

Análisis del ciclo de vida de un panel solar fotovoltaico empleado para la alimentación eléctrica de instalaciones de riego, comparando las metodologías ECO-Indicador 99 y EPS-2000

J. del Río¹, L.M. Navas¹, L.F. Sánchez¹, N. Ruiz¹, A.C. Guimaraes¹, S. Hernández¹, J. Martín¹, J.F. Sanz²

¹Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid. ETS Ingenierías Agrarias. Email: lnavas@iaf.uva.es

²Escuela Politécnica Superior. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Email: jfsanz@uemc.es

Palabras clave: impacto ambiental, panel solar fotovoltaico, silicio monocristalino y policristalino, SimaPro

Resumen

La alimentación mediante energía solar fotovoltaica de sistemas de riego hortícola localizado de alta frecuencia es una solución de amplia aplicación en áreas sin acceso a la red eléctrica de distribución. Las ventajas medioambientales de este tipo de instalaciones de suministro energético frente a otras, no sólo debe ser analizada desde el punto de vista del ahorro de combustible producido en el corto plazo de su utilización sino a largo plazo durante todo el ciclo de vida de su utilización. En esta comunicación se incluye parte del trabajo llevado a cabo dentro en una investigación sobre el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de paneles solares fotovoltaicos, utilizando la metodología de la Norma ISO 14040, con objeto de estimar los impactos ambientales de los paneles solares fotovoltaicos a lo largo de su ciclo de vida, incluida su fabricación y reutilización, con el fin de poder determinar su idoneidad desde un punto de vista técnico-económico y ambiental. De los procesos que conforman la producción de un panel solar fotovoltaico, el proceso de ensamblaje del panel es el que mayores impactos ambientales produce, siendo el responsable de prácticamente toda la totalidad de la carga ambiental. De hecho, es el causante de más de la mitad de casi todos los impactos, suponiendo porcentajes de responsabilidad aún más elevados en el resto. El proceso de transformación de silicio metalúrgico a silicio solar, es el siguiente con mayor repercusión ambiental, al aparecer en casi todas las categorías de impacto y de daño.

INTRODUCCIÓN

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología internacionalmente aceptada para la evaluación de cargas e impactos ambientales asociados a la elaboración de un producto o proceso, teniendo en cuenta todas las etapas de la vida del mismo.

Existen diferentes métodos para la obtención de silicio solar, pero en este caso se ha considerado el proceso desarrollado por la *Union Carbide Corporation* (UCC) que consiste en la hidrogenación del silicio en un reactor fluido a 500°C y 3,5 MPa, con un catalizador de bases de cobre y una serie de destilaciones fraccionadas que eliminan impurezas. En la última destilación, tiene lugar un proceso de pirólisis, a partir del cual se obtiene el silicio de grado solar, con una pureza de $1 \cdot 10^{-3}$ a 10^{-6} . (Enríquez, 2008).

En el caso del proceso de ensamblaje, las células fabricadas se prueban, se interconectan mediante cintas de cobre y plata, soldadas con soldadura ultrasónica, para dotarlas de alta conductividad. A continuación, las células son encapsuladas entre dos

láminas de etileno-vinil acetato (EVA) que garantizan su tiempo de vida media superior a los 20 años, y reduce las pérdidas por reflexión. Después, la parte del módulo donde llega la luz del sol, es cubierta por una lámina de vidrio templado transparente, y la posterior por una lámina plástica multicapas (Tedlar-poliéster) resistente a la acción mecánica, opaca y de color claro para reflejar la luz. Finalmente, se enmarca el panel con perfiles de aluminio.

METODOLOGÍA

En esta comunicación se incluye parte del trabajo llevado a cabo dentro de una investigación sobre el ACV de la fabricación de paneles solares fotovoltaicos de dos tipos. En primer lugar, paneles con células monocristalinas de 0.65 m², 36 células por panel, 95 Wp de potencia y una eficiencia real aproximada del 14%. El segundo tipo la constituyen paneles fotovoltaicos que se diferencian de los anteriores por tener mejoras ambientales en su fabricación, como estar constituidos por células policristalinas o sustituir el silicio en un caso por grafenos y en otro por sulfuro de molibdeno, tener 72 células por panel y una eficiencia real aproximada del 16%, utilizar marcos reciclados, emplear catalizadores menos contaminantes, y en general, la aplicación de varias medidas de reducción del impacto ambiental sobre las distintas fases de su fabricación, utilizando la metodología de la Norma ISO 14040 (ISO, 1998a; ISO 1998b).

Siguiendo esta norma, el estudio de ACV se ha dividido en cuatro fases: Objetivo y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación. Estas cuatro fases no son simplemente secuenciales, ya que el ACV es una técnica iterativa que permite ir modificando cada una de las fases a medida que se avanza en el modelo. (ISO, 1998b; ISO, 2000a; ISO, 2000b). Los dos tipos de paneles mencionados se estudian por separado mediante dos metodologías distintas, una más simple y generalista que es la Eco-Indicador 99, y otra más compleja y específica que es la EPS-2000. Posteriormente, los datos obtenidos en esos análisis, se comparan también entre metodologías, permitiendo asegurar la obtención de resultados veraces y objetivos.

La Interpretación es la fase del ACV en la que se combinan los resultados del análisis del inventario con la evaluación del impacto. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la posterior toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas medioambientales, y por tanto, qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cual presenta un mejor comportamiento ambiental.

En este caso, primero se aplica la metodología Eco-Indicador 99 con el panel normal y después con el panel sobre el que se han aplicado mejoras ambientales durante su fabricación, y en ambos casos se estudian y comparan los resultados obtenidos en once categorías de impacto ambiental que nos proporciona este método, que son: Sustancias cancerígenas, orgánicos respirados, inorgánicos respirados, cambio climático, radiación, capa de ozono, ecotoxicidad, uso del terreno, acidificación-eutrofización, minerales y combustibles fósiles, aunque estas once categorías se terminan agrupando en tres, para facilitar la interpretación posterior. Estas tres categorías son: Daños a la salud humana, Daños a la calidad del ecosistema y daños a los recursos

Posteriormente, se hace el estudio de ACV pero con la metodología EPS-2000, y se estudian los resultados por separado y en conjunto, para finalmente compararlos también con los obtenidos en el Eco-Indicador 99.

EPS-2000 se basa en métodos de valoración de economía ambiental, cuantificando el daño en la asignación monetaria ELU (*Environmental Load Unit*), y tiene sólo cuatro categorías de daño o áreas de protección que son (Blottnitz y Curran, 2007): Salud humana, capacidad de regeneración del ecosistema, stock de recursos y biodiversidad, valores culturales y recreativos. Sin embargo, Eco-Indicador 99 tiene una quinta fase que EPS-2000 no tiene, que es la normalización, la cual consiste en demostrar a través de unas gráficas obtenidas con los flujos de materia que entra y sale en el proceso de fabricación, hasta qué grado la categoría de impacto contribuye en forma significativa al problema ambiental global, por lo tanto, comprender mejor la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización.

El programa informático utilizado para el estudio de estos ACVs es Sima-Pro, y los datos son parte generales de bases comunes, y otros de obtención propia en salidas a campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidos y analizados todos los datos necesarios, se introducen en las bases de datos del programa informático Sima-Pro, y a través de él se obtiene un diagrama de red o de árbol (Fig.1), en el que aparecen todos los procesos y subprocesos de fabricación del panel (con o sin medidas de mejora ambiental según el caso concreto), indicando los inputs de flujos de energía y la carga ambiental que supone cada uno de ellos, incluso en proporción con respecto a la afección global dentro de todos los procesos.

Se observa que los mayores inputs del proceso de fabricación son la electricidad, el vidrio, el EVA, el aluminio y el poliéster; y en cuanto a outputs, los de mayor carga ambiental son: residuos sobrantes de silicio, aceite mineral y emisiones de polvo a la atmósfera. Posteriormente, en el análisis de impacto se obtiene gráficas como la mostrada en la Fig. 2. Siguiendo el mismo patrón que la figura anterior, se obtienen también de la normalización, de la ponderación y de la puntuación única, las tres primero por categoría de impactos y luego por categoría de daños. Todas ellas, tanto en Eco-Indicador 99 como EPS-2000, tienen también una tabla asociada con todos los valores numéricos.

Una vez que se tienen todos los resultados, se procede a la comparación de todos ellos y se obtiene como conclusión que se han obtenido valoraciones objetivas y medibles sobre la afección al medio ambiente, con lo que se demuestra que la utilización de Si policristalino reduce los residuos provocados por el monocristalino. También se deduce que el proceso de encapsulado y enmarcado es el mayor contaminante suponiendo aproximadamente el 90% del total global y el 50% de casi todos los impactos por separado, pero que este se reduce a casi la mitad cuando se aplican las medidas de mejora ambiental mediante piezas recuperadas de marcos reciclados. Así mismo, la utilización de hornos calefactores más eficientes en el uso de la energía también reduce la carga ambiental aunque en valores mucho más pequeños que en el caso anterior; En cuanto a las categorías de evaluación de daños, existen diferencias entre metodologías al estudiar, por un lado la fabricación del panel primero de forma habitual y después de forma ambientalmente mejorada, pero principalmente en la comparación conjunta, las más afectadas sin medidas de mejora ambiental son la calidad de los ecosistemas, biodiversidad y daños o agotamiento de las reservas naturales, según el método EPS-2000. Sin embargo, una vez aplicadas las medidas de mejora, la categoría de daño a las reservas aparece como poco inalterada (destacando la referente a los combustibles fósiles, los respirables orgánicos y el cambio climático, que juntos suponían inicialmente el 90%

de la carga ambiental total y que se reducen al 30%), la calidad de los ecosistemas mejora considerablemente y la categoría de biodiversidad mejora aunque levemente; Por otro lado, también se observa que se producen impactos positivos sobre la categoría de regeneración de los ecosistemas, y dentro de ella, sobre las categorías de impacto de producción de carne y pescado, y de la capacidad de crecimiento de los cultivos.

Referencias

- Enríquez, H. 2008. Análisis de ciclo de vida de un panel solar fotovoltaico policristalino. Proyecto fin de carrera de la Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid.
- Blottnitz, V.; Curran, M.A. 2007. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 15, 607-619.
- ISO (International Organization for Standardization). 1998a. Norma ISO 14040:1997 Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y estructura.
- ISO (International Organization for Standardization). 1998b. Norma ISO 14041:1998. Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario.
- ISO (International Organization for Standardization). 2000a. Norma ISO 14042:2000. Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Evaluación del impacto de ciclo de vida. European.
- ISO (International Organization for Standardization). 2000b. Norma ISO 14043:2000. Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida.

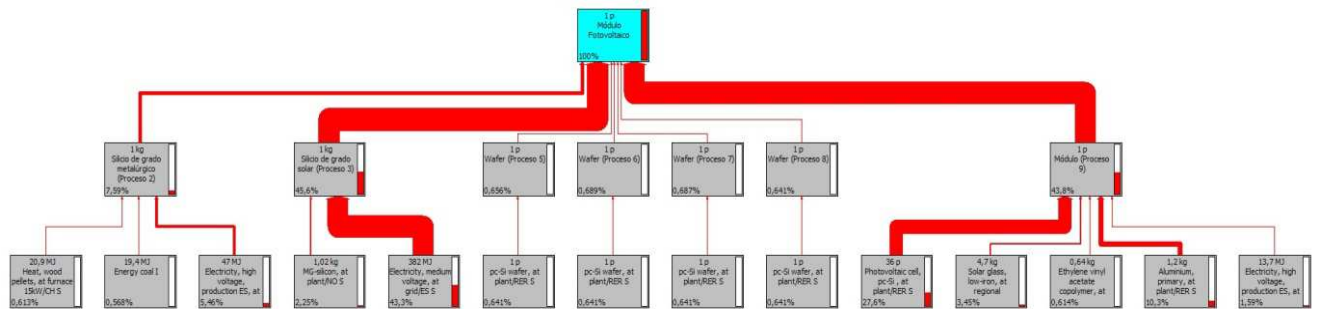


Fig. 1. Árbol de Procesos del módulo fotovoltaico sin medidas de mejora ambiental con el método Eco-indicador 99, donde las flechas que aparecen más engrosadas son las que más carga ambiental producen, y que en este caso corresponden al proceso en el cual el silicio metálico pasa a silicio de grado solar y al proceso donde finalmente se ensambla el módulo.

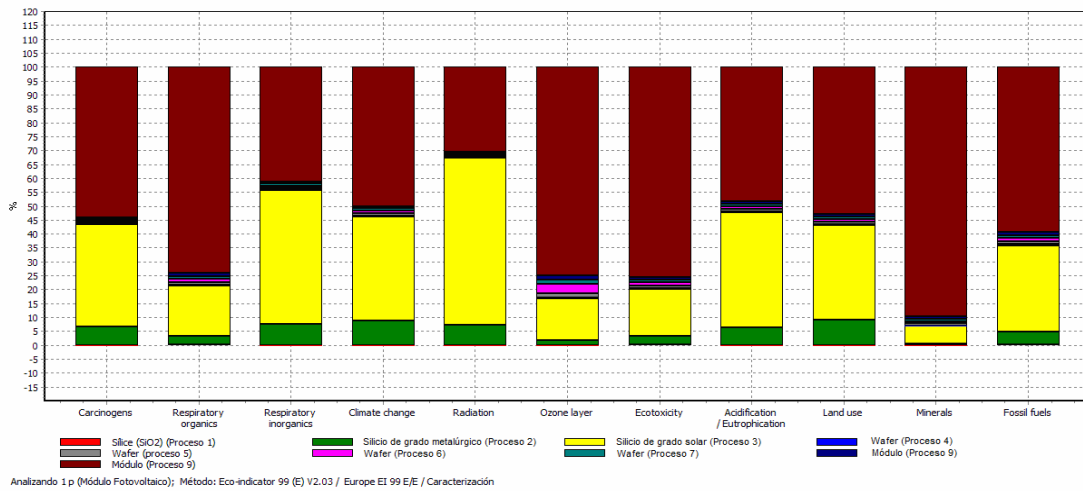


Fig. 2. Caracterización del módulo fotovoltaico sin medidas de mejora ambiental (método Eco-Indicador 99).