



Análisis del impacto ambiental y económico vinculado a la energía fotovoltaica frente al uso de energías convencionales en el regadío

A. Mérida García¹, J. Gallagher², A. McNabola², E. Camacho Poyato¹, P. Montesinos Barrios¹, J. Rodríguez Díaz¹.

¹ Universidad de Córdoba (España). Departamento de Agronomía, Área Ingeniería Hidráulica y Riegos; g82megaa@uco.es; ecamacho@uco.es; pmontesinos@uco.es; jarodriguez@uco.es

² Trinity College Dublin (Ireland). Department of Civil & Environmental Engineering; J.Gallagher@tcd.ie; AMcNabola@tcd.ie

Resumen: Los sistemas de sincronización de la potencia fotovoltaica (fv) generada con la demanda de la red de riego minimizan el problema vinculado a la variabilidad en la radiación disponible. Así el sistema resulta energéticamente independiente, reduciendo el impacto ambiental y coste durante la fase de funcionamiento de la instalación. Sin embargo, los procesos de producción e instalación y costes de inversión deben ser valorados. En este trabajo se ha analizado el ciclo de vida de un sistema de riego fv (SRfv), comparándolo con las fuentes de energía tradicionales (generador diésel y red eléctrica). Se establecieron dos posibles escenarios: con y sin acceso a la red eléctrica, considerando una vida útil del proyecto de 30 años. El análisis de impacto ambiental siguió la metodología CML (Leiden University), seleccionando las 5 categorías más representativas: potencial de calentamiento global (GWP) -agotamiento de recursos abióticos (ARDP) -acidificación (AP) -toxicidad humana (HTP) y -agotamiento de recursos fósiles (FRDP). Los resultados mostraron el SRfv como la opción con menor impacto para todas las categorías, excepto para ARDP, donde la demanda de materiales en la fabricación tuvo una importante repercusión. El SRfv presentó la mayor inversión inicial, aunque el menor coste total vinculado a toda la vida útil del proyecto, gracias al bajo coste asociado a la etapa de funcionamiento del sistema.

Palabras clave: energías renovables, riego fotovoltaico, evaluación del ciclo de vida

1. Introducción

El calentamiento global y las consecuencias derivadas del mismo [1], así como la subida en los precios de la energía, hacen que el interés en el uso de las energías renovables en el sector de la agricultura sea cada vez mayor. En concreto, la energía fotovoltaica (fv) presenta una alternativa económica de baja emisión de gases efecto invernadero (GEI), con un gran potencial en zonas con adecuados niveles de radiación. El principal inconveniente de esta tecnología radica en su dependencia de las variables climáticas [2]. Para hacer frente a este problema, se han desarrollado modelos de gestión del riego fv basados en la sincronización de la potencia fv generada y la demandada por la red de riego, consiguiendo así un sistema autónomo y energéticamente independiente [3]. Sin embargo, a pesar de la nula emisión de GEI de esta tecnología durante la etapa de funcionamiento, sí que hay un impacto ambiental vinculado a la etapa de producción, transporte e instalación de los elementos que componen el sistema, que debe ser considerado [4]. Numerosos estudios han evaluado el impacto vinculado a distintos

tipos de paneles fv [3, 4, 5, 6], destacando la carga ambiental vinculada al potencial de agotamiento de los recursos abióticos (ARDP-Abiotic resource depletion potential) como la más significativa. Estas cargas ambientales son normalmente expresadas en relación a 1 kWh de energía aprovechado. Por ello, la particularidad en los proyectos de riego radica en la estacionalidad de la actividad como tal, la cual afecta directamente a este valor, puesto que no toda la energía producida es utilizada. Así, el objetivo de este trabajo ha sido llevar a cabo una evaluación de impacto ambiental y económico de un sistema de riego fv, comparándolo con el impacto asociado al uso de las fuentes de energía tradicionales (generador diésel y red eléctrica). Para ello, se establecieron dos escenarios, con y sin conexión a la red, considerando en el primero de ellos la posibilidad de exportar a la red el excedente de energía fv generada y no consumida por la instalación de riego.

2. Materiales y métodos

2.1. Alcance del estudio

El análisis de impacto ambiental (Life Cycle Assessment-LCA) se llevó a cabo siguiendo la metodología CML [9], la cual incluye una gran variedad de flujos involucrados en la producción de las distintas tecnologías a evaluar [10]. De todas las categorías de impacto, se seleccionaron 5 como las más representativas [11], las cuales quedan brevemente definidas en la Tabla 1.

Tabla1. Categorías de impacto evaluadas

Categoría de impacto		Descripción
GWP	Global Warming Potential (kg CO ₂ eq.)	Potencial de Calentamiento Global, relacionado con las emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global
ARDP	Abiotic Resource Depletion Potential (kg Sb eq.)	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos, relacionado con la protección de la salud humana y ecosistemas. Relacionado con la extracción de minerales y reservas globales.
AP	Acidification Potential (kg SO ₂ eq.)	Potencial de Acidificación. Relaciona el efecto de las sustancias acidificantes en el suelo, aguas subterráneas, organismos y ecosistemas.
HTP	Human Toxicity Potential (kg 1,4-DCBe eq.)	Efecto de sustancias tóxicas en el entorno humano. Los riesgos de exposición en el entorno de trabajo no se incluyen en esta evaluación. Expresado como emisiones de 1,4-diclorobenceno eq. kg ⁻¹ . Calculado con USES-LCA.
FRDP	Fossil Resource Depletion Potential (kJ eq.)	Agotamiento de las reservas de combustible fósil empleado para producir electricidad. Medido en kilojulios eq.

Para ambos análisis (ambiental y económico), se consideró un periodo de vida útil del proyecto de 30 años, puesto que la vida esperada para los paneles fv normalmente oscila en torno a los 25-30 años [10, 11, 12].

2.2. Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado fue la parcela de olivar experimental de la Universidad de Córdoba, la cual incluye una instalación fv que abastece de energía a la red de riego. El sistema en su conjunto está formado por: una parcela de 13,4 ha de olivar intensivo con riego por goteo,

organizada en 3 sectores; una planta fv de 15,36 kW de potencia pico (120 paneles de capa fina); una bomba sumergida de 13 kW de potencia; y el sistema de control y filtrado. Esta instalación trabaja de forma autónoma, sin incluir ningún elemento de almacenamiento de energía, gracias al sistema de sincronización de la potencia fotovoltaica generada y la demandada por la red, previamente desarrollado [3]. La campaña de riego considerada fue de abril a septiembre, por lo que el sistema de riego únicamente trabaja durante este periodo.

2.3. *Inventario de materiales y procesos*

Para llevar a cabo el LCA, se generó una base de datos que incluía todos los materiales y procesos involucrados en la producción, transporte, instalación y funcionamiento de cada una de las opciones a evaluar. Para ello, se hizo uso de la base de datos Ecoinvent [15], siguiendo los estándares establecidos por la ISO 14040 [16]. En este trabajo, no se incluyeron las labores de mantenimiento para ninguna de las opciones analizadas.

2.3.1. Planta fotovoltaica

En este caso, la planta fv del caso de estudio estaba compuesta por paneles de capa fina (Sharp thin-film) con una potencia pico unitaria de 128 W y un peso total de 26 kg por módulo. Además de los paneles fv, también se consideraron el inversor, el cableado y la estructura metálica sobre la que se apoyan los paneles, instalados en la cubierta de una nave agrícola.

2.3.2. Generador diésel

Para evaluar la opción de suministro energético mediante generador diésel, se seleccionó uno comercial de 15 kW de potencia. Dada la complejidad en la lista de materiales incluidos en la fabricación del generador, ésta se sintetizó en aquellos con mayor representación (acero, aluminio, hierro forjado, polietileno, etc.). Además, también se contabilizaron los requerimientos de energía para su producción, y el combustible consumido durante las horas anuales de trabajo, para el periodo de vida útil estimado. Así mismo, también se incluyeron los materiales y energía necesarios para la fabricación del tanque de almacenamiento del combustible, así como el transporte.

2.3.3. Red eléctrica.

El impacto ambiental derivado del uso de la red eléctrica está condicionado por la contribución de las distintas fuentes de energía en la generación de electricidad en cada país. Para este estudio se consideraron los datos disponibles de estructura de generación de la energía en España en 2017. Así, destacaron las energías renovables, que representaron un 34,4% del total, la nuclear, con un 21,7% y el carbón, que representó un 14,5% [17]. Además se consideró la posible evolución en esta estructura de generación a lo largo de los 30 años evaluados, estimando un aumento en la contribución de las energías renovables [18]. Para esta opción de suministro, se consideró que la conexión a la red ya estaba disponible en parcela, por lo que únicamente se evaluó el impacto asociado a la energía consumida.

2.4. *Coste asociado al ciclo de vida*

El coste del ciclo de vida de cada una de las opciones fue calculado como la suma de los correspondientes costes de instalación y funcionamiento. Para ello, en el caso de la opción fotovoltaica, se consideró como único coste de funcionamiento el reemplazo del inversor. En el caso del generador diésel, los costes de funcionamiento fueron, además del asociado al reemplazo del generador, los vinculados al consumo de combustible. Finalmente, para la opción de

suministro a partir de la red eléctrica, únicamente se consideró el coste de la energía consumida, así como el coste fijo vinculado a la potencia contratada.

Para poder considerar las posibles oscilaciones en el precio del combustible y la electricidad proveniente de la red, el estudio se acompañó de un análisis de sensibilidad, incluyendo un rango de posibles precios, que fueron entre 0,8 y 1,3 € l⁻¹ y 0,14 y 0,24 € kWh⁻¹, para el combustible y la electricidad, respectivamente.

2.5. *Análisis de escenarios*

La evaluación de las distintas tecnologías se llevó a cabo estableciendo previamente dos posibles escenarios. En el primero de ellos, el uso de un sistema de riego fv aislado de la red, fue comparado con el uso de un generador diésel. En el segundo escenario, el sistema de riego fv conectado a la red, fue comparado con el uso de la red eléctrica. Por ello, en este último caso, se consideró que el exceso de energía producida, era inyectado a la red, y con ello, el 100% de la energía generada se consideró aprovechada. Además, también se incluyó un análisis de sensibilidad, en el que se evaluó la influencia de la duración de la vida útil del proyecto, valorando posibles escenarios entre 5 y 30 años. Finalmente, también se analizó el impacto derivado de añadir conexión a la red a un sistema de riego fotovoltaico inicialmente aislado, así como distintos precios para el combustible y electricidad dentro de la evaluación económica de las distintas alternativas.

3. Resultados y discusión

3.1. *Análisis de contribución*

La Fig. 1 muestra la carga ambiental acumulada para las distintas categorías de impacto analizadas en los dos escenarios previamente establecidos, para una vida útil del proyecto de 30 años. Los resultados obtenidos para ambas opciones de riego fv muestran diferencias significativas entre escenarios. Esta diferencia es debida a que, bajo las condiciones del escenario 1, la energía fv producida no es aprovechada en su totalidad, y al no existir conexión a la red, el exceso de la misma no puede ser exportado. Este exceso de energía se debe a que el riego para el cultivo de olivar es estacional, centrándose en un único periodo del año (abril a septiembre en este caso), así como al tiempo de riego diario, cuya media estuvo en torno a las 4 h. De esta forma, la instalación de riego fv aislada tuvo una repercusión ambiental 6 veces superior a la correspondiente instalación fv conectada a red. En ambos casos, la mayor carga ambiental estuvo asociada al periodo de instalación, y en concreto a la categoría de impacto ARDP, debido a la fabricación de los paneles [19]. Los resultados obtenidos para el escenario 2 son comparables con otros trabajos previos, puesto que todos ellos consideran el total de energía producida por los módulos. Así, las conclusiones de los mismos muestran que la carga ambiental asociada a los paneles fv de capa fina es menor que la correspondiente a los paneles cristalinos [20, 21], debido a la menor demanda energética y de materiales para su fabricación. La opción correspondiente al uso del generador diésel presentó importantes cargas ambientales para las categorías GWP, AP, HTP y FRDP, lo que coincide con resultados obtenidos en estudios previos [22, 23]. En el caso de la red eléctrica, toda la carga ambiental estuvo asociada al total de energía consumida durante el funcionamiento del sistema de riego. El análisis de las distintas categorías de impacto mostró que para todas ellas, excepto para la ARDP, la carga ambiental asociada a esta última alternativa fue significativamente superior a la correspondiente a la instalación fv conectada a red.

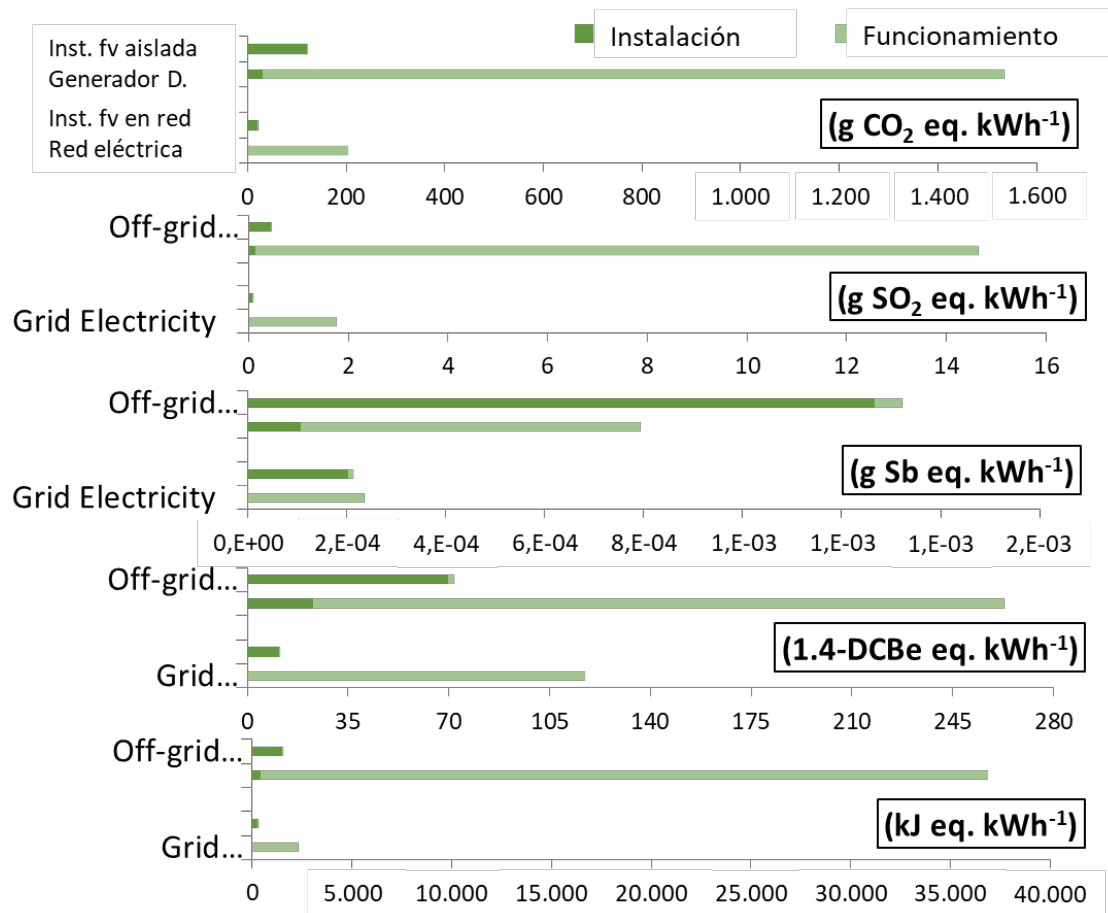


Figura 1. Carga ambiental asociada a las etapas de instalación y funcionamiento para las distintas opciones y categorías de impacto analizadas en relación a un kWh de energía aprovechado

En relación a la contribución asociada a los distintos materiales y procesos, en el caso de la instalación fv, el 29% del total de las emisiones de CO₂ fue debida a los materiales empleados en la fabricación, mientras que el 60% fue debida a los requerimientos de energía. Esto ocurrió para el resto de categorías, excepto para el ARDP, en el que el uso de metales representó un 80% de la carga asociada. La mayor contribución para el caso del uso del generador diesel estuvo vinculada al consumo de combustible durante los 30 años de funcionamiento de la instalación, lo que representó el 77% de la carga asociada al HTP y entre un 92-97% para el resto de categorías.

3.2. Coste del ciclo de vida

La evaluación económica se llevó a cabo asumiendo los precios de la energía en España, donde se localiza el caso de estudio, asumiendo estos precios como media para los próximos 30 años, como aproximación para la comparativa económica entre escenarios. Para el inversor necesario para la instalación de riego fv, así como el generador diésel, se estimó una vida útil de 15 años, por lo que ambos fueron reemplazados una vez.

Los resultados mostraron que, la opción de riego fv, a pesar de presentar el mayor coste de inversión inicial, fue la alternativa con menor coste total asociado, con 26.444 €, frente a 41.593 € y 70.748 €, correspondientes al uso de la red eléctrica y generador diésel, respectivamente. A pesar de que la diferencia entre la opción fv y el uso de la red eléctrica no fue significativa, la posibilidad de vender el excedente de energía en instalaciones fv conectadas a red permitiría tener un ingreso económico extra al agricultor. Además, el periodo de amortización fue estimado en torno a los

8,6 años para la instalación fv aislada, mientras que para la conectada a la red, debería considerarse la posibilidad de vender el excedente de energía, lo cual dependerá de la legislación vigente en cada país. No obstante, esta última situación permitiría reducir considerablemente los costes de amortización.

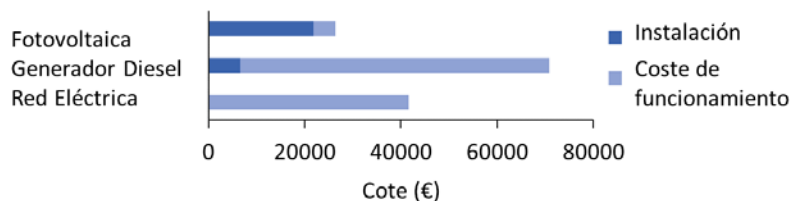


Figura 2. Coste del ciclo de vida asociado a las distintas opciones de suministro energético analizadas.

Por otra parte, en función de la zona de emplazamiento del caso de estudio y las condiciones concretas de radiación, el tiempo de recuperación energético (energy payback time- EPBT) para la instalación fv fue estimado en 0,5 y 3,1 años, para el escenario conectado y aislado de la red, respectivamente. Estos valores se mostraron dentro de los rangos de resultados obtenidos en trabajos anteriores [19, 24, 21].

Finalmente, el tiempo de retorno ambiental (environmental/carbon payback time) para la instalación fv aislada fue de 2,4 años, teniendo como referencia el generador diesel, mientras que este valor ascendió a 18 años al compararla con el uso de la red eléctrica.

3.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de un rango de valores de vida útil del proyecto permitió observar la influencia del mismo sobre la carga ambiental asociada a 1 kWh de energía aprovechado por los distintos sistemas. De esta forma, valores de vida útil inferiores a 15 años implicaron el uso de un solo inversor (en el sistema fv) y generador diesel. En el caso del generador diésel, no se apreciaron diferencias significativas para los distintos supuestos, debido a que la mayor parte de la carga ambiental estaba asociada al tiempo de funcionamiento. Esto mismo fue observado para el caso del uso de la red eléctrica, donde el impacto total es proporcional a la energía consumida. En este último caso, las pequeñas variaciones entre años únicamente reflejan la evolución en la estructura de generación de la electricidad. Sin embargo, para las opciones de riego fv, cuanto mayor es el periodo de vida útil considerado, menor es la carga asociada a 1 kWh de energía aprovechado, puesto que la mayor parte del impacto ambiental está asociado a la etapa de instalación, y los mismos módulos mantienen su actividad durante los 30 años considerados.

La evaluación de la influencia derivada de añadir conexión a la red a una instalación de riego fv originalmente aislada mostró que la carga ambiental, en comparación con la instalación fv aislada, podría disminuir en torno a un 73-77% para todas las categorías de impacto, excepto para el HTP, donde mostró una reducción menor, del 54%. Esta evaluación consideró el efecto de añadir 1 km de cableado, así como los elementos de sujeción necesarios.

Por último, el análisis del coste del ciclo de vida para las alternativas correspondientes al uso del generador diésel o red eléctrica, considerando distintos precios para el combustible fósil y electricidad, dio costes totales siempre superiores al obtenido para el riego fotovoltaico.

4. Conclusiones

La energía fv es una tecnología que ofrece una solución económicamente rentable para el agricultor, con un impacto ambiental despreciable durante el periodo de funcionamiento. Sin embargo, para evaluar el coste ambiental asociado a la energía producida, el proceso de fabricación de los paneles debe ser también considerado. De esta forma, en este trabajo se ha llevado a cabo el análisis económico y ambiental de un sistema de riego fv así como de los sistemas de suministro energético tradicionales (red eléctrica y generador diésel). Los resultados mostraron la opción fv como la de menor impacto ambiental asociado a todas las categorías de impacto analizadas salvo para el ARDP, para el cual el sistema fv aislado mostró el valor más alto. Además, cabe destacar que el sistema de riego fv en red obtuvo resultados 6 veces menores a los asociados al sistema fv aislado, debido al uso parcial de la energía para el riego. En cuanto a los aspectos económicos, la opción de riego fv fue la que mostró un menor coste total, aún implicando un mayor coste de inversión, en todos los escenarios analizados, estimando un periodo de vida útil del proyecto de 30 años. Por su parte, el tiempo de retorno energético supuso entre 0,5 y 3,1 años, para la instalación fv en red y aislada, respectivamente. La influencia del valor asociado a la vida útil del proyecto mostró una reducción gradual en la carga asociada a la energía producida al aumentar el número de años considerados, mientras que para las dos opciones restantes (generador diésel y red eléctrica) no se observaron diferencias significativas. Finalmente, cabe destacar que las características del proyecto a evaluar tienen una gran influencia sobre los resultados obtenidos, desde el punto de vista económico y ambiental. Así, la duración del periodo de vida útil, la disponibilidad de conexión a la red eléctrica, la posibilidad de vender el excedente de energía y los requerimientos anuales de energía por parte de la instalación de riego juegan un papel fundamental a la hora de seleccionar la mejor alternativa. Para el caso de estudio analizado, se demostró que la alternativa del riego fv presenta la mejor opción desde el punto de vista económico y ambiental, incluso si no existiera la posibilidad de vender el excedente de energía generada.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (AGL2017-82927-C3-1-R), la iniciativa "Interreg Volunteer Youth Programme", y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional a través del Interreg Atlantic Area programme (REDAWn Project).

Referencias

1. FAO Climate change and food security: Risks and responses; 2016; ISBN 9789251089989.
2. López-Luque, R.; Reza, J.; Martínez, J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Appl. Energy* 2015, 149, 13–23.
3. Mérida García, A.; Fernández García, I.; Camacho Poyato, E.; Montesinos Barrios, P.; Rodríguez Díaz, J.A. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J. Clean. Prod.* 2018, 175, 670–682.
4. Desideri, U.; Proietti, S.; Zepparelli, F.; Sdringola, P.; Bini, S. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. *Appl. Energy* 2012, 97, 930–943.
5. Berger, W.; Simon, F.G.; Weimann, K.; Alsema, E.A. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. *Resour. Conserv. Recycl.* 2010, 54, 711–718.
6. Evans, A.; Strezov, V.; Evans, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 1082–1088.
7. Gerbinet, S.; Belboom, S.; Léonard, A. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 38, 747–753.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

8. Gallagher, J.; Basu, B.; Browne, M.; Kenna, A.; McCormack, S.; Pilla, F.; Styles, D. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. 2017, 00, 1–8.
9. CML Characterization Factors database available online from Institute of Environmental Sciences (CML). 2010.
10. Chen, W.; Hong, J.; Yuan, X.; Liu, J. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: A case study in China. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 1025–1032.
11. Gallagher, J.; Styles, D.; McNabola, A.; Williams, A.P. Life cycle environmental balance and greenhouse gas mitigation potential of micro-hydropower energy recovery in the water industry. *J. Clean. Prod.* 2015, 99, 152–159.
12. Knapp, K.; Jester, T. Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules. *Sol. Energy* 2001, 71, 165–172.
13. Fthenakis, V.; Alsema, E. Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status. *Prog. Photovolt Res. Appl.* 2006, 14, 275–280.
14. Fu, Y.; Liu, X.; Yuan, Z. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *J. Clean. Prod.* 2015, 86, 180–190.
15. Ecoinvent In:SimaPro, a.v (Ed.). Ecoinvent Database Version 3. 2014.
16. ISO ISO 14040: Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework. ISO, Geneva. 2006.
17. REE Estructura de Generación de Energía Anual Nacional. Red Eléctrica España 2016.
18. Gallagher, J.; Basu, B.; Browne, M.; Kenna, A.; McCormack, S.; Pilla, F.; Styles, D. Can circular economy impact on the environmental performance of stand-alone renewable energy system? Examining future recycling eco-design opportunities. *J. Ind. Ecol.* 2017.
19. Peng, J.; Lu, L.; Yang, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 19, 255–274.
20. Kittner, N.; Gheewala, S.H.; Kamens, R.M. An environmental life cycle comparison of single-crystalline and amorphous-silicon thin-film photovoltaic systems in Thailand. *Energy Sustain. Dev.* 2013, 17, 605–614.
21. Sumper, A.; Robledo-García, M.; Villafáfila-Robles, R.; Bergas-Jané, J.; Andrés-Peiró, J. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 3888–3896.
22. Smith, C.; Burrows, J.; Scheier, E.; Young, A.; Smith, J.; Young, T.; Gheewala, S.H. Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island’s diesel/PV/wind hybrid microgrid. *Renew. Energy* 2015, 80, 85–100.
23. Amante-García, B.; Grimau, V.L.; Casals, L.C. LCA of different energy sources for a water purification plant in Burkina Fasso. *Desalin. Water Treat.* 2017, 76, 375–381.
24. Wetzel, T.; Borchers, S. Update of energy payback time and greenhouse gas emissions data for crystalline silicon photovoltaic modules. *Prog. photovoltaics Res. Appl.* 2015, 23, 1429–1435.