

Las últimas innovaciones en las tecnologías fotovoltaicas, de la reducción de coste a la captación de valor

Emilien Simonot

Renewable Energy Technology Officer, KIC InnoEnergy

Los últimos y más recientes récords de eficiencia en energía solar fotovoltaica han sido publicados por Panasonic y First Solar. El primero con un 23,8% de eficiencia en módulo utilizando tecnología de alta eficiencia de silicio, el segundo con un 22,1% de eficiencia en células de su tecnología patentada de Cadmium Tellurium (capa fina).

Más allá de los números absolutos que se inscriben en una tendencia de mejora sostenida de la tecnología, cabe destacar la frecuencia con la cual estos récords se suceden, especialmente en el caso de First Solar que ha conseguido mejoras importantes de su tecnología en el último año. Esa tendencia confirma (por si hubiera que confirmarlo) toda la pujanza de un sector en pleno crecimiento a nivel internacional, acompañado de un proceso de desarrollo tecnológico y maduración del negocio en el que podemos incluir el resto de parámetros no tecnológicos que impactan en su competitividad (financiación, tramitación, etc.). Los resultados obtenidos hasta ahora son conocidos de todos, tasas de aprendizaje

(*learning rate* en inglés) del 20% anual y una reducción de coste de los equipos superior al 70% desde el año 2007.

Pero de acuerdo con organismos de referencia, incluida la propia Agencia Internacional de la Energía¹, hay todavía potencial para bajar los costes de la fotovoltaica aún más situándose en el rango de los 40€/MWh en términos de coste nivelizado de la energía (LCOE por sus siglas en inglés) al horizonte 2050 en zonas en las que se presentan combinaciones ideales de: irradiación, financiación, mano de obra cualificada entre otros. La Plataforma Tecnológica Europea de Energía Fotovoltaica (EUPVTP) es incluso más optimista y anticipa una reducción del LCOE similar en el año 2030². Para KIC InnoEnergy, como motor de la innovación en energía sostenible en Europa, es clave identificar las innovaciones que más contribuirán en el futuro en conseguir estos objetivos y, en la medida de lo posible, apoyar a entidades europeas para que trabajen estas líneas tecnológicas, que se las apropien y, en definitiva, puedan asumir

un liderazgo industrial a la par del liderazgo tecnológico de los centros de investigación Europeos.

Como corolario al desarrollo del mercado, y con más énfasis en los países que cuentan con las tasas de penetración de energía fotovoltaica más altas, surge la problemática de la integración en red, recordando por un lado el perfil de generación de la fotovoltaica, centrado en las horas diurnas y por otro la variabilidad de la producción por ser dependiente de las condiciones meteorológicas. Considerando tanto grandes plantas en suelo como sistemas distribuidos en tejado, esta integración presenta múltiples retos: integración en red, en mercados o regulatoria. Considerando la alta flexibilidad de la tecnología fotovoltaica en sus aplicaciones, las problemáticas de integración se extienden más allá de las estrictamente ligadas al sistema eléctrico. La integración arquitectónica es un buen ejemplo de ello. En este sentido, la tendencia está en innovar, ya no exclusivamente en tecnologías eficientes en costes, sino también en soluciones que

¹ En Energy Technology Perspectives 2014 - <http://www.iea.org/etp/>

² En PV LCOE in Europe 2014-2030 - <http://www.eupvplatform.org/publications/other-publications/pv-costs.html>

permiten captar el enorme valor que puede presentar la energía solar fotovoltaica en el conjunto de sus aplicaciones.

El desarrollo tecnológico para la optimización de costes

En el informe "Future Renewable Energy costs: solar photovoltaics"³ publicado en enero de 2016 por KIC InnoEnergy, se analizan un conjunto de más de 30 innovaciones tecnológicas en productos, servicios o procesos propios de la industria solar fotovoltaica. Los resultados de este informe se basan en un modelo económico accesible online a través de la plataforma Delphos⁴. Esta herramienta permite modelizar el impacto en costes de cada innovación por separado así como el impacto agregado de combinaciones de innovaciones en el LCOE de tecnologías como la eólica, la solar termoeléctrica y la fotovoltaica.

En todo caso, en este informe, KIC InnoEnergy se refiere a tecnologías que estarán disponibles a nivel comercial en el

corto/medio plazo (5 a 10 años). Comercialmente disponible significa que el uso de dichas tecnologías es técnicamente posible en volúmenes significativos y que han sido suficientemente ensayadas y demostradas para tener posibilidades razonables de ser integradas en proyectos a escala comercial.

Con un horizonte de estudio al año 2030, el escenario de referencia de reducción de LCOE está comprendido entre el 30% y el 50% según la tecnología y el tipo de aplicación (plantas en suelo o instalaciones en tejado). La fracción de reducción debida a la mejora tecnológica es significativa, pudiendo llegar a contribuir hasta en 2/3 de la reducción anticipada de coste global, entre un 20% y un 30% como se parecía en la figura 1.

Se abordan a continuación algunas de las innovaciones más relevantes.

Tecnología de célula fotovoltaica

En cuanto a las tecnologías de fabricación de células, han sido identificadas ocho in-

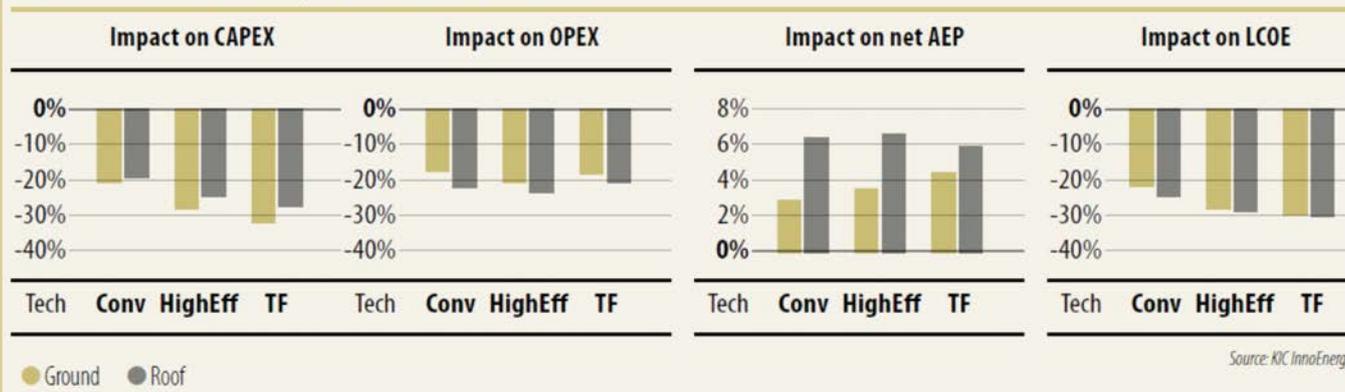
novaciones principales que tienen el mayor impacto potencial en costes. Abarcan desde procesos para el tratamiento de la materia prima hasta el desarrollo de nuevas arquitecturas de células.

El primer grupo de innovaciones se centra en las primeras etapas del proceso industrial incluyendo la purificación, cristalización y producción de las obleas. En cuanto a las mejoras del tratamiento y purificación de la materia prima, es decir del silicio, se espera que la técnica del reactor de lecho fluidizado, mucho más eficiente en cuanto a consumo energético se refiere, llegue a hacer replantear al proceso Siemens. Por otra parte, se estudia también el uso de silicio metalúrgico de grado solar que, aunque tenga una pureza y unas propiedades intrínsecas inferiores a las del silicio de grado solar normal, podría crear una nueva referencia, pudiendo obtenerse a costes altamente inferiores.

Por el lado de los procesos de cristalización, el escenario es continuista con mejoras de

Figura 1.

Figure 0.1 Anticipated impact of all innovations by Technology Type with FID in 2030, compared with a plant with the same nominal power with FID in 2015¹.



³ www.kic-innoenergy.com/reports

⁴ www.kic-innoenergy.com/delphos

los procesos existentes enfocados a la optimización, reduciendo consumos energéticos y pérdidas de material, y a incrementar la calidad de los lingotes producidos. A nivel de obtención de las obleas, el reto es ir a obleas siempre más finas que se usan en la concepción de arquitecturas avanzadas de células. Los procesos de corte son un foco importante con posibilidades de mejora en varios aspectos, desde la reducción de pérdidas (principalmente reduciendo el diámetro de los hilos de corte), mejora de los sistemas de control, así como de la detección de defectos y manipulación de las obleas. Con un enfoque más disruptivo, encontramos las prometedoras tecnologías *kerf less* o sin pérdidas con técnicas de producción directa de obleas.

El segundo gran grupo de innovaciones incluye las innovaciones en arquitecturas de células incluyendo: células tándem, células de contacto posterior, homouniones avanzadas, heterouniones y células bifaciales. Estas arquitecturas avanzadas tienen todas ellas el objetivo de incrementar la eficiencia de las células y por tanto del módulo fotovoltaico. Bajo la categoría de homouniones avanzadas figuran las tecnologías que buscan mejoras de la pasivación tanto por la parte frontal como por la parte posterior de las células, principalmente PERC, PERL o PERT, en proceso de integración en el mercado ya que se consiguen mediante un añadido a los procesos de fabricación tradicionales cuyo coste se compensa por la ganancia en eficiencia. Las propuestas más disruptivas en arquitectura de células vienen de los conceptos de contacto posterior y heterouniones que se obtienen mediante procesos de fabricación diferentes pero tienen eficiencias teóricas más elevadas. Finalmente, el caso de las células bifaciales en las cuales se busca un incremento de eficiencia recogiendo la radiación difusa por la parte posterior de la célula. Todas estas

tecnologías se encuentran en fases de desarrollo lo suficientemente avanzadas para incorporarse a proyectos comerciales en los próximos años. El mayor reto es encontrar el vehículo para su despliegue comercial, idealmente con una combinación de socios industriales y financieros.

De forma general, las innovaciones en tecnologías de células fotovoltaicas impactan principalmente en el coste y en la eficiencia del módulo. Esto último genera un impacto en cascada en el resto de los equipos de la instalación, ya que permite, a misma potencia pico, reducir la cantidad de equipos auxiliares como cableado, estructuras soporte, obra civil, etc. El resultado agregado del impacto de estas innovaciones sobre el LCOE al año 2030 es una reducción del 15% para tecnologías de silicio convencionales (basadas en silicio poli-cristalino) hasta casi un 23% para tecnologías de silicio de alta eficiencia (basadas en silicio mono-cristalino).

Ensamblaje de módulos

En el apartado de encapsulación, las principales innovaciones se orientan a la optimización del diseño y de los materiales constitutivos de los módulos: conexiones, recubrimientos anterior y posterior, encapsulante y marcos. Cabe resaltar la configuración *glass-glass* en la que el soporte posterior sobre el cual va montado el resto de elementos, tradicionalmente de TPA o PET, se sustituye por un cristal que podría llegar a ser más barato a futuro, además de posibilitar un cierto aumento de productividad por la mejora de eficiencia que se obtiene de una mayor exposición del material fotosensible a la luz.

Por otra parte la configuración *frameless* (sin marco) es otra innovación de impacto, relativamente simple pero con conse-

cuencias relevantes. Si los fabricantes consiguieran módulos *frameless* presentando las mismas características de resistencia y estanqueidad que los módulos clásicos, podrían llegar a propiciar reducción del LCOE de hasta un 2% en el 2030 por el ahorro en el uso de aluminio.

Por otra parte, los procesos de fabricación y ensamblajes de módulos pueden ser optimizados de cara a garantizar cada vez más la calidad de los módulos. Para ello, es crucial poner a punto procesos de caracterización y seguimiento en continuo de presencia de defectos o imperfecciones en las líneas de ensamblajes para detectar a tiempo errores de procesos o defectos en productos. Estos testeos permitirán mayor eficiencia de las líneas de producción y reducir significativamente el riesgo ligado a la calidad de los módulos, impactando no solo en el coste de los mismos sino también en costes de financiación y seguros, por ejemplo.

Si bien se pueden conseguir mejoras significativas con cada elemento constitutivo del módulo, las grandes mejoras de eficiencia obtenidas de arquitecturas avanzadas de célula desencadenan las mayores reducciones de costes ya que impactan en el resto de la instalación: economías de escala en estructuras soportes, cableado, etc. Dicho esto, las innovaciones en encapsulación, de índole muy práctica, llegan a ser responsables de una interesante reducción del orden de 3 a 3,5% del LCOE al horizonte 2030.

Tecnología de capa delgada

En la tecnología fotovoltaica de capa delgada, se han identificado ocho áreas en las cuales existen innovaciones con el potencial de reducir significativamente los costes de esta tecnología en un horizonte cercano. El mayor impacto potencial está en el uso de materiales alternativos, ya que puede

tener una importancia creciente para conseguir mejores eficiencias y paliar, si fuera necesario, la posible escasez de materiales ahora en uso (por ejemplo el Telurium).

Otro gran grupo de innovaciones en capa delgada impacta en los procesos de producción: desde mejoras en las técnicas de deposición de materiales (conseguir deposiciones uniformes y homogéneas en grandes superficies), desarrollo de interconexiones avanzadas (por ejemplo transparentes) hasta las innovaciones de encapsulación similares a las recogidas para las tecnologías basadas en silicio (*frameless*, *glass-glass*, etc.).

Finalmente, la mejora de los procesos de producción también pasa por una reducción de la diferencia de eficiencia entre las muestras de laboratorio y las aplicaciones en módulos, incluyendo una mejor operatividad de los equipos y el desarrollo y aplicación de métodos de control de calidad en las líneas de producción.

En conjunto, se estima que las innovaciones en capa delgada podrían desencadenar reducción de LCOE del orden de 24% de aquí a 2030, cuyo mayor origen es el incremento sustancial de eficiencia del módulo con una bajada del coste por vatio pico, así como el efecto cascada en el resto de los elementos de la planta.

Innovación en conexiones y estructuras

Dentro de la infraestructura eléctrica de plantas fotovoltaicas, los inversores son elementos claves que condicionan altamente la estructura de costes de esas instalaciones. Hay potencial para importantes mejoras en la fiabilidad y el alargamiento de vida de estos equipos gracias al uso de diseños y materiales avanzados que disminuyan el

estrés de los componentes, siendo el objetivo conseguir la misma vida útil para un inversor que para el resto de la instalación, es decir, entorno a los 30 años. Más allá de las mejoras de diseño, también es importante poner a punto estrategias y técnicas de monitoreo y seguimiento de los inversores para poder actuar de forma preventiva y reducir sobrecostes debidos a fallos irreparables así como paradas de producción inesperadas. La reducción de los costes de mantenimiento y sustitución de estos equipos permitirían reducir el LCOE a 2030 del orden de 5%.

En cuanto al resto de elementos como cableado y estructuras, cabe diferenciar según el tipo de aplicaciones.

Para plantas en suelo a gran escala, las tendencias son a estructuras fijas de muy bajo coste donde el enfoque está en la optimización del diseño para un uso de materiales mínimo (siendo el aluminio el material ideal), la reducción de las tareas de manipulación y construcción en campo, y la fiabilidad equivalente a la vida útil de la instalación. En zonas de alta radiación, el uso de los sistemas de seguidores puede ser una alternativa. Existen numerosas opciones y diseños de seguidores tanto de uno como de dos ejes. En este caso, aplican unos criterios similares: las claves son bajos costes de inversión y de mantenimiento así como alta fiabilidad. Finalmente, en cuanto al cableado, la tendencia es incrementar el nivel de voltaje de las plantas de 1.000V a 1.500V para conseguir economías de escalas sobre los elementos eléctricos (reducción del número de paneles conectados en serie).

Para instalaciones en techo, se requieren sistemas de montaje y anclaje modulares y flexibles, adaptables a una gran variedad de diseños y construcciones. Idealmente,

el diseño de estos sistemas debe de tener en cuenta ciertas consideraciones de ergonomía, así como el peso o la seguridad de uso.

De forma general, el cableado y las estructuras soportes, para plantas en suelo o instalaciones en techo, representa gran parte del contenido local de la planta. Por lo tanto las potenciales reducciones de costes no están solo en innovaciones tecnológicas concretas, sino también en el grado de optimización de la cadena de suministro local y la experiencia de la mano de obra local en ejecutar correctamente este tipo de obras.

Innovaciones en operación y mantenimiento

En el sector del mantenimiento, la tendencia es evolucionar hacia estrategias “cero mantenimiento” que incluyen soluciones de limpieza automática, empezando por recubrimientos antisuciedad por un lado, y selección de especies vegetales de limitado crecimiento y características morfológicas, por el otro, que limiten el impacto que puedan tener en generación de sombras y reducir los tratamientos.

Otra tendencia es mejorar el control sobre las instalaciones para incrementar el rendimiento de las mismas, seguir el estado de los equipos y en definitiva, planificar mejor las tareas de mantenimiento si son necesarias. Otra función es la planificación de la producción, cada vez más importante en la problemática de la integración de la energía fotovoltaica a las redes eléctricas.

Con estas innovaciones, se estima que se pueden conseguir reducciones del LCOE de entre 0,8 y 1,4% al horizonte 2030, reduciendo coste de operación y mantenimiento a la vez que incrementando la producción de energía.

Impacto agregado sobre el LCOE

El objetivo del estudio de KIC InnoEnergy es poner de manifiesto el rol de la innovación tecnológica en la reducción duradera de costes, identificar innovaciones concretas y caracterizarlas mediante el impacto relativo que pueden llegar a tener en instalaciones fotovoltaicas (ver figura 1).

Adicionalmente, sobre la base de unos escenarios de referencia, representativos de plantas fotovoltaicas europeas tanto en suelo (en el rango de los 5 MW) como para instalaciones en techo (inferior a los 100kW), se realizan proyecciones de la evolución del LCOE en términos absolutos hasta el año 2030. Estas proyecciones, presentadas en la figura 2, consideran el impacto de las innovaciones descritas en este artículo así como el impacto de factores no tecnológicos tales como los costes de tra-

mitación y acceso a redes, seguros, costes financieros, etc.

Los nuevos retos de la fotovoltaica

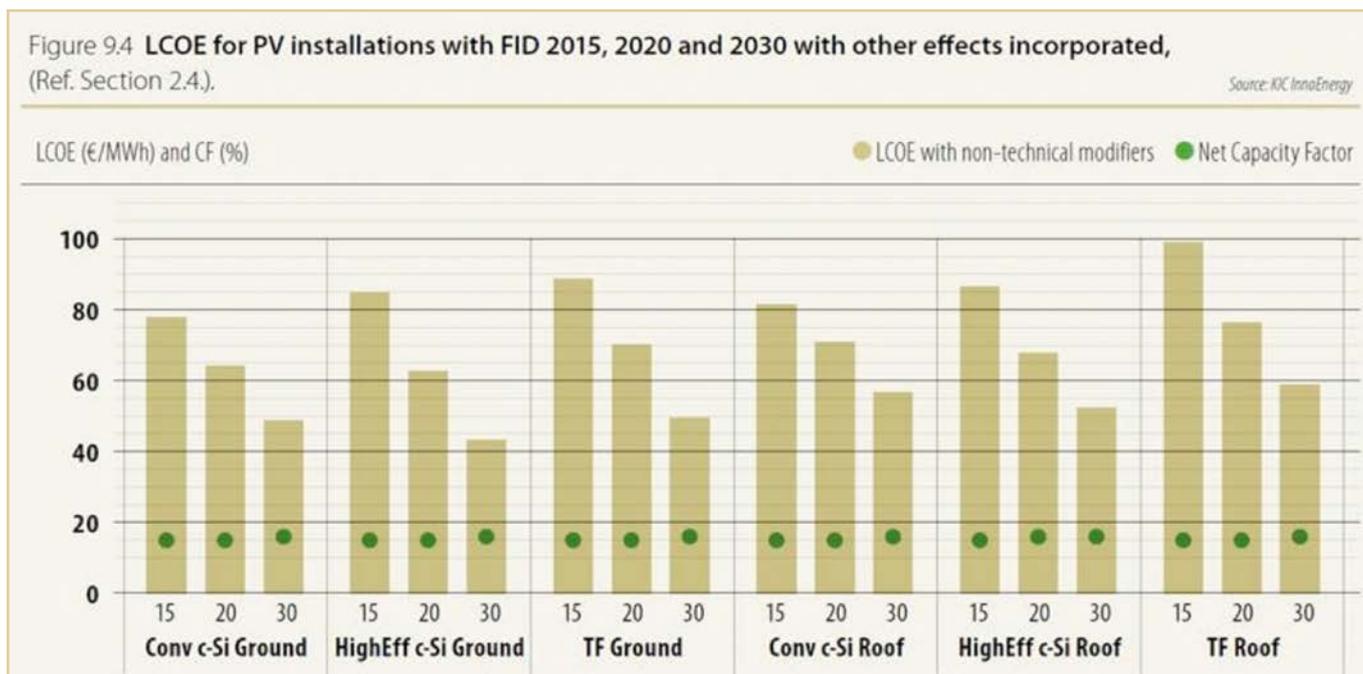
El sector fotovoltaico está en un momento de transición hacia la plena competitividad con fuentes convencionales de generación de electricidad. Esta transición parte de un escenario de mejora continuada de la competitividad en coste, en el cual la I+D solo buscaba la reducción de costes y un acceso al mercado condicionado por sistemas de apoyo específicos en cada país. El resultado ha sido una implantación global de la tecnología con países llegando a tasas de penetración de fotovoltaica cercanas al 10%.

De mantenerse esta tendencia, surgen nuevas problemáticas ligadas a la integración de esta energía en redes eléctricas y mercados, cruciales para permitir un despliegue

gestionable de esta tecnología y poder llegar a escenarios de altas penetraciones. En este sentido la reducción de coste ya no es el único reto y es necesario maximizar la captación del valor de la energía producida.

En el ámbito tecnológico las principales innovaciones y tecnologías relacionadas abarcan las soluciones de predicción de la producción y de operación coordinada de los sistemas eléctricos con altas penetraciones de energías variables, así como la mejora de las capacidades de las plantas fotovoltaicas en la participación en la gestión de los parámetros eléctricos de las redes. Pero más allá, este tipo de sistemas requieren innovar en regulación y organización del mercado, adaptando por ejemplo los mecanismos de planificación de producción, permitiendo a la fotovoltaica participar en los servicios de ajustes o actuando directamente sobre las cargas introduciendo sistemas de gestión de

Figura 2.



la demanda. Para ello, es fundamental que, además de los flujos de energía, se desarrollen en paralelo flujos de información que hagan efectivamente posible esta gestión de cargas, yendo progresivamente hacia el concepto de redes inteligentes. En este sentido, es crucial también el desarrollo de los sistemas de almacenamientos energéticos.

Estamos ante un caso de cambio de paradigma en el cual el sector fotovoltaico ya no es el único responsable de su éxito (lo que ha conseguido hasta ahora con la bajada de costes) sino que necesita de sectores conexos que co-innoven para hacer posible el uso de la fotovoltaica a gran escala. Por otra parte, el sector fotovoltaico se enfrenta ahora a una multitud de potenciales

aplicaciones, desde el *Building Integrated PV* hasta aplicaciones móviles o itinerantes. Esta situación cuestiona también el modelo de producción en masa de paneles estandarizados que no responden a estas nuevas exigencias. El reto será de mantener costes atractivos pero ofreciendo productos diferenciados, adaptados tanto a geografías como a aplicaciones específicas y pudiendo combinarse con funcionalidades adicionales como propiedades arquitectónicas, flexibilidad, transparencia, estética, etc.

Está claro que, en el futuro, el desarrollo tecnológico tanto de células como de módulos dependerá más de los requisitos del sistema al que se integrarán que de condicionantes intrínsecos que, de momento,

únicamente buscaban reducciones de costes. En este sentido, es probable que tecnologías que hoy ocupan un lugar marginal en el mercado ganen peso gracias a ciertas características o capacidades como la transparencia, la flexibilidad o la posibilidad de generar paneles de formas geométricas libres. El mercado de la construcción está llamado a ser uno de los principales clientes de las tecnologías fotovoltaicas avanzadas que podrían convertir algunos materiales fotovoltaicos en elementos constructivos estándares en el futuro. En estos casos, el proceso de I+D e innovación pasa por un enfoque pluridisciplinar con la participación de la industria fotovoltaica, los fabricantes de materiales de construcción y organismos de certificación acreditados. ■