

# La nanotecnología en las energías renovables: análisis de aplicaciones desarrolladas, reducción de costes y derechos de propiedad industrial

*Nanotechnology in renewable energies: analysis of developed applications, cost reduction and industrial property rights*

Francisco-Javier Moledo Froján<sup>1</sup>, Gaizka Orbezu Fernández

## Resumen

Se ha analizado la reducción en los costes obtenida mediante la implementación de la nanotecnología en el ámbito de las energías renovables y los derechos de propiedad industrial de dichas tecnologías. En el campo de la fotovoltaica, el uso de la perovskita para la manufacturación de los paneles supone una reducción muy significativa en los costes de fabricación. Para la energía solar térmica, el uso de nanorrecubrimientos permite obtener unos paneles que requieren de un menor mantenimiento a la vez que se aumenta su eficiencia. En el caso de la energía eólica, las nanopartículas funcionalizadas pueden usarse para manufacturar pinturas antihielo que permiten explotar el abundante recurso eólico de los climas fríos. La mejora de las baterías de litio mediante el uso de electrodos nanoestructurados permite aumentar su vida útil y reducir los tiempos de carga.

## Palabras clave

Nanotecnología, energías renovables, costes, LCOE, patente.

## Abstract

*The use of nanotechnology as a way to reduce costs in the renewable energies and the rights of intellectual property for these technologies is discussed. In the photovoltaic field the use of perovskite has gained a lot of attention lately as a mean to reduce the manufacturing costs of panels. For the solar thermal energy, the use of nanocoatings has become a successful option to obtain panels that are both more efficient and cheaper to maintain. In the case of wind energy, coating paints with functionalized nanoparticles allow the exploitation of the abundant wind resource of cold climates. The use of nanostructured electrodes has made the life span of lithium batteries much longer and has reduced the charging time.*

## Keywords

*Nanotechnology, renewable energies, costs, LCOE, patent.*

Recibido / received: 19/10/2018. Aceptado / accepted: 05/02/2019.

Universidad del País Vasco. Escuela de Ingeniería de Bilbao.

<sup>1</sup>Autor para correspondencia / corresponding author: Francisco Javier Moledo Froján. E-mail: franciscojavier.moledo@ehu.eus.



Instalación de paneles solares en el tejado de un edificio. Fuente: Shutterstock.

## 1. Introducción

### 1.1. Energías renovables

La necesidad de seguir desarrollando las energías renovables es un tema de sobra conocido y discutido, pues son una fuente de energía limpia e inagotable y resultan imprescindibles para frenar el cambio climático. Aun así, los sistemas de producción basados en energías renovables siguen teniendo una serie de inconvenientes, para los cuales la nanotecnología tiene soluciones.

El problema más destacado suele ser la falta de disponibilidad bajo demanda de la energía, ya que al depender de factores naturales y climáticos no se puede producir cuando se quiere, sino cuando se puede. La solución a este problema pasa por usar sistemas de almacenamiento de energía, con el fin de conservarla hasta que su consumo sea demandado. Mediante la nanoestructuración de los electrodos de las baterías, se puede aumentar la vida útil y la velocidad de carga, mejorando notablemente estos sistemas.

Otro inconveniente, desde el punto de vista de un modelo de producción concentrado, es la dificultad de producir energía en grandes cantidades y, en conjunto, la elevada cantidad de su-

perficie que pueden llegar a ocupar las grandes centrales energéticas de generación renovable. Ambos problemas, generalmente, se pueden unificar en una única variable, la eficiencia. Con la nanotecnología se pueden optimizar las propiedades de los materiales y, en consecuencia, la eficiencia.

Por último, en la mayoría de los casos, todavía se puede generar energía más barata mediante las fuentes convencionales. Dado que la nanotecnología permite usar el material más adecuado posible para acometer una tarea, se acaba convirtiendo en una optimización global de los procesos de generación y reduce los costes asociados.

### 1.2. Nanotecnología

De forma general, la nanotecnología se puede definir como la manipulación de materiales a través del control de la materia a nanoescala.

El interés del tamaño nanométrico radica en que se trata de la escala en la que se pueden observar y manipular los efectos cuánticos de la materia. Estos efectos dependen del tamaño de las partículas con las que se trabaja, a la vez que tienen una influencia muy notable en las propiedades observables a escala macroscópica. Por tanto,

la manipulación de las nanopartículas permite alterar los efectos cuánticos pertinentes para obtener materiales con las propiedades deseadas, lo cual abre un amplio abanico de posibilidades para cambiar y mejorar las tecnologías existentes.

En lo referente a los costes, la posibilidad de crear materiales con las propiedades óptimas para su desempeño aumenta la eficiencia con la que se manufactura y se opera, lo que minimiza las pérdidas y da lugar a un abaratamiento general de los costes.

## 2. Objetivo y metodología

El objetivo es abordar las diferentes implantaciones de la nanotecnología existentes en el campo de las energías renovables y el efecto de estas sobre los costes. Concretamente, se han elegido la energía solar, tanto fotovoltaica como térmica, la eólica y el almacenamiento de energía.

En cuanto a la metodología, primero se describe la aplicación seleccionada y, después, se analizan sus derechos de propiedad industrial correspondientes. Entre las distintas formas de registro existentes, se ha prestado especial atención a las patentes, las cuales establecen un monopolio sobre

la tecnología o el producto patentado por un tiempo limitado de 20 años [1]. Finalmente, se exponen los aspectos económicos, en los que se compara la reducción relativa de costes que la alternativa nanotecnológica supone respecto de la tecnología convencional más extendida, lo cual se realiza mediante el LCOE.

El coste nivelado de la electricidad (LCOE) permite contabilizar todos los costes que tendrá una central de producción energética a lo largo de todo su ciclo de vida con relación a la energía que se espera que genere, lo cual da lugar a un valor que representa un coste promedio de lo que costará producir energía en dicha planta.

No obstante, el método requiere una serie de hipótesis, por lo que el resultado puede no representar el valor absoluto correcto, aunque si es del todo fiable en cuanto a los valores relativos, ya que aun cuando las hipótesis no sean exactas, al ser las mismas en todos los escenarios, los valores de LCOE calculados tendrán el mismo sesgo, con lo que pueden compararse entre sí de manera fiable.

### 3. Aplicaciones de la nanotecnología

#### 3.1. Energía solar fotovoltaica

##### 3.1.1. Descripción de la tecnología

Actualmente, la tecnología fotovoltaica que domina el mercado son las células de silicio cristalino (cubren el 90% del mercado). Aun así, el desarrollo del sector lleva inevitablemente al intento de mejorar la tecnología existente y a buscar nuevas formas de afrontar las desventajas que los sistemas actuales puedan tener.

Una de las aplicaciones más destacable de la nanotecnología en el sector fotovoltaico es la fabricación de células solares formadas por haluros metálicos con estructura de perovskita. La perovskita tiene una eficiencia y una vida útil similares al silicio cristalino. Se puede considerar que los módulos de silicio cristalino comercial suelen tener eficiencias del 21%, mientras que la perovskita ronda el 19%. La vida útil de ambas se estima en unos 20 años.

Asimismo, las investigaciones en el sector fotovoltaico están dedicándole mucha atención a las células multiunión, pues se ha observado que el uso de varias capas activas puede mejorar la eficiencia. Por ello, se han propo-

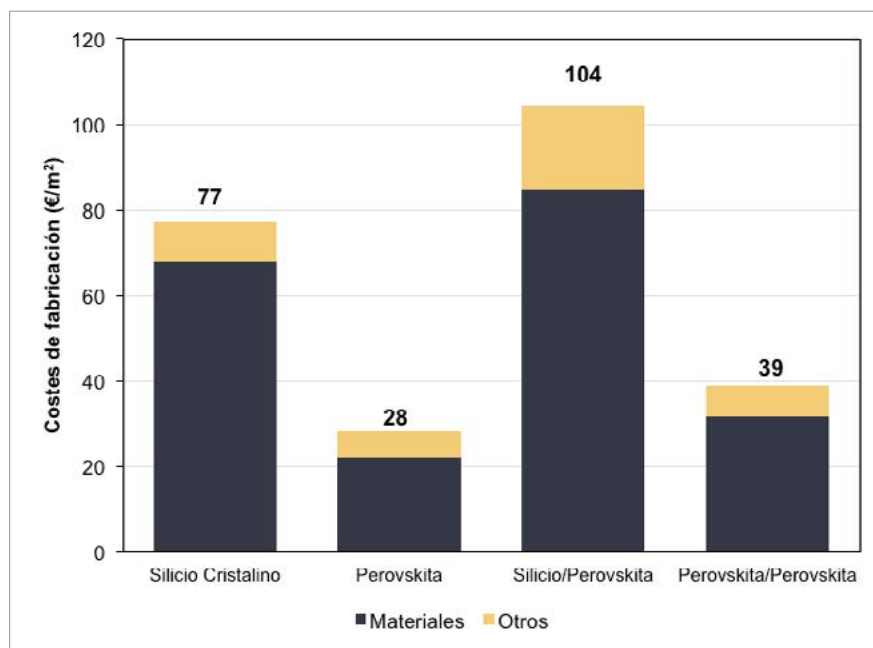


Figura 1. Comparación de costes de fabricación totales y desglosados en €/m².

puesto dos módulos multiunión para compararlos con los monounión antes descritos. Estos nuevos módulos son tandems de las dos tecnologías, esto es, uno de ellos combina una capa de silicio con otra de perovskita y el otro aúna dos capas de perovskita.

El uso de estos tandems atiende principalmente a la mejora de la eficiencia, pero también se espera que su vida útil alcance los 30 años, aunque aún no se ha probado. Los dos tandems propuestos, silicio/perovskita y perovskita/perovskita, tienen unas eficiencias del 25% y del 22%, respectivamente.

##### 3.1.2. Patente de la invención

Sin lugar a dudas, China lidera el mercado y los nuevos desarrollos en las células de perovskita. Sin embargo, al tratarse de una tecnología cuya viabilidad comercial es muy reciente, hay pocas patentes que estén ya en vigor; la mayoría sigue en trámite. Como solo tiene protección en China, se trata de una tecnología de uso libre en el resto de países. De modo que, en general, se trata de una nanotecnología cuya protección es bastante débil.

##### 3.1.3. Reducción de costes obtenida

Los costes de fabricación [2] de las células propuestas se han dividido en dos categorías: materiales y otros (en las que se incluyen equipos, mano de

obra, depreciación y mantenimiento). El desglose de dichos costes, así como el coste total de fabricación para cada uno de los módulos propuestos, se ilustran en la figura 1.

Los costes de fabricación resultan ser de 77 €/m² para el silicio cristalino, de 28 €/m² para la perovskita, de 104 €/m² para la combinación silicio/perovskita y de 39 €/m² para el módulo de perovskita/perovskita. Como era de esperar, los tandems tienen un coste de fabricación superior al de la célula de perovskita simple, pues requieren de mayores recursos para su producción. Aun así, se realiza un análisis más exhaustivo más adelante, pues debido a su mayor eficiencia el coste final podría ser inferior.

Atendiendo al desglose mostrado en la figura 1, se observa que el grueso de los costes de manufacturación se lo llevan los materiales, por lo que la mayor reducción de costes tenía que venir de la mano del empleo de materiales más baratos, como ocurre en el caso de la perovskita, en el que se sustituyen el costoso silicio por haluros metálicos, que son mucho más baratos. Además, para el silicio se suelen emplear contactos de aluminio y plata, los cuales se ven sustituidos por cobre en los módulos de perovskita.

Los costes de la figura 1 corresponden a la manufacturación del módulo, pero a la hora de calcular los costes

Módulo	$\eta$ , %	Área, m <sup>2</sup>	Coste total, €/kW	LCOE, c€/kWh
Silicio cristalino	21	1.000.000	950	11
Perovskita	19	1.060.000	690	9,5
Silicio/perovskita	25	778.000	860	10,5
Perovskita/perovskita	22	900.000	600	9

Tabla 1. Resultados del LCOE para los cuatro módulos estudiados.

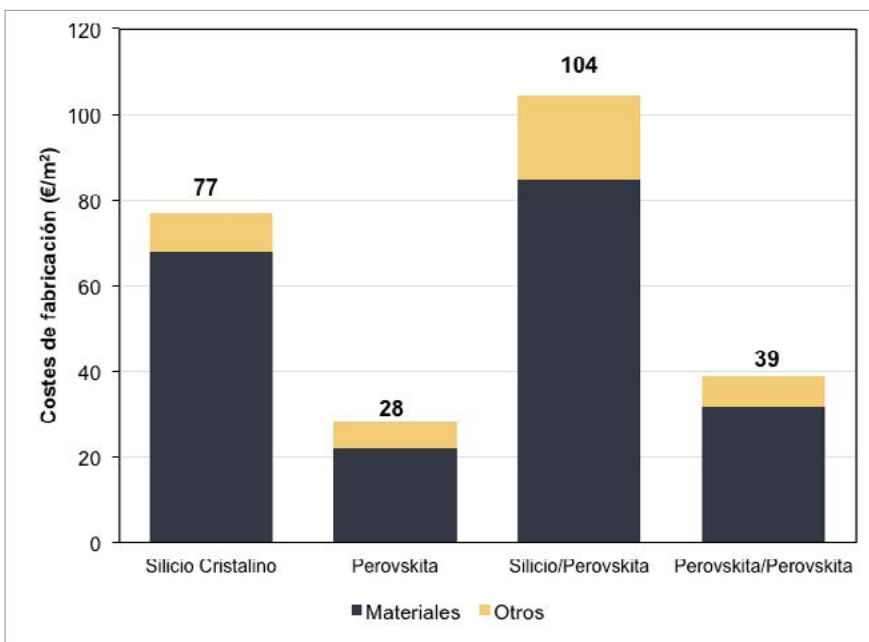


Figura 2. Reducción del LCOE respecto del silicio cristalino.

de totales, también se deben tener en cuenta los costes del equilibrio del sistema. Estos corresponden a todos los costes no relacionados con la fabricación de los módulos, es decir, la estructura sobre la que se montan los paneles, el inversor, las conexiones, la construcción, etc. Representan una parte muy importante del valor final y son función del área que ocupa el sistema fotovoltaico, no de la energía generada. Es así como el efecto que tiene la eficiencia del módulo sobre los costes se hace patente. Es decir, a pesar de que los módulos tándem son más caros que los simples, al tener mayor eficiencia, ocuparán menor área y el coste del equilibrio del sistema será menor. Las áreas de panel necesarias, los costes totales y los valores del LCOE obtenidos se encuentran en la tabla 1. En la figura 2 se ha representado la reducción relativa a la célula de silicio.

Los resultados de la tabla 1 y la figura 2 muestran como el LCOE disminuye si se emplean los módulos de perovskita, ya sean simples o híbridos. Comparando los dos módulos monounión, la perovskita permite llegar a un LCOE el 14% menor.

Comparando el silicio cristalino con el módulo híbrido silicio/perovskita, el notable aumento de eficiencia lleva a unos costes totales inferiores. Los resultados de costes totales ponen de manifiesto la gran importancia que tienen los costes del equilibrio del sistema, que está fuertemente ligado a la eficiencia, sobre el coste final. En definitiva, se obtiene una reducción del LCOE del 5%.

Finalmente, en contraste con el módulo de silicio simple, el módulo tándem perovskita/perovskita obtiene la mayor reducción en el LCOE, pues consigue que este sea el 18% inferior.

En este último módulo se añan las ventajas del aumento de eficiencia debido a la multiunión y al bajo coste de la perovskita.

No hay que olvidar que otra de las ventajas que suponen el uso de los tándems es el aumento de la vida útil. Si mediante el uso de estos módulos se pudiese optar a periodos de explotación de 30 años, las reducciones en el LCOE serían de mayor magnitud. Como se ilustra en la figura 2, se podría llegar a reducir el LCOE entre el 13% y el 24%.

### 3.2. Energía solar térmica

La cantidad de radiación solar que es capaz de absorber un panel y, por tanto, su eficiencia, dependen especialmente del recubrimiento del colector. Se ha profundizado mucho en el desarrollo de estos elementos en los últimos años y se tienen dos implementaciones de la nanotecnología muy destacables, el recubrimiento MEMO y una pintura autolimpiante.

#### 3.2.1. Recubrimiento MEMO

##### 3.2.1.1. Descripción de la tecnología

El recubrimiento MEMO es una tecnología que se basa en el uso de nanocristales de TiAlN en una matriz amorfa de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, depositado en tres capas con un grosor total de 200 nm sobre el sustrato. La disposición de las tres capas que componen este recubrimiento se esquematizan en la figura 3 [3]. La función de la primera capa, situada directamente sobre el sustrato, es absorber la luz incidente y mejorar las condiciones de trabajo del sustrato; la segunda capa tiene como objetivo mejorar la incidencia de algunas longitudes de onda y absorber parcialmente la luz incidente; la tercera capa, situada en la parte superior, sirve a modo de capa antirreflectante,

a la vez que aísla y protege el resto del sistema.

Entre las características más importantes de los recubrimientos se encuentran el grado de absorción y la emisividad. La primera se define como el porcentaje de la radiación recibida que se es capaz de absorber. La segunda hace referencia a la cantidad de calor que se pierde por radiación después de haber sido absorbida por el panel. Generalmente, las placas absorbentes suelen tener valores de absorción del 93% y unas emisividades del 9%.

Además, los recubrimientos utilizados no suelen ser selectivos; simplemente se componen de una capa negra pintada o depositada sobre el sustrato. Para mejorar los dos parámetros antes definidos, la industria se va decantando por el uso de recubrimientos que sí son selectivos respecto a las longitudes de onda que permiten absorber, como el recubrimiento MEMO.

En definitiva, MEMO responde a las siguientes características técnicas: la absorción ronda el 96% y la emisividad es del 5% y cuenta con una vida útil superior a 20 años sin necesidad de mantenimiento o replicación [4].

### 3.2.1.2. Patente de la invención

Esta tecnología se recoge en la patente EP2564129 y tiene vigencia hasta 2030. La invención se encuentra en una familia de patentes triádica, esto es, se trata de una patente para la cual se ha solicitado protección en las tres oficinas más importantes de patentes (EPO, USPTO y JPO). Es posible que dichas patentes se asocien a un mayor rendimiento comercial esperado, ya que es costoso patentar en tres sistemas de patentes distintos [5]. Adicionalmente, también se ha patentado en Dinamarca, por lo que la invención se encuentra fuertemente protegida.

### 3.2.1.3. Reducción de costes obtenida

El recubrimiento MEMO se ha implementado principalmente en Dinamarca. En este país, cada distrito cuenta con una instalación solar térmica para complementar la calefacción residencial. Se han elegido cuatro plantas solares térmicas en Dinamarca, dos de ellas convencionales (correspondientes a los distritos Sydlangeland y Broager) y las otras dos con paneles que cuentan con el nanorrecubrimiento MEMO (en los distritos Søllested y Jyderup).

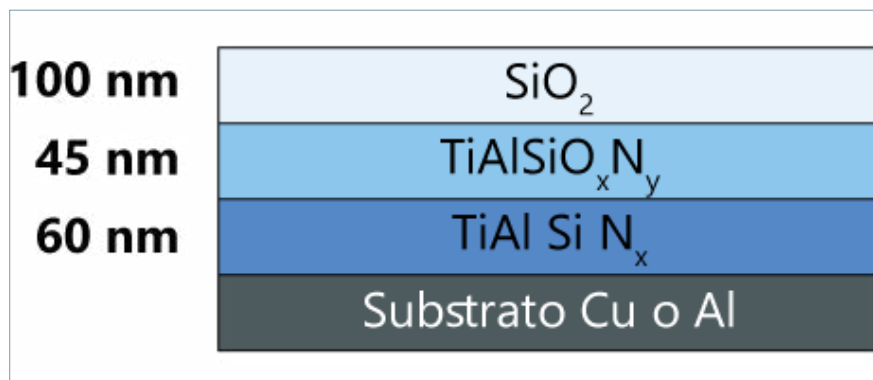


Figura 3: Esquema del recubrimiento MEMO.

Con todos los datos correspondientes a estas instalaciones [6], así como con los resultados que más adelante se discutirán, se ha confeccionado la tabla 2.

Se han calculado los costes por potencia, por unidad de área efectiva y por módulo instalado. Los resultados, incluidos también en la tabla 2, muestran valores inferiores en todos los casos para los paneles con el recubrimiento MEMO. De forma simplificada, se considera que los costes por potencia instalada y por área efectiva se reducen en un 30% y los costes por módulo, en un 40%, aproximadamente.

Como puede verse en la tabla 2, a las plantas con el recubrimiento MEMO les corresponden los valores del LCOE de 2,56 y 2,58. En contraste, para las convencionales, los LCOE son de 4,42 y 4,08. Es decir, con el recubrimiento MEMO se ha obtenido una disminución del LCOE de alrededor del 40%.

### 3.2.2. Recubrimiento autolimpiante

#### 3.2.2.1. Descripción de la tecnología

Otra posibilidad en este sector son los recubrimientos autolimpiantes. Los costes derivados del ensuciamiento de los paneles, debidos a la pérdida de eficiencia y al coste de su limpieza, componen una parte fundamental en los costes de operación y mantenimiento y, en consecuencia, tienen un efecto notable sobre el LCOE. Es más, en las centrales solares térmicas distribuidas por los desiertos del suroeste de Estados Unidos, donde el grado de deposición de arena y polvo en los paneles es muy elevado, se considera que una pérdida del 1% en la reflectancia de los paneles supone un aumento del 1% del LCOE [7].

Una superficie autolimpiante se consigue obteniendo una capa superfi-

cial muy hidrófoba, es decir, que tenga una tensión superficial muy baja. De esta manera, las gotas de aguas, que no pueden adherirse, resbalan por el panel arrastrando consigo la suciedad que encuentren. Sin embargo, el problema que suelen presentar este tipo de superficies es su baja resistencia mecánica, pues son muy susceptibles a la degradación por la erosión.

El Laboratorio Nacional de Oak Ridge ha desarrollado una pintura con nanopartículas de sílice, de manufacturación barata y fácil aplicación. La sílice es un compuesto hidrófilo, de modo que a primera vista puede no parecer una buena idea usarlo para fines en la que la naturaleza requerida es la hidrófoba, luego su funcionalización es absolutamente necesaria. Este proceso puede llevarse a cabo formando enlaces covalentes entre las nanopartículas de sílice con compuestos de baja tensión superficial, como el fluorosilano. Posteriormente, y para mejorar las propiedades mecánicas, se aglomeran las partículas funcionalizadas con un aglomerante polimérico.

Además, el tamaño de las nanopartículas utilizadas evita la dispersión de la radiación con longitudes de onda mayores de 280 nm, lo que da lugar a una selectividad superior a la de las pinturas convencionales. De esta manera, la eficiencia del panel también aumenta.

#### 3.2.2.2. Patente de la invención

En cuanto al registro legal de esta tecnología, su número de patente correspondiente es US2009196990 y únicamente cuenta con patente en Estados Unidos. Por tanto, su uso es libre en el resto del mundo. Su vigencia termina en 2028.

Planta	Søllested	Jyderup	Sydlangeland	Broager
Tipo de recubrimiento	MEMO	MEMO	Convencional	Convencional
Nº de módulos	317	623	904	794
Área efectiva, m <sup>2</sup>	4.700	9.200	12.500	9.988
Inversión, M €	0,7	1,5	3,35	2,4
Potencia instalada, MW	3,3	7	8,76	7
Producción anual, MWh	2.688	5.000	7.500	5.100
Coste por potencia, M €/MW	2,12	2,14	3,82	3,42
Coste por área efectiva, €/m <sup>2</sup>	149	163	268	240
Coste por módulo, €/módulo	2.208	2.408	3.706	3.023
LCOE, c€/kWh	2,56	2,58	4,42	4,08

Tabla 2. Datos y resultados de las plantas analizadas.

Tipo de recubrimiento	Convencional	Autolimpiante
Inversión, \$/kW	1.050	845
Costes O&M, c\$/kWh	3	0,3
LCOE, c\$/kWh	5,97	2,67

Tabla 3: Resultados para los recubrimientos convencional y autolimpiante.

### 3.2.2.3. Reducción de costes obtenida

El presente recubrimiento autolimpiante permite reducir los costes de limpieza, junto con los de operación y mantenimiento, en un 90%. Además, debido a la selectividad de las nanopartículas, se consigue un aumento de la eficiencia del 20% respecto a las pinturas convencionales [8]. Dado que su fabricación y método de aplicación son similares a los del resto de pinturas comerciales, los costes de aplicación de este producto apenas difieren de las alternativas más utilizadas.

En la tabla 3 se han resumido los datos de partida y los resultados obtenidos. La pintura autolimpiante, al tener mayor eficiencia, también tiene densidad de potencia superior. Esto se traduce en una inversión menor, pues el área de panel, de terreno, etc. necesario es inferior.

Por otra parte, la gran reducción en los costes O&M que supone redu-

cir la necesidad de limpiar los paneles permite llegar a valores por debajo del céntimo de dólar. Esto representa el grueso de la reducción de costes de esta nanotecnología.

Como resultado, se obtiene un LCOE de 5,97 c\$/kWh para los recubrimientos convencionales, mientras que para el autolimpiante es del 2,67 c\$/kWh. Es decir, se obtiene una reducción superior al 50%.

### 3.3. Energía eólica

#### 3.3.1. Descripción de la tecnología

El desarrollo de la energía eólica en climas fríos va ganando importancia, ya que este tipo de zonas destacan por su elevado recurso eólico y su baja densidad de población. A pesar de las ventajas que aportan los climas fríos, se debe tener en cuenta la necesidad de lidiar con la formación de hielo en las palas de los aerogeneradores. La acumulación de hielo tiene un efecto muy

notable en la aerodinámica del sistema y el equilibrio del rotor, ya que puede llevar a un funcionamiento incorrecto y a una reducción sustancial de la vida útil.

Para combatir estos impedimentos existen las pinturas antihielo. Pero el uso de estas pinturas también entraña un problema, pues se requieren al mismo tiempo dos propiedades que suelen ser mutuamente excluyentes: una alta resistencia a la erosión y una naturaleza hidrófoba. Las pinturas antihielo hidrófobas hacen que las gotas de agua no puedan adherirse a la pala, por lo que resbalan y evitan así la formación de hielo. Sin embargo, debido a la erosión, la pintura se vuelve porosa y pierde sus propiedades hidrófobas y crean la necesidad y el gasto de tener que repintar cada pocos años. Por otra parte, las pinturas que muestran una gran resistencia a la erosión suelen tener un grado de hidrofobicidad muy limitado.

Por tanto, aunar ambas características supone todo un reto. Sin embargo, mediante el uso de la nanotecnología, se ha dado solución al problema con la aparición de la pintura antihielo *Bladeshield*. Se compone de una pintura de altos sólidos convencional con una dispersión de nanopartículas funcionalizadas para ser hidrófobas y resistir a la erosión.

País	Tecnología	Vida útil, años	Pérdidas medias, %	Inversión, €/kW	O&M fijos, €/kW	O&M variables, €/kWh	LCOE, c€/kWh
Canadá	Convencional	20	10	1.866	47	0	9,7
	Bladeshield	23	4		39	0	8,2
Finlandia	Convencional	20	10	1.514	30	0	8,5
	Bladeshield	23	4		25	0	6,4
Suecia	Convencional	20	10	2.124	0	0,020	10,7
	Bladeshield	23	4		0	0,016	9,1

Tabla 4: Datos y resultados de LCOE para un parque eólico en los tres países estudiados.

### 3.3.2. Patente de la invención

La patente ES2556158 recoge la tecnología Bladeshield en España, con su vigencia hasta 2034. Adicionalmente, también tiene concedida la patente en EE UU y cuenta con solicitudes en China y Europa. Por tanto, una vez concedidas las patentes en trámites, la invención contará con una protección fuerte.

### 3.3.3. Reducción de costes obtenida

Los recubrimientos antihielo tienen especial interés en países con climas fríos, como pueden ser Canadá, Finlandia y Suecia. La pérdida de potencia que sufren los aerogeneradores en este tipo de climas puede llegar al 25% en invierno [9], y la erosión producida tanto por el hielo como por la lluvia, combinada con los fuertes vientos, reduce considerablemente la vida útil de los equipos. Estas condiciones no suelen permitir periodos de explotación superiores a 20 años, en contraste con los 25-30 años que logran la mayoría de parques en otras localizaciones con climas menos extremos.

En climas fríos, el uso del recubrimiento antihielo Bladeshield puede aumentar la vida útil del aerogenerador de 2 a 5 años, a la vez que reduce los costes de operación y mantenimiento en un 15-20% [10]. Teniendo en cuenta estos intervalos, se ha calculado el LCOE para los valores medios.

Además, el principal objetivo de evitar el hielo en las palas es reducir las pérdidas en el periodo invernal, hasta un valor similar al de verano. En verano las pérdidas se deben al rendimiento de conversión, pérdidas mecánicas, etc. y suelen rondar el 4% [11]. Por

tanto, el fin del uso del recubrimiento Bladeshield es conseguir que las pérdidas medias anuales sean del 4%, es decir, equivalentes a las del periodo veraniego. Consultando los datos correspondientes a las pérdidas medias anuales, publicadas por las oficinas encargadas de la energía en cada uno de los tres países, se considera que las pérdidas medias rondan el 10% tanto en Canadá como Suecia y el 20% en Finlandia.

Los resultados, junto con los datos de partida empleados, se muestran en la tabla 4. En esta tabla, se observa que en todos los casos se obtiene una reducción notable en el LCOE. Para Canadá y Suecia, la tecnología Bladeshield da lugar a una reducción media del LCOE de alrededor del 15%. En el caso de Finlandia, siendo el que mayores pérdidas sufre de entre los tres países analizados, el LCOE logra una la reducción media del 25%.

## 3.4. Almacenamiento energético

### 3.4.1. Descripción de la tecnología

Entre los distintos tipos de sistemas para el almacenamiento energético, las baterías de litio son una de las opciones más populares y en las que la nanotecnología tiene mayor presencia. En concreto, mediante la nanoestructuración de los electrodos, es decir, formando los electrodos con partículas más pequeñas.

El uso de nanopartículas responde a la necesidad de aumentar la velocidad de carga. Un tamaño de partícula menor supone una superficie específica superior. Dicho de otro modo, se tiene mayor cantidad de superficie disponible para llevar a cabo más reacciones

de forma simultánea, aumentando la velocidad global. Además, se reducen las distancias que tienen que recorrer los iones contribuyendo a la disminución de los tiempos de carga. Por otra parte, se aumenta la vida útil de las baterías y disminuye la periodicidad en la que se deben reemplazar.

Actualmente, hay muchas líneas de investigación que tratan de obtener y comercializar electrodos nanoestructurados pero, hasta el momento, solo dos tecnologías lo han conseguido satisfactoriamente: el nanotitanato de litio (nLTO) para el ánodo y nanofosfato de hierro y litio (nLFP) para el cátodo.

Convencionalmente, el material empleado en la fabricación de los ánodos ha sido el grafito. De forma alternativa, y para afrontar la corta vida útil del grafito, han comenzado a popularizarse los ánodos de titanato de litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  o LTO). La nanotecnología propone el uso de ánodos formados por nanocristales de titanato de litio (nLTO).

Para el cátodo, una opción popular es el fosfato de hierro litio ( $\text{LiFePO}_4$  o LFP). Al igual que para el caso del ánodo, también se pueden fabricar cátodos con nanopartículas de fosfato de hierro litio (nLFP).

### 3.4.2. Patente de la invención

Los derechos de propiedad industrial del ánodo de nLTO se recogen en la patente estadounidense número US6890510, y la del cátodo de nLFP en la patente US7338734. Ambas tienen vigencia hasta 2022 y son triádicas. Adicionalmente, el ánodo nLTO cuenta con patentes en Australia y

Material	Ánodo			Cátodo	
	Grafito	LTO	nLTO	LFP	LFP
Coste unitario, €/kWh	200	340	500	300	550
Ciclos	750	3.000	9.000	2.000	7.000
Reemplazos	12	3	1	4	1
Coste total, €/kWh	2.400	1.020	500	1.200	550

Tabla 5: Costes y resultados para los distintos electrodos.

Canadá; el cátodo nLFP también está protegido en Corea, China y Canadá. Es decir, ambas tecnologías cuentan con una protección muy fuerte.

#### 3.4.3. Reducción de costes obtenida

En la tabla 5 se muestran los datos y los resultados obtenidos. Observando el coste unitario de cada reemplazo para cada una de las tecnologías, se observa que la alternativa nanoestructurada es más cara, pues, aunque el proceso de síntesis de los compuestos es el mismo, se requiere de un proceso de molienda más exhaustivo para obtener las nanopartículas, lo que aumenta su coste. Sin embargo, la ventaja que presentan los electrodos nanoestructurados es su vida útil, que ronda los 20-25 años de vida, de modo que se deben reemplazar con menor periodicidad.

La tabla 5 muestra que, para el caso del ánodo, el grafito debe reemplazarse 12 veces y el LTO 3 veces, por cada unidad nLTO. Así, el coste final para el nLTO es el 80% menor que para el grafito y el 50% inferior que para el LTO. Lo mismo ocurre para el cátodo: se debe reemplazar el LFP 4 veces por cada unidad nLFP y se obtiene una reducción de alrededor del 50%.

## 4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen son las siguientes:

Respecto a las patentes, la mayoría de las nanotecnologías estudiadas cuentan con patentes triádicas, junto con patentes adicionales en otros mercados. Es decir, tienen una protección fuerte.

En el campo de la fotovoltaica, el uso de la perovskita permite disminuir los costes de fabricación y aumentar la eficiencia. Pueden alcanzarse reducciones en el LCOE de entre el 5% y el 20%, dependiendo de la configuración empleada.

En cuanto a la energía solar térmica, la mejora de los recubrimientos mediante la nanotecnología puede conllevar una reducción en el LCOE del 40-50%.

El recurso eólico en climas fríos es muy notable y, por tanto, si se evitan muchos de los inconvenientes mediante pinturas antihielo, se puede reducir el LCOE entre el 15% y el 25%, dependiendo de las pérdidas.

La nanoestructuración de los electrodos resuelve una gran cantidad de los inconvenientes de las baterías de litio y llega a reducir los costes en más del 50%.

En definitiva, la principal conclusión del presente trabajo es que la nanotecnología permite desarrollar la herramienta más adecuada para una tarea determinada, optimizando los procesos y ofreciendo la posibilidad de hacer que las energías renovables sean más baratas.

### Bibliografía

#### Bases de datos de patentes

- Bases de datos y sitio web de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM). Disponible en: [www.oepm.es](http://www.oepm.es).
- Bases de datos y sitio web de la Oficina Europea de Patentes (EPO). Disponible en: [www.epo.org](http://www.epo.org).
- Bases de datos y sitio de la Oficina Estadounidense de Patentes y Marcas (USPTO). Disponible en: [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov).

[www.uspto.gov](http://www.uspto.gov)

- Bases de datos de la Oficina Japonesa de Patentes (JPO). Disponible en: [www.jpo.go.jp](http://www.jpo.go.jp)

### Referencias

- Miranda-Hernández JM. "Figuras y sistemas de propiedades de propiedad industrial para proteger la creatividad tecnológica". *Técnica Industrial*. Vol. 298 p.28-36.
- Li Z, Zhao Y, Wang X, et al. "Cost Analysis of Perovskite Tandem Photovoltaics". *Joule*. Vol.2 p.1-14.
- Varjotie J. "From nano layers to the best solar thermal collector in the world". En: *Functional Materials Summer Festival (Helsinki 29-30 de mayo de 2012)*. Disponible en Internet: [https://tapahtumat.tekes.fi/uploads/44f6862/jarivarjotie\\_jakoon-9295.pdf](https://tapahtumat.tekes.fi/uploads/44f6862/jarivarjotie_jakoon-9295.pdf).
- Savosolar Company Brochure [En línea]. Finlandia: 2017 [ref. de julio 2018]. Disponible en Internet: [http://www.smartreflex.eu/fileadmin/user\\_upload/News/Savosolar-ENG.pdf](http://www.smartreflex.eu/fileadmin/user_upload/News/Savosolar-ENG.pdf).
- Moledo-Froján FJ. "Estudio macroscópico sobre patentes de nanotecnologías". *DYNA*. Vol.83-1 p.11-19.
- Danish District Heating Association. *SolarHeatData.eu* [En línea]. Dinamarca, 2016 [ref. de julio 2018]. Disponible en Internet: <http://solarheatdata.eu/>.
- Smith B, Polyzos G, Schaeffer D, et al. "Low cost anti-soiling coatings for CSP collector mirrors and heliostats". En: *SPIE Optics + Photonics*, (San Diego 21 de agosto de 2014). Disponible en Internet: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1185418>.
- Low-Cost Self-Cleaning Reflector Coatings for CSP Collectors [En línea]. Hunter (Tennessee): Oak Ridge National Laboratory, 15 de abril de 2013 [ref. de julio 2018]. Disponible en Internet: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/progress\\_report\\_lab\\_ornl\\_fy13\\_q2.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/progress_report_lab_ornl_fy13_q2.pdf).
- Jonsson C. "Further development of ENERCON's de-icing system". En: *Winter Wind*, (Skellefteå 7 de febrero de 2012). Disponible en Internet: [http://winterwind.se/2012/download/2\\_Winter\\_Wind\\_2012\\_Christoffer\\_Jonsson\\_Enercon.pdf](http://winterwind.se/2012/download/2_Winter_Wind_2012_Christoffer_Jonsson_Enercon.pdf).
- Raj B, Van de Voorde M, Mahajan Y. *Nanotechnology for Energy Sustainability*. 1ª edición. Weinheim: Wiley-VCH, 2017; p. 1316.
- Wind Energy in Cold Climates [En línea]. Canadá: Natural Resources Canada, 21 de diciembre de 2017 [ref. de julio 2018]. Disponible en Internet: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/renewable-electricity/wind/7321>.