



APLICACIONES INDUSTRIALES

Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica

Energy payback time of crystalline silicon photovoltaic systems in Costa Rica

Isaac Rojas-Hernández¹
 Fernando Lizana Moreno¹

¹ Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica
 E-mail: irojashe@ice.go.cr

Recibido: febrero de 2018 Aprobado: mayo de 2018

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN/ABSTRACT

Costa Rica ha asumido el compromiso de alcanzar la carbono-neutralidad, su matriz energética, con niveles bajos de emisión de gases de efecto invernadero ha sido de importancia para cumplir este objetivo. Ante la introducción de nuevas tecnologías de generación, se evalúa el impacto de cada sistema, aun de tecnologías consideradas como limpias. En este artículo se estima el tiempo de recuperación de la energía (EPBT, por sus siglas en inglés) de sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino (monocristalinos y policristalinos), para cinco ubicaciones diferentes. Se presentan los supuestos utilizados; mediante un análisis de la energía invertida en la fabricación, transporte y disposición final, se contraponen la energía generada al utilizar el sistema fotovoltaico, desde una perspectiva de evaluación de ciclo de vida. El parámetro EPBT se estima entre los 2,7 años y los 3 años, esto permite valorar el balance de energía en la etapa inicial de operación de un sistema fotovoltaico en Costa Rica.
Palabras clave: Costa Rica, EPBT; energía solar fotovoltaica; silicio cristalino; tiempo de recuperación de la energía.

Costa Rica is committed to obtain carbon neutrality; its low level emission energy matrix has been a major contribution in order to accomplish this objective. However, since new power production technologies have been introduced, it is necessary to assess their impact and emissions, even though these are considered as clean technologies. In this paper energy payback time (EPBT) values are estimated, specifically for crystalline silicon photovoltaic systems (monocrystalline and multicrystalline), installed in five different areas throughout the country. Assumptions on the energy consumed for manufacture, transportation and final disposition are established in order to quantify EPBT, in contrast with energy produced when using the photovoltaic system. Findings are described from basic Life Cycle Assessment (LCA) perspective. EPBT calculated values range from 2,7 to 3 years, this is important to balance energy during the first stage of a photovoltaic power plant's production in Costa Rica.

Keywords: Costa Rica; crystalline silicon, EPBT; energy payback time; solar photovoltaic power.

INTRODUCCIÓN

Como parte de las iniciativas para combatir el cambio climático, Costa Rica se ha propuesto el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad (C-N) en pocos años, es decir, que las emisiones netas asociadas al país sean iguales a cero [1], este compromiso se refleja en acciones llevadas a cabo por empresas, instituciones e incluso individuos. El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha aportado en la ruta hacia la C-N, al propiciar una matriz de generación eléctrica basada mayormente en el uso de fuentes renovables, las cuales tienen pocas emisiones. Como se menciona en [2], cuando el objetivo es construir un ciclo de vida para una edificación de cero emisiones, todas las emisiones deben ser escrutadas.

Ante la introducción de nuevas tecnologías de generación, es necesario evaluar el impacto y las emisiones de cada sistema, aún de las tecnologías consideradas como limpias o verdes.

El uso de fuentes de generación renovables a nivel global presenta un rápido crecimiento. La energía fotovoltaica (FV) se presenta como una de las más prometedoras en cuanto a su capacidad para reducir la contaminación. Sin embargo, Hou *et al.* [3], mencionan que aún existe controversia respecto a que la energía total generada por un sistema fotovoltaico no compensa la energía consumida durante su fabricación, considerado como un proceso intensivo desde el punto de vista energético. A pesar de esto, Baharwani *et al.* [4], mencionan que al considerar el ciclo de vida completo de la generación fotovoltaica, desde la minería del cuarzo hasta su disposición final, la energía consumida es solamente una fracción de la energía generada. Por lo tanto, el presente trabajo pretende calcular el parámetro de tiempo de recuperación de la energía (EPBT, por sus siglas en inglés) para plantas solares fotovoltaicas, de manera que se cuente con información precisa al evaluar este tipo de sistemas en Costa Rica. Se realiza una distinción entre los tipos de silicio cristalino “c-Si” (monocristalino “mc-Si” y policristalino “pc-Si”), pues su producción consume diferentes niveles de energía y emisiones de gases de efecto invernadero debido a los procesos de fabricación, diferenciación utilizada en [3-4].

En esta sección se introduce conceptualmente la evaluación del ciclo de vida fotovoltaico y el tiempo de recuperación de energía. En la siguiente sección, Métodos y Materiales, se hace referencia a la metodología aplicada para el cálculo del parámetro EPBT; en la sección Resultados, se parte de referencias actualizadas para determinar la energía invertida en el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico, se estudian los procesos: minería, purificación, obtención de obleas, fabricación de celdas y módulos, transporte, instalación, operación y mantenimiento, disposición final o reciclaje [5-6]. Adicionalmente, a partir de simulaciones con módulos de múltiples fabricantes, se estiman la generación energética en cinco sitios de Costa Rica, a saber, de la provincia de Guanacaste: i) Liberia, ii) Playa Hermosa y iii) Guayabo de Bagaces, por pertenecer a la zona con mayor radiación en el país y del valle central de la provincia de Cartago: iv) Paraíso, mientras que de la provincia de San José: v) Mata Redonda, estos últimos se escogieron por estar ubicados en la zona de mayor población, a pesar de contar con menor radiación. Finalmente, posterior a la determinación de los valores de EPBT, se detalla una sección de Conclusiones.

Evaluación del ciclo de vida

La evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) es un método estructurado para cuantificar los flujos de energía y material, así como las emisiones asociadas en todo el ciclo de vida de un bien o un servicio. Estándares, tales como ISO 14040, proveen un marco de trabajo para el LCA, sin embargo, existen metodologías específicas aplicables a los sistemas solares fotovoltaicos que permiten obtener resultados y conclusiones confiables, indistintamente de la aplicación de la metodología, para mayor detalle ver [7]. La metodología LCA permite obtener registros no solo de las emisiones y energía generadas durante la etapa de producción de una planta solar fotovoltaica, sino también de las etapas de extracción del material, fabricación, transporte, construcción y reciclaje o disposición final.

Aunque la generación fotovoltaica con c-Si se acepta generalmente como una mejora sobre las tecnologías de generación con combustibles fósiles, respecto a sus emisiones y energía invertida en la fabricación, se reporta una variación considerable entre publicaciones científicas [7]. Esto se debe a que la energía generada por el sistema fotovoltaico sustituye energía generada en una matriz dependiente del país o región, y la cantidad de energía generada depende de la radiación en el sitio. Por esta razón, es importante realizar un estudio específico en Costa Rica, que permita determinar los parámetros que se han calculado en otros lugares.

Además de los paneles fotovoltaicos, un sistema de generación solar incluye otros componentes como inversores, estructuras de soporte, transformadores, cableado y otros sistemas asociados, como monitoreo y vigilancia. Gerbinet [8], menciona la importancia de incluir en los estudios de LCA estos elementos complementarios, conocidos como balance del sistema (BoS, por sus siglas en inglés).

Tiempo de recuperación de la energía

El parámetro EPBT indica el tiempo que un sistema fotovoltaico, durante su etapa de utilización, tardará en generar una cantidad de energía equivalente a la invertida en su producción [9], instalación y disposición final. En [10], se indica la energía invertida en cada uno de los procesos productivos de varias tecnologías de c-Si y CdTe (telururo de cadmio), se toma en cuenta el grosor de la oblea de Si, esto muestra que el EPBT depende de detalles específicos de la construcción del panel solar fotovoltaico. Yue, You y Darling [11], en 2014 muestran valores de EPBT entre 1,4 y 2,5 años, mientras que [12], estima para 2018 valores entre 0,7 y 2 años (para escenarios de generación en Europa). Esta reducción en el EPBT se presenta por la mejora en la eficiencia de los procesos industriales de fabricación de los paneles solares fotovoltaicos.

Hou *et al.* [3], definen el EPBT en años, mediante la ecuación (1), en la cual toman en cuenta todo el proceso del ciclo de vida de un sistema solar fotovoltaico.

$$EPBT = \frac{\text{Energía total consumida en el ciclo de vida FV}}{\text{Energía anual generada por la planta FV}} \quad (1)$$

Ciclo de vida fotovoltaico

Como cualquier producto, el ciclo de vida permite obtener información desde las etapas más básicas de la fabricación, como lo son la extracción de los materiales hasta la disposición final. La información refleja los impactos que cada etapa de la construcción, uso y disposición podrían tener sobre el ambiente. Existen enfoques denominados desde la cuna hasta la sepultura (C2G, *cradle-to-grave*), no obstante, otros enfoques promueven el reaprovechamiento de los materiales previo a la disposición final [14] se denominan desde la cuna hasta la cuna (C2C, *cradle-to-cradle*). A pesar de que actualmente se trabaja en nuevas técnicas para el reciclado de paneles solares, esta tecnología debe madurar, por esta razón se utiliza un enfoque C2G en el presente estudio.

En [14], se establecen etapas para los materiales que componen un sistema fotovoltaico, para la construcción de paneles de c-Si la materia prima se obtiene a partir de un proceso de minería. El material debe adquirir un alto grado de pureza, esto implica que el procesamiento del mismo se distribuye en varios subprocesos, algunos muy intensivos en consumo energético, en estos se encuentra la diferencia entre el mc-Si y el pc-Si. Una actividad paralela a todas las etapas y que es normalmente examinada por sus emisiones es el transporte, el cual está presente en todas las etapas anteriormente mencionadas (ver figura 1).

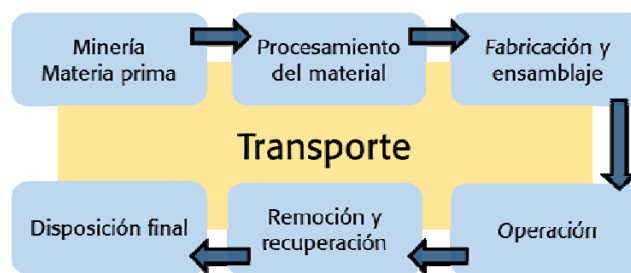


Fig. 1. Etapas a tomar en cuenta en el ciclo de vida de un sistema solar fotovoltaico.

MÉTODOS Y MATERIALES

Búsqueda de información

La búsqueda de información se divide en las siguientes partes:

- obtener parámetros del consumo energético de las diferentes etapas de los procesos de fabricación, transporte, instalación y disposición final de los paneles solares fotovoltaicos basados en c-Si.
- obtener datos de consumo energético de la fabricación de algunos componentes complementarios como el inversor y las estructuras de soporte aplicados en una planta solar FV.
- determinar los fabricantes de paneles c-Si que aparecen con mayor frecuencia en diferentes clasificaciones y su país de fabricación
- escoger paneles mc-Si y pc-Si de cada uno de los fabricantes identificados, con su respectiva eficiencia.
- determinar la irradiación global horizontal, temperatura e irradiación difusa de cinco sitios en Costa Rica.

Cálculo del EPBT

A partir de la información recabada en i) y ii) de la sección anterior, se determina la energía consumida para el ciclo de vida de una planta solar FV, tanto para pc-Si como para mc-Si. Luego, de la información de iii), iv) y v) se realizan simulaciones de plantas con diferentes módulos, de los fabricantes identificados y en ubicaciones diferentes, de lo anterior se determina la energía generada anualmente por una planta FV bajo cada escenario. Una vez obtenidos los resultados para una planta modelada de 1 MWp en la salida AC (1,2 MWp DC en el campo FV) para cada sitio y para cada tecnología c-Si, se aplica la ecuación (1), y se obtienen los resultados del EPBT.

RESULTADOS

Consumo de energía en el ciclo de vida fotovoltaico

Al examinar el ciclo de vida de una planta solar FV se puede determinar la cantidad de energía total que se consume en sus diferentes etapas, queda claro que, dado que se trata de un producto para generar energía, si la energía consumida en su producción es mayor a la energía generada, no sería un producto viable y su uso aplicaría solo en escenarios muy específicos, como lo son las aplicaciones fotovoltaicas espaciales. A continuación se revisan diferentes etapas del ciclo de vida de una planta solar FV y se cuantifican los niveles de energía consumidos en cada una.

Durante la etapa de minería se obtiene la materia prima, que será arena o cuarzo, luego, se realiza un proceso inicial de purificación por reducción carbotérmica [15], de este se obtiene un silicio de grado metalúrgico (mg-Si) con una pureza de 98,5% a 99,5% [16], suficientemente adecuado para aleaciones, pero no lo suficiente para aplicaciones electrónicas o de generación fotovoltaica [17]. El consumo energético para la producción de mg-Si es de 11 kWh/kg a 13 kWh/kg del material a la salida del proceso [15]. Posteriormente, se procesa el mg-Si [18] para obtener el SoG-Si (silicio de grado solar). La tolerancia en impurezas en este silicio es menor a 0,01 mg/kg (ppm). El SoG-Si es convertido en lingotes, el proceso es diferente para mc-Si y pc-Si, ya que para el primero se requiere un proceso de cristalización particular, el cual utiliza más energía. Posteriormente los lingotes son cortados y transformados en obleas, las cuales se usan en el ensamblado de las celdas y paneles solares [19], se supone un grosor de oblea de 200 μm y una densidad de 2 329 kg/m³. En la figura 2, se resumen los valores encontrados de energía invertida por proceso con valores de consumo energético por kilogramo y eficiencia de material (proporción de kg aprovechable al finalizar el proceso), con su respectiva referencia (kWh_c se refiere a energía calórica y kWh_e a energía eléctrica).

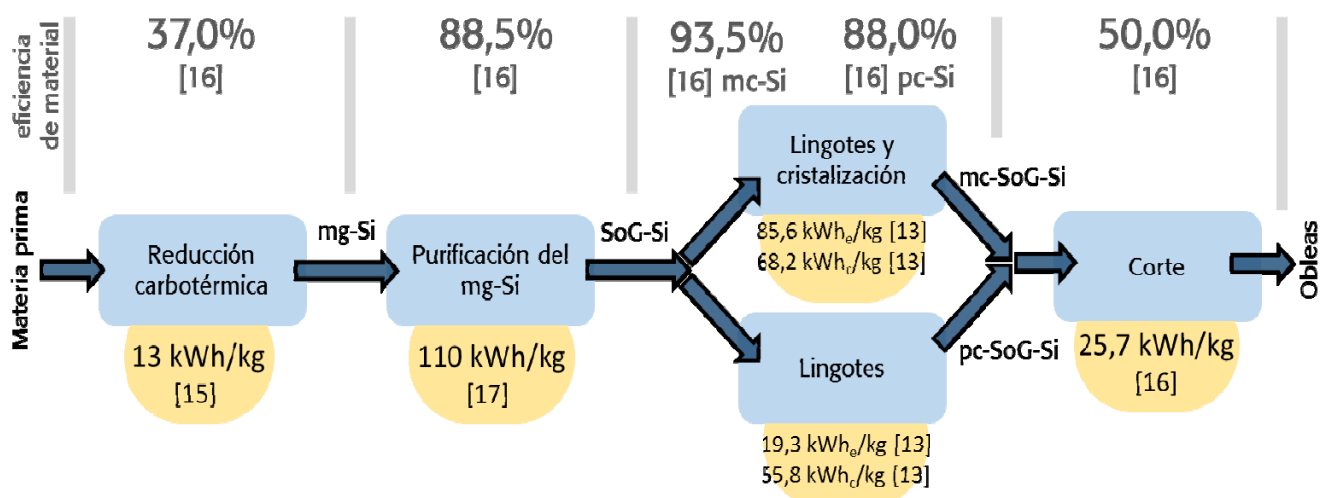


Fig.2. Consumo en los procesos de fabricación FV, desde la materia prima del cuarzo o arena hasta la obtención de obleas.

Una vez que se tienen las obleas, las mismas deben convertirse en celdas solares fotovoltaicas, para lograrlo se les realiza un tratamiento con ácidos para remover los daños que pudiera ocasionar el corte, luego se dopan para producir la juntura p-n, posteriormente, se imprime una pasta metalizada y se hornea para formar los contactos de la celda. Finalmente, se recubre con una fina capa antirreflejo [15]. Esta etapa requiere el uso de muchos químicos, que a su vez pueden requerir mucha energía para producirse, sin embargo, no se toma en cuenta en el análisis por ser productos complementarios. Según Jungbluth [16], la energía requerida en este proceso es de 97,5 kWh/m² en energía eléctrica y 1,67 kWh/m² en energía calórica. Mientras que la energía para fabricar el aluminio que se usa en el marco de los paneles es de 138 kWh/m² y la del vidrio que cubre los paneles es de 33,67 kWh/m², en unidades de área de los paneles. Además, el ensamblaje final de todo el panel demanda al menos 16,67 kWh/m². Se incluye en el flujo de energía el consumo de producción del carburo de silicio, utilizado en el proceso con valores de 68,61 kWh/m², con respecto al área de las celdas.

El BoS, incluye elementos complementarios, en [16], se menciona que el inversor requiere un consumo de 134,7 kWh/kWp y se calcula que un montaje para techo consume 1 097,2 kWh/kWp en su fabricación, estos equipos utilizan materiales como aluminio y acero, cuya producción es de alto consumo energético, estos valores toman en cuenta los kWp instalados en la planta solar FV.

Dado que el transporte entre sitios de minería, sitios de producción de lingotes u obleas y fábricas de paneles fotovoltaicos puede ser muy variado, inclusive entre países, se omite el análisis de la energía invertida y de los gases emitidos en este proceso, sin embargo, para la importación final de los paneles se toma como referencia un peso promedio de 27 kg/panel con embalaje, en contenedores de 600 unidades, se deben importar al menos 7 contenedores de 40 pies para instalar una planta de 1 MWp, se supone el origen de los equipos en China y destino en Costa Rica. Este transporte se estima en 15 000 km en rutas marítimas y 1 000 km en rutas terrestres, al tomar en cuenta distancias entre fábricas, puertos y sitios de instalación. De acuerdo con [20] se utiliza una energía por unidad de tráfico (vía marítima) promedio de 0,092 kWh/tkm, donde un tkm equivale a movilizar una tonelada por un kilómetro, este fue el valor utilizado en el cálculo de energía invertida en importación. En [21], se establece un valor de aproximadamente 0,3 kWh/tkm para el transporte terrestre en camiones. Por lo tanto, se calcula el consumo energético en transporte como 184,3 kWh/kWp.

Con respecto a la instalación, se incluye únicamente la energía utilizada en la producción de los cimientos, pues se desconoce el detalle del resto de componentes y actividades que requieren energía en el proceso constructivo. Como indica Jungbluth [16], en una planta de referencia se utilizan 1,3 kg de concreto por cada m² de paneles en la planta. El consumo energético del concreto en su etapa de producción es de 0,278 kWh/kg.

Al cumplir su vida útil, estimada en 25 años, una planta solar fotovoltaica se desmantela y se realiza una disposición final de los desechos, se podría obtener un ahorro de energía si se reciclan sus componentes, sin embargo, este tipo de técnicas aún están en desarrollo. De acuerdo con Avfall Sverige [22], la energía utilizada en esta etapa es de 69,4 kWh/m², al utilizar una conversión de área para paneles promedio se obtiene un valor de 451 kWh/kWp.

Recurso solar disponible

Se ubican cinco sitios en Costa Rica, para cada uno de ellos se utilizan diferentes fuentes de información respecto a la irradiación global horizontal, en la tabla 1, se resume parte de la información obtenida de bases de datos de NASA, Meteonorm, SolarGis, RetScreen y artículos como Rojas et al. [24] y Wrieth [25]. Además, se utiliza la funcionalidad de Meteonorm, integrada en PVSyst para determinar la radiación global difusa y la temperatura promedio en el día.

Sitio	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)	Irradiación global horizontal anual (kWh/m ²)
Paraíso, Cartago	9,83	-83,86	1324	1651
Playa Hermosa, Guanacaste	10,58	-85,67	58	1883
Liberia, Guanacaste	10,63	-85,44	141	1810
Guayabo de Bagaces, Guanacaste	10,71	-85,17	864	1766
Mata Redonda, San José	9,93	-84,10	1126	1763

Fabricantes mejor clasificados

Al consultar en línea diferentes tipos de clasificación para el 2017 [23], se encuentran los cinco fabricantes más recurrentes Trina Solar, Jinko Solar, Hanwha Q CELLS, LONGi y Yingli. Por lo tanto, se escogieron paneles de 72 celdas de estos fabricantes con tecnologías mc-Si y pc-Si, fabricados en 2017.

Simulaciones

Se modelan y simulan plantas con una salida 1,0 MWp en corriente alterna (es decir, en su conexión a la red) y un dimensionamiento del campo solar fotovoltaico de 1,2 MWp en corriente directa, los paneles se suponen instalados en un sistema fijo con una elevación de 10° y orientación sur, conforme a las mejores prácticas aplicadas en el diseño FV, se utilizaron los paneles mc-Si y pc-Si mencionados en el apartado anterior en cada uno de los cinco sitios. Se utiliza el software PVSyst para obtener el resultado de energía generada anualmente en cada sitio, como un promedio según la tecnología utilizada, ver la tabla 2.

Cálculo del EPBT

A partir de la información recabada se calcula el EPBT para dos escenarios promedio, uno para la tecnología mc-Si y otro para pc-Si, tomando como referencia una planta de 1 MWp en su salida AC. Los resultados se observan en la tabla 2 (de manera resumida) y en la figura 3, de manera desglosada para cada componente del ciclo de vida estudiado.

Tecnología	mc-Si		pc-Si	
Valores calculados	Producción anual (MWh)	EPBT (años)	Producción anual (MWh)	EPBT (años)
Paraíso, Cartago	1 686	2,97	1 725	2,91
Playa Hermosa, Guanacaste	1 837	2,72	1 829	2,76
Liberia, Guanacaste	1 785	2,80	1 776	2,82
Guayabo de Bagaces, Guanacaste	1 725	2,90	1 722	2,91
Mata Redonda, San José	1 787	2,80	1 783	2,81

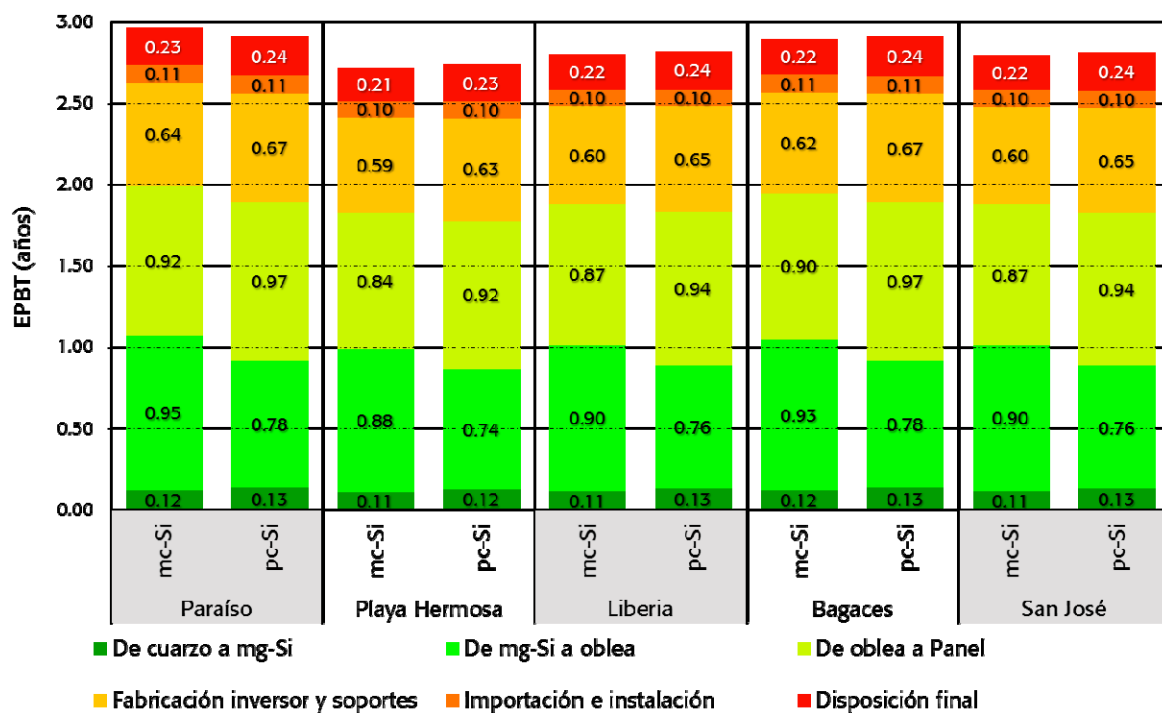


Fig. 3. EPBT desglosado, calculo para sistemas mc-Si y pc-Si en cinco sitios de Costa Rica.

DISCUSIÓN

Se observa que los valores de EPBT calculados para cinco sitios en Costa Rica, varían de manera general entre los 2,7 años y los 3 años, este es el tiempo requerido durante la etapa de uso de una planta solar fotovoltaica para compensar la energía invertida en su ciclo de vida.

A pesar de que los procesos de fabricación en mc-Si son más intensivos desde el punto de vista energético que los de pc-Si, los EPBT son casi iguales para cada sitio, esto se debe a que la cantidad de paneles para alcanzar los 1,2 MWp del campo fotovoltaico en pc-Si es mayor que la cantidad utilizada en mc-Si, al punto que se equiparan los niveles de energía utilizada en el ciclo de vida de cada tecnología.

Las diferencias más marcadas de los valores de EPBT entre sitios son Paraíso, Cartago y Playa Hermosa, Guanacaste. Esta variación está dentro del ámbito esperable, pues en los lugares con mayor irradiación se espera obtener un EPBT menor, ya que hay mayor generación anual. La diferencia porcentual entre la irradiación global horizontal de Playa Hermosa y Paraíso ronda el 12%, mientras que el EPBT tiene diferencias del 10%, esta disminución en la variación se debe a que la planta en Paraíso tiene hasta un 4% menos de pérdidas por efecto de la temperatura, este valor se estimó en las simulaciones.

El proceso de mg-Si a oblea es el más intensivo en consumo de energía en mc-Si, mientras que el proceso de oblea a panel es el más intensivo en pc-Si. Entre estos dos procesos se invierte en promedio un 62% de la energía consumida del ciclo de vida de una planta solar fotovoltaica.

CONCLUSIONES

No se observa una diferencia entre el EPBT para las tecnologías comparadas mc-Si y pc-Si. Dado que los paneles mc-Si alcanzan mayores eficiencias al compararlos con los pc-Si, se requiere de más estos paneles para igualar el dimensionamiento de una planta que utilice los primeros. Desde el punto de vista de ciclo de vida y EPBT es indiferente utilizar una tecnología u otra para una planta instalada en Costa Rica.

La energía consumida en los procesos del ciclo de vida FV se compensan entre los 2,7 y 3 años para los sitios analizados, si se toma en cuenta una vida útil de 25 años, similar a las garantías que ofrecen los fabricantes de paneles solares FV, se tiene una energía neta generada positiva en todos los casos.

Al realizar gestiones de eficiencia sobre el consumo en el ciclo de vida FV, se debe evaluar los procesos de producción de los paneles solares FV, desde el tratamiento de la materia prima para su purificación hasta el ensamblaje de los paneles, pues son las fases de mayor consumo energético.

Muchas instituciones y programas para la reducción de emisiones incentivan la inclusión de energías renovables como la energía solar y se considera como energía limpia desde el primer Wh que produce la planta, sin embargo, se debe repensar si es necesario extraer la energía del ciclo de vida FV al considerar el inicio de la operación de una planta solar FV, pues el balance neto de energía antes de cumplir una operación equivalente al EPBT es negativo.

REFERENCIAS

- [1] Chassoul, M.J., Marín, R., Morales M.A. y Fallas, M.F. “Cuantificación de gases de efecto invernadero en la Sede de Occidente de la Universidad de Costa Rica”, *Posgrado y Sociedad*, 2017, vol. 15 no. 1, p. 69-77. ISSN: 2215-2172. DOI: 10.22458/rpys.v15i1.1827
- [2] Kristjansdottir, T.F., Good, C.S., Inman, M.R., Schlanbusch R.D. y Andresen, I. “Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential Zero Emission Pilot Buildings”, *Solar Energy*, 2016, vol. 133, p. 155-171. ISSN: 0038-092X. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.046
- [3] Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., Zhao, Y. y Yao, Q. “Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China”, *Applied Energy*, 2016, vol. 164, p. 882-890. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.023
- [4] Baharwani, V., Meena, N., Dubey, A., Brighu U. y Mathur, J. “Life Cycle Analysis of Solar PV System: A Review”, *International Journal of Environmental Research and Development*, 2014, vol. 4, no. 2, p. 183-190. ISSN: 2249-3131.
- [5] Fu, Y., Liu, X. y Yuan, Z. “Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China”, *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 86, p. 180-190. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.057
- [6] Xu, L., Zhang, S., Yang, M., Li, W. y Xu, J. “Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011 - 2016: A life cycle assessment approach”, *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol 170, p. 310-329. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.129
- [7] Hsu D.D. et al. “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, no. 1, p. 122-135, 2012. ISSN: 1530-9290. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x
- [8] Gerbinet, S., Belboom S. y Léonard, A. “Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, p. 747-753. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.043
- [9] Fthenakis, V.M., Kim H.C. y Alsema, E. “Emissions from Photovoltaic Life Cycles”, *Environment Science Technologies*, 2008, vol. 42, No. 6, p. 2168-2174. ISSN: 1520-5851. DOI: 10.1021/es071763q
- [10] Fthenakis, V.M. y Kim, H.C. “Photovoltaics: Life-cycle analyses”, *Solar Energy*, 2011, vol. 85, p. 1609-1628. ISSN: 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2009.10.002
- [11] Yue, D., You, F. y Darling, S.B. “Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis”, *Solar Energy*, 2014, vol. 105, p. 669-678. ISSN: 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.008
- [12] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. “Photovoltaics Report”. Freiburg, Alemania. 2018. Consultado el 3 de abril de 2018. Disponible en <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [13] Frischknecht, R., Fthenakis, V., Kim, H.C., Rauei, M., Sinha, P. y Stucki, M., *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. International Energy Agency, 2015. ISBN 9783906042282.
- [14] Contreras-Lisperguer, R., Muñoz-Cerón, E., Aguilera J. y de la Casa, J. “Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels”, *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 168, p. 51-59. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.206
- [15] Xakalashe, B. S. y Tangstad, M. “Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells”, *Southern African Pyrometallurgy*, 2011, pp. 83-99. ISBN 978-1-920410-14-8.
- [16] Jungbluth, N., Stucki, M., Flury, K., Frischknecht R. y Büsser S. “Life Cycle Inventories of Photovoltaics”, pp. 238. ESU-services Ltd., 2012. Consultado el 1º de marzo de 2018. Disponible en: <http://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/jungbluth-2012-LCI-Photovoltaics.pdf>
- [17] Benavides, P.T., Dai, Q., Sullivan, J., Kelly, J.C. y Dunn, J.B. *Material and Energy Flows Associated with Select Metals in GREET2: Molybdenum, Platinum, Zinc, Nickel, Silicon*. Argonne National Laboratory, 2015. Consultado el 22 de febrero de 2018. Disponible en <https://greet.es.anl.gov/files/mo-pt-zn-ni-si>
- [18] Safarian, J., Tranell G. y Tangstad, M. “Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon”. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, p. 88-97. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.03.011
- [19] Pearsall, N. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems*, Cambridge, MA, USA: Woodhead Publishing, 2017. ISBN: 978-1-78242-336-2.

- [20] Gursel, A.P. Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application. vol. 1, 2014. ISSN 1098-6596. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004
- [21] Yin, X., Chen, W., Eom, J., Clarke, L.E., Kim, S.H., Patel, P.L., Yu, S. y Kyle, G.P. "China's transportation energy consumption and CO2 emissions from a global perspective", *Energy Policy*, 2015, vol. 82, p. 233-248. ISSN: 0301-4215. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.03.021
- [22] Swedish Waste Management Associations. *Annual report*, 2015. Consultado el 25 de enero de 2018. Disponible en http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Statistikfiler/SAH_2015.pdf
- [23] Margolis, R., Feldman D. y Boff, D. Q4 2016/Q1 2017 Solar Industry Update, 2017. DOI: NREL/PR-6A20-68425. Consultado el 22 de febrero de 2018. Disponible en <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68425.pdf>
- [24] Rojas-Hernández, I., Lizana, F., Jiménez, J., Paz, A. y Moya, L. Estudio de factibilidad de una planta solar fotovoltaica ubicada en el techo de un edificio en Liberia, Guanacaste. En A. Hernández, R. Rodríguez y A. Suárez, *Clima, Agua y Energía: pilares para el desarrollo sostenible*, Costa Rica: Universidad Nacional, 2014, p. 193-209. ISBN: 978-9968-638-12-8.
- [25] Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. *UNICIENCIA* 22, p. 55-69. ISSN: 2215-3470.