

15. Impactos ambientales de los sistemas fotovoltaicos

Emmanouil Fylladitakis Brunel University Reino Unido

Resultados del aprendizaje

Después de completar este capítulo, los lectores deben ser capaces de:

- Lista de los principales impactos ambientales de la energía solar.
- Comprender el área requerida por dicho sistema y evaluar la adecuación del sitio de instalación.
- Darse cuenta de los impactos sobre los recursos hidrológicos.
- Adquirir conocimientos sobre los más importantes materiales peligrosos que se utilizan para producir energía fotovoltaica y equipamiento asociado.
- Comprender el nivel de energía necesaria para la producción de equipos de sistemas fotovoltaicos y su impacto sobre el calentamiento global.
- Darse cuenta de los sistemas fotovoltaicos de impacto visual pueden tener y recomendar sobre la conveniencia de cada aplicación.
- Evaluar empíricamente todos los impactos antes mencionados.

Introducción

Sin duda, el sol es un recurso increíble energía, permitiendo la generación de electricidad aparentemente sin contaminantes tóxicos o un efecto sobre el calentamiento global. Algunos sostienen que las placas fotovoltaicas son la forma más limpia de generación de electricidad y pocos van tan lejos como para afirmar que es la única forma sin efecto sobre el medio ambiente en todos. Esta idea sin embargo es erróneo, como la energía solar tiene impactos ambientales significativos y multidimensionales, durante la fase de construcción, operación y clausura.

Los principales impactos ambientales de la energía solar están asociados con:

1. El uso de la tierra
2. El uso del agua
3. El uso de los recursos naturales
4. El uso de materiales peligrosos
5. Las emisiones de calentamiento global de ciclo de vida
6. El impacto visual

La escala y la tecnología de la instalación fotovoltaica tiene un efecto directo sobre el nivel de cada impacto ya mencionado. Por ejemplo, sistemas fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV) pueden requerir el uso del terreno nulo o casi nulo, pero pueden afectar negativamente a la estética del sitio.

Uso del terreno

Plantas de generación de electricidad fotovoltaica escala más grandes inquietudes sobre degradación de los terrenos, pérdida de terreno cultivable, incluso el de la pérdida de hábitat. Dependiendo de la tecnología, topografía del sitio y ubicación, las estimaciones indican que la generación de utilidad escala PV sistemas requiere 12.000 m² hasta 40,000 m² por MW. Turbinas de viento requieren semejantemente grandes áreas pero hay mayor oportunidad de compartir terreno con otros servicios, como para uso agrícola.

Los estudios sugieren que el impacto que los sistemas de escala PV utilidad tienen en el uso del terreno puede minimizarse mediante la colocación en el lugar donde la calidad del terreno es muy baja [1].

Estos sitios pueden ser terrenos baldíos, minas abandonadas o corredores de transporte y transmisión existentes [2]. Sistemas FV a gran escala son generalmente adecuados para uso en áreas de calidad bajos aislados, abandonados o de otro de la tierra (Fig. 1).



Figura 1 - instalación de escala PV situado en tierras yermas de muy bajo valor.

Medianas instalaciones también pueden integrarse en grandes edificios comerciales o como barreras de aislamiento acústico cerca de lugares de interés, tales como hospitales, o entre carreteras y áreas residenciales y comerciales (Fig. 2).



Figura 2 - Instalación de mediana escala PV actuando como una barrera de sonido de la carretera. Autopista del Brenner, fuera de la localidad de Marano, Italia.

Una pequeña escala y construcción de matrices de PV integrados están instalados generalmente en estructuras hechas a mano y así tengan un impacto mínimo sobre el uso del terreno. Es interesante notar que la superficie neta de terrenos que no están disponibles para otros usos por plantas de energía PV puede ser significativamente menos para carbón o energía nuclear, todos asociados con el uso del terreno, incluyendo minería, procesamiento, etc. se toman en cuenta [16].

Uso del agua

El uso del agua se convierte en una cuestión problemática con las plantas termosolares de concentración que, como cualquier planta de generación de energía térmica, requiere agua de enfriamiento. Como los sitios que tienen el mayor potencial para este tipo de plantas suelen ser aquellos con climas secos, es esencial una cuidadosa evaluación de las ventajas y desventajas [1, 3, 4].

Paneles fotovoltaicos sin embargo aparentemente no utilizan agua para la generación de electricidad. Sin embargo, el agua es necesario para su mantenimiento, para que los sistemas mantengan su máximo rendimiento. En

concreto, el agua es necesaria para la limpieza de los paneles, cuya cantidad varía grandemente dependiendo de la ubicación del sistema [5]. Además, como con la mayoría de los procesos de fabricación, agua es requerida durante la fabricación de paneles fotovoltaicos y otros componentes que un sistema fotovoltaico requiere [6].



Figura 3 - limpieza de una instalación PV en pequeña escala por chorro de agua.

Aunque no es el uso directo de agua, instalaciones de fotovoltaicas de gran escala pueden tener un impacto severo sobre los recursos hídricos en el sitio de instalación. Pueden reducir la tasa de recarga de agua subterránea, la filtración del aire y de agua de la lluvia de contaminantes y aumenta la probabilidad de inundaciones [7]. Esto es especialmente probable si la instalación obliga a la eliminación de árboles en una colina inclinada. Todavía, si han de compararse con cualquier forma de energía convencional, el efecto de los sistemas fotovoltaicos sobre estos impactos es grandemente beneficioso [7].

Uso de recursos naturales

Aparte de la producción de los paneles fotovoltaicos actuales, siendo un proceso intensivo de energía, también requiere grandes cantidades de materiales a granel. Cantidades muy grandes de minerales comunes son necesarias para la producción de paneles fotovoltaicos, tales como hierro, cobre y aluminio. Minerales de cobre y aluminio no son utilizados por carbón, petróleo o estaciones de generación de energía alimentadas con solo gas, o se utilizan en cantidades insignificantes. Hierro se utiliza en cantidades relativamente grandes para todas las estaciones de energía convencional pero todavía se estiman que los sistemas

fotovoltaicos requieren cantidades mucho mayores por kWh producido, frente a todas las formas convencionales de energía, incluyendo incluso instalaciones de Carbon [8].

A pesar de que estos materiales son reciclables, los números de inmenso agotamiento mineral no deben ser ignorados. Estudios reportan gr 3,3 y 1,2 gr de hierro y aluminio (bauxita) mineral es necesarios por kWh producido [9]. Tales figuras comando el establecimiento de programas efectivos de reciclaje si son sistemas fotovoltaicos para convertirse en un contribuyente importante de la energía.

Además, aunque las cantidades requeridas son pequeñas, escasos materiales como telurio, indio, cadmio y galio. Algunos, como el cadmio, son tóxicos. Adquisición de estos materiales puede ser un proceso costoso y difícil, especialmente cuando son tóxicos.

Materiales peligrosos

El proceso de fabricación de paneles fotovoltaicos y sus componentes asociados (por ejemplo, inversores) contiene un número de materiales peligrosos. La liberación de estos materiales peligrosos para el medio ambiente con frecuencia se considera el más importante impacto ambiental negativo de los grandes y pequeños sistemas fotovoltaicos [10]. La mayoría se utiliza para limpiar y purificar la superficie de semiconductores de células fotovoltaicas. Estos productos químicos son similares a los utilizados en la industria de semiconductores general y generalmente incluyen:

- Ácido clorhídrico
- Ácido sulfúrico
- Ácido nítrico
- Fluoruro de hidrógeno
- 1,1,1-tricloroetano
- Acetona

La cantidad y el tipo de productos químicos utilizados dependen del tipo de célula, la cantidad de limpieza necesaria y el tamaño de la oblea de silicio [1]. Tecnologías más avanzadas también tienden a ampliar la lista de materiales peligrosos presentes durante su fabricación. Por ejemplo, la fotovoltaica de lámina fina contiene materiales más tóxicos que las células tradicionales basados en silicio, como arseniuro de galio [11, 12], cobre indio galio diselenide (CIGS) [13, 14] y Telururo de cadmio [15, 16]. En operación normal, las células de telurio de cadmio no representan ningún riesgo ambiental. Sin embargo, en un incendio y sólo en un incendio, los gases tóxicos pueden ser producido [17]. Las células diselenide de cobre, indio se consideran menos peligrosas que las células de telurio de cadmio [17]. Si no se manejar y desechar correctamente, estos materiales podrían plantear

serias amenazas ambientales o de salud pública. Sin embargo, los fabricantes tienen un gran incentivo financiero para asegurar que estos materiales altamente valiosos y a menudo raros son reciclados en lugar de tirar.

Aun así, si se compara con las formas convencionales de energía, el ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos consiste en materiales menos peligrosos. Por ejemplo, las emisiones de cadmio son casi 300 veces mayores en el caso de las estaciones de energía con carbón [18, 19]. Las emisiones de contaminantes comunes que son peligrosos para el bienestar de los seres humanos, tales como NO_x y SO_2 , son órdenes de magnitud más bajas que cualquier forma convencional de energía, con excepción de la energía nuclear [19]. Las emisiones de combustión de centrales alimentadas con combustibles convencionales también son contaminantes que se asocian con cáncer, efectos reproductivos y cardiovascular [20]. En ese sentido, los sistemas fotovoltaicos son muy superiores a cualquier estación de la energía basada en la combustión.

El proceso de fabricación de células fotovoltaicas es también un peligro para la salud conocidos para los trabajadores que corren el riesgo de inhalación de polvo de silicio [21-23].

Ciclo de vida las emisiones de calentamiento global

Sin duda, hay casi cero emisiones de calentamiento global durante la operación de los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, las emisiones se generan a través de casi cada otra etapa del ciclo de vida fotovoltaico. Algunas de estas etapas incluyen la fabricación de los paneles fotovoltaicos y otras partes asociadas, su transporte, la instalación y procedimientos de alteración del sitio, procesos de mantenimiento, incluso el reciclaje y desmantelamiento de las instalaciones de reintegro.

Consumo de energía primaria para la fabricación de paneles fotovoltaicos ha sido una de las más graves preocupaciones de los investigadores durante décadas. Un papel de revisión anterior resumió muchos de estos estudios y el autor señaló específicamente el desacuerdo significativo entre los investigadores [24]. Como los informes del autor, hubo estudios que indican que el consumo de energía necesario para la producción de uno m^2 de módulos de silicio policristalino (mc-Si) puede ser tan bajo como 667 kWh o tan alto como 2115 kWh. Del mismo modo, el consumo de energía reportado por monocristalinos de silicio (Si-mn) estaba entre 1470 kWh y 4580 kWh / m^2 . Tecnologías de láminas finas consumen mucho menos energía, que requieren generalmente una cuarta parte de la energía necesaria para hacer un panel equivalente de mc-Si. La revisión cubre sin embargo mayores estudios, antes del año 2000. Como tal, se basaban en supuestos que implican mayores métodos

de fabricación y procesamiento de silicio. Además, cabe señalar que en estudios similares todos tienen que asumir la producción estimada de la instalación fotovoltaica, que obviamente difiere de un sitio a otro. Así, los estudios que se realizaron para las áreas con baja irradiación solar informan obviamente menos optimistas resultados [8].

Mayoría de las estimaciones de las emisiones de ciclo de vida para los sistemas fotovoltaicos es entre 30 y 80 gramos de dióxido de carbono equivalente por kWh generado, dependiendo de la mezcla de generación energética de la zona o país [25]. Hay estudios que indican que nuevas tecnologías fotovoltaicas, tales como paneles de Teluro de cadmio (Cd-Te), pueden ir tan bajos como 24 gramos/kWh, rivalizando con la línea base de energía nuclear [26-28]. Estas emisiones son casi exclusivamente asociadas con la producción y transporte de los materiales necesarios para una instalación fotovoltaica, es decir, los paneles y la electrónica de potencia. Las emisiones asociadas a los materiales de plantas de energía convencionales son un porcentaje muy bajo del total de sus emisiones por kWh generado, como la mayor parte de sus emisiones de gases de efecto invernadero proviene de su funcionamiento [28]. Aun así, incluso si las emisiones de la operación no se contabilizan en todo, únicamente la producción y el transporte de su combustible supera las emisiones de gases de efecto invernadero de los paneles fotovoltaicos por kWh [29].

Impacto visual

Otro importante efecto ambiental es el impacto visual que pueden tener sistemas fotovoltaicos en edificios y zonas. La intrusión visual de una instalación fotovoltaica integrada en edificios puede ser muy alta, pero también puede ser abordada con relativa facilidad. Cuidado de materiales y diseño arquitectónico pueden introducir los paneles fotovoltaicos como elementos arquitectónicos, complementando el aspecto del edificio en lugar de lo degradante. No es necesario que el arquitecto oculte los paneles y componentes totalmente, sólo para implementarlos como parte del diseño general del edificio. Desde el lado de los fabricantes de panel PV, diseños modernos se pueden desarrollar fácilmente específicamente para su instalación en zonas pobladas y en edificios con versiones de colores ya hay en el mercado por varios años. Color paneles fotovoltaicos se utilizan con frecuencia para simular la apariencia de tejas de cerámica o vidrio típico. Retro adaptación de sistemas fotovoltaicos en cubiertas y superficies de los edificios más antiguos generalmente es una solución viable, con la excepción de edificios que no se puede modificar visualmente, es decir, aquellos que son de importancia histórica o cultural. Además, los paneles de película delgada podrían sustituir fácilmente los espejos y superficies de vidrio de grandes edificios. Como paneles de lámina fina tienen una transmitancia solar menor que el vidrio, se puede también utilizar como un medio para reducir la carga de enfriamiento de edificios, ofreciendo sombreado o incluso la extracción de calor [30]. Sin embargo, el

arquitecto siempre debe considerar los efectos del deslumbramiento. La sustitución de superficies de vidrio puede ser el único método aplicable a edificios históricos y edificios con alto valor cultural, donde las modificaciones visuales de la estructura son imposibles.



Figura 4 - Pfizer-Universidad de Granada-Junta de Andalucía Centro de genómica y Investigación Oncológica (GENYO) ventilada fachada fotovoltaica diseñada por Onyx Solar. Genera unos 32 MWh/año.

Instalaciones de escala son un asunto más complicado. La instalación de una instalación de escala en o cerca de zonas de belleza natural, atractivos turísticos, sitios arqueológicos, áreas ecológicas y otros lugares similares es problemática y debe evitarse. Grandes instalaciones deben estar correctamente ubicado, generalmente fuera de zonas residenciales y comerciales. Áreas abandonadas y terrenos de baja calidad suelen ser los sitios más adecuados para dichas instalaciones.



Figura 5 - paneles fotovoltaicos policristalinos adaptado para cubrir la fachada de un edificio comercial. Fueron utilizados para reemplazar los espejos.

Referencias

- [1] M. M. Hand, S. Baldwin, E. DeMeo, J. M. Reilly, T. Mai, D. Arent, et al. (2012, April, 18th). Renewable electricity futures study. Available: http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/
- [2] United States Environmental Protection Agency. (2015, April, 18th). Renewable Energy at Mining Sites. Available: <http://www.epa.gov/aml/revital/renewable.htm>
- [3] D. Mills, "Advances in solar thermal electricity technology," Solar energy, vol. 76, pp. 19-31, 2004.

- [4] K. Ummel and D. Wheeler, "Desert power: the economics of solar thermal electricity for Europe, North Africa, and the Middle East," Center for Global Development Working Paper, 2008.
- [5] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2039-2048, September 2010.
- [6] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1609-1628, August 2011.
- [7] D. Turney and V. Fthenakis, "Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3261-3270, 2011.
- [8] R. Laleman, J. Albrecht, and J. Dewulf, "Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 267-281, 2011.
- [9] M. Pehnt, "Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies," *Renewable energy*, vol. 31, pp. 55-71, 2006.
- [10] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, and V. Gekas, "Environmental impacts from the solar energy technologies," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 289-296, 2005.
- [11] C. Jagadish and S. J. Pearton, *Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications*: Elsevier, 2011.
- [12] V. Fthenakis, P. Moskowitz, and J. Lee, "Manufacture of amorphous silicon and GaAs thin film solar cells: an identification of potential health and safety hazards," *Solar cells*, vol. 13, pp. 43-58, 1984.
- [13] D. L. Morgan, C. J. Shines, S. P. Jeter, R. E. Wilson, M. P. Elwell, H. C. Price, et al., "Acute pulmonary toxicity of copper gallium diselenide, copper indium diselenide, and cadmium telluride intratracheally instilled into rats," *Environmental research*, vol. 71, pp. 16-24, 1995.
- [14] N. Naghavi, S. Spiering, M. Powalla, B. Cavana, and D. Lincot, "High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition (ALCVD)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 437-443, 2003.
- [15] V. Fthenakis and P. Moskowitz, "Thin-film Photovoltaic Cells: Health and Environmental Issues in their Manufacture Use and Disposal," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 3, pp. 295-306, 1995.
- [16] K. Hynes, A. Baumann, and R. Hill, "An assessment of the environmental impacts on thin film cadmium telluride modules based on life cycle analysis," in *1994 IEEE first world conference on photovoltaic energy conversion: Conference record of the twenty fourth IEEE photovoltaic specialists conference--1994. Volume 1*, 1994.
- [17] V. Fthenakis, M. Fuhrmann, J. Heiser, A. Lanzirotti, J. Fitts, and W. Wang, "Emissions and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, pp. 713-723, 2005.
- [18] R. Meij and H. te Winkel, "The emissions of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations," *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 9262-9272, 2007.
- [19] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, and E. Alsema, "Emissions from photovoltaic life cycles," *Environmental science & technology*, vol. 42, pp. 2168-2174, 2008.

- [20] J. Lewtas, "Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects," *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 636, pp. 95-133, 2007.
- [21] R. Merget, T. Bauer, H. Küpper, S. Philippou, H. Bauer, R. Breitstadt, et al., "Health hazards due to the inhalation of amorphous silica," *Archives of Toxicology*, vol. 75, pp. 625-634, 2002/01/01 2002.
- [22] E. C. Rose, "Environmental, health and safety assessment of photovoltaics," NASA, United States, 1983.
- [23] T. L. Neff, *The social costs of solar energy: A study of photovoltaic energy systems*: Elsevier, 2013.
- [24] E. Alsema, "Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems," *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol. 8, pp. 17-25, 2000.
- [25] V. Fthenakis and E. Alsema, "Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status," *Progress in Photovoltaics: research and applications*, vol. 14, pp. 275-280, 2006.
- [26] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Energy use and greenhouse gas emissions in the life cycle of CdTe photovoltaics," in *MRS Proceedings*, 2005, pp. 0895-G03-06.
- [27] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Greenhouse-gas emissions from solar electric-and nuclear power: A life-cycle study," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 2549-2557, 2007.
- [28] H. Hondo, "Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case," *Energy*, vol. 30, pp. 2042-2056, 2005.
- [29] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1609-1628, 2011.
- [30] A. G. Hestnes, "Building integration of solar energy systems," *Solar Energy*, vol. 67, pp. 181-187, 1999.