generación energéticas con valores más bajos de emisiones y afectaciones al medio en general. En comparación con los grid mix utilizados por el fabricante específico del caso práctico desarrollado, que incorporan un alto porcentaje de tecnologías basadas en combustibles fósiles, que acumulan más impactos en el medio ambiente.

### **6.19.3. Evaluación fase de uso**

Los sistemas fotovoltaicos generan electricidad durante su fase de uso mediante el aprovechamiento de la energía solar. En esta fase los impactos generados son prácticamente nulos. Solo se producen emisiones indirectas procedentes de las tareas de mantenimiento, no tenidas en cuenta en este estudio según los límites del sistema establecidos.

A continuación se presentan los impactos evitados debido a que la producción de energía mediante el sol, desplaza ciertas tecnologías marginales del mix eléctrico, tal y como se ha expuesto en apartados anteriores. Para ello se detallan dos zonas geográficas distintas, Barcelona y Málaga, con sus respectivas radiaciones solares.

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

Escenario Barcelona	Impacto / kWh generado	Impacto evitado / kWh generado Barcelona	Impacto final / kWh generado Barcelona
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	8,55E-06	-5,41E-08	8,50E-06
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	8,36E-01	-9,70E+00	-8,87E+00
Potencial de Acidificación [kg SO2-Eq.]	3,96E-04	-4,03E-03	-3,63E-03
Potencial de Eutrofización [kg de PO4 eq.]	5,12E-05	-2,52E-04	-2,01E-04
Potencial de Calentamiento Global [kg CO2-eq.]	6,43E-02	-7,05E-01	-6,41E-01
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	1,32E-08	-4,91E-08	-3,59E-08
Potencial de creación del ozono fotoquímico [kg ethene Eq.]	5,11E-05	-2,21E-04	-1,70E-04

**Tabla 23 Impactos potenciales del sistema incluyendo la etapa de uso con la irradiación solar de Barcelona**

Fuente: *Elaboración propia*

Escenario Málaga	Impacto / kWh generado	Impacto evitado / kWh generado Málaga	Impacto final / kWh generado Málaga
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	7,07E-06	-5,41E-08	7,01E-06
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	6,91E-01	-9,70E+00	-9,01E+00
Potencial de Acidificación [kg SO2-Eq.]	3,27E-04	-4,03E-03	-3,70E-03
Potencial de Eutrofización [kg de PO4 eq.]	4,23E-05	-2,52E-04	-2,09E-04
Potencial de Calentamiento Global [kg CO2-eq.]	5,31E-02	-7,05E-01	-6,52E-01
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	1,09E-08	-4,91E-08	-3,82E-08
Potencial de creación del ozono fotoquímico [kg ethene Eq.]	4,22E-05	-2,21E-04	-1,79E-04

**Tabla 24 Impactos potenciales del sistema incluyendo la etapa de uso con la irradiación solar de Málaga**

Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede observar, los impactos en la zona de Málaga son más bajos, esto es debido a la mayor radiación existente, y en consecuencia, una mayor producción energética del sistema.

Si se analiza el impacto generado durante todo el ciclo de vida, se observan valores negativos en todas las categorías, menos la de reducción de recursos minerales. Por lo tanto, se puede concluir que los sistemas de generación de electricidad mediante energía solar, son ambientalmente beneficiosos en las dos situaciones estudiadas, teniendo una capacidad superior de generación de energía a toda la usada para su fabricación y puesta en funcionamiento.

Tal y como se comenta anteriormente, el EPBT es uno de los indicadores de referencia utilizados por la comunidad científica para valorar este tipo de sistemas, aunque inconsistente con el cálculo anterior. Por este motivo se presentan de forma separada y se valoran independientemente.

	Producción anual (kWh/año)	Energía primaria consumida (MJ)	EPBT [yr]
<b>Barcelona</b>	104025	3132967	<b>2,6</b>
<b>Málaga</b>	125925	3132967	<b>2,1</b>

**Tabla 25 Energy Payback Time de los dos escenarios**

Fuente: *Elaboración propia*

Igual que en el caso anterior, la mayor radiación de la zona de Málaga produce unos resultados mejores. Comparado con los estudios citados en la bibliografía, estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos [Pacca S. et. al, 2009], [Fthenakis V.M. et. al, 2010], [Alsema E. A. et al, 2006] y [Alsema E. A. et al, 2007].

## **6.20. Verificación de los resultados**

### **6.20.1. Exactitud**

Al inicio del estudio se estableció el requisito de mostrar la variabilidad de los datos utilizados. Por una parte, la precisión y exactitud de los datos introducidos en las bases de datos del programa GaBi ya han sido evaluadas por sus autores. Para el caso de datos obtenidos de primera mano del fabricante, se basaran únicamente en la actividad de la empresa durante el año 2011.

### **6.20.2. Alcance**

Al inicio del estudio se estableció el requisito de utilizar medidas directas o bien desarrollar modelos basados en información básica sobre el proceso. Cuando esto no ha sido posible, se han utilizado modelos procedentes de la base de datos Ecoinvent, como ya se ha comentado anteriormente.

A pesar de ello, el estudio es una buena aproximación a los sistemas estudiados ya que la mayoría de datos obtenidos provienen de fabricantes e instaladores, y, los pertinentes a las bases de datos, se considera que las fuentes utilizadas son representativas y de calidad.

La representatividad de los datos queda asegurada ya que los valores utilizados corresponden a datos de producción estable del año 2011, abarcando la producción total anual.

### **6.20.3. Homogeneidad**

Al inicio del estudio se estableció el requisito de aplicar la metodología del estudio de una manera uniforme. Esta condición se ha cumplido en todas las decisiones metodológicas. Para poder cumplir con este requisito, se ha desarrollado en GaBi 4.3 un único modelo de estudio para todos los tipos de sistemas solares fotovoltaicos analizados que permite crear escenarios diferentes para cada tipo, pudiendo así identificar las características diferenciadas para cada uno de ellos.

### **6.20.4. Reproducibilidad**

Al inicio del estudio se estableció el requisito de describir los métodos y datos utilizados de manera que pudieran ser reproducidos por parte de un profesional independiente. Siempre y cuando este profesional dispusiera de las mismas bases de datos, podría reproducir los mismos resultados. Por motivos de confidencialidad los modelos de las bases de datos comerciales no se pueden reproducir en el informe (aunque sí pueden consultarse si se adquieren), en cambio los datos calculados o añadidos por los autores han sido descritos en detalle en el apartado del inventario.

### **6.20.5. Representatividad**

Al inicio del estudio se estableció el requisito de reflejar la población de datos real de interés, en cuanto a su ámbito geográfico, temporal y tecnológico.

### **6.20.6. Cobertura temporal**

Al inicio del estudio se planteó como objetivo utilizar datos con una antigüedad máxima de 10 años. Este horizonte temporal ha sido suficiente en todos los datos utilizados de la base de datos, y para datos directos de la empresa se han utilizado datos correspondientes al año 2011, como ya se ha comentado anteriormente.

### **6.20.7. Cobertura geográfica**

Este proyecto cubre las diferentes fases del ciclo de vida de los sistemas solares fotovoltaicos. Por este motivo, la cobertura geográfica abarca desde las zonas de extracción de

las materias primas, hasta la fase de uso del producto, incluyendo las zonas de producción de distintos componentes y el transporte de éstos (España, Europa, resto del Mundo) y su uso (España). Para la gestión de los residuos del embalaje se han estudiado los escenarios correspondientes a las zonas de recepción en España.

#### **6.20.8. Cobertura técnica**

El estudio se ha planteado teniendo en cuenta los datos relativos a las tecnologías actuales a la hora de evaluar la producción de cualquier material, fuente energética o utilidad. Para los datos correspondientes a la producción de los sistemas estudiados, se han empleado los valores relativos a las tecnologías actualmente empleadas por la empresa Colaboradora.

#### **6.20.9. Análisis de integridad**

Como ya ha sido expuesto, cuando no ha sido posible utilizar datos reales directos de la empresa, se ha optado por utilizar los datos presentes en la base de datos de Ecoinvent. Conservando siempre la consistencia entre límites del sistema e hipótesis realizadas.

#### **6.20.10. Análisis de sensibilidad**

La finalidad del análisis de sensibilidad es evaluar la fiabilidad de los resultados finales y de las conclusiones. Para ello se debe analizar si éstos se ven afectados por incertidumbres en los datos, los métodos de asignación, los indicadores de categoría utilizados o cualquier otro parámetro significativo.

Una vez valorados los resultados obtenidos del estudio y las contribuciones relativas de los distintos procesos que intervienen en el ciclo de vida del sistema estudiado, se decide analizar las siguientes variables:

- Mix eléctrico obtención del silicio grado solar
- Espesor del wafer

Estas dos variables contribuyen de forma importante al impacto final generado, por esto son objeto del análisis de sensibilidad.

#### **Mix eléctrico obtención del silicio grado solar**

Para poder llegar a analizar las variaciones producidas en los impactos debidos al cambio de país en la producción del wafer, primero de todo se debe conocer el mix eléctrico del país, ya que los impactos van directamente relacionados con éste, como se ha visto en las distintas categorías analizadas.

En la siguiente tabla se presentan los distintos mix eléctricos considerados en el presente análisis de sensibilidad y sus emisiones de kg. CO<sub>2</sub> eq. / kWh generado.

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**

	kg. CO <sub>2</sub> / kWh	US 2009	Taiwan 2009	España 2009	Mix europeo 2009
Carbón	1,07E+00	45,2%	32,1%	12,6%	36,2%
Diesel	8,80E-01	1,2%	49,0%	6,5%	1,4%
Gas natural	6,40E-01	22,7%	10,2%	36,6%	11,6%
Biofuel	1,50E-01	1,2%	0,0%	0,9%	3,7%
Residuos	0,00E+00	0,5%	0,0%	0,5%	1,4%
Nuclear	1,00E-02	19,8%	8,3%	18,0%	19,0%
Hidroeléctrica	0,00E+00	7,1%	0,0%	9,9%	19,4%
Geotérmica	---	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%
Solar FV	5,00E-02	0,0%	0,0%	2,0%	0,9%
Eólica	1,00E-02	1,8%	0,0%	12,9%	5,6%
Otros	---	0,0%	0,5%	0,1%	0,9%
<b>Total kg CO<sub>2</sub> / kWh</b>		<b>6,43E-01</b>	<b>8,41E-01</b>	<b>4,32E-01</b>	<b>4,82E-01</b>

**Tabla 26 Mixes eléctricos considerados y kg CO<sub>2</sub> generado por kWh**

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que las tecnologías que generan mayores emisiones por kWh son principalmente las que funcionan a base de combustibles fósiles, como el carbón, diesel o el gas natural, aunque este último en menor medida, ya que la tecnología de generación es más eficiente.

Impactos / kwp panel	Caso base (Taiwan y Us)	Mix español	Variación	Mix europeo	Variación
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	1,43E-01	1,43E-01	0%	1,43E-01	0%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	1,81E+04	1,09E+04	-40%	1,60E+04	-12%
Potencial de Acidificación [kg SO <sub>2</sub> -Eq.]	8,20E+00	4,19E+00	-49%	4,69E+00	-43%
Potencial de Eutrofización [kg de PO <sub>4</sub> eq.]	1,05E+00	7,79E-01	-26%	8,40E-01	-20%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	1,38E+03	8,57E+02	-38%	1,24E+03	-10%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11]	2,85E-04	2,59E-04	-9%	2,75E-04	-4%
Potencial de creación del ozono fotoquímico [kg ethene Eq]	1,01E+00	7,82E-01	-22%	8,31E-01	-17%

**Tabla 27 Variación de los impactos generados en función del país de fabricación del wafer**

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, como los mix eléctricos de los países productores de wafers son fuertemente dependientes de combustibles fósiles. Del carbón y, diesel, en el caso de Taiwan, y gas natural, en Estados Unidos, las reducciones de impactos presentadas en la tabla – vienen justificadas por los mixes eléctricos del país de procedencia de la fabricación, teniendo una gran afectación al total de los impactos generados en el ciclo de vida de la instalación. Por esto también se considera importante analizar la cantidad de material utilizada para la producción del wafer, ya que va directamente relacionado.

Las principales variaciones en las categorías de impacto seleccionadas vienen dadas en las categorías que están más directamente relacionadas con los consumos energéticos, como son la reducción de recursos energéticos fósiles, potencial de acidificación y cambio climático. Llegando hasta un 50% de reducción en los impactos generados, en el caso español por ejemplo, principalmente a la contribución de la energía hidroeléctrica, eólica y nuclear utilizada. Simplemente con el hecho de variar el lugar de producción del wafer, se observan cambios significativos, por este motivo, es ambientalmente muy importante, considerar el país de producción. Por ejemplo, en Noruega, país donde se produce aproximadamente el 17 % de la producción europea de wafers, los impactos por kWh generados son mucho menores que en otros país, consiguiéndolos reducir hasta un orden de magnitud. Esto es debido a que su mix eléctrico está compuesto por un 96% de generación hidroeléctrica, siendo esta una de las de menor impacto ambiental generado en prácticamente todas las categorías.

### Espeor wafer

Como se ha observado en los resultados del estudio, la producción del wafer, es un proceso que genera una gran cantidad de impactos ambientales. Una de las maneras de reducir estos impactos es reduciendo su espesor, esto conlleva una reducción del material utilizado y en consecuencia una reducción de los impactos. En la siguiente tabla se presentan dos escenarios distintos, una reducción del wafer en un 25%, resultando un espesor de 150  $\mu\text{m}$ , y un aumento de este en 20%, hasta un espesor de 240  $\mu\text{m}$ , respecto al caso base del fabricante estudiado que es de 200  $\mu\text{m}$ .

Impactos / kwp panel	Espesor 200 $\mu\text{m}$	Espesor 150 $\mu\text{m}$	Variación	Espesor 240 $\mu\text{m}$	Variación
Reducción de recursos minerales [kg Sb-Eq.]	1,43E-01	1,43E-01	0%	1,43E-01	0%
Reducción de recursos energéticos fósiles [MJ]	1,63E+04	1,41E+04	-14%	1,81E+04	11%
Potencial de Acidificación [kg SO <sub>2</sub> -Eq.]	7,39E+00	6,38E+00	-14%	8,20E+00	11%
Potencial de Eutrofización [kg de PO <sub>4</sub> eq.]	9,89E-01	9,13E-01	-8%	1,05E+00	6%
Potencial de Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> -eq.]	1,25E+03	1,09E+03	-13%	1,38E+03	10%
Potencial de Agotamiento de Ozono Estratosférico [kg R11-Eq.]	2,74E-04	2,60E-04	-5%	2,85E-04	4%
Potencial de creación del ozono fotoquímico [kg ethene Eq.]	9,54E-01	8,87E-01	-7%	1,01E+00	6%

**Tabla 28 Variación de los impactos generados en función del espesor del wafer utilizado**

Fuente: Elaboración propia

La variación del espesor afecta a los impactos asociados a la cantidad de materias primas utilizadas y, sobretodo, a la energía utilizada para su fabricación. Se analiza cómo dicha variación puede afectar a los valores de las diferentes categorías de impacto consideradas.

Para ello, se ha analizado la variación del peso del wafer a partir de los datos de los consumos de materias primas y energía introducidas en el modelo realizado.

La variación más significativa se observa para las categorías de acidificación y de reducción de recursos energéticos fósiles, seguidas del potencial de calentamiento global. Para el resto de categorías, la variación del peso es menos significativa. Esto es debido, una vez más al consumo energético en su producción, siendo las categorías citadas, las más sensibles.

Por lo tanto, se concluye, que el espesor del wafer es un punto clave para la optimización de los sistemas y la reducción de los impactos ambientales generados debido a la importante contribución en la mayoría de categorías. Prueba de esto es el constante trabajo de las empresas productoras para la reducción de su espesor.

### 6.21. Análisis de consistencia

El análisis de consistencia tiene el objetivo de determinar si las hipótesis, métodos y datos son coherentes con el objetivo y el alcance del estudio. Se considera importante abordar las siguientes cuestiones:

¿Son coherentes las diferencias de calidad de los datos con el objetivo y el alcance del estudio a lo largo de todo el ciclo de vida de un sistema de productos y entre los distintos sistemas de productos?

**Respuesta:** Existen diferencias en la calidad de los datos utilizados en los distintos sistemas de producto. Sin embargo, la mayoría de los datos relativos a los procesos de producción, transporte e instalación de son datos directamente obtenidos de los productores, asegurando su representatividad y veracidad. En el resto de sistemas, como pueden ser los datos relativos a la actividad extractiva, o la producción de embalajes, se han utilizado únicamente las fuentes de las bases de datos de Ecoinvent.

¿Se han aplicado coherentemente las reglas de asignación y los límites del sistema a todos los sistemas de productos?

**Respuesta:** se ha procurado aplicar las mismas reglas de asignación y límites del sistema en todos los datos utilizados. En los casos en los que por motivos de confidencialidad de

datos se ha tenido que trabajar con modelos agregados, se ha procurado que las reglas de asignación y los límites del sistema fueran compatibles con el resto de datos.

¿Se han aplicado coherentemente los elementos de evaluación de impacto?

**Respuesta:** se han aplicado los elementos de evaluación de impacto de manera coherente en todos los sistemas analizados. Sólo se han utilizado los elementos de clasificación y caracterización.

Se considera que los resultados del estudio son coherentes con la definición de sus objetivos y alcance.

## **6.22. Valoración y discusión**

- Para todas las categorías de impacto analizadas, la fase de fabricación del panel solar es la de mayor impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del panel solar estudiado.
- Durante la fase de fabricación, los procesos más impactantes son la obtención del silicio multicristalino, debido al gran consumo energético que se produce en el proceso productivo (MJ/kWp). Otros procesos que generan un gran impacto aunque no en todas las categorías son , el inversor, el vidrio solar, los gases florados utilizados en la manufactura del silicio y la metalización de la celda.
- La estructura de aluminio, todo y tener un peso elevado, no supone un impacto ambiental relevante en relación con el total de impacto de todo el ciclo de vida.
- Los transportes de materiales, todo y ser intercontinentales algunos y cubrir distancias de hasta 10.000 km., tampoco tienen una afectación importante a ninguna categoría de impacto ambiental estudiada, principalmente debido a que los algunos de los productos o subproductos que intervienen tienen una carga energética elevada en su fabricación, tal y como ya se ha comentado.
- Se observa que debido a la generación de energía durante la fase de uso, el sistema consigue compensar, y conseguir impactos ambientales positivos en prácticamente todas las categorías. La única que no, es la de recursos minerales abióticos, debido a que no está relacionada con los flujos energéticos, sino a los materiales.
- La energía fotovoltaica es ampliamente considerada como una de las tecnologías de energía renovable más prometedoras, debido a que no se requiere combustible para su funcionamiento, como otras tecnologías convencionales. Tiene el potencial para contribuir de forma significativa a un suministro de energía sostenible y puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Para estudios posteriores sería necesario incorporar la parte de fin de vida, aunque esta esté poco estandarizada. Ya existen algunos estudios pioneros como los realizados por la asociación PV Cycle

## **7. DESARROLLO DE LAS RCP**

El proceso de elaboración de un documento de RCP queda descrito por la norma ISO 14025 e incluye, entre otras actividades, la consulta a partes interesadas (fabricantes, asociaciones, laboratorios, administración, usuarios, etc.). Para facilitar este proceso, los

programas de DAP acostumbran a preparar un borrador del documento que, posteriormente, es presentado y debatido con los representantes de las partes interesadas<sup>6</sup>.

Por otro lado, la norma EN 15804:2012 define los contenidos nucleares de los documentos de RCP de productos de la construcción. Por todo ello, en el marco de este proyecto final de máster y utilizando los resultados del estudio de ACV desarrollado, se pretende definir los valores de parámetros clave que, combinados con los contenidos de la EN 15804:2012, puedan llevar a la definición de las RCP de los sistemas fotovoltaicos para edificios. .

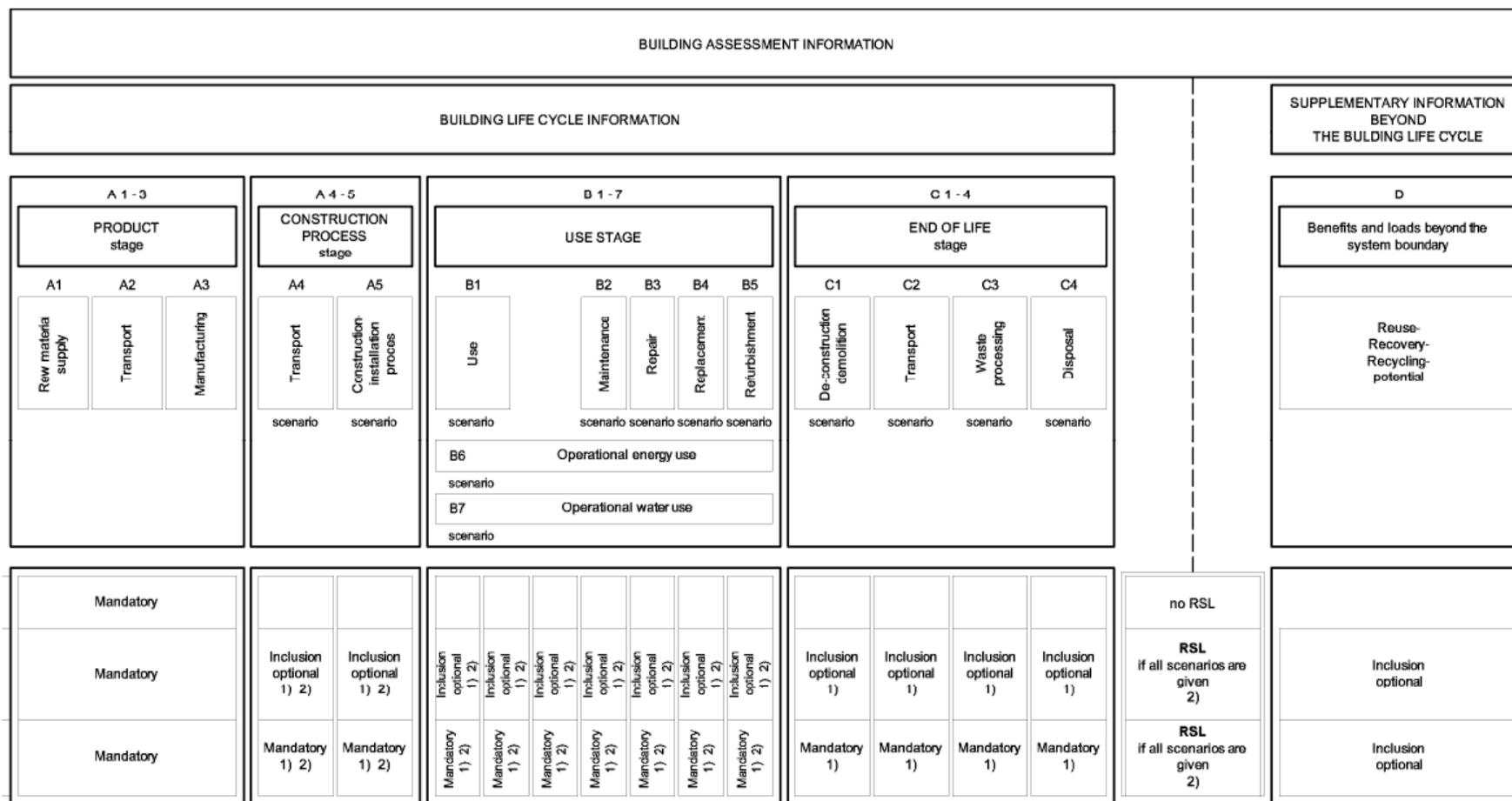
### **7.1. Límites del sistema y etapas del ciclo de vida a incluir**

Los límites del sistema definen claramente los procesos que se deben incorporar en el sistema estudiado y estos dependerán del alcance definido. Las PCR definen las partes obligatorias y opcionales a incorporar, según la norma UNE-EN 15804:2012 se clasifican de la siguiente forma:

---

<sup>6</sup> Fuente: comunicación personal de la Dra. Cristina Gazulla, subdirectora de la Cátedra UNESCO de Ciclo de Vida y Cambio Climático (ESCI-UPF), el día 20 de agosto de 2012.

**Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación**



1) inclusion for a declared scenario

2) if all scenarios are given

**Figura 29** Diferentes alcances de las DAP en función de las etapas del ciclo de vida tenidas en cuenta

Fuente: EN 15804:2012

### **7.1.1. Módulos A1- A3. Fabricación del producto**

La fase de fabricación del producto es de inclusión obligatoria para la obtención de la DAP y está formada por los siguientes módulos y procesos:

- A1. Suministro de materias primas: Extracción, preparación y elaboración intermedia de materias primas, y producción y transporte de materiales auxiliares y productos intermedios utilizados.
- A2. Transporte: Transporte medio de las materias primas desde el lugar de extracción o producción hasta la fábrica
- A3. Fabricación: Fabricación del producto, energía utilizada (producción y transporte), recogida de residuos y procesos de reciclaje hasta la fabricación de materias primas secundarias, producción de los embalajes utilizados en toda la cadena

### **7.1.2. Módulos A4 y A5. Construcción y/o instalación**

La fase de construcción es de carácter opcional y está formada por los siguientes módulos y procesos:

- A4. Transporte: Transporte desde la puerta de la fábrica hasta el lugar de instalación del producto estudiado o de sus diferentes componentes si se diera el caso de que los lugares de fabricación no son el mismo,
- A5. Procesos de instalación y construcción: Almacenaje del producto, instalación del producto en el edificio, incluyendo materiales auxiliares necesarios y posibles afectaciones en el lugar de instalación y gestión de los residuos generados durante la obra.

### **7.1.3. Módulos B1- B7. Uso y mantenimiento**

La fase de uso también es de carácter opcional y está formada por los siguientes módulos y procesos:

- B1. Uso: Uso del producto en el edificio donde está instalado
- B2. Mantenimiento y transporte: Operaciones de mantenimiento del producto, incluyendo el transporte de los subproductos utilizados para tal.
- B3. Reparación: Operaciones de reparación del producto, incluyendo los componentes necesarios y su transporte
- B4. Substitución: Operaciones de substitución del producto, incluyendo los componentes necesarios y su transporte
- B5. Rehabilitación: Operaciones de rehabilitación del producto, incluyendo los componentes necesarios y su transporte
- B6. Uso de la energía operacional: Consumo de energía debido a la utilización del producto
- B7. Uso del agua operacional: Consumo de agua debido a la utilización del producto
- 

### **7.1.4. Módulos C1- C4. Fin de vida**

La fase de fin de vida también es de carácter opcional, se podrá incluir siempre y cuando se hayan incluido las anteriores. Está formada por los siguientes módulos y procesos:

- C1. Deconstrucción y derribo: Operaciones para la deconstrucción del producto, incluyendo componentes necesarios, su transporte y los consumos energéticos asociados
- C2. Transporte: Transporte de los residuos generados en la deconstrucción hasta la planta de gestión de éstos

- C3. Gestión de residuos: Se deberá considerar la cantidad de producto que es reciclado al final de su ciclo de vida, teniendo en cuenta las reglas de asignación descritas
- C4. Eliminación final: Procesos de tratamiento de los residuos que no sean los reutilizados, recuperados ni reciclados. Principalmente vertido y incineración sin recuperación energética

#### **7.1.5. Módulo D. Beneficios y cargas ambientales**

En el módulo D se podrán presentar los impactos ambientales generados debido a la reutilización, recuperación o reciclaje dentro de los límites del sistema definidos.

A la hora de calcular los impactos de las operaciones de reutilización, recuperación y reciclaje se deberá tener en cuenta la tecnología media existente y las prácticas actuales.

Como ya se ha visto en los resultados del ACV, los sistemas fotovoltaicos son productores de energía, y, por lo tanto, capaces de compensar los impactos ambientales generados en su fase de fabricación, debido a los impactos evitados. Es por esto que también se podrá incorporar, de forma opcional, los beneficios y cargas ambientales debidos a la expansión del sistema asociadas a la generación energética. Tal y como indica la norma EN 15804:2012, esta información debe ser presentada de forma independiente en otro módulo separado a los anteriores (módulo D).

En el sistema utilizado como caso base de estudio, se han considerado todas las etapas del ciclo de vida citadas como obligatorias en la norma EN-15804:2012, que son la A1, A2 y A3, y las referentes a la fase de instalación, A4 y A5. Finalmente también se ha tenido en cuenta la producción energética producida durante toda la vida útil del sistema, que debe ir detallada en el módulo D.

Las PCR a desarrollar han de considerar las opciones descritas en la figura anterior, siendo obligatorias las etapas A1, A2 y A3. A partir de aquí, las etapas incluidas deben ir acorde con el alcance requerido y se debe obtener información de primera mano del fabricante para su modelización.

Tal y como se ha desprendido de las conclusiones del ACV realizado, es de suma importancia la correcta modelización de la producción del wafer y su energía embebida asociada, debido a la gran contribución que tiene en prácticamente todas las categorías.

En el caso de la modelización de una instalación fotovoltaica completa, no solo el panel fotovoltaico, también tiene una contribución importante el inversor, por lo cual se deberían disponer datos directos de su fabricante.

Por lo tanto, se desprende del estudio realizado, que las etapas relevantes a tener en cuenta en los sistemas fotovoltaicos para la obtención de una DAP son las etapas A1, A2 y A3 dado su carácter obligatorio y el impacto generado. Para poder llegar a observar los beneficios del sistema también se recomienda incorporar el módulo D, para la contabilización de la energía generada durante su funcionamiento.

Para el cálculo de los beneficios ambientales del módulo D se recomienda la siguiente metodología específica para los sistemas fotovoltaicos.

Tal y como se ha realizado en el estudio del caso base, se asume un rendimiento del sistema (Performance ratio) de 0,75 definido por la IEA [IEA, 2011], este rendimiento se considera igual para todos los tipos de sistemas, ya que es independiente de la tecnología de conversión de la energía solar a eléctrica.

Para los cálculos de previsiones de producción se debe definir la situación geográfica donde va a operar el sistema, ya que la radiación obtenida no es constante a lo largo de todo el territorio y la producción obtenida depende de ésta. Los distintos niveles de radiación en España

pueden ser extraídos del Código Técnico de Edificación, del Ministerio de Fomento de España [Ministerio de fomento de España, 2006].

Por otra parte también se debe considerar que los sistemas fotovoltaicos tienen cierta degradación y pérdida de rendimiento con el paso del tiempo. Se considera una pérdida de capacidad de producción lineal, llegando a ser del 80% al final de su vida útil [IEA, 2011].

## **7.2. Unidad declarada y unidad funcional**

Como ya se ha definido en la metodología del ACV, la unidad funcional debe definir y abarcar perfectamente las funciones del producto estudiado. Por lo tanto, se definen dos unidades funcionales a elegir dependiendo del alcance escogido por el fabricante.

- Para las DAP de la cuna hasta la puerta de fábrica, se recomienda utilizar como unidad declarada: 1 kWp de un panel fotovoltaico, ya que es uno de los parámetros clave para definir los módulos e instalaciones fotovoltaicas y junto con su rendimiento definen la producción de energía potencial de la instalación
- Para las DAP de la cuna hasta la tumba, se recomienda utilizar como unidad funcional: 1 kWh generado por una instalación fotovoltaica. En este caso el fabricante deberá especificar la potencia total de la instalación, la irradiación teórica utilizada y hacer referencia a la vida útil de referencia especificada. Esta unidad funcional es suficientemente representativa del sistema, ya que se adecua perfectamente a la función para el cual ha sido diseñado, la producción de energía. También permite la comparación entre sistemas con diferentes tecnologías o situaciones geográficas, siempre y cuando se cumplan con los mismos requisitos de calidad de datos y límites del sistema

## **7.3. Vida útil de referencia**

La vida útil de referencia debe quedar claramente especificada, ya que de ella dependen, en parte, los impactos que se vayan a producir, debido a posibles acciones de mantenimiento y reposición. Destacar que la vida útil de referencia solo será válida para las condiciones establecidas de funcionamiento.

Los tiempos de vida útil de referencia de los diferentes componentes aplicables para la definición RCP son los ya citados en el apartado 6.6 del presente proyecto, según el documento *LCA Report IEA-PVPS T12-01:2009 Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*.

- **Módulos: 30 años** para las tecnologías de módulos más maduras (por ejemplo, encapsulación vidrio-Tedlar), la esperanza de vida suele ser menor en la encapsulación en papel de aluminio solamente, por ejemplo.
- **Inversores: 15 años** para las plantas pequeñas residenciales.
- **Estructura: 30 años** para instalación montadas e integradas en tejado o fachada.
- **Cableado: 30 años**
- **Bienes de equipo:** El tiempo de vida se establece en **30 años**, aunque debido al rápido desarrollo de la tecnología, puede ser inferior.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Este apartado es el resumen de los resultados obtenidos y los objetivos alcanzados en el presente trabajo final de máster. Contiene las principales conclusiones y recomendaciones para el proyecto.

Como ha sido estudiado por la comunidad científica y se ha analizado en el análisis de antecedentes del presente proyecto, es necesario un cambio de paradigma en el modelo energético global desarrollado durante las últimas décadas. La escasez de los combustibles fósiles y la alta dependencia de la importación de éstos, está ahogando las economías de muchos países actualmente.

Es necesario un aumento sustancial de las inversiones en los sectores económicos estratégicos que favorezcan un desarrollo sostenible sin poner a prueba el desarrollo de generaciones futuras. Estos sectores incluyen las energías renovables, los edificios energéticamente eficientes, tecnologías limpias de producción, entre muchos otros...

En este paradigma, la energía solar es una tecnología clave para la generación energética futura. Es una opción tecnológicamente y económicamente viable ya hoy en día. Los recursos de energía solar en Europa y en todo el mundo son abundantes y de libre acceso.

También existe la necesidad de incluir explícitamente aspectos y consideraciones ambientales en el diseño de productos, a lo largo de todas sus etapas del ciclo de vida. Este concepto, considerado “ecodiseño” o simplemente un buen diseño, está orientado a que los productos tengan el menor impacto ambiental asociado en toda su vida útil.

Sobre esta concepción se generó la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV), que implica que para estudiar el impacto ambiental que genera un producto se deben considerar todos los procesos que intervienen en su fabricación, distribución, uso y fin de vida. De esta forma se conoce de forma íntegra la cadena del producto y permite establecer mejoras en las fases donde se generan los mayores impactos para, así, poder realizar un mejor diseño del producto.

Posteriormente se observó la necesidad de comunicar de forma adecuada los resultados de los análisis ambientales realizados, para estimular el mercado hacia una compra más verde, y se crearon distintos tipos de ecoetiquetas.

Dichas etiquetas y declaraciones se basan en la comunicación de información fiable y concreta, no engañosa, de aspectos medioambientales de determinados productos y servicios. Las etiquetas y las declaraciones medioambientales dan información sobre un producto o servicio en términos medioambientales. Ésta puede ser específica o en aspectos generales.

Durante el desarrollo de la investigación, se han utilizado diferentes herramientas metodológicas como pueden ser la revisión bibliográfica de publicaciones científicas y documentos de referencia en el sector, análisis de la normativa existente, consulta a expertos en las distintas materias, desarrollo de trabajo experimental y encuestas y entrevistas con distintos representantes de empresas y asociaciones sectoriales, para poder obtener una buena representatividad del sector fotovoltaico, tanto a nivel nacional como internacional.

Como desarrollo futuro de este estudio, se sugieren las siguientes actividades:

- El mercado fotovoltaico evoluciona de una forma muy rápida y es fácil que los datos y tecnologías utilizadas queden obsoletos en poco tiempo. Por esto se debe hacer un seguimiento de los datos de inventario utilizados en este estudio en los años sucesivos

(cada 2-3 años) para verificar su validez y ver si las acciones de mejora han aportado reducciones en los impactos ambientales mostrados.

- Aumentar el panel de empresas que han aportado datos de inventario de los distintos productos y subproductos estudiados. Como se ha comentado, el proceso de fabricación del wafer, es muy intensivo energéticamente, por ejemplo, y el modelo del wafer, está basado y adaptado del proceso de la base de datos de Ecoinvent. Sería interesante poder obtener más información de primera mano de fabricantes de wafers, para poder evaluar de forma más específica todas las afectaciones que tiene al modelo completo de la instalación fotovoltaica analizada y, de esta forma aumentar la calidad de los datos presentados.
- Igual que en el caso del wafer, el inversor del sistema también ha sido modelado de forma teórica. Aunque su contribución a las categorías de impacto es menor, un análisis ambiental con datos de primera mano aportaría más calidad y representatividad al estudio.
- Además, cabe destacar que este estudio servirá como base para la realización de las reglas de categoría de producto (RCP) para sistemas solares fotovoltaicos, que servirán como guía para la realización de declaraciones ambientales de producto de dichos sistemas. Por esto se han presentado las principales recomendaciones, desprendidas del análisis realizado, para la elaboración de las RCP.

## 9. REFERENCIAS

- Ardente, F., G. Beccali, M. Cellura, y V. Lo Brano. "Life cycle assessment of a solar thermal collector" *Renewable Energy*, 30, 1031–1054, 2005
- Battisti R. y A. Corrado. "Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage". *Journal of Cleaner Production*, 13, 1295 □ 1300, 2005
- Baumann, H. et Tillman, A.M. "The Hitch Hiker's guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application". *Studentlitteratur*, 2004
- Benveniste G., Gazulla C., Fullana-i-Palmer P., Celades I., Ros T., Zaera V. y Godes B. "Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas". *Informes de la Construcción*, 63, 522, 2011
- Berkhout F., Howes R. "The adoption of life-cycle approaches by industry: patterns and impacts". *Resources, Conversation and Recycling* 20, 71-94, 1997
- Bogeskär M., Carter A., Nevén C.O, Nuij R., Schmincke E., Strandforf H. "Evaluation of Environmental Product Declaration Schemes. Final Report". ERM for European Commission, 2002
- Bolin B. et. Al., "Second Assessment Report Climate Change 1995". Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1995
- Clift R. "Life cycle assessment and ecolabelling". *Journal of Cleaner Production* 1, 3-4, 155- 159, 1993
- Comisión de las Comunidades Europeas. "Libro verde sobre la política de productos integrada. Comunicación COM (2001) 68 final". 2001
- Comisión de las Comunidades Europeas. "Política de Productos Integrada. Desarrollo del concepto de ciclo de vida medioambiental. Comunicación de la Comisión de las Comunidades Europeas al Consejo y al Parlamento Europeo. COM (2003) 302 final". 2003
- Comisión de las Comunidades Europeas. "ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context", 2011

- Consoli F. “Guidelines for Life-cycle Assessment”, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, (SETAC), 1993
- Crutzen, P.J., “The anthropocene”. *Journal of Physics*, 12, 1-5, 2002
- Dalhammar C. “An Emerging Product Approach in Environmental Law. Incorporating the life cycle perspective”. Doctoral Dissertation. The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), 2007
- Derwent, R.G., M.E. Jenkin, S.M. Saunders & M.J. Pilling. “Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in Northwest Europe calculated with a master chemical mechanism”. *Atmospheric Environment*, 32, 2429-2441, 1998
- Ekvall, T. et Tillman, A.M. “Open-loop recycling: criteria for allocation procedures”. *Int. J. LCA* 2 (3) 155-162. 1997
- European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy. “PV status report”, 2011
- European Photovoltaic Industry Association. (a) “Unlocking the Sunbelt Potential of Photovoltaics”, 2011
- European Photovoltaic Industry Association. (b) “Solar Generation 6. Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World”, 2011
- EUROSTAT, European Commission. “Statistical Books, Energy – Yearly Statistics 2005”. 2007
- Fthenakis, V., Chul Kim H., Alsema E., “Emissions from Photovoltaic Life Cycles”. *Environmental Science and Technology*, 42 (6), 2168–2174, 2008
- Fullana-i-Palmer P., Puig R., Bala A., Baquero G., Riba J. and Raugei M. “From Life Cycle Assessment to Life Cycle Management. A Case Study on Industrial Waste”. *Journal of Industrial Ecology*. 15 (3), 458-475, 2011
- Fullana-i-Palmer P., *Revista Aislamiento e Impermeabilización*, nº57, 2011
- Gazulla C. “Declaraciones Ambientales de Producto: instrumento para la mejora de productos”. Tesis doctoral en Ciencia y Tecnología Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona, 2012
- Goldemberg, J. “The Case for Renewable Energies. Thematic Background Papers (TBP)”, International Conference for Renewable Energies, 2004
- Grupo de Investigación en Gestión Ambiental, Escola Superior de Comerç Internacional (UPF), “Análisis del Ciclo de Vida de diferentes tipos de bolsas de supermercado”. *Cicloplast*, 2008
- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J “Life Cycle Assessment. An operational guide to the ISO standards”. Centre of Environmental Science – Leiden University (CML). 2001
- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J “Life Cycle Assessment. An operational guide to the ISO standards, characterisation factors update”. Centre of Environmental Science – Leiden University (CML). 2010
- 
- Hauschild, M & H. Wenzel. “Environmental Assessment of products. Volume 2: Scientific background”. Chapman & Hall, 1998
- Hauschild, M et Potting, J. “Spatial differentiation in life cycle impact assessment. The EDIP 2003 methodology”. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency. 2004
- Hauschild, M et Wenzel, H., “Environmental Assessment of products. Volume 2: Scientific background”. Chapman & Hall, London. 1998
- Heijungs, R., J. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede, “Environmental

- Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds”. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2001.
- Hernández, F. “La producción de energía eléctrica en España: análisis económico de la actividad tras la liberalización del sector eléctrico”. Fundación de las Cajas de Ahorro. Documento de Trabajo número 290/2006. 2006
  - Houghton, J.T., Ding, Y. Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Xiaosu, D. (Eds.), “IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis”. Cambridge University, 2001.
  - Hubbert M.K., “Energy from fossil fuels”. Science, 109, 103-109, 1949
  - IEA PVPS Task 12. “LCA Report IEA-PVPS T12-01:2009 Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity”. 2009
  - IEA. “Trends in photovoltaic applications Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010”. 2010
  - Jenkin, M.E. & G.D. Hayman. “Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters”. Atmospheric Environment 33: 1775-1293, 1999
  - Johansson D. “The influence of eco-labelling on producers of personal computers: The potential for eco-labelling as part of an IPP approach for reducing chemical risks related to PCs in Sweden”. IIIIE Communications, 2000
  - Jolliet O., Müller-Wenk R., Bare J., Brent A., Goedkoop M., Heijungs R., Itsubo N., Peña C., Pennington D. y Potting J. “The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative”. Internacional Journal LCA 9 (6), p 394-404. 2004
  - Jungbluth N., Stucki M., Frischknecht R. y Büsser S. “Ecoinvent-report No. 6 –part XII. Photovoltaics”, 2010
  - Kessides I., Wadeb D. “Towards a sustainable global energy supply infrastructure: Net energy balance and density considerations” Energy Policy, The World Bank Development Research Group Environment and Energy Team, 2011
  - Lindfors L., “Nordic guidelines on life-cycle assessment”, 1995
  - Lindhqvist T. “The Environmental Product Declaration, EPD”. UN ECE Seminar on Economic Implications of Low-waste Technology in the Hague, 1989.
  - Lindhqvist T. “Extended Producer Responsibility in Cleaner Production. Policy Principle to Promote Environmental Improvements of Product Systems”. Doctoral Dissertation. The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), 2000
  - Maggio G., Cacciola, G., "When will oil, natural gas, and coal peak?". Fuel, 98, 111-123, 2012
  - Ministerio de fomento de España. “Código Técnico de la Edificación”, 2006
  - Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITYC). “Plan Nacional de reserva estratégica de carbón 2006-2012 y nuevo modelo de desarrollo integral y sostenible de las comarcas mineras”, 2006
  - Molina-Murillo S.A, Smith T.M. “Exploring the use and impact of LCA-based information in corporate communications”. International Journal of Life Cycle Assessment 14, 184-194, 2009
  - Parlamento Europeo y Junta de la Unión Europea. “Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings”, 2002
  - Pimentel, D., Pimentel M., “Global environmental resources versus world population growth”. Ecological economics, 59, 195-198, 2006
  - Puig, R. (coordinación y edición) “Llibre didàctic d’Anàlisi del Cicle de Vida (ACV)” Xarxa temàtica Catalana d’ACV, 2002.
  - Raugei, M., Bargigli, S., Ulgiati, S. “Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si”. Energy 32, 1310–1318, 2007

- Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.-P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W. “Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications”. *Environment International* 30, 701-720, 2004
- Red Eléctrica Española. “El sistema eléctrico español. Informe anual 2006”, 2007
- Solomon & Albritton. “Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment”, *Nord* 1995:20, 1992
- Stø E., Strandbakken P., Strand M. “Consumers and Environmental Information. Deliverable no 21a from the DEEP project. Lysaker: SIFO Professional report no 3”, 2002
- Stø E., Strandbakken P., Scheer D., Rubik F. “Background: theoretical contributions, eco-labels and environmental policy” Greenleaf Publishing, 2005
- Tsoutsos, T., N. Frantzeskaki y V. Gekas. “Environmental impacts from the solar energy technologies”. *Energy Policy*, 33, 289–296, 2005
- United Nations Environment Programme (UNEP). “Green Economy Report: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication”. 2011
- Valdivia, S., Ciroth, A., Ugaya, C., Lu, B., Sonnemann, G., Fontes, J., Alvarado, C. y Tischhauser, S. “A UNEP/ SETAC Tool Box for LC Sustainability Assessment of Products” *Proceedings of the 9th International Conference on EcoBalance*, 2010
- van Amstel M., Driessen P., Glasbergen P. “Eco-labelling and information asymmetry: a comparison of five eco-labels in the Netherlands”. *Journal of Cleaner Production* 16, 263-276, 2008
- Weidema, B. “Market information in life cycle assessment”. *Environmental Project No. 863 Miljøprojekt*. Danish Environmental Protection Agency, Danish Ministry of The Environment, 2003
- World Energy Council. “Deciding the future: Energy policy scenarios to 205”. 2007.
- Zwaana, B., Gerlagh R. “Climate sensitivity uncertainty and the necessity to transform global energy supply” *Energy*, 31 (14), 2571-2587, 2006

## **Anexo 1 Factores de caracterización de las categorías de impacto aplicadas**

### **Agotamiento de recursos abióticos**

Flujo	1 [flujo] = * kg Sb-Equiv.
Actinium [Non renewable elements]	6,33E+13
Aluminum [Non renewable elements]	1,00E-08
<b>Antimony [Non renewable elements]</b>	<b>1</b>
Argon [Non renewable elements]	4,71E-07
Arsenic [Non renewable elements]	0,009167566
Barium [Non renewable elements]	1,06E-10
Barium sulphate [Non renewable resources]	4,92E-05
Bauxite [Non renewable resources]	2,10E-09
Beryllium [Non renewable elements]	3,19E-05
Bismuth [Non renewable elements]	0,073100107
Boron [Non renewable elements]	0,004667118
Bromine [Non renewable elements]	0,006673231
Cadmium [Non renewable elements]	0,330075346
Calcium [Non renewable elements]	7,08E-10
Cer [Non renewable elements]	5,32E-09
Cesium [Non renewable elements]	1,91E-05
Chlorine [Non renewable elements]	4,86E-08
Chromium [Non renewable elements]	0,000858251
Chromium ore (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30%) [Non renewable resources]	0,000133887
Chromium ore (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 40%) [Non renewable resources]	0,000196368
Chromium ore [Non renewable resources]	0,000257522
Cinnabar [Non renewable resources]	0,426931767
Cobalt [Non renewable elements]	2,62E-05
Copper [Non renewable elements]	0,001942374
Copper ore (0.14%) [Non renewable resources]	2,72E-06
Copper ore (0.2%) [Non renewable resources]	3,88E-06

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Copper ore (0.3%) [Non renewable resources]	5,83E-06
Copper ore (1.2%) [Non renewable resources]	2,33E-05
Copper ore (1.28%) [Non renewable resources]	2,49E-05
Copper ore (2%) [Non renewable resources]	3,88E-05
Copper ore (4%) [Non renewable resources]	7,77E-05
Copper ore (sulphidic) [Non renewable resources]	2,20E-05
Copper ore [Non renewable resources]	2,20E-05
Crude oil (APME) [Crude oil (resource)]	0,020321769
Crude oil [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Algeria [Crude oil (resource)]	0,021452119
Crude oil Angola [Crude oil (resource)]	0,0204906
Crude oil Argentina [Crude oil (resource)]	0,02023567
Crude oil Australia [Crude oil (resource)]	0,020826819
Crude oil Brazil [Crude oil (resource)]	0,01977872
Crude oil Brunei [Crude oil (resource)]	0,020442981
Crude oil Cameroon [Crude oil (resource)]	0,020345819
Crude oil Canada [Crude oil (resource)]	0,0198172
Crude oil Central Africa [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Central America [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil China [Crude oil (resource)]	0,02035592
Crude oil CIS [Crude oil (resource)]	0,020297719
Crude oil Colombia [Crude oil (resource)]	0,0202501
Crude oil Denmark [Crude oil (resource)]	0,019961981
Crude oil Egypt [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil Far East [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil France [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil free wellhead [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Gabon [Crude oil (resource)]	0,02039921
Crude oil Germany [Crude oil (resource)]	0,020538879
Crude oil Indonesia [Crude oil (resource)]	0,0200577
Crude oil Iran [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Italy [Crude oil (resource)]	0,021308781
Crude oil Kuwait [Crude oil (resource)]	0,020345819

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Crude oil Libya [Crude oil (resource)]	0,0207792
Crude oil Malaysia [Crude oil (resource)]	0,0206349
Crude oil Mexico [Crude oil (resource)]	0,0198653
Crude oil Middle East [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Netherlands [Crude oil (resource)]	0,021164481
Crude oil New Zealand [Crude oil (resource)]	0,0209716
Crude oil Nigeria [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil North Africa [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Norway [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil Oman [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil Qatar [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil Saudi Arabia [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil South Africa [Crude oil (resource)]	0,0203944
Crude oil Spain [Crude oil (resource)]	0,02057754
Crude oil Tunisia [Crude oil (resource)]	0,02070224
Crude oil United Arab Emirates [Crude oil (resource)]	0,0205387
Crude oil United Kingdom [Crude oil (resource)]	0,0207311
Crude oil USA [Crude oil (resource)]	0,020201519
Crude oil Venezuela [Crude oil (resource)]	0,0200577
Cryptonite [Non renewable elements]	20,9
Dysprosium [Non renewable elements]	2,13E-06
Energy recovery (APME) [Energy resources]	0,000481
Energy unspecific [Energy resources]	0,000481
Energy unspecified (APME) [Energy resources]	0,000481
Erbium [Non renewable elements]	2,44E-06
Europium [Non renewable elements]	1,33E-05
Fluorine [Non renewable elements]	2,96E-06
Gadolinium [Non renewable elements]	6,57E-07
Gallium [Non renewable elements]	1,03E-07
Germanium [Non renewable elements]	1,47E-06
Gold [Non renewable elements]	89,50996877
Gold deposit [Non renewable resources]	89,50996877
Hafnium [Non renewable elements]	8,67E-07

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Hard coal (APME) [Hard coal (resource)]	0,01286675
Hard coal [Hard coal (resource)]	0,01395862
Hard coal Australia [Hard coal (resource)]	0,0135642
Hard coal Belgium [Hard coal (resource)]	0,0084656
Hard coal Brazil [Hard coal (resource)]	0,00799903
Hard coal Canada [Hard coal (resource)]	0,01402596
Hard coal China [Hard coal (resource)]	0,0122174
Hard coal CIS [Hard coal (resource)]	0,01228955
Hard coal Colombia [Hard coal (resource)]	0,01263587
Hard coal Czech Republic [Hard coal (resource)]	0,01388166
Hard coal France [Hard coal (resource)]	0,01289561
Hard coal Germany [Hard coal (resource)]	0,01395862
Hard coal Indonesia [Hard coal (resource)]	0,01139489
Hard coal Japan [Hard coal (resource)]	0,011111111
Hard coal Poland [Hard coal (resource)]	0,01290042
Hard coal Portugal [Hard coal (resource)]	0,00676767
Hard coal South Africa [Hard coal (resource)]	0,012506
Hard coal Spain [Hard coal (resource)]	0,01301105
Hard coal United Kingdom [Hard coal (resource)]	0,01228955
Hard coal USA [Hard coal (resource)]	0,012987
Hard coal Venezuela [Hard coal (resource)]	0,0136604
Heavy spar (barytes) [Non renewable resources]	4,92E-05
Helium [Non renewable elements]	147,5585685
Holmium [Non renewable elements]	1,33E-05
Hydrogen (APME) [Non renewable energy resources]	0,000481
Indium [Non renewable elements]	0,00903081
Iodine [Non renewable elements]	0,042708805
Iridium [Non renewable elements]	32,34945907
Iron [Non renewable elements]	8,43E-08
Iron ore (65%) [Non renewable resources]	5,48E-08
Iron ore [Non renewable resources]	4,80E-08
Lanthanides [Non renewable elements]	2,13E-08
Lead - zinc ore (4.6%-0.6%) [Non renewable resources]	0,000627908

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Lead [Non renewable elements]	0,01352075
Lead ore [Non renewable resources]	0,000676957
Lignite (APME) [Lignite (resource)]	0,00623376
Lignite [Lignite (resource)]	0,003944248
Lignite Australia [Lignite (resource)]	0,004713838
Lignite Austria [Lignite (resource)]	0,0052429
Lignite France [Lignite (resource)]	0,003751656
Lignite Germany (Lausitz) [Lignite (resource)]	0,004160554
Lignite Germany (Rheinisch) [Lignite (resource)]	0,004107596
Lignite Germany [Lignite (resource)]	0,004519827
Lignite Greece [Lignite (resource)]	0,002140537
Lignite Spain [Lignite (resource)]	0,004362812
Lignite USA [Lignite (resource)]	0,006782099
Lithium [Non renewable elements]	9,23E-06
Lutetium [Non renewable elements]	7,66E-05
Magnesium [Non renewable elements]	3,73E-09
Manganese [Non renewable elements]	1,38E-05
Manganese ore (43%) [Non renewable resources]	5,91E-06
Manganese ore (R.O.M.) [Non renewable resources]	6,20E-06
Manganese ore [Non renewable resources]	6,20E-06
Mercury [Non renewable elements]	0,495123125
Molybdenid disulfide (Mo 0.21%) [Non renewable resources]	6,65E-05
Molybdenite (Mo 0,24%) [Non renewable resources]	7,60E-05
Molybdenum [Non renewable elements]	0,03166464
Molybdenum ore [Non renewable resources]	3,17E-05
Natural gas (APME) [Natural gas (resource)]	0,02310724
Natural gas [Natural gas (resource)]	0,0197691
Natural gas Algeria [Natural gas (resource)]	0,020558421
Natural gas Angola [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Argentina [Natural gas (resource)]	0,022982465
Natural gas Australia [Natural gas (resource)]	0,023636364
Natural gas Brazil [Natural gas (resource)]	0,021197832
Natural gas Brunei [Natural gas (resource)]	0,023708596

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Natural gas Cameroon [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Canada [Natural gas (resource)]	0,021196708
Natural gas China [Natural gas (resource)]	0,023587681
Natural gas CIS [Natural gas (resource)]	0,020196709
Natural gas Colombia [Natural gas (resource)]	0,021196708
Natural gas Czech Republic [Natural gas (resource)]	0,020196507
Natural gas Denmark [Natural gas (resource)]	0,022615177
Natural gas Egypt [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas France [Natural gas (resource)]	0,01539681
Natural gas Gabon [Natural gas (resource)]	0,023035295
Natural gas Germany [Natural gas (resource)]	0,01960075
Natural gas Greece [Natural gas (resource)]	0,022986858
Natural gas Indonesia [Natural gas (resource)]	0,023694581
Natural gas Iran [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Italy [Natural gas (resource)]	0,023914839
Natural gas Japan [Natural gas (resource)]	0,01945164
Natural gas Kuwait [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Libyan [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Malaysia [Natural gas (resource)]	0,023578431
Natural gas Mexico [Natural gas (resource)]	0,021196708
Natural gas Netherlands [Natural gas (resource)]	0,018304455
Natural gas New Zealand [Natural gas (resource)]	0,023636364
Natural gas Nigeria [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Norway [Natural gas (resource)]	0,022615177
Natural gas Oman [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Poland [Natural gas (resource)]	0,012948556
Natural gas Qatar [Natural gas (resource)]	0,02218853
Natural gas Saudi Arabia [Natural gas (resource)]	0,022029862
Natural gas Spain [Natural gas (resource)]	0,022140391
Natural gas Tunisia [Natural gas (resource)]	0,023434836
Natural gas United Arab Emirates [Natural gas (resource)]	0,022188394
Natural gas United Kingdom [Natural gas (resource)]	0,023354955
Natural gas USA [Natural gas (resource)]	0,021196708

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Natural gas Venezuela [Natural gas (resource)]	0,021196708
Neodymium [Non renewable elements]	1,94E-17
Neon [Non renewable elements]	0,325
Nickel [Non renewable elements]	0,000107508
Nickel ore (1.2%) [Non renewable resources]	1,29E-06
Nickel ore (1.6%) [Non renewable resources]	1,72E-06
Nickel ore (2.0%) [Non renewable resources]	2,15E-06
Nickel ore (2.7%) [Non renewable resources]	2,90E-06
Nickel ore [Non renewable resources]	1,61E-06
Niobium [Non renewable elements]	2,31E-05
Osmium [Non renewable elements]	14,37753736
Palladium [Non renewable elements]	0,323494591
Palladium deposit [Non renewable resources]	0,323494591
Phosphate ore [Non renewable resources]	1,53E-06
Phosphorus [Non renewable elements]	8,44E-05
Phosphorus minerals [Non renewable resources]	8,44E-05
Pit gas [Natural gas (resource)]	0,017292431
Platinum [Non renewable elements]	1,293978363
Platinum deposit [Non renewable resources]	1,293978363
Polonium [Non renewable elements]	4,79E+14
Potassium [Non renewable elements]	3,13E-08
Potassium chloride [Non renewable resources]	3,96E-08
Praseodymium [Non renewable elements]	2,85E-07
Precious metal ore (R.O.M) [Non renewable resources]	5,21E-05
Protactinium [Non renewable elements]	9770000
Radium [Non renewable elements]	23600000
Radon [Non renewable elements]	1,20E+20
Raw brown coal (BUWAL) [Lignite (resource)]	0,003848
Raw hard coal (BUWAL) [Hard coal (resource)]	0,008658
Raw natural gas (BUWAL) [Natural gas (resource)]	0,02104375
Rhenium [Non renewable elements]	0,765823929
Rhodium [Non renewable elements]	32,34945907
Rhodium deposit [Non renewable resources]	32,34945907

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Rubidium [Non renewable elements]	2,36E-09
Ruthenium [Non renewable elements]	32,34945907
Samarium [Non renewable elements]	5,32E-07
Scandium [Non renewable elements]	3,96E-08
Selenium [Non renewable elements]	0,475239211
Selenium deposit [Non renewable resources]	0,475239211
Silicon [Non renewable elements]	2,99E-11
Silver [Non renewable elements]	1,844923517
Silver deposit [Non renewable resources]	1,844923517
Sodium [Non renewable elements]	8,24E-11
Spodumen (LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ) [Non renewable resources]	4,49E-07
Strontium [Non renewable elements]	1,12E-06
Sulphur (APME) [Non renewable energy resources]	0,000481
Sulphur (bonded) [Non renewable resources]	0,000358306
Sulphur [Non renewable elements]	0,000358306
Tantalum [Non renewable elements]	6,77E-05
Tellurium [Non renewable elements]	52,81544338
Terbium [Non renewable elements]	2,36E-05
Thallium [Non renewable elements]	5,05E-05
Thorium [Non renewable elements]	2,08E-07
Thulium [Non renewable elements]	8,31E-05
Tin [Non renewable elements]	0,033003878
Tin ore [Non renewable resources]	3,30E-06
Titanium [Non renewable elements]	4,40E-08
Tungsten [Non renewable elements]	0,011677991
Uranium free ore (BUWAL) [Uranium (resource)]	0,002868358
Uranium free ore [Uranium (resource)]	0,002868358
Uranium natural [Uranium (resource)]	0,002868358
Vanadium [Non renewable elements]	1,16E-06
Vanadium ore (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0.94%) [Non renewable resources]	1,09E-08
Xenon [Non renewable elements]	17500
Ytterbium [Non renewable elements]	2,13E-06
Yttrium [Non renewable elements]	3,34E-07

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Zinc - copper ore (4.07%-2.59%) [Non renewable resources]	9,07E-05
Zinc - lead - copper ore (12%-3%-2%) [Non renewable resources]	0,000563545
Zinc - lead ore (4.21%-4.96%) [Non renewable resources]	0,000138117
Zinc - lead ore (R.O.M) [Non renewable resources]	0,000138117
Zinc [Non renewable elements]	0,000992294
Zinc ore (sulphide) [Non renewable resources]	3,95E-05
Zinc ore [Non renewable resources]	3,95E-05
Zinc-lead ore [Non renewable resources]	0,000138117
Zirconium [Non renewable elements]	1,86E-05

*Fuente: <http://www.cml.leiden.edu/>*

## Acidificación

Flujo	1 [flujo] = * kg SO <sub>2</sub> -Equiv.
Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	0,5
Ammonia [Inorganic emissions to air]	1,6
Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air]	0,5
Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air]	1,2

*Fuente: Hauschild, M & H. 1998*

## Calentamiento global

Flujo	1 [flujo] = * kg CO <sub>2</sub> -Equiv.
Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emissions to air]	1
Carbon dioxide [Renewable resources]	1
Carbon dioxide, land transformation [Inorganic emissions to air]	1
Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	1
Methyl bromide [Halogenated organic emissions to air]	5
Dichloromethane (methylene chloride) [Halogenated organic emissions to air]	10
Chloromethane (methyl chloride) [Halogenated organic emissions to air]	16
VOC [Organic emissions to sea water]	16,1
VOC [Organic emissions to fresh water]	16,1
VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	16,1
Methane [Organic emissions to air (group VOC)]	23
Methane (biotic) [Organic emissions to air (group VOC)]	23
Trichloromethane (chloroform) [Halogenated organic emissions to air]	30
R 152a (difluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	120
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated organic emissions to air]	140
Nitrous oxide (laughing gas) [Inorganic emissions to air]	296
Halon (1211) [Halogenated organic emissions to air]	1300
R 134a (tetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	1300
R 22 (chlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	1700

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

Carbon tetrachloride (tetrachloromethane) [Halogenated organic emissions to air]	1800
R 11 (trichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	4600
Tetrafluoromethane [Halogenated organic emissions to air]	5700
R 113 (trichlorofluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	6000
Halon (1301) [Halogenated organic emissions to air]	6900
R 114 (dichlorotetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	9800
R 12 (dichlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	10600
R 116 (hexafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	11900
R 23 (trifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	12000
R 13 (chlorotrifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	14000
Sulphur hexafluoride [Inorganic emissions to air]	22200

*Fuentes: IPCC, 2001*

**Potencial de eutrofización**

Flujo	1 [flujo] = * kg fosfatos-Equiv.
Chemical oxygen demand (COD) [Analytical measures to fresh water]	0,022
Chemical oxygen demand (COD) [Analytical measures to sea water]	0,022
Ammonium nitrate [Inorganic emissions to air]	0,074
Nitrate [Inorganic emissions to sea water]	0,1
Nitrate [Inorganic emissions to air]	10%
Nitrite [Fresh water]	10%
Nitrite [Inorganic emissions to fresh water]	10%
Nitrate [Fresh water]	10%
Nitrite [Inorganic emissions to sea water]	10%
Nitrate [Inorganic emissions to fresh water]	0,1
Ammonium carbonate [Inorganic emissions to air]	0,12
Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air]	0,13
Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	0,13
Nitrogen monoxide [Inorganic emissions to air]	0,2
Ammonium / ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	0,33

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

Ammonium / ammonia [Inorganic emissions to sea water]	0,33
Ammonium [Inorganic emissions to air]	0,33
Ammonium / ammonia [Fresh water]	0,33
Ammonia [Inorganic emissions to air]	0,35
Ammonia [Inorganic emissions to sea water]	0,35
Ammonia [Inorganic emissions to industrial soil]	0,35
Ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	0,35
Nitrogen [Inorganic emissions to sea water]	0,42
Nitrogen [Inorganic emissions to fresh water]	0,42
Phosphate [Inorganic emissions to fresh water]	1
Phosphate [Fresh water]	1
Phosphate [Inorganic emissions to sea water]	1
Phosphorus [Inorganic emissions to air]	3,06
Phosphorus [Inorganic emissions to industrial soil]	3,06
Phosphorus [Inorganic emissions to sea water]	3,06
Phosphorus [Inorganic emissions to fresh water]	3,06

*Fuente: CML, 1999*

**Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos**

Flujo	1 [flujo] = * kg fosfatos-Equiv.
Nitrogen monoxide [Inorganic emissions to air]	-0,427
Benzaldehyde [Group NMVOC to air]	-0,092
Chloromethane (methyl chloride) [Halogenated organic emissions to air]	0,005
Methane [Organic emissions to air (group VOC)]	0,006
Methane (biotic) [Organic emissions to air (group VOC)]	0,006
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated organic emissions to air]	0,009
Trichloromethane (chloroform) [Halogenated organic emissions to air]	0,023
Methyl formate [Group NMVOC to air]	0,027
Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	0,027

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Carbon monoxide (biotic) [Inorganic emissions to air]	0,027
Nitrogen dioxide [Inorganic emissions to air]	0,028
Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	0,028
Tetrachloroethene (perchloroethylene) [Halogenated organic emissions to air]	0,029
Formic acid (methane acid) [Group NMVOC to air]	0,032
Sulphur dioxide [Inorganic emissions to air]	0,048
Dichloromethane (methylene chloride) [Halogenated organic emissions to air]	0,068
Ethine (acetylene) [Group NMVOC to air]	0,085
Acetone (dimethylcetone) [Group NMVOC to air]	0,094
Acetic acid [Group NMVOC to air]	0,097
VOC [Organic emissions to sea water]	0,1134033
VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	0,1134033
VOC [Organic emissions to fresh water]	0,1134033
Ethane [Group NMVOC to air]	0,123
Styrene [Group NMVOC to air]	0,14
Methanol [Group NMVOC to air]	0,14
Propionic acid (propane acid) [Group NMVOC to air]	0,15
Methyl tert-butylether [Group NMVOC to air]	0,175
Propane [Group NMVOC to air]	0,176
Propanol (iso-propanol; isopropanol) [Group NMVOC to air]	0,188
Ethylene acetate (ethyl acetate) [Group NMVOC to air]	0,209
Benzene [Group NMVOC to air]	0,22
Cyclohexane (hexahydro benzene) [Group NMVOC to air]	0,29
Butane [Group NMVOC to air]	0,352
Butane (n-butane) [Group NMVOC to air]	0,352
Butanone (methyl ethyl ketone) [Group NMVOC to air]	0,373
Alkane (unspecified) [Group NMVOC to air]	0,39
Pentane (n-pentane) [Group NMVOC to air]	0,395

***Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación***

---

Ethanol [Group NMVOC to air]	0,399
Octane [Group NMVOC to air]	0,453
Hexane (isomers) [Group NMVOC to air]	0,482
Heptane (isomers) [Group NMVOC to air]	0,494
Cumene (isopropylbenzene) [Group NMVOC to air]	0,5
Formaldehyde (methanal) [Group NMVOC to air]	0,519
1-Butanol [Group NMVOC to air]	0,62
Toluene (methyl benzene) [Group NMVOC to air]	0,637
Acetaldehyde (Ethanal) [Group NMVOC to air]	0,641
Ethyl benzene [Group NMVOC to air]	0,73
Butadiene [Group NMVOC to air]	0,851
Alkene (unspecified) [Group NMVOC to air]	0,97
NMVOC (unspecified) [Group NMVOC to air]	1
Ethene (ethylene) [Group NMVOC to air]	1
Isoprene [Group NMVOC to air]	1,092
Xylene (dimethyl benzene) [Group NMVOC to air]	1,1
Xylene (meta-Xylene; 1,3-Dimethylbenzene) [Group NMVOC to air]	1,108
Propene (propylene) [Group NMVOC to air]	1,123
Trimethylbenzene [Group NMVOC to air]	1,381

*Fuentes: Jenkin, M.E. et al 1999 y Derwent, R.G. et al 1998*

## **Potencial de destrucción del ozono estratosférico**

Flujo	1 [flujo] = * kg R11-Equiv.
R 22 (chlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	0,14
R 113 (trichlorofluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	0,59
R 11 (trichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	1
Carbon tetrachloride (tetrachloromethane) [Halogenated organic emissions to air]	1,23
Halon (1211) [Halogenated organic emissions to air]	9
Halon (1301) [Halogenated organic emissions to air]	10,5

*Fuente: Solomon M. ed al 1992*