

Consideraciones en el tiempo de retorno energético de sistemas fotovoltaicos integrados arquitectónicamente en edificios

(Recibido: 05/05/2016; Aceptado: 28/06/2016)

Toledo C.¹; Campos-Guzmán V.¹

¹ Universidad Politécnica de Cartagena. Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Plaza del Hospital 1, 30202 – Cartagena, España.

Teléfono: 968326514

Email: carlos.toledo@upct.es

Resumen. El presente artículo examina el potencial de los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios en relación al impacto ambiental que pueden generar durante su producción y uso. Se realiza por medio de una revisión bibliográfica de artículos científicos con el objetivo de dar ciertas pautas a la hora de realizar el análisis de ciclo de vida de estos sistemas. Este artículo es un primer paso para establecer una hoja de ruta hacia la consolidación de estos sistemas en el mercado.

Palabras clave. BIPV; eficiencia energética; EPBT; energías renovables; LCA.

Abstract. This paper aims to examine the potential of building integrated photovoltaics systems by its environmental impact during production and use. This is carried out through a literature review in order to provide some guidelines for doing a life cycle analysis in that systems. This paper is a first step to create a roadmap for implementing BIPV systems on the market.

Keywords. BIPV; energy efficiency; EPBT; renewable energies; LCA.

1. Sistemas fotovoltaicos integrados

En línea con las directrices europeas para llegar a edificios con energía neta cero, se tiene que empezar a considerar a los edificios (responsables del 40% del consumo de energía de la Unión Europea) no solo como consumidores de energía sino como generadores de la misma, lo que supone un desafío en la forma de concebir la arquitectura y los espacios donde habitamos (European Parliament and Council, 2010).

La inclusión de sistemas fotovoltaicos en sectores como la industria o la construcción pueden ser la clave para alcanzar este objetivo.

Esta nueva concepción de los sistemas fotovoltaicos se ha estado desarrollando en numerosas publicaciones popularizando el término BIPV (por sus siglas en inglés “Building Integrated Photovoltaics”) y que se caracteriza por su multifuncionalidad: generación de electricidad y reemplazo de un material convencional de construcción.

Se prevé que llegarán a instalarse 4.6 GW hasta 2017 de estos sistemas (Pike Research, 2012), por lo que es evidente que es un sector en auge y desarrollo.

2. Análisis de ciclo de vida en sistemas integrados

Se puede demostrar que la integración arquitectónica proporciona beneficios ambientales cuando se compara con una alternativa no integrada de sistemas

montados en suelo (Beylot et al., 2014). Para ello se emplean los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (Life-Cycle Analysis, LCA), que es la herramienta metodológica regulada por varios estándares ISO (International Organization for Standardization, 2006). El método LCA es ampliamente utilizado por los desarrolladores para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto o servicio. Esta metodología se ha utilizado para evaluar el impacto ambiental de tecnologías fotovoltaicas, y en especial para calcular el balance energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (Greenhouse Gas Effect, GHG) asociadas con los procesos de fabricación y uso de sistemas fotovoltaicos.

La interpretación en la fase final del LCA es clave para la toma de decisiones de acuerdo al ámbito del estudio. El tiempo de retorno energético (Energy Payback Time, EPBT), es un indicador cuantitativo que ayuda a la interpretación de resultados, mide el tiempo que tarda un sistema fotovoltaico en generar la energía que se utilizó en fabricarlo, por tanto es la relación entre energía embebida y energía generada.

$$EPBT = \frac{E_{input} + E_{BOS}}{E_{output}} \quad (1)$$

Donde E_{input} es la energía embebida en el sistema (módulos fotovoltaicos); E_{BOS} es la energía embebida en los componentes como pueden ser el inversor, cables, estructura, etc. (Balance of System, BOS); y E_{output} es la energía anual generada por el sistema.

2.1. Sistemas fotovoltaicos integrados y su tiempo de retorno energético

De acuerdo a los casos de estudio aplicados en este contexto, el valor del EPBT asociado a los sistemas de integración arquitectónica varía en función de la localización geográfica de la instalación y de los parámetros técnicos del sistema. M. Perez et al. (2012) han estudiado la primera fachada de un edificio con un sistema fotovoltaico multi-cristalino (mc-Si) integrado en la ciudad de Nueva York, obtuvieron un EPBT entre 0.8 y 3.8 años y 10.2 gCO₂/kWh como factor de emisiones para un sistema con orientación vertical. En el trabajo de Radhi et al. (2010) el EPBT calculado oscilaba entre 12 y 13 años para un sistema fotovoltaico integrado en una fachada. Otros cálculos de EPBT en países como China realizados por Lu & Yang (2010) han obtenido valores de entre 7.1 y 20 años para un sistema de integración arquitectónica en azotea y fachadas de un edificio en Hong Kong, en este estudio además del cálculo del EPBT, concluyeron que su valor depende fuertemente de las orientaciones de las fachadas (figura 1). Por otro lado, Hammond et al. (2009) determinaron que un sistema fotovoltaico integrado en un edificio en el Reino Unido era poco probable que devolviera su inversión energética durante 25 años de su vida útil.

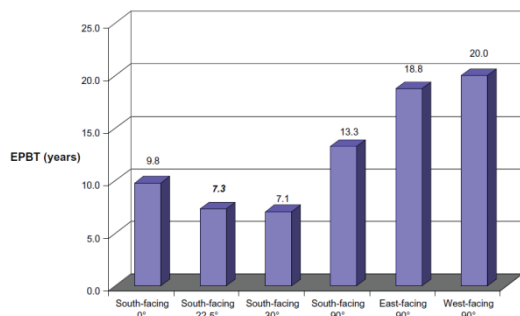


Fig.13 EPBT en función de la orientación del sistema BIPV. (Lu & Yang, 2010).

3. Factores influyentes en el EPBT de sistemas BIPV

Como vemos el valor del EPBT varía en función de las condiciones del sistema: la tecnología fotovoltaica, el tipo de sistema (integrado, montado en suelo o acoplado), los ratios de eficiencia y degradación, vida útil, localización, irradiación anual y orientación. En las siguientes secciones se pretende explorar las ventajas que presentan estos sistemas a pesar del lastre de no tener orientaciones e inclinaciones óptimas.

3.1 Ahorro energético

Los sistemas BIPV pueden mejorar la transmitancia térmica de la envolvente del edificio y reducir el consumo de energía tanto en calefacción y

refrigeración. Los módulos fotovoltaicos influyen en la transmisión de calor a través de la piel del edificio debido a que cambia su resistencia térmica con su consecuente ahorro de energía. Si añadimos la ventaja de que algunos sistemas pueden dotarse de cierto grado de transparencia la integración puede ir acompañada de otros beneficios. Por ejemplo, Young et al. (2014) han creado un sistema llamado HIGS (Heat Insulation Solar Glass) que consiste en una ventana con un módulo de silicio amorfo (a-Si) semitransparente con propiedades aislantes térmicas e hizo un estudio comparativo con cristal templado para las condiciones climatológicas de una zona subtropical obteniendo ahorros de energía de hasta 30% en calefacción y 40% en refrigeración. E. Cuce et al. (2015) implantaron este sistema en un muro cortina analizando las ventajas en iluminación, bloqueo de rayos ultravioleta, aislamiento térmico y generación energética con muy buenos resultados (24.9% más de iluminación, 40.8% y 46.9% de ahorro en demanda de calefacción y refrigeración respectivamente y 100% de bloqueo de rayos ultravioleta). Otros estudios, también han obtenido buenos resultados en eficiencia energética usando módulos fotovoltaicos semitransparentes.

Todos estos factores son gananciales y algunos autores como Lu & Yang (2010) sugieren tenerlo en cuenta en la expresión (1) y por ende dar lugar a una segunda ecuación válida solo para este tipo de sistemas.

$$EPBT = \frac{E_{input} + E_{BOS}}{E_{output} + E_{saving}} \quad (2)$$

3.2 Tecnologías

B.P. Jelle et al. (2012) y también I. Cerón et al. (2013) han analizado los productos BIPV que actualmente hay en el mercado; de sus estudios se puede ver que la tecnología basada en silicio cristalino todavía domina en gran medida el mercado fotovoltaico, sin embargo, hay barreras que el silicio no puede superar. Las características de los módulos de silicio (rigidez, alto peso y medidas estándares rectangulares no modificables bajo demanda) hacen difícil una verdadera integración arquitectónica estructural, por ejemplo como material de fachada o recubrimiento, sobre tejado o incluso en ventanas. Además, los procesos de producción de las células mono y poli cristalinas son más complejos, lo que se traduce en una cantidad mayor de energía embebida. Hammond et al. (2012) han obtenido que la energía embebida en el proceso de producción de las células mono-cristalinas de un sistema BIPV de 2.1 kWp representa el 45% de todo el sistema. El marco por su parte es el segundo mayor con el 20% (figura 2), lo que es una ventaja para algunos sistemas BIPV puesto que, el laminado del marco no es necesario y puede ir directamente integrado en el edificio.

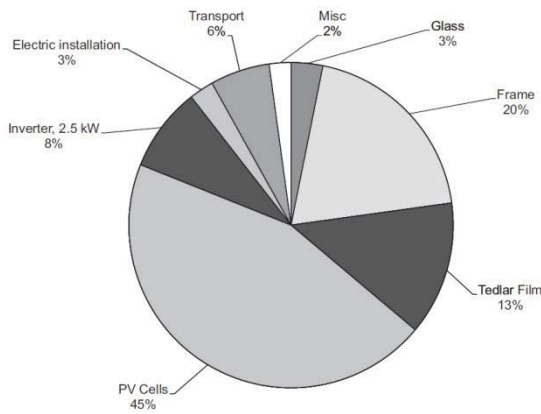


Fig. 14 Energía embebida de un sistema BIPV de 2.1 kWp en Reino Unido (Hammond et al., 2012).

Todas estas barreras hacen que se estén desarrollando nuevas tecnologías basadas en dispositivos de lámina delgada. Algunos ya han alcanzado el mercado (un 18% de eficiencia de conversión), en particular las de telurio de cadmio (CdTe) y CIGS (acrónimo de “Copper, Indium, Gallium, Diselenide”) que además tienen procesos de producción menos complejos que consumen menos energía. Peng, Lu, and Yang (2013) han realizado un estudio comparativo de los requerimientos energéticos entre las tecnologías fotovoltaicas consolidadas entre 2005 y 2013 obteniendo que las tecnologías de lámina delgada claramente aventajan en este sentido a las de silicio cristalino (figura 3).

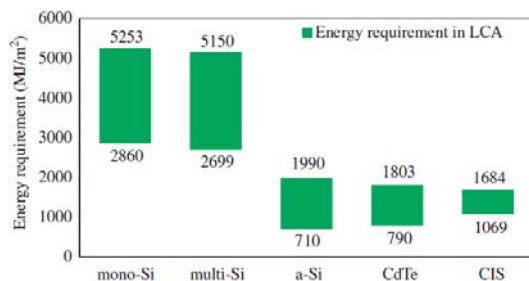


Fig. 15 Requisitos energéticos durante el ciclo de vida en varios sistemas fotovoltaicos (Peng, Lu, and Yang, 2013).

Sin embargo, existen otras tecnologías fase de investigación o proyectos de demostración como las células solares que utilizan polímeros conjugados con eficiencias de conversión en torno al 10% en configuración tándem y vidas útiles que llegan a los cinco años; desde hace un par de años la tecnología basada en perovskitas híbridas ha alcanzado el sorprendente 20% de eficiencia (Gao, Graetzel, & Nazeeruddin, 2014). Las ventajas de estas tecnologías son su bajo peso y flexibilidad. Estas tecnologías pueden fabricarse en procesos industriales compatibles con una producción en línea mediante técnicas de impresión sobre sustratos flexibles, de bajo peso y grosores de célula solar hasta 200 veces menores que en silicio lo cual, incidirá en un coste económico muy competitivo, además de tener un menor impacto ambiental en el proceso de

fabricación (menores temperaturas, ausencia de requisitos de vacío, etc.) (Espinosa, García-Valverde, Urbina, & Krebs, 2011). Además, la fabricación sobre demanda para una aplicación finalista, con unas características “a medida” sobre los requisitos de tamaño, peso y transparencia, hacen de estas tecnologías la opción ideal para su integración en edificios, instalaciones agrícolas o industriales.

3.3 Producción energética

Además de factores como la orientación, localización o eficiencia de conversión se debe tener en cuenta otros componentes que pueden causar pérdidas en la producción como el coeficiente de degradación de la célula en donde el encapsulado juega un papel muy importante, especialmente en sistemas que usan sustratos de cristal templado o laminado para obtener una menor transmitancia y mejor resistencia pero que pueden aumentar el uso de recursos en el proceso de producción. La poca acumulación por polvo o suciedad puede ser una ventaja en los sistemas dispuestos verticalmente como en fachadas respecto a los integrados en tejados. Sin embargo, las soluciones llevadas a cabo para reducir las pérdidas por aumento de temperatura fuera de las condiciones estándar, como la inclusión de cámara de aire o sistemas de aislamiento puede aumentar los recursos para la ejecución del sistema. Finalmente, aunque se tenga mayor superficie activa en la envolvente del edificio comparado con sistemas convencionales dispuestos en filas se debe tener cuidado con las posibles sombras de edificios o elementos colindantes que puedan producir pérdidas significativas y que se añadan a las pérdidas por inclinaciones y orientaciones no óptimas debidas a la disposición del edificio.

4. Conclusiones

Los sistemas BIPV son el nuevo enfoque de producción de energía y eficiencia energética al reducir su EPBT. Mediante el LCA podemos determinar las ventajas ambientales que supone un BIPV en comparación con una alternativa de instalación convencional. A pesar que hay pocos estudios sobre este contexto, la mayoría concluye que son más las ventajas que desventajas al adoptar este nuevo paradigma de construcción, sin embargo aún queda mucho por investigar y comprobar y uno de las áreas más atractivas a estudiar en este contexto son los beneficios económicos al aplicar estos sistemas.

Agradecimientos

Verónica Campos agradece a la Universidad Autónoma de Guerrero, quien a través del Programa de desarrollo profesional docente (Exp. UAGRO-210) ha financiado su beca de posgrado.

Carlos Toledo agradece a la Fundación Séneca su beca de Formación de Personal Investigador (Exp. 19768/FPI/15).

Referencias

- [1] Beylot, A., Payet, J., Puech, C., Adra, N., Jacquin, P., Blanc, I., & Beloin-Saint-Pierre, D. (2014). Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. *Renewable Energy*, *61*, 2–6. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.051>
- [2] Cerón, I., Caamaño-Martín, E., & Neila, F. J. (2013). ‘State-of-the-art’ of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, *58*, 127–133. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.013>
- [3] Cuce, E., Young, C.-H., & Riffat, S. B. (2015). Thermal performance investigation of heat insulation solar glass: A comparative experimental study. *Energy and Buildings*, *86*, 595–600. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.063>
- [4] Espinosa, N., García-Valverde, R., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2011). A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *95*(5), 1293–1302. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.020>
- [5] European Parliament and Council. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, *L153*, 13–35.
- [6] Gao, P., Graetzel, M., & Nazeeruddin, M. K. (2014). Organohalide lead perovskites for photovoltaic applications. *Energy & Environmental Science*, *7*(8), 2448–2463. <http://doi.org/10.1039/c4ee00942h>
- [7] Hammond, G. P., Harajli, H. A., Jones, C. I., & Winnett, A. B. (2009). Integrated appraisal of a building integrated photovoltaic (BIPV) system. In *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on* (pp. 1–9). IEEE.
- [8] Hammond, G. P., Harajli, H. A., Jones, C. I., & Winnett, A. B. (2012). Whole systems appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system: Energy, environmental, and economic evaluations. *ENERGY POLICY*, *40*, 219–230. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.048>
- [9] International Organization for Standardization. Environmental management-life-cycle assessment-principles and framework. ISO report 14040 (2006).
- [10] Lu, L., & Yang, H. X. (2010a). Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. *Applied Energy*, *87*(12), 3625–3631.
- [11] Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *19*, 255–274. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.035>
- [12] Perez, M. J. R., Fthenakis, V., Kim, H.-C., & Pereira, A. O. (2012). Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *20*(8), 975–990. <http://doi.org/10.1002/pip.1167>
- [13] Petter Jelle, B., Breivik, C., & Drolsum Røkenes, H. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *100*, 69–96. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016>
- [14] Pike Research. (2012). *BIPV and BAPV: Market drivers and challenges, technology issues, competitive landscape, and global market forecasts*.
- [15] Radhi, H. (2010). Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings. *Solar Energy*, *84*(12), 2009–2021. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2010.10.002>
- [16] Young, C.-H., Chen, Y.-L., & Chen, P.-C. (2014). Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings. *Energy and Buildings*, *78*, 66–78. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.012>