



TÍTULO

**CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS Y SU
INTEGRACIÓN EN CULTIVOS DE INVERNADERO**

AUTOR

Miguel Ángel Tenor Martínez

Tutora	Esta edición electrónica ha sido realizada en 2015 Paula Sánchez Frieria
Curso	<i>Máster Oficial en Tecnología de los Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica (2014/15)</i>
ISBN	978-84-7993-672-3
©	Miguel Ángel Tenor Martínez
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2015



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
 - **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
 - **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
-
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
 - *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
 - *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



Máster Oficial en Tecnología de los Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica

Curso 2014-2015

Células fotovoltaicas orgánicas y su integración en cultivos de invernadero

*Autor: Miguel A. Tenor Martínez
Tutora: Paula Sánchez Frieria*

Universidad Internacional de Andalucía

Células fotovoltaicas orgánicas y su integración en cultivos de invernadero

Resumen

En este proyecto se exponen tanto las necesidades del cultivo protegido como las del agricultor, focalizando la atención en las características específicas de la zona mediterránea. También se verá la importancia que tiene la elección de la cubierta, estructura y orientación del invernadero para el desarrollo del cultivo. Se describirán las características básicas de las células plásticas orgánicas así como su estado actual de desarrollo, potencial de innovación y técnicas de fabricación para comprender las posibilidades que éstas nos brindan.

En el último capítulo del proyecto se buscarán posibles configuraciones de integración que afecten en la menor medida de lo posible al cultivo. Al mismo tiempo se evaluarán tanto la capacidad de producción eléctrica como los costes de la misma para dos localizaciones específicas.

*Autor: Miguel A. Tenor Martínez
Tutora: Paula Sánchez Frieria*

Palabras clave: Células fotovoltaicas plásticas, Invernadero, Integración.

1	Introducción	1
1.1	Justificación	1
1.2	Objetivos	2
2	El invernadero	3
2.1	Introducción	3
2.2	La radiación solar y su interacción con las plantas	3
2.3	La radiación solar en el invernadero	5
2.4	Condiciones climáticas para el cultivo	7
2.5	Energías renovables en invernaderos	8
2.6	El cultivo en el clima mediterráneo	9
2.7	Cubiertas plásticas	9
3	Células solares orgánicas	11
3.1	Introducción	11
3.2	Polímeros semiconductores	11
3.3	Célula solar orgánica	12
3.4	Estado de arte	13
3.4.1	Eficiencia	14
3.4.2	Degradación	16
3.5	Procesos de fabricación	17
3.5.1	Técnicas de revestimiento	17
3.5.2	Técnicas de impresión	19
3.6	Células fotoselectivas	20
4	Integración	23
4.1	Introducción	23
4.2	Cubiertas y módulos	23
4.3	Tipos de paneles orgánicos	25
4.4	Sombreo, ocupación y disposición de módulos	27
4.5	Potencial productivo	29
4.6	Energía generada	30
4.6.1	Invernaderos tipo túnel en Huelva	31
4.6.2	Invernaderos de tipo parral en Almería	34
4.7	Costes de la electricidad	36
4.8	Otros aspectos de la integración	41

5 Conclusiones	43
6 Bibliografía	44
7 Webgrafía	45
8 Anexos	46

Introducción

1.1 Justificación

Desde el punto de vista medioambiental, la necesidad de reducir la emisiones de CO₂ a la atmósfera nos obliga implementar sistemas energéticos que sean respetuosos con el medio ambiente. La energía solar fotovoltaica se presenta como una de las alternativa al modelo energético actual basado en los combustibles fósiles, uno de los inconvenientes que presenta es que requiere de grandes extensiones de terreno en comparación con otras tecnologías. La integración arquitectónica de módulos solares fotovoltaicos no solo nos permite un ahorro en los terrenos, en el caso de disponer de invernaderos tecnificados con consumibles eléctricos que alimentar, el punto de consumo eléctrico se encontraría cerca del centro de generación siendo menores las pérdidas si se compara con una generación eléctrica centralizada.

Desde el punto de vista del agricultor de invernadero, factores climáticos y económicos han contribuido a que actualmente los invernaderos en el mediterráneo estén poco tecnificados. Pero el agricultor ha visto como los márgenes de beneficio por kg de producto obtenido se han reducido a lo largo de las campañas.

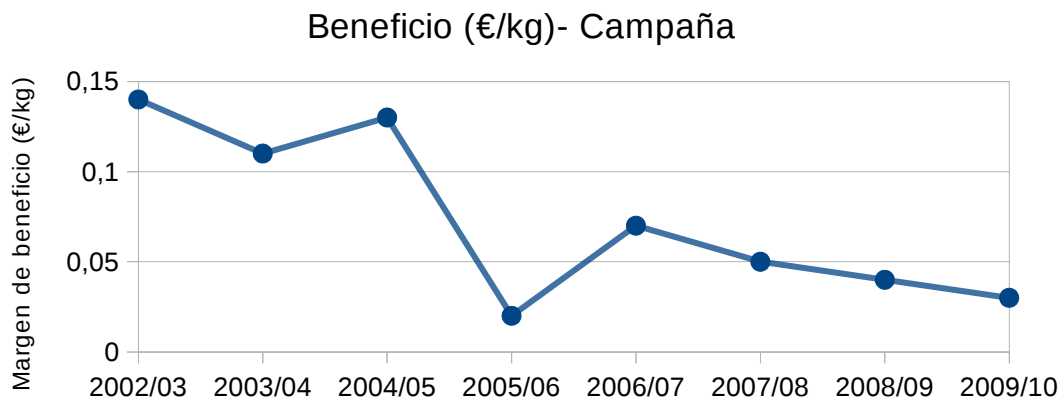


Gráfico 1: Margen de beneficio (€/kg) desde la campaña 2002/03 hasta la 2009/10
Fuente^[2]: ISSN 2173-7568

Mejoras en el invernadero proporcionan mejores condiciones climáticas para el cultivo y reducen la exposición a posibles plagas y enfermedades^[1], aumentando así la productividad (kg/m²). Pero, por un lado, el escaso beneficio dificulta la inversión inicial^[2], y por otro, la inestabilidad de los mercados hace que las inversiones a largo plazo deban ser consideradas con detenimiento.

Las células solares plásticas se perfilan como las low-cost dentro de los paneles fotovoltaicos, gracias tanto a los costes de los materiales como a las posibilidades que brinda de ser producidas en serie, de forma continua en un proceso totalmente mecanizado. Además con el sustrato oportuno, podemos tener la ligereza y flexibilidad en nuestros paneles, por lo que no sería necesario reforzar la estructura del invernadero para que pudiese soportar el peso de los paneles. Con estas características, la inversión inicial que ha de disponer el agricultor es mucho menor que con otras tecnologías fotovoltaicas.

1.2 Objetivos

Con el fin de que el agricultor pueda reducir costes sin necesidad de una fuerte inversión inicial, se pretende integrar las nuevas células plásticas fotovoltaicas en la cubierta los invernaderos situados en la zona del Mediterráneo.

A lo largo del documento se verán las ventajas y desventajas que nos brinda el uso de estos paneles, la capacidad de generación eléctrica y sus costes. Así como su viabilidad a la hora de considerarlo una realidad ya sea para un autoconsumo sostenible o para la venta a la red eléctrica.

Para poder desarrollar estos puntos será necesario conocer que nos puede ofrecer la tecnología de células orgánicas plásticas y que se puede esperar de ella a medio-largo plazo.

Dado que el recurso solar es un bien compartido entre la plantación y la producción fotovoltaica, no podemos olvidarnos de las necesidades lumínicas que requiere la plantación para su desarrollo. Por lo que hemos de ver como los diferentes tipos de invernadero alteran la calidad de la luz que llega a la plantación, y como afectarán las modificaciones que hagamos sobre el mismo.

El invernadero

2.1 Introducción

Un invernadero es un recinto en el que es posible recrear un microclima artificial que aporte las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de un determinado cultivo. Con el uso del invernadero protegemos a la plantación de las bajas temperaturas, fuertes vientos, plagas, enfermedades, malas hierbas y predadores^[4]. Además, si se desea obtener producción fuera de época se pueden extender los ciclos de cultivo controlando variables como temperatura, humedad o iluminación^[1]; alcanzando el máximo rendimiento, aumentando las producciones y mejorando la calidad del producto. Aunque como inconvenientes encontramos, además de un conocimiento específico en la materia, la necesidad de una mayor inversión inicial y coste de operación y/o mantenimiento.

Los países que conforman la zona del mediterráneo cuentan con cerca del 18% de superficie de cultivo bajo invernadero que se estiman en todo el mundo (949.000^(*)ha). Aunque actualmente estos países cuentan con 170.000ha^(*), hasta el desarrollo de las cubiertas plásticas en los años 60, el cultivo bajo invernadero era prácticamente inexistente. Estas cubiertas son más baratas que el vidrio, y también más ligeras, permitiendo estructuras menos robustas que las soporten. Por lo que en cómputo se obtiene una reducción de costes con respecto a los invernaderos de vidrio característicos del norte de Europa. Este abaratamiento ha permitido que países de la zona impulsen su economía. Solo en España durante el año 2008 dio empleo directo a 80.000 personas y tuvieron 2.500 millones de euros facturación^(**).

España cuenta con cerca del 7% del total (65.055 ha^(***)). La mayoría están localizados en Andalucía, Canarias, Murcia y Comunidad Valenciana, pero sin duda la mayor concentración la encontramos en la provincia de Almería con 29.596 ha^(****).

2.2 La radiación solar y su interacción con las plantas

La radiación solar puede considerarse el factor climático más importante en el cultivo por su influencia en los procesos fotosintéticos, balances de agua y energía, así como crecimiento y desarrollo de las plantas. No solo es un recurso energético para la planta, sino que tiene la capacidad de modular su comportamiento. Los fotorreceptores de la planta detectan cambios en la luz, y ésta reacciona a estos cambios con una respuesta fotomorfogenética determinando la forma, el color y la floración de planta^[3]; haciendo que la planta crezca en dirección a la fuente luminosa y las hojas busquen la orientación óptima para una mayor absorción de radiación. Muchas plantas reaccionan a la duración del día, esperando a que las horas de Sol se hallen en un determinado margen para comenzar su floración o para la formación del fruto. La fresa por ejemplo, requiere de días cortos para comenzar la floración y días largos para la formación del fruto.

La materia vegetal crece y se desarrolla gracias al alimento que ellas mismas fabrican durante la fotosíntesis. En este proceso, dióxido de carbono y agua es transformado en oxígeno, que es

* Fuente: [Dontificia Universidad Javerian-Datos 2014 -Enlace 1](#)

** Fuente: [COTEC -Enlace 2](#)

*** Fuente: [Ministerio de Agricultura -Enlace 3](#)

****Fuente:[Europa press -Enlace 4](#)

liberado a la atmósfera, y azúcares que serán empleados para formar la savia elaborada.

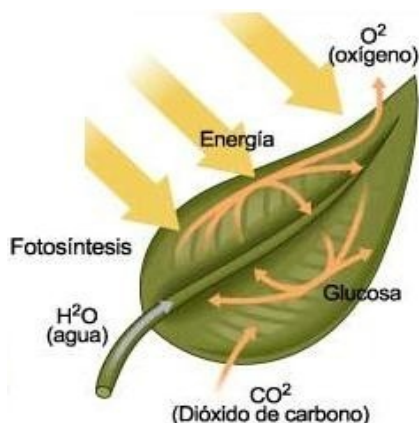
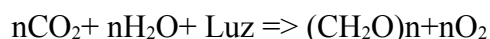


Ilustración 1: Fotosíntesis

Fuente ilustración original: [Enlace 5](#)

Existe un límite de saturación lumínica, para el cual la tasa neta de fotosíntesis deja de aumentar su productividad. Este límite de saturación es característico para cada cultivo, incluso las adaptaciones al medio que presentan las plantas hacen que la relación entre la tasa neta de fotosíntesis y la radiación disponible varíe entre distintas alturas del follaje. Pero por regla general, y a excepción de periodos concretos, la disponibilidad de la luz suele ser un factor limitante.

Determinados pigmentos que poseen las plantas son los encargados de extraer la energía de la radiación incidente para ser aprovechados en el proceso de fotosíntesis. Estos pigmentos son sensibles a determinadas longitudes de ondas la radiación electromagnética. Se denomina radiación fotosintéticamente activa (PAR) a la proporción de radiación solar incidente sobre la cubierta vegetal que es aprovechable para realizar la fotosíntesis. La zona del espectro que contribuye a la fotosíntesis corresponde a longitudes de onda que van desde los 300nm hasta los 700nm, coincidiendo aproximadamente con el visible. En función de los pigmentos que contenga la planta, algunas longitudes de onda tomarán más peso en el proceso que otras.

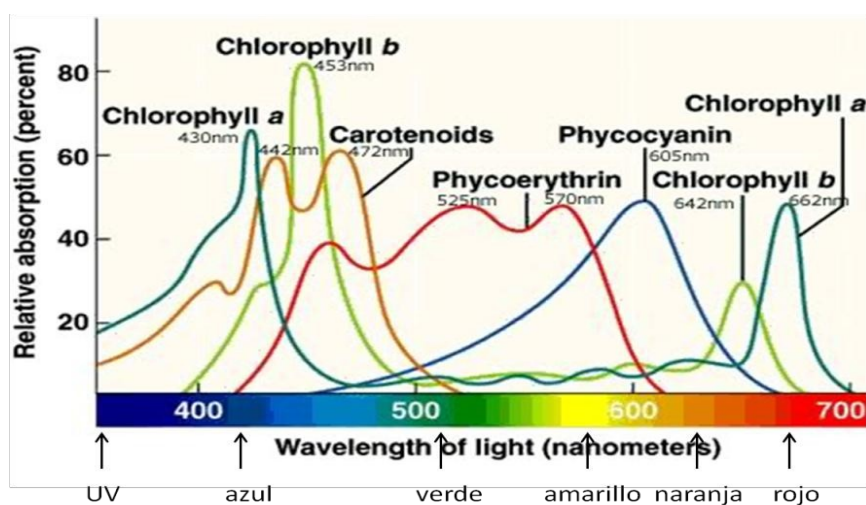


Figura 1: Espectro de absorción de pigmentos

Fuente: [Enlace 6](#)

En la figura 1 están representado el espectro de absorción de algunos pigmentos. La clorofila-A es la que absorbe mayor parte de la radiación y se encuentra en en todas las plantas y algas. La clorofila-B tiene la misión de absorber la luz en la que falla la tipo A y solo la encontramos en las plantas pluricelulares superiores y algunas algas. Los pigmentos carotenoides son los responsables de la coloración marrón de las hojas en otoño mientras que la ficoeritrina y ficocianina solo lo encontramos en algunas especies de algas.

Salvo alguna rara excepción que se pueda llegar a dar, las plantas que se alojarán bajo un invernadero realizan la fotosíntesis principalmente a través de las clorofilas A y B, y en una menor medida de los carotenoides. En la figura 1 podemos ver la tasa de absorción de estos pigmentos en

función de la longitud de onda y su contribución total en la tasa de absorción fotosintéticamente activa. El tramo que va desde los 510 hasta los 620 nm se ha identificado como el menos activo con un mínimo en 550nm.

Aunque no entren en juego en los procesos fotosintéticos, otras longitudes de onda también afectan a la hora del desarrollo de la planta. El infrarrojo lejano es aprovechado transformado en calor latente de la planta, exceso de radiación ultravioleta puede causar deformaciones en la planta haciendo que crezcan menor y hojas más estrechas, incluso longitudes de onda inferiores a 280 nm pueden ser letales para las plantas, por contra, reducir esta radiación presenta efectos germicidas al impedir la germinación de determinadas familias de hongos y genera un ambiente hostil para los insectos que transmiten enfermedades víricas.

2.3 La radiación solar en el invernadero

En el medio natural las plantas reciben directamente la luz proveniente del Sol una vez que ha sido filtrada por la atmósfera. Intensidad, horas de luz o el espectro que llega a la planta dependerá de factores como la localización geográfica, época del año y condiciones climatológicas que se presenten. El cultivo protegido en el interior del invernadero recibirá una radiación diferente que la que recibiría en el exterior. Esto es debido a que la propia cubierta, y estructura que soporta el invernadero modifica la luz a su paso, cambiando la morfología y desarrollo de las plantas que alberga.

Con ayuda de la cubierta se pueden controlar la temperatura y humedad además de cambiar las propiedades de la luz que recibe el interior del invernadero. Las cubiertas fotoselectivas son capaces de actuar solo en determinadas longitudes de onda del espectro en busca de diferentes propósitos:

- Ultravioleta (UV): impidiendo el paso de esta radiación (290-380nm) al invernadero conseguimos un efecto antiplaga. Algunos hongos requieren de UV para producir esporas y reproducirse, a lo que hay que sumar que muchos virus son transmitidos por insectos sensibles al UV y no se sienten cómodos en zonas oscuras a la misma. Por contra, también se ve mermada la eficacia de insectos polinizadores
- Infrarrojo cercano (NIR): Los llamados antitérmicos bloquean el paso de la radiación NIR (780-2.100nm), de esta forma evitamos el sobre calentamiento de invernaderos en zonas calurosas.
- Infrarrojo medio (MIR): Estas cubiertas reflejan la radiación infrarroja media con el fin de mantener las temperaturas nocturnas en zonas frías.
- Luminiscentes: Con ayuda de pigmentos fluorescentes, capaces de absorber longitudes de onda que no son aprovechadas por la plantación (UV y verde) y emitir en otras que sí puedan ser aprovechar para la fotosíntesis (azul y rojo). Consiguiendo aumentos de productividad, pero su uso es limitado porque son caros y pueden producir cambios en la morfología de la planta en función del cultivo.

Otro factor importante en el desarrollo de la planta es la relación entre la componente directa y difusa de la luz que recibe. Dada la estructura que tienen las plantas terrestres, la componente directa de la radiación, al incidir sobre las hojas superiores de la planta, hace que éstas proyecten sombras sobre el follaje interior. Reduciendo así la luz disponible para la realización de la

fotosíntesis. Mientras que la radiación difusa penetra mejor entre la vegetación dado su carácter adireccional, haciendo que tanto la radiación absorbida como su productividad aumenten^[7].

Con la cubierta también podemos conseguir que la luz tenga una mayor componente de radiación difusa y así lograr mejores producciones. Esto se consigue agregando aditivos a la cubierta de tal forma que la luz incidente sufra reflexiones sobre los mismos, consiguiendo así desviar y dispersar la radiación directa. Pero al aumentar el número de reflexiones también conseguimos que una mayor cantidad de la luz que incide sobre la cubierta se escape hacia el exterior del invernadero, por lo que la transmisividad total en cubiertas altamente difusoras es menor que en las cubiertas con menor grado de difusión^[7]. La pérdida de transmisividad hace que el uso de cubiertas difusoras quede relegada a zonas que reciban una alta radiación y disponga de días despejados como países situados en la zona del mediterráneo, mientras que para países más septentrionales con días nublados se recomienda el uso de cubiertas claras.

El grado de difusión no es el único factor que influye en la transmisividad global de la cubierta. El estado de degradación y espesor de la cubierta, la acumulación de polvo o la condensación de agua hacen que la radiación en el interior del invernadero sean siempre menor que en el exterior.

Otro factor de pérdidas lo encontramos en la inclinación que tenga la radiación directa con respecto a la cubierta, dado que ésta actúa como frontera que la luz ha de pasar. Por un lado, las ecuaciones de Fresnel determinarán la luz transmitida en función del ángulo de incidencia de la radiación, por otro, a mayor ángulo de incidencia, mayor será la distancia que la radiación ha de recorrer dentro del material haciendo que tenga mayores probabilidades de ser desviada fuera del invernadero. De lo que se desprende que a mayor ángulo de incidencia con respecto a la normal de la superficie, mayores serán las pérdidas. En el caso de la radiación difusa que recibe el invernadero, no tiene sentido hablar de ángulo de incidencia sino de una transmisividad global con respecto a la misma.

Del último punto concluimos que la geometría y orientación de la estructura del invernadero será determinante a la hora de estimar la luz total transmitida dado que condiciona la orientación de la cubierta. Aunque nos podemos encontrar con las estructuras más variadas, en la figura 2 se muestra una clasificación de las estructuras más comunes atendiendo al perfil externo del invernadero.

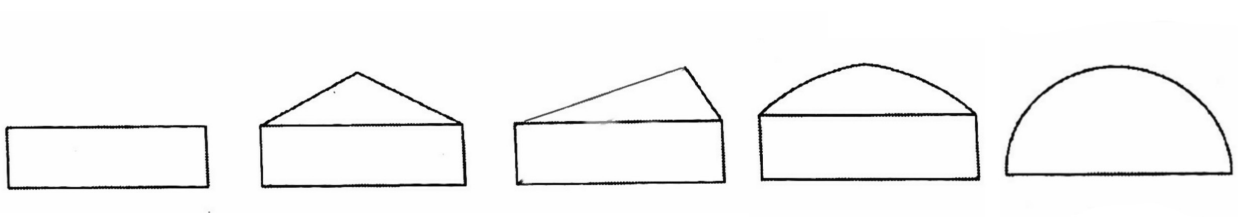


Figura 2: Clasificación de invernaderos. De izquierda a derecha: plano, plano simétrico, plano asimétrico, capilla y túnel

Con respecto a la clasificación mostrada, a excepción del tipo plano o parral, la orientación del invernadero determinará también la orientación final de la cubierta, y por tanto su grado de transmisividad. Las principales orientaciones con respecto a la cumbre (parte más alta del invernadero) que nos podemos encontrar son Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-O) como muestran las figuras 3 y 4.

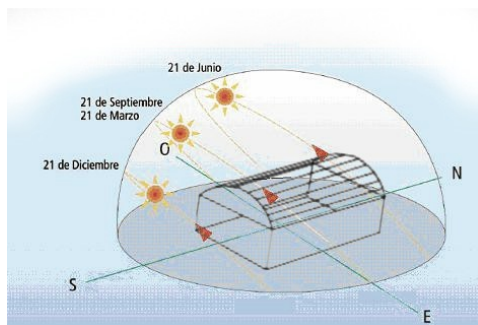


Figura 3: orientación N-S

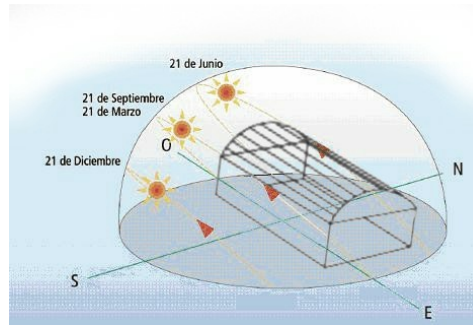


Figura 4: orientación E-O

Con respecto a la transmisividad de la luz, los invernaderos con orientación E-O reciben globalmente más radiación que a los orientados N-S. Sin embargo, a la hora de distribuir las sombras que producen la estructura, canalones de desagüe y demás elementos, la orientación N-S presenta mejores resultados. A lo largo del día, debido a las diferentes posiciones del Sol en el horizonte, las sombras se desplazan mayormente de oeste a este. Es por esto que las sombras que producen las estructuras orientas E-O están muy localizadas a lo largo del día, dejando zonas de sombra bien definidas que pueden llegar a afectar el cultivo que se encuentre situado en estos lugares del invernadero. Mientras que las sombras de los invernaderos con orientación N-S recorren el invernadero a lo largo del día repartiendo así la carga sobre toda la plantación por igual. Las sombras han de ser evitadas en la medida de lo posible. Numerosos son los estudios que se han llevado a cabo para determinar los efectos de éste sobre el cultivo. Al reducir la iluminación que llega al cultivo la producción potencial también disminuye, pérdidas entorno a $0,6\text{kg/m}^2$ _mes de tomate por cada 10% de sombreado se estimaron en Nápoles durante el periodo de mayo a julio^[7].

En la mayoría de invernaderos, incluso los situados en la zona mediterránea, la luz es un factor limitante, por lo que las orientaciones E-O son más propicias para conseguir mayores producciones. Con el propósito de conseguir mejores valores de iluminación fueron concebidas las estructuras asimétricas; con orientación E-O y la techumbre de mayor tamaño orientada hacia donde se disponga de una mayor radiación.

Pero la elección de la estructura y la orientación no siempre esta supeditada a la radiación disponible, hay que saber que también influyen en la temperatura y humedad del invernadero que junto con otros factores como la topografía del terreno, la intensidad y dirección de los vientos que ha de soportar, o factores económicos, pueden determinar el invernadero que finalmente se tenga.

2.4 Condiciones climáticas para el cultivo

La tasa fotosintética no solo depende de la disponibilidad de la luz; factores climáticos como la humedad, CO_2 y temperatura son también determinantes^[6], siendo éstos característicos de cada cultivo y fase de desarrollo. Con el invernadero tratamos de controlar estas variables para así conseguir el mayor grado de confort posible con las técnicas y recursos disponibles.

A la intemperie, las plantas no tienen carencia de CO_2 . Sin embargo, en el interior de un invernadero con alta densidad de plantas y ventilación insuficiente, los niveles de CO_2 caen mermando la producción. Podemos aumentar la concentración de éste, ya sea de forma líquida a través de los fertilizantes o aprovechando los gases de combustión de las calderas. Se han demostrado mejores rendimientos productivos con altas concentraciones ($700\sim 900\text{ppm}$)^[6]

Cuando la humedad relativa es excesiva, las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento. Cuando es muy baja, las plantas transpiran en exceso pudiendo deshidratarse. La siega, la vaporización de agua y el sombreado ayudan a aumentar la humedad relativa en el interior del invernadero, mientras que subir la temperatura ayuda a reducir su valor.

La temperatura influye en la mayoría de los procesos biológicos implicados en el crecimiento y desarrollo de la planta, convirtiéndose en un factor determinante para la producción final. En los periodos fríos, cubiertas térmicas, reducción de la ventilación y sistemas de calefacción son usados para mantener la temperatura en el interior del invernadero. Mientras que en el caso de necesidad de refrigeración, la ventilación se presenta como un método eficaz. Ésta puede realizarse naturalmente mediante aberturas en la cubierta o de forma forzada con ayuda de extractores eléctricos. Y en el caso de que esta ventilación fuese insuficiente se podría combinar con un sistema basado en la evaporación que pueden reducir la temperatura hasta en 10° con respecto a la exterior^[5].

2.5 Energías renovables en invernaderos

La demanda energética que tenga un invernadero dependerá de la relación entre las condiciones climáticas externas y las necesidades ambientales del cultivo. Siendo fundamentalmente el salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero el que marque los requisitos energéticos. Otras consideraciones a tener en cuenta a la hora de evaluar las necesidades de consumo son las exigencias del cultivo, profundidad del acuífero, equipos usados, etc.

Además, el grado de tecnificación en cada invernadero es diferente. Los podemos encontrar desde los más simples sin aporte ninguno de electricidad que hacen usos de métodos tradicionales como la ventilación natural o el sombreado para la refrigeración del entorno, hasta invernaderos automatizados y alto aporte tecnológico. Entre estas dos posibles opciones de tecnificación nos podemos encontrar todo un abanico de opciones en cuanto a confort para las plantas se refiere, por lo que cada invernadero tendrá unas necesidades concretas de consumo y deberían ser determinadas para cada caso en concreto.

A la hora de introducir energías renovables con el fin de obtener la energía necesaria para la climatización en el interior del invernadero, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)^[5] recomienda en su documento “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos” el uso de energía solar fotovoltaica para abastecer elementos aislados de bajo consumo como bombas para el riego, sistema de control climático, accionamientos de ventanas, compresores de aire para refrigeradores por evaporación, etc.

Aunque los sistemas de calefacción podrían venir también del recurso fotovoltaico, existen mejores soluciones ya estudiadas, como el uso de energía solar térmica y/o calderas. Los cuales presentan un mayor grado de eficiencia. Además, con el uso de calderas se puede aumentar la concentración de CO₂ en el invernadero aprovechando los gases de la combustión y así consiguiendo mejores rendimientos en el cultivo.

Centrándonos en el uso de la energía solar fotovoltaica, podemos disponer los módulos en una zona anexa al invernadero si se dispone de tal espacio para su instalación. En caso contrario, se han de disponer en el propio invernadero consiguiendo con ello que la plantación y los módulos compitan por el recurso solar.

Los tipos de módulos que el mercado ha estado ofreciendo y podríamos usar para tal fin son^[7]:

- Módulos opacos flexibles o rígidos, que han de estar dispuestos sobre la cubierta de tal forma que minimice los efectos de sombreado sobre el cultivo, ya sea instalándolos en pasillos o zonas perimetrales; o dispersándolos en la mayor medida para repartir el sombreado.
- Módulos de células opacas y encapsulante completamente transparente que permita el paso de la radiación en los lugares del módulo donde no hay células.
- Módulos de lámina delgada semitransparentes con aperturas puntuales que permite el paso de luz a través de ellas.

2.6 El cultivo en el clima mediterráneo

La escasa tecnificación llevan a una producción que se aleja mucho de su potencial productivo, el cual está sujeto a las condiciones climáticas locales. Y aunque las bonanzas del clima mediterráneo permita una menor tecnificación que en los países más al norte, la plantación está también más expuesta a sufrir posibles enfermedades, plagas y pérdidas de calidad en los frutos^[1]

Mientras que en los inviernos suaves propios de la latitud es fácil proteger al cultivo de las bajas temperaturas externas con el uso de cubiertas térmicas y reducción de la ventilación, en los periodos cálidos, las temperaturas que se alcanza en el invernadero superan el umbral de tolerancia de las plantas. En estos invernaderos poco tecnificados, resulta difícil mantener la temperatura dentro de los límites aceptables^[1]. La ventilación natural es ampliamente utilizada pero no siempre es suficiente y se ha de recurrir a otras técnicas. El sombreado del cultivo suele ser el más común de los métodos. Con él se busca reducir la radiación que llega al cultivo, ya sea usando mallas de sombreado o a través del encalado de la cubierta.

En el interior de los invernaderos de la zona mediterránea, la radiación PAR que llega al cultivo nunca alcanza la saturación lumínica^{[6],[7]}; incluso durante los meses de verano. Por lo que la radiación es un factor limitante para el crecimiento. Además, se ha demostrado en numerosas ocasiones que la producción disminuye proporcionalmente a la reducción de iluminación. Por lo que el principal problema que plantea el sombreado es la irremediable pérdida de producción. Sin embargo, recurriendo al sombreado se mantiene la calidad del fruto, el cual es muy sensible al rigor térmico, se optimiza el recurso del agua y evita la deshidratación de la planta^[7], por lo que su uso es aconsejado.

2.7 Cubiertas plásticas

La tecnología del plástico permite encontrarnos con cubiertas rígidas o flexibles. Las primeras presentan la ventaja de su mayor fotoestabilidad, otorgando más campañas de duración. Las segundas ofrecen una mayor ligereza y el mejor balance coste/propiedades.

Dentro de los plásticos rígidos para cultivo de invernadero nos encontramos con el polimetacrilato de metilo (PMM), policarbonato (PC) y poliéster con fibra de vidrio. Estos materiales son fabricados en placas por lo que para su instalación se requiere de soportes para su correcto anclaje, ofreciendo una menor estanqueidad que una película continua. Por contra son

altamente estables, manteniendo sus propiedades hasta 15 años^(*).

El policloruro de vinilo (PVC) puede ser rígido o, si se le añade plastificantes, flexible. Su vida útil varía de 6 años para placas rígidas a 2 o 3 en el caso de ser flexibles antes de ganar en fragilidad y perder tanto en transparencia como coloración.

Dentro de las láminas flexibles a destacar los fabricados con copolímero de Etileno y Acetato de vinilo (EVA) para uso agrícola con una proporción de entre el 6% y el 18% de acetato de vinilo. Tienen una buena respuesta a la absorción ultra violeta, pero su carga electrostática provoca una acumulación de polvo que reduce su transmisividad y es difícil de eliminar, además, presentan excesiva plasticidad. En función de su grosor pueden mantener sus propiedades de una a dos campañas.

El polietileno (PE) es el plástico flexible más empleado actualmente debido a su bajo precio y buenas propiedades mecánicas. EL PE es poco fotoestable, muy transparente a la radiación infrarroja y no especialmente a la visible, pero por medio de diferentes aditivos podemos cambiar sus propiedades.

Para la fabricación de las cubiertas flexibles, la técnica extrusión-soplado es la más usada. Con esta técnica conseguimos espesores que están habitualmente comprendidos entre 80 y 220 μm , y anchos de hasta 20 metros. La fabricación se lleva a cabo de forma continua, obteniendo como producto final un rollo de material que puede ser cortado a la longitud deseada.

Los materiales de cubierta pueden ser tratados con el fin de otorgarles diferentes propiedades. Así nos podemos encontrar con cubiertas difusoras o claras, antigoteo que eviten daño a la plantación y permita más paso de luz, o fotoselectivas, capaces de actuar en solo determinadas longitudes de onda del espectro. En busca de combinar diferentes propiedades en una misma lámina, los filmes multicapa a través del proceso de coextrusión unen varias capas, normalmente tres, teniendo filmes de mayores espesores, pero mejores propiedades. Con esta técnica podemos colocar el EVA en la lámina intermedia, consiguiendo una mayor compatibilidad entre aditivos y un aumento de la transparencia, además de evitar los problemas de acumulación de polvo que éste tiene.

*Fuente: [infoagro -Enlace 7](#)

Células solares orgánicas

3.1 Introducción

Células solares orgánicas, plásticas, basadas en moléculas o polímeros plásticos, incluso por sus siglas en inglés OPV (organic photovoltaic); son muchos los nombres que podemos encontrar para definir éste tipo de tecnología, las cuales se basan en el material predominante desde el siglo pasado, el plástico.

Este material se había considerado eléctricamente aislante hasta que a finales de los años setenta se descubrió que determinados polímeros tenían propiedades conductoras, aunque no fue reconocido hasta el año 2.000, cuando se concedió el Premio [Novel de Química](#) a los profesores Alan Heeger, Hideki Sarakawa y Alan MacDiarmid por su descubrimiento y desarrollo. Desde entonces son muchos los esfuerzos por el desarrollo de aplicaciones con materiales con las características típicas de los plásticos, como son la flexibilidad y el fácil modelado, con propiedades ópticas y eléctricas de los conductores y semiconductores.

El descubrimiento de la transferencia de carga ultrarrápida entre el polímero semiconductor y un fullereno^[10] ha permitido que las OPV hayan pasado en una década de valores próximos al 1% de eficiencia hasta sobrepasar el 10%. Esta rápida evolución está motivada por su alto potencial para generar paneles flexibles, ligeros y de bajo coste cambiando el concepto clásico de paneles fotovoltaicos.

Aunque actualmente es una tecnología muy joven que apenas está empezando a ver la luz en el mercado, con algunas empresas como [Eight19](#) o [InfinityPV](#), su potencial es grandísimo. No solo por sus propiedades mecánicas, sino también por los costes de los materiales y la fabricación “roll to roll” que nos permiten un proceso completamente mecanizado, de bajo coste y de producción ultrarrápida, a lo que hay que sumar una energía de retorno que ronda entre los tres y seis meses, muy inferior a las actuales tecnología fotovoltaicas^[18].

3.2 Polímeros semiconductores

En los polímeros tradicionales, los electrones están altamente localizados y requieren de una gran energía para ser excitados (>5eV) convirtiéndolos en aislantes eléctricos. Pero dentro del grupo de polímeros conjugados, en los cuales se alternan enlaces simple y dobles, encontramos a los polímeros semiconductores, donde los electrones de los orbitales Z forman enlaces tipo π que están asociados a energías menores, correspondientes al rango de radiación ultravioleta y visible.

En los sólidos moleculares la transición $\pi \rightarrow \pi^*$ que se produce entre el orbital molecular ocupado de mayor energía (HOMO) y el orbital desocupado de menor energía (LUMO)^[9] determinan el equivalente a la energía de banda prohibida de los semiconductores inorgánicos, aunque entre ellos presenten algunas diferencias.

En este tipo de materiales el apantallamiento coulombiano es pequeño, por lo que cuando se absorbe un fotón se forma un excitón tipo Frenkel con energía de enlace demasiado grande (0,3-0,5eV) como para ser disociados térmicamente. La longitud de difusión de estos excitones es de solo unas décimas de nanómetros antes de recombinarse rápidamente sin dejar cargas libres^[9].

Para poder obtener cargas libres, es necesario disociar el excitón transfiriendo la carga a un

material aceptor (tipo n). El descubrimiento de la transferencia de carga ultra rápida entre un polímero semiconductor y un fullereno proporcionó una forma eficaz de disociar los excitones^[10]. A día de hoy, aunque el fullereno sigue siendo usado, se sigue probando nuevos materiales que puedan realizar la misma acción, disociar el excitón de manera eficaz.

La energía entre el HOMO y el LUMO^[9] es la energía mínima para que se produzca la transición $\pi \rightarrow \pi^*$. Sin embargo, las transiciones entre orbitales puede ir acompañada de cambios en los estados vibracionales o rotacionales que son característicos de cada polímero y nos determinarán que longitudes de onda son absorbidas por el mismo^[12].

En la figura 5 tenemos representado el coeficiente de extinción de diferentes materiales usados en la fabricación de células plásticas. Vemos las diferentes respuestas que tienen los materiales cuando se exponen a la luz. Para energía inferiores a la del gap (longitudes de onda larga), el coeficiente de absorción es cero porque los fotones no tienen la suficiente energía para generar el excitón. Para energías superiores (longitudes de onda inferiores) el material empieza a absorber la luz pasando por un máximo de absorción.

Dado un polímero, la transición $\pi \rightarrow \pi^*$, y los estados vibracionales y rotacionales son característicos, por lo que cada polímero tendrá un espectro de absorción característico.

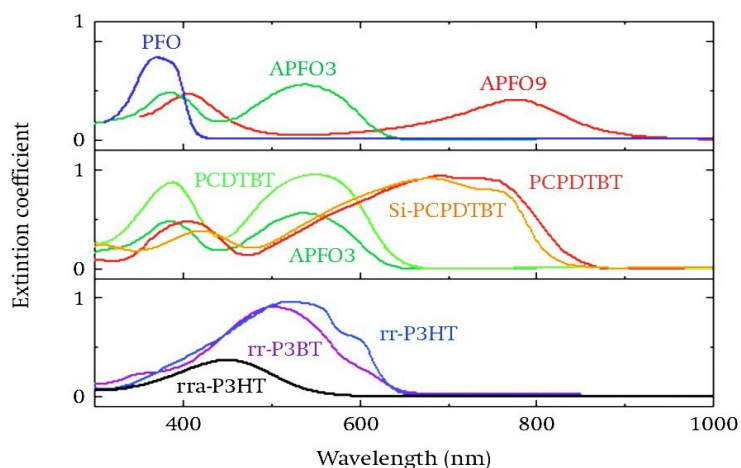


Figura 5: Coeficiente de extinción de diferentes materiales plásticos fotovoltaicos. Fuente^[9]: [M.Campoy-2014](#)

3.3 Célula solar orgánica

Una célula solar orgánica está compuesta por diferentes capas, siendo la estructura más simple que nos podemos encontrar aquella que consta de una capa activa entre dos contactos. La capa activa es el corazón de la célula, donde el fotón es absorbido para su posterior aprovechamiento en forma de energía eléctrica. Esta capa está compuesta a su vez por un polímero semiconductor que hace de material donante y un material aceptor como puede ser el fullereno. El fotón es absorbido en el polímero semiconductor, aunque el material aceptor también absorbe fotones, pero en menor cuantía. Una vez el fotón es absorbido se genera un excitón que se difunde en los dominios del polímeros hasta que alcanza el material aceptor donde se realiza una transferencia de carga del electrón al material aceptor para que el electrón y el hueco viajen por separado hasta sus respectivos contactos.

Con el fin de evitar recombinaciones y mejorar los contactos entre las diferentes capas de la célula se intercalan dos nuevas capas entre los electrodos y el material activo. Entre el cátodo y la capa activa se introduce una lámina para facilitar la transmisión de los electrones (ETL); y entre la capa activa y el ánodo, otra lámina para facilitar la transmisión de huecos (HTL).

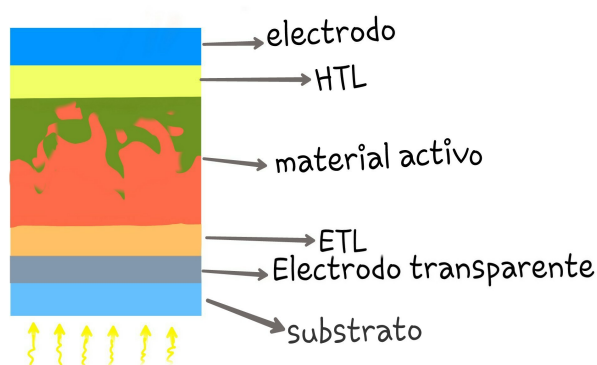


Ilustración 2: Diferentes capas de una célula orgánica (geometría invertida)

La célula orgánica crece depositando las diferentes capas que la componen sobre un sustrato que ha de ser transparente para que la luz pueda pasar a su través. El vidrio es comúnmente usado dada sus buenas propiedades ópticas, estabilidad, y además es un buen material de barrera que evita el paso de aire y agua, evitando así la degradación de los diferentes componentes. Pero si buscamos flexibilidad en la célula, el sustrato ha de serlo también. La avanzada tecnología del plástico nos ofrece materiales con las propiedades requeridas, como el tereftalato de polietileno (PET), aunque no es tan buena barrera como el vidrio.

Al igual que con otras tecnologías fotovoltaicas, las principales geometrías que podemos encontrarnos son la normal y la invertida. En la geometría normal el ánodo se apoya sobre un sustrato transparente por el que ha de pasar la luz que debe llegar a la capa activa, mientras que en la invertida, sobre el sustrato depositamos el cátodo.

A la hora de elegir el electrodo de la capa trasera, para la geometría normal se suele usar aluminio o calcio dado que son buenos conductores de electrones, y además baratos, pero se degradan rápidamente en contacto con el oxígeno y el agua, haciendo que durante la fabricación de la célula, éstos contactos deban depositarse en vacío o ambientes controlados. Mientras que para la geometría inversa la plata es el mejor material para conducir los huecos a la par que es más estable en contacto con el ambiente, pudiendo ser depositada por técnicas de impresión y/o cobertura sin miedo a que sufra degradación en ambientes no controlados^[14].

Independientemente de la geometría, tanto el electrodo que esta en contacto con el sustrato como la lámina de transporte que conecta con la capa activa, han de ser transparentes para permitir el paso de la luz hacia el material activo. El óxido de indio y estaño (ITO), por su transparencia a la luz visible y sus propiedades conductoras, es el material más común usado como electrodo transparente a la hora de preparar células plásticas en el laboratorio. Aunque el ITO presenta algunos problemas: por un lado la relativa escasez del indio unida a su creciente demanda para otros fines ha incrementado su precio; haciendo que se incluya en la lista de Materias Primas Críticas elaborada por la Comisión Europea*; además, su extrema fragilidad hace que debemos descartarlo si queremos células flexibles. En tales casos se ha de buscar un sustituto, como rejillas metálicas que no bloqueen demasiado el paso de la luz.

3.4 Estado de arte

Las células fotovoltaicas orgánicas son una tecnología relativamente joven que aún tiene muchos frentes abiertos en cuanto a líneas de investigación se refiere. Todas estas líneas se pueden englobar o generalizar en tres grandes bloques: Eficiencia, degradación y procesos de fabricación. En el equilibrio de estas tres, se sustenta el futuro de las OPV.

Las eficiencias con las que contamos se alejan mucho de las que ya poseen otras tecnologías

* Fuente: [Comisión Europea -Enlace 8](#)

fotovoltaicas. Actualmente contamos con un récord de eficiencia* del 11% conseguidos en los laboratorios Toshiba para una única célula. Y si buscamos el récord de eficiencia conseguido en módulos nos encontraremos con valores que rondan el 9%.

En cuanto a la degradación, nos encontramos en una situación similar, mientras que la tecnología de silicio puede garantizar una vida útil de 25 años, actualmente, para las células orgánicas, se lucha por lograr tiempos de vida que alcancen los diez años.

Los actuales valores de eficiencia y degradación dejan a ésta tecnología en desventaja frente a otras, pero los procesos de fabricación se convierten en elemento clave del futuro de las células orgánicas al prometer unos costes muy inferiores de producción en comparación con otras tecnologías fotovoltaicas, que unido al bajo coste de los materiales nos aportarían unos precios difíciles de competir.

Buscar el equilibrio entre estas tres líneas de investigación es punto clave para el desarrollo y comercialización de las células plásticas. Las publicaciones de los laboratorios que hacen referencia a eficiencias conseguidas, no suelen tener en consideración ni la degradación que la célula tiene, ni los procesos de fabricación que han llevado a la célula a estudio suelen ser con técnicas de bajo coste. Por lo que no podemos esperar que módulos comerciales de una vida útil razonable presente los valores de eficiencia conseguidos por el momento en laboratorio.

3.4.1 Eficiencia

Aunque teóricamente se podrían llegar a construir células que superen el 80% de eficiencia, este valor está muy alejado de los obtenidos actualmente. Hasta julio de 2014, la mayor eficiencia registrada era de un 11% para una única célula y algo inferior al 9% en el caso de módulos terrestres basados en esta tecnología.

Hasta el día de hoy no se han conseguido resultados espectaculares, pero la ingente cantidad de materiales que se pueden usar para las diferentes capas, la afinidad química entre ellas, diferentes geometrías, etc, ha promovido una búsqueda incansable entre diferentes laboratorios de todo el mundo con el fin de obtener los mejores valores de eficiencia.

Ya se ha comentado que el uso de las láminas de transporte tanto de electrones como de huecos evitan recombinaciones y mejoran los contactos entre las diferentes capas, consiguiendo una mejora de la eficiencia del dispositivo. Los conductores usados también son motivo de estudio, la búsqueda de un sustituto del ITO esta llevando a dispositivos que, por ahora reducen la eficiencia de la célula, pero dado los costes y la fragilidad es necesaria su búsqueda. Incluso la calidad de los materiales afecta a la eficiencia final, antes de aparecer las células plásticas existían multitud de pastas de plata las cuales pueden usarse en los procesos de fabricación de bajo coste, pero haciendo pruebas sobre varias se han comprobado diferentes eficiencias^[14].

Sin duda alguna, la capa activa juega un papel fundamental en la eficiencia que finalmente tenga el dispositivo, no solo los materiales que la conforma los cuales determinarán que zona del espectro será absorbido, sino también la microestructura que ésta tenga. Al no disponer de cargas libres tras la interacción con el fotón, resulta mucho más difícil la extracción completa de las mismas. El excitón que se genera tras la absorción del fotón ha de estar a una distancia del material aceptador inferior a su longitud de difusión si no queremos que éste se recombine.

Las primeras células constaban de los dos materiales dispuestos en láminas, a modo de unión P-

* Fuente: Solar cell efficiency tables-2014 (Version 45), DOI:[10.1002/pip.2573](https://doi.org/10.1002/pip.2573).

N como el usado en las tecnologías del silicio. Sin embargo esto limita a que solo sean absorbidos los excitones generados en las zonas próximas a la unión. En primera instancia se podría pensar que con capas lo suficientemente finas (del orden de la longitud de difusión) el problema podría estar solucionado, sin embargo, láminas tan delgadas absorben poca luz, dado que el máximo de absorción se tiene para una profundidad de penetración del fotón que es un orden de magnitud mayor que dicha longitud de difusión.

Para solucionar el compromiso existente entre el grosor que ha de tener la capa activa para una absorción de la luz óptima y la libertad de movimiento que tiene el excitón, apareció la estructura de heterounión distribuida (bulk heterojunction). Aquí se produce una mezcla heterogénea de los dos materiales, de esta forma, podemos tener grosores que absorban suficiente luz y a su vez, los materiales donador y aceptador están lo suficientemente cerca como para que el excitón pueda ser disociado. Esta estructura se consigue mezclando el material aceptador y donante en un disolvente. Cuando el disolvente se evapora, los componentes tienden a tener microfases separadas, cuya estructura dependerá de los materiales utilizados, temperaturas de secado, velocidad de deposición en la lámina, etc.



Ilustración 3: A la izquierda estructura bicapa, a la derecha bulk heterojunction.

La heterounión distribuida ha ayudado a aumentar los valores de eficiencia, sin embargo no está exenta de problemas. Por un lado las distancias intersticiales entre los materiales es crítica, si es muy grande los excitones se recombinan antes de disociarse y si es muy pequeña, las cargas libres de signo opuesto pueden verse atraídas volviéndose a recombinar. A esto hay que sumar que la estructura irregular forma laberintos y trampas que hacen que las cargas no lleguen a los electrodos. En general, la

forma final que tenga la microestructura dependerá de los materiales utilizados, temperaturas de secado, velocidad de deposición en la lámina, etc.

De lo visto se deduce que la micro estructura del material activo es determinante en los valores de eficiencia que se pueden conseguir. Es por ello que éste es un campo en el que se está trabajando actualmente.

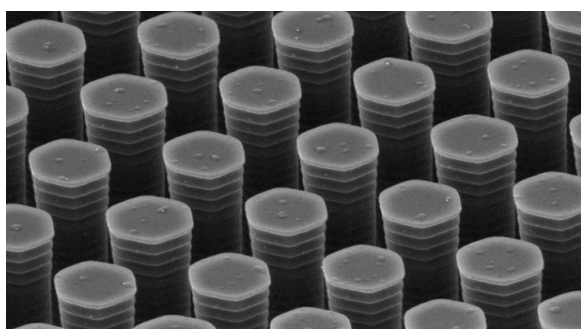


Ilustración 4: Apilamiento de fullereno conseguido por Fluencia vista a través de microscopía electrónica de barrido.
Fuente: [SLAC -Enlace 9](#)

La estructura mostrada en la ilustración 4 muestra una microestructura publicada en agosto de este año. En lugar de una mezcla heterogénea, tenemos columnas de fullereno, dispuestas a una distancia tal que el excitón sea disociado con éxito y al mismo tiempo se evite su posterior atracción coulombiana. Con esta estructura se evitan laberintos y trampas que presenta la heterounión distribuida, pudiendo llegar a duplicar la eficiencia de las OPV según sus autores^[13]. Hasta el momento, los resultados en laboratorio han conseguido un aumento del 18%.

Los actuales niveles de eficiencia se han conseguido gracias a la construcción de células tándem para así conseguir mayores voltajes en una misma célula. Éstas constan de diferentes materiales activos, dispuestos unos sobre otros separados por unas láminas intermedias que ofrezcan bajas resistencias óhmicas. Para su construcción es necesario una selectiva elección de los materiales. Por un lado los polímeros elegidos han de tener diferentes espectros de absorción, y a su vez, las capas no han de bloquear el paso de la luz a las restantes. Además las células han de ser balanceadas para que su corriente sean más o menos iguales.

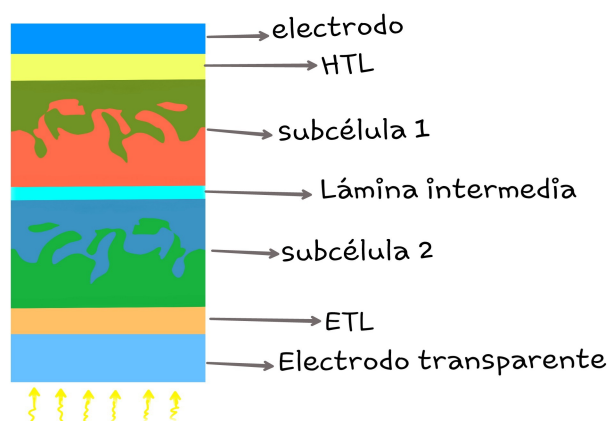


Ilustración 5: Célula multicapa

3.4.3 Degradación

Mientras que los módulos de silicio pueden tener una vida útil entorno a los 25 años, las células orgánicas no son tan estables, sufriendo una degradación en un tiempo mucho más reducido, aunque se ha avanzado bastante en este campo si tenemos en cuenta que las primeras células apenas duraban segundos una vez eran expuestas a la luz.

La pérdida de estabilidad de la célula puede ser debida a multitud de factores, ya sean químicos o físicos, que pueden darse en todas las capas que compone la célula:

La capa activa de la célula es la parte del dispositivo más propensa a sufrir degradación que se traduce directamente en una pérdida de eficiencia, siendo la foto oxidación el mecanismo que más contribuye a la pérdida de estabilidad en esta capa de la célula. El descubrimiento del P3HT, el cual se foto oxida rápidamente pero es mucho más estable que otros materiales usados hasta la fecha para tal fin, aportó mejores tiempo de vida útil a la par que contribuyó al desarrollo de la tecnología roll to roll. La foto oxidación no solo afecta a la capa activa, el ITO también se ve afectado por este mecanismo de degradación el cual se vuelve más intenso con la radiación ultravioleta^[14].

El aluminio y el calcio usado como cátodo en dispositivos de geometría normal, sufren una rápida degradación en contacto con el oxígeno y la humedad, haciendo necesaria una atmósfera controlada (o vacío) en el momento de la deposición sobre la célula que ha de mantenerse hasta que sea cubierta por una lámina protectora que mantenga el electrodo separado de la humedad y el oxígeno. Sin embargo, la plata no reacciona a estos elementos pudiendo ser depositada por técnicas de impresión o cobertura sin necesidad de atmósfera protectora^[14].

Las láminas de transporte de electrones (ETL) y de huecos (HTL) no solo tienen la misión de aumentar la eficiencia de la célula, sino que también pueden ayudar a mantener la estabilidad de la misma ejerciendo de barrera que eviten el paso de oxígeno, humedad y/o radiación ultravioleta. Aunque también se pueden verse afectados, como el PEDOT:PSS en contacto con la humedad o el ZnO, usado como ETL en geometría inversa, el cual en contacto con el oxígeno y luz ultravioleta cambia sus propiedades.

Para evitar las degradaciones producidas por estos tres agentes (humedad, oxígeno y UV), lo mejor es evitar que entren en contacto con la célula. Es por ello que un buen encapsulado^[16] que actúe como barrera para el oxígeno y la humedad a la par de filtro UV se vuelve necesario si no

queremos un rápido decaimiento de las propiedades. Se ha probado un encapsulado como el de las tecnologías clásicas con vidrio y EVA con el que se obtienen paneles rígidos. Para los paneles flexibles, filmes usados para el empaquetado de comida son de fácil aplicación usando procesos roll to roll, los cuales son adheridos en el último tramo de la cadena de producción de las células aunque esto es en general insuficiente para preservar las propiedades de las células orgánicas.

Los mecanismos de degradación nombrados no son únicos, las células flexibles pueden verse afectadas por delaminación, fracturas internas, rotura por estrés, cambios morfológicos en su estructura interna, difusión de los electrodos en la materia o defectos de fabricación entre otros. De tal forma que pueden alterar las propiedades del dispositivo. A esto hay que sumar, que las células orgánicas plásticas sufren degradación desde el primer instante incluso en ausencia de iluminación^[14].

Todas las posibles causas de degradación, unida a la ingente variedad de materiales al uso, hacen que los ensayos de degradación acelerada para paneles de silicio no sean extrapolables, siendo difícil establecer a priori las propiedades que tendrá un determinado panel orgánico. Con el fin de conocer bajo que condiciones se han llevado a cabo las pruebas de degradación, y así sacar conclusiones acordes con la situación, se han establecido los estándares ISOS (International Summits on Organic Photovoltaic Stability). Éstos marcan las condiciones en las que se va a medir la degradación bajo diferentes condiciones como son: el decaimiento mientras está almacenado (en oscuridad), al aire libre, con luz de laboratorio, ciclos térmicos, bajo condiciones de humedad y ciclos combinados de humedad y temperatura. Estos a su vez se dividen en función de las capacidades del laboratorio, desde el nivel 1 que requiere de herramientas básicas, hasta el nivel 3 en el que las variables a controlar requieren de una que no está al alcance de la mayoría de laboratorios.

3.5 Procesos de fabricación

Una de las grandes ventajas que tienen las células orgánicas, es la posibilidad de un proceso de fabricación de bajo coste y rápida manufactura. En esencia, las diferentes capas que forman la célula pueden ser depositadas sobre un rollo de sustrato, como si de una imprenta se tratase, donde la tinta a usar sería el material que conforma la capa que estemos agregando. Si además la técnica usada permite incorporar las diferentes capas de manera continua, sin importar la longitud del sustrato, se dice que es “roll to roll” (R2R) compatible.

Podemos englobar en dos grandes grupos los procesos de fabricación. Por un lado tendríamos técnicas de revestimiento o cobertura, en los que se incorporan las diferentes capas de forma continua, cubriendo por completo la superficie donde se ha de depositar la capa deseada; y las técnicas de impresión, donde ya no se cubre por completo la superficie sino que tenemos la posibilidad de incorporar patrones que se repitan de forma constante.

A excepción de algunas técnicas de impresión, las capa activa se ha de incorporar en forma líquida. Esto se consigue con una mezcla del polímero y material aceptador disuelto en un solvente. Además cada técnica trabaja con una tinta con unas condiciones de viscosidad específica.

3.5.1 Técnicas de revestimiento

Las necesidades de diferentes industrias han conseguido un gran desarrollo en técnicas que

permitan cubrir completamente una determinada superficie. No todas son extrapolables u óptimas para la fabricación de células plásticas pero algunas sí que pueden adaptarse a las nuevas necesidades.

Algunos ejemplos de técnicas de utilidad para nuestro fin, puede ser el uso de aerosoles, como ya usan las empresas automovilísticas, o la técnica “knife coating” representadas en la ilustración 6. Uno de los problemas que plantean estas dos métodos es que la tinta está en contacto con el aire antes de ser depositada sobre la superficie deseada y hemos visto que algunas capas de nuestras células son muy sensibles a la humedad y al oxígeno, por lo que podríamos empezar a sufrir la degradación antes incluso de que nuestro material sea depositado.

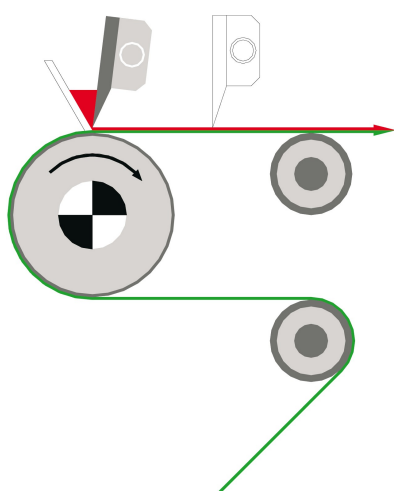


Ilustración 6: Knife coating
Fuente ilustración original: [Enlace 10](#)

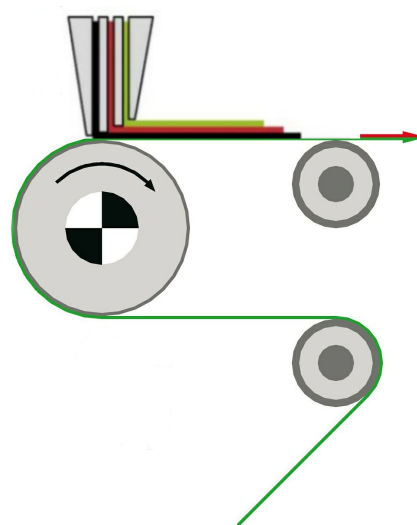


Ilustración 7: Slot die coating multicapa
Fuente ilustración original: [Enlace 10](#)

Otra técnica de amplio uso es la llamada “Slot die coating” (ilustración 7) con ella evitamos que la tinta entre en contacto con el aire antes de ser depositada, y además puede adaptarse para incorporar más de una capa al mismo tiempo. Esto nos permite que las capas inferiores no entren en contacto con el aire, aunque hay que tener en cuenta cómo afecta esto al secado y curado de las diferentes capas.

Las técnicas de recubrimiento permiten controlar el grosor que finalmente tendrá la película, a través de algunas de las variables^[17] que entran en juego como son la concentración de sólidos en la tinta, su densidad, la velocidad a la que circula el sustrato, caudal de deposición, etc.

La técnica “Spin coating” es la más usada en laboratorios de todo el mundo para producir OVP para su posterior estudio. Aunque no es R2R compatible y la cantidad de material desperdiciado es muy alta, por su simplicidad y el control que permite sobre el grosor de la capa que se va a incorporar le hace una técnica muy valiosa. esto es en general insuficiente para preservar las propiedades de las células orgánicas. Además no requiere grandes inversiones en equipamiento y permite la producción de pequeñas muestras, al contrario de los equipos roll-to-roll, que son caros y están pensados para largas tiradas.

Esta técnica pone el sustrato donde va a depositarse los materiales que compondrán la célula, a girar sobre un eje de revolución. Las gotas del material son depositadas sobre este sustrato mientras gira, de esta forma, parte del material se distribuye por el sustrato y parte es lanzado por la fuerza centrífuga.

El control del grosor (h) de cada una de las capas se tiene regulando las revoluciones a la que va a girar el sustrato (f), conocida la viscosidad (v_0), a partir de^[17]: $h \propto v_0^{1/3} \cdot f^{-1/2}$

3.5.2 Técnicas de impresión

Con las técnicas de impresión podemos generar patrones que se repitan a lo largo de la cadena productiva, al igual que en una imprenta. La base de funcionamiento es la misma, aunque la tinta y el propósito es otro. Dentro de las múltiples técnicas de impresión podemos destacar algunas, como: “Rotary screen” y “Gravure” mostradas en las siguientes ilustraciones:

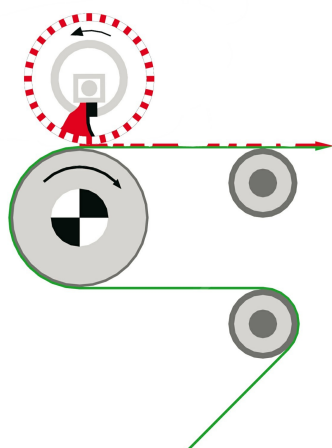


Ilustración 8: Rotary Screen

Fuente ilustración original: [Enlace](#)

[10](#)

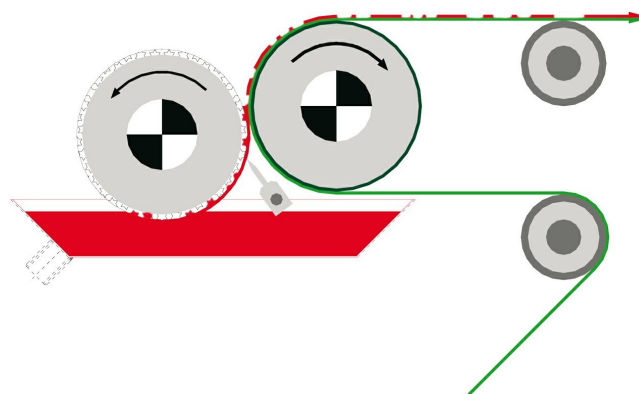


Ilustración 9: Gravure

Fuente ilustración original: [Enlace 10](#)

Estas técnicas, a diferencia de las de recubrimiento mostradas en el punto anterior, depositan la tinta por contacto. Siendo necesario que la tinta tenga la propiedad de adherirse al sustrato en el que se va a depositar. Otro inconveniente que encontramos es que si queremos cambiar el patrón a imprimir, hemos de cambiar por completo el “engranaje” que contiene el patrón, es por ello que se ha de tener muy claro el patrón deseado y se han de evitar errores a la hora de adquirirlo si no queremos gastar más dinero en la adquisición de nuevas piezas. Estos sistemas están pensado por tanto para grandes tiradas, puesto que la inversión en nuevo utillaje no se justifica cuando el número de muestras a producir es pequeño, como suele ocurrir en los laboratorios de I+D.

Otra posibilidad es impresión por inyección de tinta que permite cambiar el patrón de forma digital. Al igual que una impresora como la que tenemos en nuestras casas, esta técnica de no-contacto, permite generar patrones al antojo, sin costes extras, ni pérdida de tiempo al cambiar elementos de la maquinaria. Aunque las tintas que se han de utilizar no son fáciles de fabricar y han de tener unas propiedades muy específicas, como bajo tamaño de partícula.

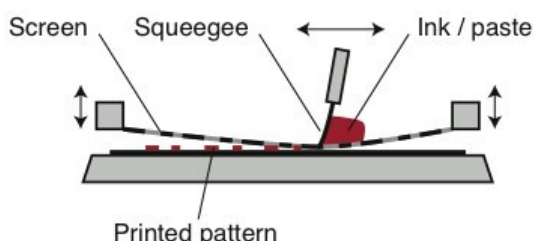


Ilustración 10: Flatbed Screen

Fuente ilustración original: [Enlace 11](#)

Existe muchas otras técnicas tanto de revestimiento como de impresión, pero hablar de todas ellas se escaparía del propósito de este proyecto. Aunque quizás sería interesante mencionar la técnica “Flatbed Screen”, también también conocida por “screen-printing” o “serigrafía”, puede ser interesante a la hora de realizar impresiones sobre cubiertas rígidas. Sigue el mismo principio que la “Rotary Screen” pero en lugar de tener un cilindro con muelas donde la tinta se cuela para ser

adherida a la futura célula, disponemos de una superficie plana que contiene el patrón. Sobre ésta, una goma mueve la tinta de un lado hacia el otro con el fin de que rellene los huecos de nuestro molde donde la tinta entra en contacto con el substrato.

Cada una de de las técnicas descritas incorporan una nueva capa (algunas pueden incorporar más de una) con el fin de construir la célula plástica, el proceso puede llevarse a cabo paso a paso, es decir, en un proceso discreto en el que no se incorporaría una nueva capa hasta que la capa anterior no cubra el rollo al completo. O en un proceso continuo en el que las capas se irían incorporando paso a paso pero en la misma línea de producción, sin tener que esperar a que las capas anteriores cubran completamente la superficie.

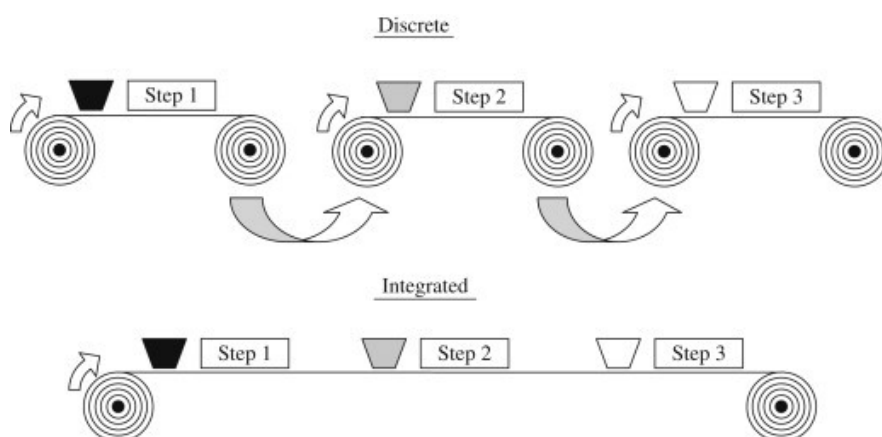


Ilustración 11: Proceso discreto y continuo

Fuente ilustración original^[21]: [DOI:10.1016/j.solmat.2008.10.004](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004)

El proceso continuo tiene la ventaja de que partiendo de un substrato, al final de la cadena de producción tendremos nuestra OPV sin necesidad de intervenir en el proceso y sin necesidad de enrollar y desenrollar el substrato en cada fase, reduciendo por tanto el número de pasos. Sin embargo la situación puede complicarse dado que cada una de las capas podrá seguir diferentes procesos de fabricación, con diferentes velocidades de trabajo. Por lo que puede resultar muy complicado acoplar todo el sistema a las diferentes velocidades que requieran cada una de las capas a incorporar. Además es de vital importancia controlar las condiciones de secado, temperatura, velocidad de deposición, etc, porque junto a las propiedades de la tinta, determinarán la separación de fase final en la heterounión y por tanto la eficiencia global de nuestra célula.

3.7 Células fotoselectivas

En busca de la mejor integración posible. Lo ideal sería que el módulo FV solo hiciese uso de la radiación que es menos requerida por la plantación y fuese transparente al resto.

En el punto 2.2 hemos visto como los pigmentos responsables de la fotosíntesis no hacen uso por igual de todas las longitudes de onda de la luz que reciben. Salvo alguna rara excepción que se pueda llegar a dar, las plantas que se alojarán bajo un invernadero realizan la fotosíntesis a través de las clorofilas y carotenoides. Esto se reduce a un menor uso de las

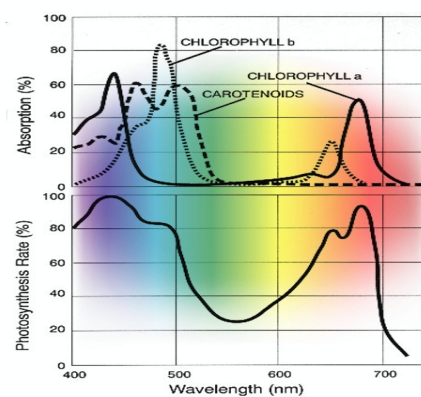


Figura 6: Tasa de absorción fotosintéticamente activa (TAR)

longitudes de onda comprendidas entre los 510 y los 620nm.

Esta característica ya se ha intentado aprovechar con el uso de cubiertas fluorescentes que absorben en este rango de baja productividad para emitir en longitudes de onda más larga (rojo-naranja). El problema que plantean estas cubiertas es que alteran la relación azul/rojo que va a recibir el cultivo causando en ocasiones alteraciones morfológicas. Pero si queremos usar esa zona del espectro para producción fotovoltaica, la relación azul/rojo no se verá alterada, por lo que se ha de esperar una mejor respuesta fotomorfogenética del cultivo.

Si queremos hacer uso de la radiación menos activa a la hora de realizar la fotosíntesis la primera pregunta que nos podríamos hacer es: ¿Cuánta energía podemos obtener de ahí? La respuesta a esta pregunta depende, entre otros factores, de la localización del invernadero. Pero si podemos estimar cuánto contribuyen estas longitudes de onda a la energía total recibida.

En una primera aproximación podemos considerar que la radiación recibida proviene de un cuerpo negro con la temperatura de nuestro Sol ($T_s=5.778K$). En estas condiciones, a partir de la ecuación de Stefan-Boltzmann podemos calcular que contribución hace la radiación entre 510 y 620 nm

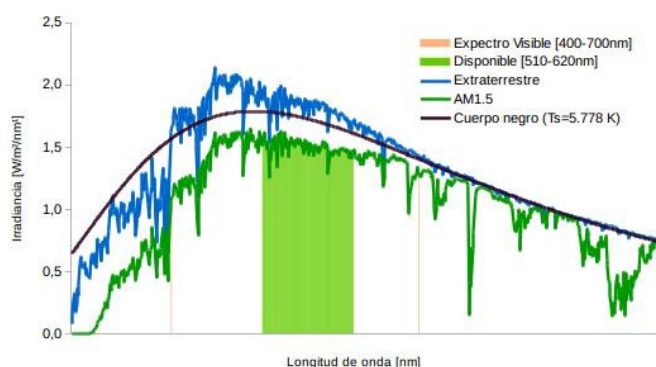
$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \Rightarrow \frac{W_{\lambda[510-620]}}{W_{Total}} = \frac{\int_{510}^{620} \lambda^{-5} \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1} d\lambda}{\int_0^\infty \lambda^{-5} \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1} d\lambda} = 0,138^* \Rightarrow 13,8\%$$

Por lo que, si pudiésemos aprovechar esa porción del espectro, tendríamos a nuestra disposición el 13,8% de la energía total disponible.

Un cálculo más aproximado sobre la radiación que recibirá nuestra cubierta sería con el espectro que se usa a para la calibración de células solares, el AM1.5. A partir del mismo **, podemos determinar que el rango 510-620 nm contiene el 16,6% de la energía total irradiada.

Si fuésemos capaces de extraer toda la energía contenida entre los 510 y los 620nm, tendríamos células fotovoltaica con eficiencias superiores al 16% haciendo uso de la radiación menos requerida por la plantación. Sin embargo esto nunca se llegará a dar, entre otros, por las inevitables pérdidas que todo sistema tiene.

Si queremos hacer uso de la radiación menos activa a la hora de realizar la fotosíntesis hemos de disponer de ambos conductores y láminas de transporte transparentes. A día de hoy esto sería una complicación a la hora de los costes, pero se espera que las investigaciones ofrezcan alternativas a precios razonables. Además, el material activo usado ha de ser sensible a las longitudes de onda deseadas. Para que se genere un excitón, la energía del fotón ha de ser al menos la energía del gap. Para nuestro caso, el fotón con menor energía que queremos que sea absorbido es aquél con mayor longitud de onda. Es decir para $\lambda=620nm$ que tiene una energía de $E_{fotón}=h.c/\lambda \rightarrow E_{fotón}=2,0eV$. La transición $\pi \rightarrow \pi^*$ no solo se lleva a cabo en los niveles de menor energía, sino que estados vibracionales y rotacionales de las moléculas hacen que tengan un patrón de absorción que es característico de cada polímero, por lo que cada uno absorberá la luz en unas determinadas



* Cálculos realizados en Scilab

** [AM1.5 -Enlace 12](#)

longitudes de onda. Deberíamos de buscar aquél material que cumpla con las condiciones deseadas, que en nuestro caso sería un polímero con un gap de 2,0eV y un máximo de absorción entorno a los 550nm. Como herramienta para su búsqueda, tanto la simulación por ordenador, si es conocida la estructura química, como la espectroscopía UV/visible, nos aportarían información sobre las longitudes de onda que son absorbidas por un determinado polímero.

Disponer de módulos transparentes o de absorción selectiva no solo tienen interés en nuestro caso. Muchos prototipos buscan la integración arquitectónica en las ventanas de los edificios haciendo uso de paneles transparentes fotoselectivos. Ya sean completamente transparente haciendo uso del ultra violeta o tintados al usar algunas longitudes de onda que se encuentren en el rango del visible. Para nuestro caso concreto, nuestros paneles absorberían mayormente en el rango del verde, por lo teniendo en cuenta la teoría sustractiva del color, nuestros paneles deberían de tener un tono magenta.

El uso de paneles fotoselectivos sería sin duda alguna la opción más interesante en cuanto a que ya no estaríamos compitiendo con la plantación por la radiación solar disponible. Esto permitiría cubrir toda la superficie que deseemos de nuestro invernadero para su instalación. Pero hemos de tener en cuenta una cosa: La radiación que incide sobre el módulo se encontrará con diferentes capas en las que sufrirá reflexiones en todas las longitudes de onda, reduciendo la radiación PAR que finalmente llega al cultivo. Por lo que su uso no causaría sombras, pero si que tendríamos considerar una disminución en los niveles de radiación.

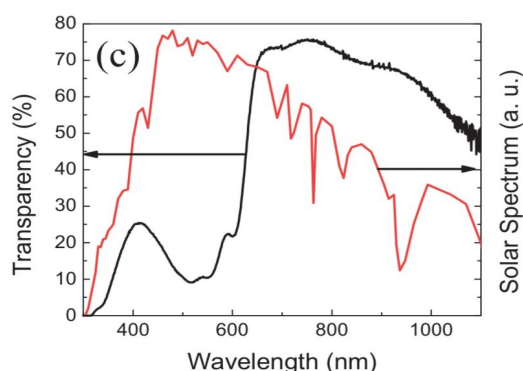


Figura 7: Transparencia espectral de un dispositivo semitransparente. Fuente ^[11]: [Adv. Mater. 2008, 20, 415-419](#)

Teniendo en cuenta la energía contenida en el rango de longitudes de onda [510-620nm] con respecto a la energía total del espectro AM 1.5 (ver 2.2), no podemos esperar tener células con más de un 17% de eficiencia. Esta restricción está impuesta por la cantidad de radiación que las plantas nos dejarían tomar, pero no es el único factor limitante. Hemos visto como las recombinaciones, trampas, defectos de la estructura, etc hacen que la eficiencia del dispositivo decaiga. Y aunque actualmente se está trabajando duro buscando innovaciones que reduzcan en gran medida estas pérdidas, dada la naturaleza estadística de los procesos que intervienen, no podemos esperar estar exentos de todas ellas.

La figura 7 muestra un ejemplo de estudio^[11] de célula orgánica transparente, usando ITO por ambas caras y 200nm de RR-P3HT:PCBM como material activo. Y aunque no se fabricó con métodos de bajo coste R2R, es extrapolable. Las eficiencias conseguidas con esta célula de laboratorio llegaron al 3%.

Las características que presenta en cuanto a transparencia las convierte en buenas candidatas para nuestro propósito, pero las tasas de transparencia para longitudes de onda inferiores a 510nm deberían de perfilarse buscando componentes que tengan transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ que abarquen un menor tramo del espectro.

Integración

4.1 Introducción

En el documento “El cultivo protegido en el clima mediterráneo”^[1] de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) se hacen presentes las medidas que se han de tomar para un uso más sostenible de los recursos, y con el objetivo de evitar pérdidas en la plantación se aconseja una mayor tecnificación en el cultivo protegido, que en estos momentos está lejos de ser una realidad. Sin embargo, iniciar una potente inversión no siempre es factible para el agricultor de la cuenca mediterránea, es por ello que se aconseja un proceso escalonado de inversión que consiga mejores condiciones para el cultivo año a año.

A lo largo de las siguientes líneas se va a tratar las posibilidades que nos brindan las células orgánicas a la hora de realizar una integración sobre los invernaderos situados en la zona del mediterráneo. Su bajo coste y la posibilidad de instalarlas sin la necesidad de contar con estructuras robustas como requieren los paneles de silicio de primera generación, las convierten en unas buenas candidatas para comenzar un proceso escalonado de inversión que no afecte en desmedida al bolsillo del agricultor de invernadero.

Con su integración buscamos una reducción en el coste de la electricidad o incluso venderla a red si las condiciones fuesen favorables. Aunque la integración sobre la cubierta va a ser causa directa de una reducción de la radiación en el interior del invernadero, y por tanto, de producción agrícola, podría alimentar a sistemas de climatización que sí permitiesen una mayor producción, compensando así las pérdidas.

La estructura del invernadero se elige en función de las necesidades de luz, evacuación de agua, o incluso costes de la estructura, pero se ha de tener en cuenta que la inclinación y orientación de la cubierta determinarán la inclinación y orientación de los módulos que instalemos sobre el invernadero. Aunque existan multitud de configuraciones posibles analizaremos solo aquellas más comunes como son el tipo túnel, planos y a dos aguas así como las orientaciones más comunes, que son la Norte-Sur y Este-Oeste además de la viabilidad de la inversión en dos provincias con diferentes tipos de invernadero.

4.2 Cubiertas y módulos

Las células solares plásticas, a diferencia de otras tecnologías, tienen una enorme versatilidad a la hora de ser presentadas. Hemos visto que podemos tener paneles ligeros y flexibles, pero también podríamos encontrarlos como paneles rígidos y pesados si usamos el mismo material encapsulante que se usa para la construcción de paneles de silicio monocristalino con el fin de aumentar la estabilidad del conjunto. La elección del tipo de módulo que se vaya a instalar en el invernadero ha de ser examinada con detenimiento en cada caso particular, teniendo en cuenta las características de cada invernadero y las necesidades del cultivo que alberga, entre otros.

La inmensa mayoría de los invernaderos que encontramos en la zona mediterránea usan el polietileno como material de cubierta apoyado sobre débiles estructuras que serían incapaces de soportar módulos fotovoltaicos pesados. Por lo que si no queremos vernos obligados a mejorar la estructura hemos de usar módulos livianos. Una de las maneras más simples a la hora de instalar nuestros módulos puede ser simplemente superponerlos sobre la cubierta una vez el invernadero

esté montado, aunque éstos deberían de ser fijados de alguna manera a la cubierta o estructura con el fin de que estos no se dañen o vuelen con el viento. Debido a la ligereza de las células (llegando a obtener valores de 10W/g ^[19]), el peso total del conjunto no ha de exceder en demasía el de la cubierta libre de célula, por lo que la estructura debería de soportar estas nuevas condiciones sin demasiados problemas.

Otra posible configuración, quizás la más interesante, sería la venta directa de cubiertas con los paneles incorporados, donde podríamos pensar en un proceso continuo en el que la cubierta de PE fuese el sustrato donde la célula plástica se apoya, pero este caso tendría que ser estudiado con detenimiento: Tendríamos que tener en cuenta que el ancho de la cubierta puede llegar a medir hasta 20 metros, Para trabajar con estas anchuras, o disponemos de una maquinaria especial que pueda soportarlo, o la lámina de PE debería plegarse hasta tener el ancho adecuado para que la maquinaria lo soportase; y aunque en el proceso de fabricación de cubiertas, ésta es doblada de forma automática antes de ser enrollada, puede que la zona que queda libre para incorporar la célula no sea la idónea una vez instalada la cubierta; por lo que en el mismo proceso de plegado debería de verse en que zona de la cubierta queremos imprimir nuestros módulos. Otra cuestión que se nos plantea es si las propiedades de la cubierta no se verán alteradas en el proceso de impresión debido las temperaturas que se han de soportar en el curado de la célula. Las cubiertas multicapa podrían albergar la célula plástica entre capa y capa, quedando así perfectamente encapsulada a modo de sándwich protegiendo la célula de las condiciones externas, sin embargo, el método de coextrusión y soplado genera filmes multicapa que imposibilitan la incorporación de más elementos entre las diferentes capas, por lo que hemos de descartar esta idea. Quizás la forma más sencilla de eliminar parte de los problemas para fabricar cubiertas con células plásticas sería fabricar ambas por separado y ensamblarlas posteriormente antes de ser puestas a la venta.

Ya sea en un proceso discreto, en el que módulos y cubiertas son fabricados por separado para su posterior ensamble, o continuo, en el que el PE es tomado como sustrato donde empezar a formar nuestras células, la cubierta actuaría de film protector para la célula plástica en una de sus caras, reduciendo así su degradación al actuar de barrera contra el paso de agua, aire y, en función de las propiedades que tenga la cubierta, de la radiación ultra violeta. Además, el agricultor se encontraría en el mercado con cubiertas fotovoltaicas en la que solo tendría que preocuparse de la conexión, olvidándose de la instalación de los módulos plásticos con el consiguiente ahorro de mano de obra. El principal problema que se nos plantearía sería que la vida útil tanto de la cubierta como del módulo han de coincidir, en caso contrario uno de los dos perdería su funcionalidad antes que el otro.

En el caso de invernaderos con cubierta rígida, éstas son mucho más estables térmicamente, por lo que el propio panel de la cubierta podría ser usado de sustrato donde imprimir el módulo fotovoltaico presentando menos problemas que las flexibles de PE. Asimismo, la estructura de este tipo de invernaderos por un lado es más resistente que estructuras que soportan cubiertas flexibles, y por otro, ha de estar preparada para soportar paneles, por lo que podría usarse cualquier otro material de sustrato con las dimensiones correctas para que posteriormente encaje en los huecos de la estructura.

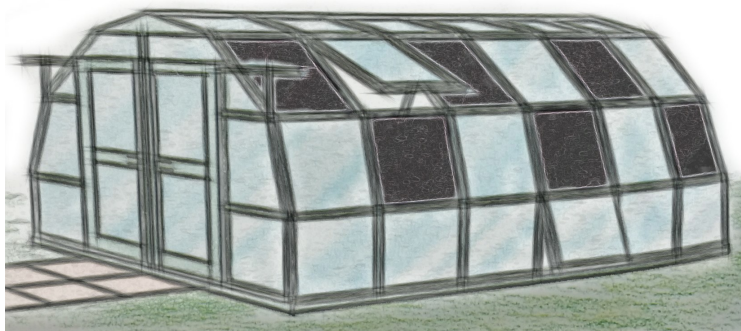


Ilustración 12: Módulos fotovoltaicos a tresbolillo en estructura de cubierta rígida

Independientemente del tipo de filmes usados, podríamos preguntarnos si es mejor que los módulos queden dentro del invernadero con la cubierta protegiéndolos del exterior, o tener los módulos sobre la cara de la cubierta que mira al exterior del invernadero. Para este último caso, nuestros módulos deberían de tener algún tipo de encapsulante que los protejan de las condiciones climatológicas externas (aire, agua, UV). En el caso de que la cubierta proteja del exterior a los módulos, éstos también deberían de ser protegidos del ambiente que tenemos en el invernadero dado que tenemos condiciones de humedad, temperatura y niveles de oxígeno que provocarían un rápido envejecimiento de los módulos, pero el encapsulante no tendría que soportar condiciones tan adversas como en el exterior del invernadero.

El principal problema que plantea disponer los módulos en el interior del invernadero es la irremediable pérdida de radiación al atravesar la cubierta. Para filmes claros la pérdida por transmisión no es muy elevada, pero en la zona mediterránea, el uso de filmes difusores es mayoritario, y con éstos las pérdidas pueden superar el 20%, por lo que hemos de elegir entre una mayor protección de nuestros módulos, o una mayor producción eléctrica.

Por último, para la zona del mediterráneo, nos podemos plantear la posibilidad de instalar los módulos solo durante la época en la que se practica el sombreado y de esta forma obtener energía eléctrica con la radiación que de cualquiera de las maneras no iba a llegar a la plantación. Sin embargo, teniendo en cuenta los costes de la instalación y mano de obra, y el hecho de que las células plásticas sufran degradación incluso en condiciones de oscuridad (haciendo que éstas se degraden de un año para otro) hacen que la viabilidad de esta acción sea puesta en duda. En lo que resta de proyecto se verá si es factible la integración en la que los módulos estén cubriendo el invernadero a lo largo de todo el año, y adelantando resultados, no tendremos en cuenta la opción de instalar paneles solo en verano dado los márgenes de viabilidad en los que nos moveremos.

4.3 Tipos de paneles orgánicos.

Las células orgánicas pueden ser escaladas a medida y realizarse patrones, esto junto a la ingente cantidad de materiales que se pueden llegar a usarse con sus diferentes propiedades abren un abanico de posibilidades enorme en cuanto al producto final obtenido. Por lo que en primera instancia, podemos construir paneles a medida, con diferente grado de transparencia y a nuestro antojo. Aunque a día de hoy queda camino por recorrer hasta ofrecer paneles personalizados a precios razonables como para considerarlo una alternativa a otras tecnologías pero su potencial a

medio-largo plazo es muy elevado.

A lo largo del proyecto se ha visto la posibilidades que nos brindan las células fotoselectivas pudiendo llenar a plantearnos si tiene sentido la instalación de células opacas teniendo la opción de instalar fotoselectivas. El hecho de eliminar restricciones, como puede ser la transparencia de las diferentes capas o las características del material activo, nos da mayores oportunidades de encontrar materiales más baratos que reducirían el precio del vatio instalado, y más estables. Además, la eficiencia máxima teórica para las geometrías multicapa supera el 80%. Esto no significa que lo lleguemos a conseguir, pero si nos aporta una idea de cuan difícil es superar los valores de eficiencia ya obtenidos y hasta donde podemos llegar.

Un ejemplo de las alternativas que nos pueden ofrecer las células orgánicas opacas es el “Infinity concept” desarrollado en la Universidad Técnica de Dinamarca^[20]. Haciendo la conexión de las células en serie, y de forma continua con técnicas de bajo coste R2R, consiguen unos paneles fotovoltaicos en rollo. De tal forma que la longitud del panel determinará su potencia de salida. Longitudes de 100 metros de largo con 21.000 células conectadas en serie están siendo testadas con éxito tanto en Dinamarca como en el sur de España, aportando eficiencias de un 2% y una vida útil que superan los dos años.



Ilustración 13: "Infinity concept" sobre invernadero tipo túnel

Para nuestro propósito de integración, disponer de paneles longitudinales es una opción atractiva que podemos acomodar a lo largo del invernadero. La principal ventaja que presenta esta configuración es la posibilidad en la reducción de costes, dado que la tira completa sigue una fabricación bajo técnicas R2R que ofrece un producto continuo que puede ser cortado con posteridad a la longitud

deseada. Entre las desventajas: Se ha visto que la disposición a tresbolillos, ofrece una mejor distribución de las sombras que la disposición en línea, sin embargo este podría ser un mal menor si el coste total de la instalación compensase. La principal desventaja que presenta esta configuración es que trabaja a alto voltaje con el fin de evitar grandes corrientes y así no necesitar de un cableado que encarezca el producto y complique su fabricación. Por lo que tal y como están concebidos, solo pueden ser manipulados por personal especializado.

Con el fin de simplificar la situación, haremos una distinción de posible construcción de los módulos en dos grupos: paneles con células opacas o fotoselectivas.

En el caso de células opacas, estimaciones^[15] publicadas en el 2010, hechas a partir de datos tanto de la industria como del mundo académico llevaron a vaticinar la evolución para las OPV en cuatro fases como se muestran en la siguiente tabla:

	Fase 1 (2010-2013)	Fase 2 (2013-2015)	Fase 3 (2015-2018)	Fase 4 (2018-2025)
Eficiencia	1~3%	3~4%	4~6%	6~9%
Vida útil	1~2 años	1~3 años	3~5 años	5~7 años
Precio	8~12 €/Wp	2~4 €/Wp	1 €/Wp	<0.5 €/Wp

Tabla 1: Estimaciones de eficiencia, vida útil y precios de las OPVs

Fuente^[15]: [DOI:10.1016/j.solmat.2010.04.074](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.074)

Para el caso de las fotoselectivas se tienen de pocos datos contrastados, pero hemos visto que al menos a día de hoy, disponemos de células con un 3% de eficiencia que fueron fabricadas bajo el control que aporta un laboratorio, por lo que si se fabricasen bajo procesos R2R, a todas luces reduciría su eficiencia y a las que además habría que pulirle su perfil de absorción. Teniendo en cuenta el esfuerzo que se está poniendo en busca de una mayor estabilidad de las OPV y su desarrollo a través del R2R; y viéndose la dificultad para encontrar un proceso que genere células con eficiencias próximas a las obtenidas en laboratorio, conseguir células semitransparentes que presenten una estabilidad y eficiencia aceptable resultará mucho más difícil. Por eso, en busca de una tecnología viable que podríamos tener a corto-medio plazo, para las estimaciones que siguen, y aunque su potencial es mucho mayor, supondremos que podemos tener un 3% de eficiencia en paneles fotoselectivos, aunque también es de esperar que ofrezcan peores valores de vida útil y precios que las células opacas.

4.4 Sombreo, ocupación y disposición de módulos

A la hora de evaluar el grado de sombreado que tendrá un invernadero debido a la integración de paneles fotovoltaicos son muchos los factores a considerar. La radiación que llega al interior del invernadero ha de pasar a través de la cubierta, cuyo valor se verá alterado cuando incorporemos nuestros módulos, pudiendo alterar la calidad y/o propiedades del fruto. Además, hemos de buscar la mejor orientación que el invernadero nos permita para tener la mayor productividad eléctrica que suele coincidir con la zona del invernadero que presenta mayor transmisividad. En función de la geometría, orientación y tamaño del invernadero así como de la disposición de los paneles sobre la misma pueden hacer variar el valor del sombreado que recibirá la plantación. Por lo que no es fácil de estimar a primera instancia. Por regla general, a mayor superficie de cubierta, mayor será la superficie que hemos de cubrir para obtener el mismo grado de sombreado.

La integración de módulos opacos en el invernadero y el efecto que sus sombras producen en el cultivo ya han sido estudiadas en algunos casos. Conclusiones que se desprenden de estos trabajos es que la pérdida de productividad en el cultivo al incorporarse sombras, teniendo peores resultados si éstas permanecen estáticas sobre una zona afectando a la misma plantación. Sin embargo, las producciones mejoran notablemente si la incorporación de los paneles se hace de forma conjunta con equipos eléctricos en busca de una mejor climatización del invernadero, como ventiladores, sistemas de bombeo para riego, compresores de aire para refrigeradores por evaporación, etc.

Tanto el tipo de geometría usada en la estructura del invernadero como su orientación determinarán la orientación que puedan tener nuestros paneles. Atendiendo a las clasificaciones hechas con anterioridad podemos sacar las siguientes conclusiones:

En los invernaderos tipo plano o parral disponemos de una superficie horizontal donde estarán apoyados nuestros paneles, por lo que la orientación no influye en este tipo de estructuras.

Los invernaderos asimétricos están pensados para exponer su cara mayor hacia donde hay mayores valores de radiación. Por lo que éstos están siempre orientados E-O, permitiéndonos así disponer de paneles mirando al sur con inclinaciones iguales a la que tiene la techumbre. Los invernaderos simétricos nos aportan los mismos resultados, pero según las condiciones, también podríamos encontrarlo en disposición N-S el cual puede causar grandes pérdidas de producción eléctrica en el caso de grandes pendientes de la techumbre.

En el caso de disponer de invernaderos con techo curvo como el tipo túnel o el tipo capilla, tendremos cierto margen de maniobra a la hora de elegir la inclinación que finalmente tendrán los

módulos. Para orientaciones N-S, y cumbrera también curva, podríamos disponer los paneles de forma horizontal. En el caso de tener una cumbrera con forma de pico, deberíamos disponer el panel lo más cerca posible del mismo para tener la menor inclinación posible. La orientación E-O de este tipo de invernaderos nos brinda la posibilidad de disponer los paneles con la orientación óptima* de producción.

Los invernaderos tipo túnel con orientación E-O presentan una serie de ventajas a la hora de disponer los paneles. Este tipo de invernaderos con esta orientación nos aporta al menos una zona de la cubierta, la cual varía a lo largo del año, perpendicular a la radiación directa cuando el Sol se haya en su cénit, mientras que en el resto de la cubierta el ángulo de inclinación cambia paulatinamente. Teniendo en cuenta que la mayor transmisividad de la cubierta se produce cuando la incidencia de la radiación es normal a la superficie y disminuye de forma gradual conforme cambia la inclinación de la misma. En lugar de disponer los paneles con la inclinación óptima de producción anual, podríamos disponer los paneles con inclinaciones para la producción máxima en periodos estivales para así tener serie de ventajas:

Mientras que combatir las bajas temperaturas del invierno en la zona del mediterráneo no es una tarea dura, la deficiencia en cuanto a intensidad luminosa sí puede llegar a ser un lastre. Al disponer los paneles sobre la zona óptima para producción eléctrica en verano dejamos libre la zona de la cubierta que recibe la radiación directa normal a su superficie, permitiendo una mayor entrada de luz y además tapamos una zona de la cubierta que tendrá un ángulo de incidencia mínimo que ha de rondar los 30° respecto a la zona de cubierta perpendicular a la radiación directa, en contra de los aproximadamente 20° que nos otorgaría la posición de máxima producción anual. Por lo que estaríamos cubriendo una zona de por sí aporta menor transmisividad.

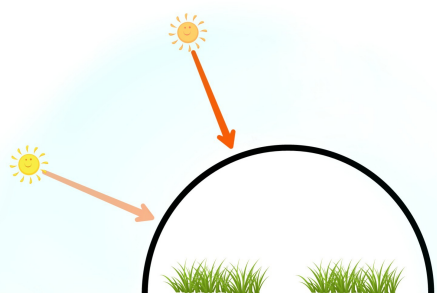


Ilustración 14: Incidencia directa sobre la cubierta en diferentes épocas del año

Durante los meses de verano la situación se complica debido a la dificultad que presenta controlar las altas temperaturas que adquiere el interior del invernadero. Una de las técnicas más usadas en invernaderos no tecnificados es el uso de mallas o el encalado de la cubierta con el fin de reducir la radiación que entra en el invernadero. Si disponemos nuestros paneles con la inclinación óptima para verano estaremos cubriendo la zona de la cubierta que presenta mayor transmisividad, actuando así los paneles como elemento de sombreado. Y en el caso de disponer de un sistema de refrigeración por nebulización, éste ha de funcionar conjuntamente con los ventiladores para obtener el efecto deseado. Las horas del día a las que éstos sistemas han de trabajar son las horas de máxima radiación solar, coincidiendo el máximo consumo eléctrico con el momento de mayor producción.

La integración de cubiertas fotoselectivas, se presenta como una grata alternativa al permitir ocupar una mayor superficie del invernadero sin que el sombreado se vea afectado en gran medida. Debido al espesor y las capas que la componen el módulo, la luz sufrirá inevitables reflexiones entre las múltiples capas con sus consecuentes pérdidas, haciendo que finalmente también se reduzca la radiación global que llega al cultivo.

* $\beta_{\text{opt. anual}} = \Phi - 10^\circ$; $\beta_{\text{opt. verano}} = \Phi - 20^\circ$; $\beta_{\text{opt. invierno}} = \Phi + 10^\circ$ ($\Phi = \text{latitud}$) [-Enlace 13](#)

4.5 Potencial productivo

A la hora de determinar cuanta potencia puede llegar a instalarse en nuestros invernaderos hemos de tener en cuenta tanto los niveles de eficiencia que puede llegar a presentar los paneles, como la superficie total que ocupan los mismos. De tal forma que podríamos calcular la potencia pico instalada por unidad de superficie de invernadero como:

$$P_{0_m^2} = \eta \cdot G_{STC} \cdot \lambda \quad (1)$$

Donde $P_{0_m^2}$ es la potencia pico por m^2 de invernadero (Wp/m^2), η la eficiencia del módulo fotovoltaico, G_{STC} la irradiancia en condiciones estándares de medida ($1.000 W/m^2$), y λ el tanto por ciento de la superficie que ocupan los paneles con respecto a la superficie total de invernadero.

El valor de λ nos aporta la relación entre la superficie total instalada con respecto a la superficie de cultivo, pero el sombreado (refiriéndonos al % de radiación que las plantas dejan de recibir a causa de la colocación de los módulos) dependerá tanto de la geometría, tamaño y orientación del invernadero, como de la posición que ocupan los paneles en el mismo. Por ejemplo, en dos invernaderos iguales en extensión y geometría, pero de diferentes alturas, el sombreado que genera un módulo, será menor en el invernadero de mayor altura, puesto que a través de las paredes del mismo entra más luz. O si en un invernadero simétrico colocamos los paneles en el techo que mira al norte también tendríamos más radiación para las plantas que si los módulos se colocan en el techo que mira al sur. En el caso de tener paneles opacos sobre invernaderos tipo plano o de escasa pendiente, el valor de λ será aproximadamente igual al sombreado siempre que la superficie total del invernadero sea lo suficientemente grande, pero usando módulos fotoselectivos, el valor de λ deja de aproximarse al valor de sombreado.

Tenido en cuenta la superficie de terreno ocupado por invernaderos en diferentes zonas, se puede construir la siguiente tabla donde se muestra la potencia pico que tendría la instalación en con diferentes valores de eficiencia y ocupación.

Superficie ocupada	Paneles opacos						Paneles fotoselectivos		
	5%			10%			50%	70%	100%
Eficiencia	2%	6%	10%	2%	6%	10%	3%		
Potencia pico por m^2 de invernadero	1 Wp/m ²	3 Wp/m ²	5 Wp/m ²	2 Wp/m ²	6 Wp/m ²	10 Wp/m ²	15 Wp/m ²	21 Wp/m ²	30 Wp/m ²
El mundo 949.000 ha	9,5 GWp	28,5 GWp	47,5 GWp	19,0 GWp	56,9 GWp	94,9 GWp	142,4 GWp	199,3 GWp	284,7 GWp
Zona mediterránea 170.000 ha	2 GWp	5,1 GWp	8,5 GWp	3,4 GWp	10,2 GWp	17,0 GWp	25,5 GWp	35,7 GWp	51,0 GWp
España 65.000 ha	651 MWp	2,0 GWp	3,3 GWp	1,3 GWp	3,9 GWp	6,5 GWp	9,8 GWp	13,7 GWp	19,5 GWp
Andalucía 44.500 ha	445 MWp	1,3 GWp	2,2 GWp	890 MWp	2,7 GWp	4,5 GWp	6,7 GWp	9,3 GWp	13,4 GWp

Tabla 2: Potencia pico a instalar según eficiencia y superficie disponible

A partir de la tabla 2 tenemos que con una ocupación del 10% y células de eficiencia del 10%, sobre los invernaderos de todo el mundo, tendríamos una instalación próxima a los 100GW_p. Sin embargo, no todos los invernaderos podrían permitirse esta tasa de sombreados, los situados en latitudes más meridionales, como los holandeses, tienen la luz como un bien escaso y es frecuente recurrir a iluminación artificial para poder ofrecer a la plantación unas condiciones favorables para su desarrollo. Es por ello que los valores aportados en la tabla para la superficie total de invernaderos en el mundo ha de mirarse con cuidado. Sin embargo en la zona mediterránea, la luz es un bien que abunda, es por ello que los invernaderos dentro de la zona mediterránea son unos

buenos candidatos para este uso. Aunque es cierto que bajo invernadero nunca llegamos a la saturación lumínica de las plantas, la técnica del sombreado es muy común con el fin de mantener las temperaturas, el encalado durante los meses de verano en Almería llega a otorgar un 30% de sombreado^[6], pero los módulos fotovoltaicos sombrearán todo el año, algunos prototipos^[23] vistos rondan el 10%, es por ello por lo que tomaremos este valor como máximo de sombreado para nuestros módulos opacos con el fin de que no perjudique al cultivo en demasía. Es en estas zonas donde la integración de tecnología fotovoltaica, puede ser de gran ayuda aportando en parte al sombreado y así sacando provecho de la radiación que se desusa. España es líder en cuanto a hectáreas de cultivo bajo invernadero. De las 66.000 hectáreas de cultivo que encontramos en España, Andalucía cuenta con 44.500* de éstas.

En el caso de disponer de células fotoselectivas, las superficies que éstas pueden ocupar son mucho mayores. En el caso de encontrarnos con un invernadero plano o simétricos de pequeña pendiente, la superficie puede ser del 100% de la extensión del cultivo. Pero para invernaderos a dos aguas con orientación E-O, solo será aprovechable la cara del invernadero que está mirando al sur. El área que tenga esta superficie aprovechable dependerá del ángulo de inclinación y de si es simétrico o no. En el peor de los casos, dispondremos de al menos el 50% de superficie aprovechable en relación a la extensión del cultivo

Para los invernadero tipo túnel teniendo en cuenta los aproximadamente 45° de desviación que sufre el cenit lo largo del año, podemos determinar cubrir solo esta zona que es la que va a recibir más radiación. En este caso contaríamos con el 70% de la superficie ocupada por el invernadero.

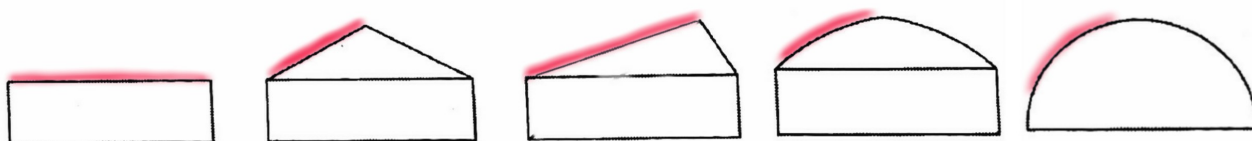


Figura 8: ocupación de paneles fotoselectivos para invernaderos con orientación E-O

Observando los valores obtenidos en la tabla 2, vemos que las potencias pico instaladas no son nada despreciables. En Andalucía, incluso en la peor de las configuraciones (paneles de 2% de eficiencia y solo un 5% de ocupación) tendríamos una potencia pico de 445MWp, que se considerase el entramado de invernaderos como una sola planta de producción fotovoltaica, sería la segunda mayor del mundo. Superada por la planta de Topaz Solar Farm situada en California que cuenta con 550MW, y seguida de Longyangxia Hydro-Solar PV Station con 320 MW**

4.6 Energía generada.

La potencia pico instalada por m² de invernadero, no nos aporta ninguna información acerca de cuánta energía puede llegar a generarse. Para su estimación es necesario conocer tanto la radiación que recibirán nuestros módulos, cuyo valor dependerá de la localización y orientación de nuestros módulos, como las posibles pérdidas que tendrá la instalación en su conjunto.

Podemos realizar una estimación de la energía generada por cada m² de invernadero, teniendo en

* Fuente: [Europapress – \(2009\) -Enlace 14](#)

** Fuente: [El periódico de la energía.com \(2015\) -Enlace 15](#)

cuenta cuanta potencia está instalada por m² de superficie. Para ello hacemos uso de la ecuación (2):

$$E_{FV_m^2} = P_{0_m^2} \frac{G_{da}(\alpha, \beta)}{G_{STC}} PR \quad (2)$$

Donde $P_{0_m^2}$ es la potencia pico por m² de invernadero (Wp/m²), este valor depende de la eficiencia de célula y del sombreado que deseemos aportar al cultivo, pudiendo oscilar según la tabla 2 entre 1 y 30W/m². G_{da} es el valor anual de la irradiación sobre la superficie del generador expresada en kWh/m²_año, G_{STC} la irradiancia en condiciones estándares de medida (1.000 W/m²) y PR el performance ratio de la instalación. Con estas unidades obtendríamos la energía eléctrica generada anualmente por m² de invernadero ($E_{FV_m^2}$) expresada en kWh/m²_año.

4.6.1 Invernaderos tipo túnel en Huelva

En la provincia de Huelva, la fresa es el principal producto de cultivo bajo invernadero. La geometría más usada es la tipo túnel o multitúnel en la que podemos encontrarnos la cumbre orientada de Norte a Sur, pero sin embargo, la orientación Este-Oeste es de uso más común debido a su mayor captación de luz en épocas de baja radiación.

Hemos visto que este tipo de estructuras nos permite cierta libertad a la hora de elegir la inclinación final que tendrán nuestros paneles instalados. Teniendo en cuenta que la provincia se encuentra a unos 37° de latitud, la máxima producción anual la tendremos para paneles orientados al sur con 27° de inclinación. Mientras que para la máxima producción en verano se consigue con inclinaciones de 17°.

Tomando los datos de radiación recibida en los invernaderos situados en Palos de la Frontera, Huelva (Latitud= 37,18° ; Longitud= -6,85) a partir del software Meteonorm 7.1.6 podemos rellenar la siguiente tabla:

	0°	17°	27°
Radiación [kWh/m ² _año]	1844	2059	2114

Tabla 3: Radiación para diferentes inclinaciones y orientación Sur en Palos de la Frontera

Los datos obtenidos en la tabla 3 nos indican que módulos en posición horizontal tienen pérdidas próximas al 13% respecto a paneles situados en la posición óptima de producción anual (27°), y pérdidas inferiores al 3% si los paneles estuviesen situados en la posición óptima para una máxima producción en verano (17°). Por lo que colocar los módulos para una producción óptima en verano no nos aportará grandes pérdidas energéticas con respecto a la posición óptima anual, y sin embargo el cultivo puede agradecerlo al no impedir en gran medida el paso de la radiación durante los meses que ésta es más escasa. A la par que la radiación recibida durante los meses de verano se verá reducida, disminuyendo la temperatura en el interior del invernadero.

Con ayuda de la ecuación (2), los datos de la tabla 3 y considerando un PR estándar de 0,7 podemos construir la gráfica 2. En la que se muestra la estimación energética (kWh/m²_año) en función de la potencia pico instalada por m² de invernadero para dos posibles orientaciones de los paneles fotovoltaicos. En azul si el panel está sobre superficie horizontal, y en rojo si situamos el panel orientado al sur con una inclinación de 27°. Además se ha incluido en color verde una horquilla de consumos en el caso de tener un invernadero tecnificado. Como referencia se han tomado consumos entre 1,73 y 0,25 kWh/m²_mes^[8], los cuales se tienen en el mes de enero y

agosto respectivamente en un invernadero situado en Cartagena. Esta horquilla es para invernaderos altamente tecnificados, en el caso de una menor tecnificación, los consumos también serán menores. Como ejemplo, la IDAE aporta unos consumos orientativos entorno a los 13,43 kWh/ha_día, es decir, aproximadamente 0,5kW/m²_año para alimentar un sistema de ventilación.

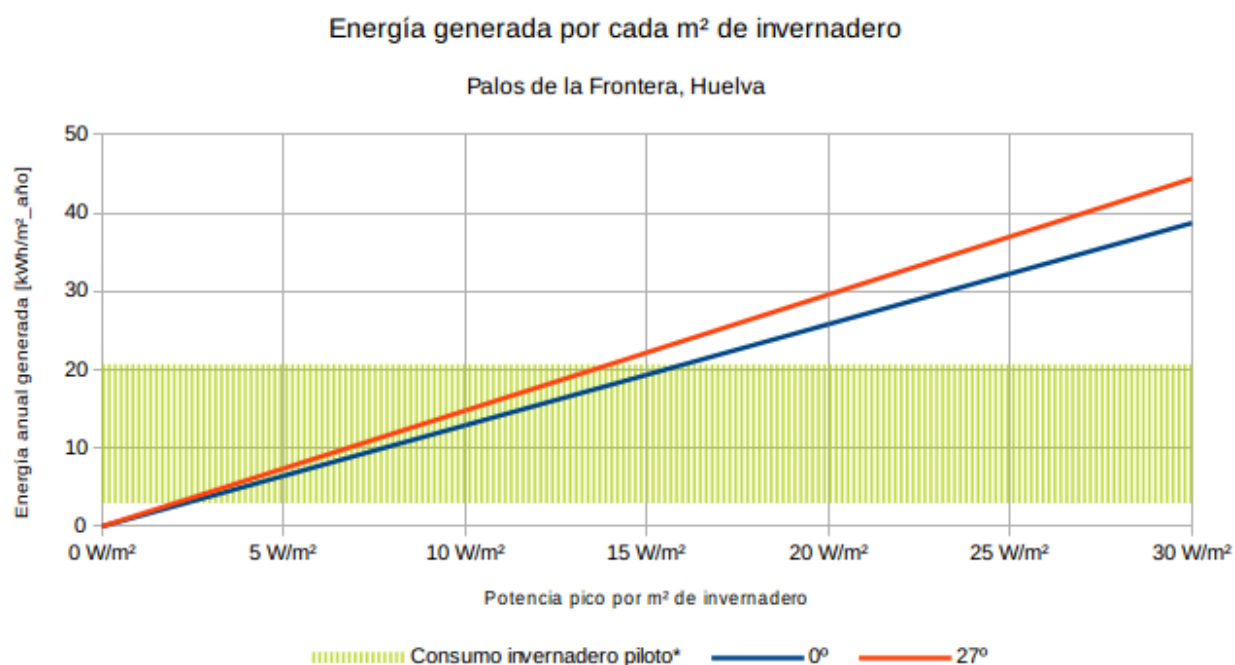
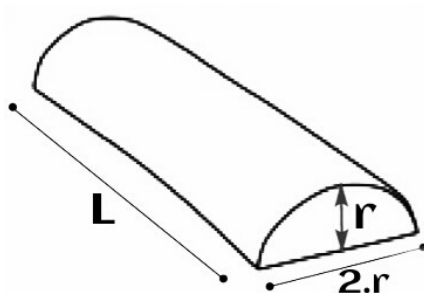


Gráfico 2: Producción anual por m² de invernadero en Huelva según densidad de potencia instalada

El gráfico 2 nos muestra que densidades entorno a 15W/m² podrían alimentar un consumo de 1,73 kWh/m²_mes, el cual indicaría que el invernadero estaría consumiendo durante todos los meses del año lo mismo que consume en el mes de máximo requerimiento energético. Mientras que concentraciones inferiores a 1W/m² son suficientes para producir la energía necesaria para alimentar un sistema de ventilación propuesto en la IDAE.



Para este estudio hemos dicho que no íbamos a considerar módulos plásticos de eficiencias superiores al 10%, por lo que para conseguir una concentración de 15W/m² deberíamos tomar $\lambda=0,15$, ie, un 15% de la superficie que ocupa el invernadero. Considerando que los invernaderos tipo túnel pueden aproximarse a semicilindros, llegamos a que los módulos han de ocupar el 10% de la superficie de la cubierta. Teniendo en cuenta que los módulos cubrirán zonas de la cubierta que, debido a su orientación, tendrían una alta transmisividad es de esperar que los valores de sombreado superen este 10%. Por lo que si no queremos superar este valor límite deberíamos de hacer uso de paneles fotoselectivos, o plantearnos el uso de otras tecnologías que presenten mejores valores de eficiencia. Aunque no hemos de olvidar que 15W/m² puede considerarse un caso extremo, con menores concentraciones, la producción anual podría suplir el consumo eléctrico anual. Y en éstos casos si que podríamos tener sombreados inferiores al 10% con módulos plásticos opacos.

Si tenemos en cuenta toda la extensión que ocupan los invernaderos en la provincia de Huelva (7.500 hectáreas) y considerando valores de radiación aproximadamente iguales en toda la provincia podemos construir el siguiente gráfico:

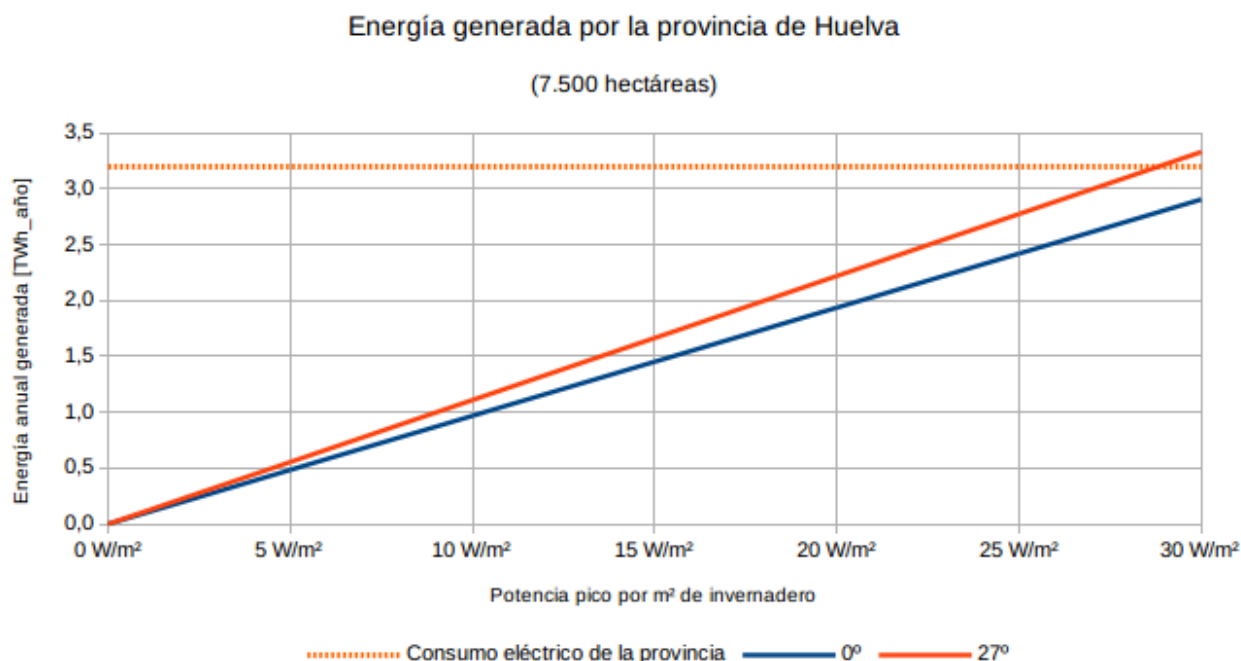


Gráfico 3: Producción anual total en Huelva según densidad de potencia instalada

En el gráfico 3 se han incluido, además de los valores de energía generada para módulos con inclinación horizontal y de óptima producción anual, el consumo energético de la provincia de Huelva, que según la Agencia Andaluza de la Energía, es de 271,1kTep [Tonelada de petróleo equivalente= 11 630kWh] los cuales, expresados en unidades más familiares, dan 3,2 TWh_año*. Para poder cubrir el consumo de la provincia sería necesario una densidad de 30W/m². Esto solo lo podríamos conseguir con ayuda de paneles semitransparentes con un 100% de ocupación (teniendo en consideración los valores de eficiencia esperados en este tipo de módulos) e inclinaciones próximas a la óptima. Teniendo en cuenta la aproximación a semicilindros para los invernaderos tipo túnel, un 100% de ocupación con respecto a la superficie ocupada equivale a un 64% de la superficie de la cubierta, por lo que si la orientación del módulo esta supeditada a la de la cubierta, no podemos esperar llegar a cubrir el consumo de la provincia. Además, es de esperar que un agricultor que realice una inversión en la instalación de módulos fotovoltaicos, no solo quiera usarlo para cubrir las necesidades de consumo de su provincia, sino que realizará mejoras en el invernadero que llevarán a un aumento del consumo total, haciendo más inalcanzable el objetivo.

Aunque no esperemos una producción eléctrica tal que cubra el consumo de la provincia, dada la extensión que ocupan los invernaderos, sí que tendríamos unos valores más que aceptables incluso con bajas concentraciones de W/m². Con tan solo 5W/m² podríamos alimentar el sistema de ventilación propuesto en la IDAE, y con la energía sobrante se puede llegar a abastecer el 15% del consumo de la provincia de Huelva.

* Fuente: [Agencia Andaluza de la Energía \(2015\) -Enlace 16](#)

4.6.2 Invernaderos de tipo parral en Almería

La mayor concentración de invernaderos de todo el mundo está situada en España, más concretamente en la provincia de Almería. Contando actualmente con 29.596 hectáreas* que se pueden llegar a ver desde el espacio como un punto blanco (Ver ilustración 15). Ante tan vasta extensión es lógico que nos encontremos con múltiples estructuras, grados de tecnificación, etc. Aunque si hay que destacar la estructura más común, ésta sería la tipo plana, seguidas por las simétricas de escasa pendiente (inferiores a 10°). Y, aunque en menos medida, también podemos encontrarnos con invernaderos tipo túnel, pero a diferencia de los situados en Huelva, éstos son orientados normalmente de norte a sur. Si bien es cierto que la orientación E-O permitiría una mejor producción agrícolas por su mayor transmisividad, los vientos de levante y poniente hacen que no se opte por esta orientación**.



Ilustración 15: Invernaderos de Almería visto desde el espacio

Dado que la latitud a la que están situados estos invernaderos es aproximadamente igual a la que se encuentran los invernaderos de Palos de la Frontera (latitud ~ 37°) los ángulos de inclinación para las producciones máximas anuales y estivales han de coincidir. Al igual que antes, tomaremos los datos del software Meteonorm 7.1.6 para determinar la radiación recibida por los invernaderos situados en el campo de Dalías, Almería (Latitud= 36,75° ; Longitud= -2,70) y así poder rellenar la siguiente tabla:

	0°	17°	27°
Radiación [kWh/m ² _año]	1917	2158	2226

Tabla 4: Radiación para diferentes inclinaciones y orientación Sur en Campo de Dalías

Si comparamos los valores de la tabla 4 con los valores obtenidos para los invernaderos situados en Palos de la Frontera, vemos que la radiación recibida en el Campo de Dalías es entorno a un 5% superior. Aunque hemos estimado los mismos grados de inclinación para las producciones óptimas en ambas localizaciones, éstos han de determinarse para cada punto del mapa. Para las coordenadas elegidas del Campo de Dalías, el máximo de producción anual se tendría para los 35° debido principalmente al albedo provocado por los propios invernaderos. Si la tecnología fotovoltaica instalada también hiciese uso de la radiación difusa (como es el caso que nos concierne) deberíamos de tener en cuenta estas nuevas orientaciones. Sin embargo, para comparar radiaciones recibidas de estos dos puntos del mapa con aproximadamente la misma latitud se ha mantenido se han mantenido las mismas inclinaciones en las tablas 3 y 4. Además, dada las geometrías de invernadero usadas en esta zona, no podemos escoger la inclinación deseada. Teniendo que optar por aquellas próximas a la horizontal.

* Fuente: [Europa press -Enlace 17](#)

** Fuente: [infoagro -Enlace 18](#)

En párrafos anteriores se ha mencionado que los invernaderos de la zona mayormente o son planos o tienen una pendiente inferior a 10° con orientación preferente Norte-Sur. Si atendemos a las aproximaciones que nos presenta el Documento Básico HE 5, el cual establece que para inclinaciones inferiores a 15° con respecto a la horizontal, las pérdidas debidas a orientación e inclinación de nuestros paneles con respecto a la de máxima producción anual son independientes de la orientación. Es decir, que podemos aproximar la radiación recibida por nuestro módulos fotovoltaicos a la que recibirían estando en posición horizontal.

Si hiciésemos una estimación de la producción eléctrica anual en función de la potencia pico instalada por m^2 de invernadero, considerando el mismo valor de performance ratio que antes, obtendríamos una gráfica equivalente al gráfico 2 pero con valores de producción un 5% superior dado un valor de potencia pico. Aunque hemos de considerar que en la provincia de Huelva tenemos la opción de disponer los paneles con la inclinación que nos otorga la producción máxima, mientras que en Almería hemos de tenerlos en posición horizontal o próximos a ella. Esto hace que en Huelva, la producción eléctrica anual por m^2 de invernadero sea un 7,4% o 10,3% superior si tenemos inclinaciones óptimas para la producción estival o anual respectivamente. Por lo que, aunque los valores de radiación para Huelva son inferiores a los de Almería, la posibilidad de disponer los paneles en la posición deseada hace que finalmente tengamos una mayor producción eléctrica por m^2 de invernadero en la provincia onubense.

Aunque si en algo destaca el Campo de Dalías, es en la extensión que ocupan los invernaderos. Con las cerca de 30.000 hectáreas de cultivo podríamos tener una producción eléctrica anual como la que muestra el siguiente gráfico:

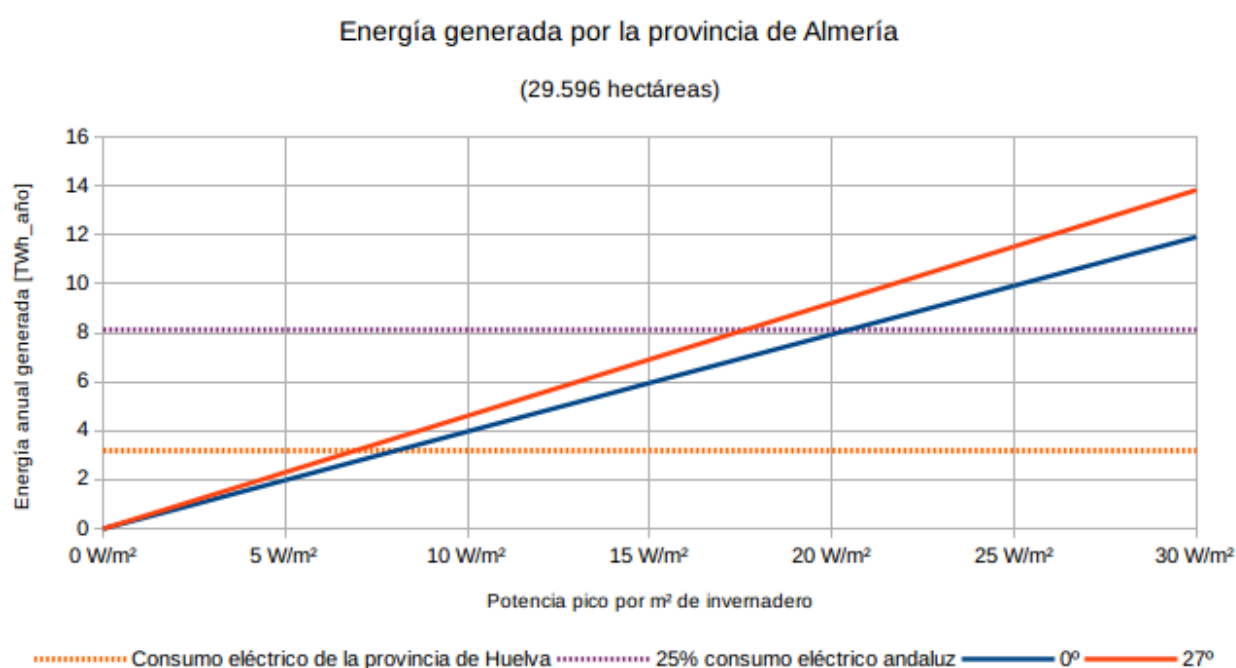


Gráfico 4: Producción anual total en Almería según densidad de potencia instalada

La enorme extensión que estos invernaderos ocupan hacen que la producción eléctrica total supere con creces a la obtenida en la provincia de Huelva. Mientras que en Huelva necesitábamos una densidad de $30W/m^2$ con inclinación de producción óptima para cubrir el consumo de la provincia, el mismo consumo podría cubrirse en Almería con densidades de $8W/m^2$, el cual puede

obtenerse con el uso de paneles opacos sin llegar a sombreos muy acusados. Es tal la extensión que ocupan estos invernaderos que con ocupaciones de 20W/m², incluso en posición horizontal, serían capaces de cubrir la demanda del 25% del consumo eléctrico anual de la comunidad autónoma andaluza (40.385,4 GWh** - datos del 2010). Aunque para poder lograr esto si que deberíamos de disponer de módulos fotoselectivos si no queremos caer en un excesivo sombreado.

En los invernaderos tipo túnel con orientación Este-Oeste, podemos llegar a paliar las pérdidas de radiación causadas por nuestros módulos en invierno al dejar libre la zona de la cubierta que tienen mayor transmisividad. Sin embargo, en los invernaderos que no tienen el techo plano, no podemos jugar con las diferentes transmisividades debido a que toda la zona de la cubierta que tenga la misma pendiente presentará el mismo valor. Con lo que los invernaderos situados en Almería presentarían otro problema a la hora de integrar nuestros módulos, éstos nos aportarían un sombreado en verano que ayudaría a reducir la temperatura del invernadero, pero también bloquearían más radiación en invierno si los comparamos con los tipo túnel Este-Oeste. Si tenemos en cuenta que el agricultor tiene un mayor beneficio (venta de productos a un precio mayor) con las cosechas que se obtienen fuera de temporada, cuando existe una menor oferta (normalmente durante los meses de menor radiación) debido a que se elimina competencia de los huertos al aire libre, los cuales suelen tener una producción más económica causada por la reducción de costes en instalaciones. La pérdida de producción, por causa del sombreado, en este periodo puede ser fatal si no se balancea adecuadamente con beneficios que tendremos por la instalación fotovoltaica.

4.7 Costes de la electricidad

En esta sección vamos a realizar un esbozo de los costes aproximados del kWh generado al hacer uso de las células plásticas en función de los diferentes valores de vida útil que puede llegar a presentar. Para ello se ha de tener en cuenta tanto la energía generada como el coste de la instalación y su vida útil haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\text{Costes por kWh} [\text{€}/\text{kWh}] = \frac{\text{Costes instalación} [\text{€}]}{\text{Energía producida} [\text{kWh}]} \quad (3)$$

En principio solo tendremos en cuenta el coste de los módulos fotovoltaicos, así, si los costes por kWh obtenidos son aceptables, posteriormente podremos tener en cuenta otros aspectos a considerar que han de incluirse en los costes, como es el precio de los inversores, mano de obra, etc.

Para estimar el precio al que finalmente vamos a pagar el kWh producido podemos usar para la ecuación 3 tomando los costes de instalación y la energía producida durante la vida útil de la instalación o bien tomar sus valores anuales. La estimación de la producción energética ya ha sido estudiada en el apartado 4.6, en el que con ayuda de la ecuación (2) obteníamos la energía anual generada por m² de invernadero. Sustituyendo P_{0,m²} por la potencia pico instalada tendremos la energía anualmente. Para los costes de instalación de los módulos se tomará el coste por vatio pico multiplicada por la potencia total instalada y dividida por la vida útil del módulo. Es decir:

$$\text{Costes por kWh} [\text{€}/\text{kWh}] = \frac{\text{Costes del Wp} [\text{€}/\text{Wp}] \times P_0 \times \frac{1}{\text{vida útil mód.} [\text{años}]}}{P_0 \frac{G_{da}(\alpha, \beta)}{G_{STC}} PR} \quad (4)$$

** Fuente: [Agencia Andaluza de la Energía- \(2010\) -Enlace 19](#)

Reescribiendo la ecuación y cambiando cambiando las unidades de los costes por kWh a céntimos de euro por kWh producido llegamos a:

$$\text{Costes por kWh} [\text{€}/\text{kWh}] = \frac{100 \times G_{STC}}{\text{vida útil mód.} [\text{años}] \times G_{da}(\alpha, \beta) \times PR} \times \text{Costes del Wp} [\text{€}/\text{Wp}] \quad (5)$$

A la vista de la ecuación 5, los costes de la instalación (solamente teniendo en cuenta el coste de los módulos) será inversamente proporcional a la vida útil de los módulos, la radiación recibida y el PR de la instalación. Es decir, que a mayor radiación, PR o vida útil de los módulos, menores serán los costes finales del kWh producido. Vemos que los costes no solo dependen de factores intrínsecos a la instalación, sino que la localización, orientación e inclinación de los módulos serán determinantes a la hora de definir el precio final de la electricidad producida.

En el siguiente gráfico se ha representado el coste por kWh en función de los costes del modulo, para ello hemos elegido los invernaderos situados en Palos de la Frontera, donde nuestros paneles se pueden orientar con inclinación óptima para la producción durante los meses de verano, con el mismo performance ratio que se eligió antes (PR=0,7) y una vida útil de 1 y tres años, que suele ser los periodos de tiempo que suelen durar las cubiertas flexibles en estas latitudes.

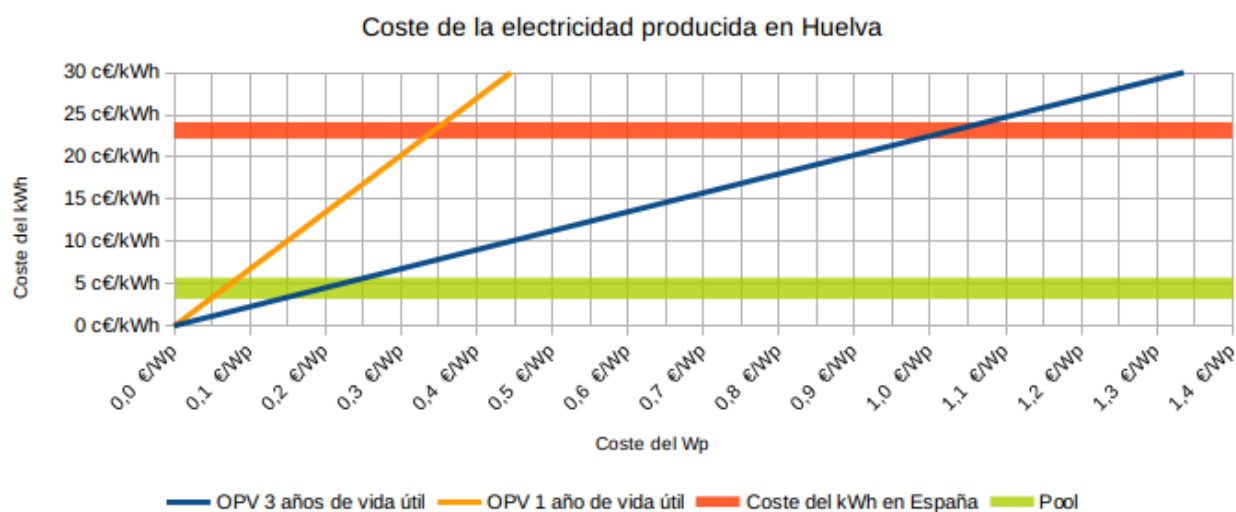


Gráfico 5: Costes de producción en Huelva con módulos inclinados 17°

En el gráfico se han incluido tanto el precio actual del kWh en España, situado en 23,7 c€ según los datos de la agencia de estadísticas Eurostat*, como el precio de venta en el mercado pool. Determinar el precio del mercado no resulta nada fácil, puesto que este varía constantemente*, pero podemos estimar según datos históricos** un precio entre tres y seis céntimos de euro

Dado los precios obtenidos usando módulos de un año de vida útil, éstos solo serán rentables si su precio es inferior a 35 céntimos de euro por vatio y además somos capaces de consumir toda la

* Fuente: [La Vanguardia -\(2015\) -Enlace 20](#)

* Fuente: [OMI. Precio diario de mercado -Enlace 21](#)

** Fuente: [Blog generación distribuida-\(2013\) -Enlace 22](#)

energía generada; o que los costes sean inferiores a 5 céntimos de euro de tal forma que la energía no consumida sea rentabilizada al venderse en el mercado. Para módulos con vida útil de 3 años, evidentemente, la situación es más favorable, en este caso hemos de disponer de paneles de coste inferior a 1€/Wp si somos capaces de consumir toda la energía, o inferior a 15c€/Wp en el caso de buscar beneficio con la venta en mercado.

Los precios a los que hemos de comprar el vatio en estas circunstancias son extraordinariamente bajos, además hemos de recordar que no se ha tenido en consideración otros precios de la instalación. Si quisiéramos tenerlos en consideración deberíamos de estimar un precio por vatio pico para el resto de la instalación, teniendo en cuenta también la vida útil de los nuevos componentes como puede ser el inversor. En este tipo de instalaciones, dada sus características, con módulos apoyados sobre superficies inestables que pueden bambolearse a causa del viento y difíciles de dar exactamente la misma orientación a todos ellos, deberían de usarse microinversores para así mitigar los mismatch y conseguir un mejor rendimiento del sistema en su conjunto. De esta forma también evitamos altas tensiones o fuertes corrientes sobre el material conductor de los módulos. Otra ventaja de trabajar con microinversores es que presentan un mayor periodo de garantía que pueden llegar hasta los 20 años en comparación con los 10~15 que presentan los inversores orientados a ramas y/o central. Y en el caso de querer ampliar nuestra instalación una vez acabada la vida útil de nuestro módulos, ya sea a costa de una mayor ocupación o con paneles que presenten mejores eficiencias, solo tendríamos que añadir más microinversores a nuestra instalación. Pero también plantean sus problemas: Son más caros que los inversores orientados a ramas y centrales. Ofrecen peores valores de eficiencia que los inversores centrales u orientados a ramas. Además la cubierta no podría soportar su peso, debiendo de anclarse a la estructura.

Si queremos estimar los costes totales incluyendo el resto de gastos que el sistema generador tiene, podemos partir de la ecuación 4 añadiendo un término que tenga en consideración estos gastos.

$$\text{Costes por KWh}[\text{€}/\text{kWh}] = \frac{\frac{\text{Costes Wp módulo}[\text{€}/\text{Wp}] \times P_0}{\text{vida útil mód.}[\text{años}] + \frac{\text{Costes Wp otros}[\text{€}/\text{Wp}] \times P_0}{\text{vida útil otros.}[\text{años}]}}{P_0 \frac{G_{da}(\alpha, \beta)}{G_{STC}} PR} \quad (6)$$

Reorganizando la ecuación 6, y cambiando las unidades para obtener los costes de la electricidad en céntimos de euro por kWh tenemos la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Costes por KWh}[\text{€}/\text{kWh}] = & \frac{100 \times G_{STC}}{\text{vida útil mód.} \times G_{da}(\alpha, \beta) \times PR} \times \text{Costes Wp mod}[\text{€}/\text{Wp}] + \\ & + \frac{100 \times G_{STC}}{\text{vida útil otros.} \times G_{da}(\alpha, \beta) \times PR} \times \text{Costes Wp otros}[\text{€}/\text{Wp}] \quad (7) \end{aligned}$$

La ecuación 7 se diferencia de la 5, en el último término que correspondería a la ordenada en el origen de la ecuación de una recta, por lo que el concepto otros gastos hace que las rectas representadas en el gráfico 4 se desplacen hacia arriba manteniendo la pendiente. Dicho de otra manera, estos gastos harán sumar una cantidad fija a los costes del kWh independientemente de las propiedades de los módulos. Pero si dependerá de factores intrínsecos a la instalación (PR) y de la

localización, orientación e inclinación de los módulos. Así como del elemento de mayor vida útil a excepción de los módulos, en este caso consideraremos la del inversor.

Tomando datos de radiación para Palos de la frontera, performance ratio del setenta por ciento y una vida útil del inversor de 20 años podemos construir la siguiente tabla:

Coste otros [€/Wp]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Coste eléctrico [c€/kWh]	0,5	0,9	1,4	1,9	2,3	2,8	3,2	3,7	4,2	4,6

Tabla 5: coste de la electricidad debido a otros componentes de la instalación

Una rápida búsqueda en Google nos ofrece microinversores con costes que rondan los 0,2€/W. Considerando valores de dimensionado F_s entre 0,85~1 (relación entre la potencia del inversor y la potencia pico instalada) tendríamos unos costes de 0,17~0,2€/Wp. Estos son solo los gastos referentes al inversor, sin contar mano de obra, cableado, conectores, etc. Podremos considerar que los costes del resto de elementos puede rondar 0,2~0,3€/Wp, a esta estimación aproximada se llega partiendo de dos supuestos, por un lado el inversor se convertiría en el elemento más caro y por otro, una compra al por mayor permitiría unos precios más ajustados del inversor. De tal forma que al coste obtenido en el cálculo que involucra solo el precio de los módulos abriría que añadirle entre 0,9 y 1,4 céntimos de euro extra. Estos márgenes son a tener en cuenta cuando nos encontremos en situación de venta en el mercado dado que, según las circunstancias, pueden llegar a cerca del 50% del precio que recibiremos por su venta, mientras que solo representan menos del 8% del precio de compra a red.

Otro factor de vital importancia a considerar es el marco legal que regule las producciones eléctricas. En España, la ley 24/2013 establece la obligación de contribuir a la financiación de los costes y servicios del sistema eléctrico para las instalaciones de autoconsumo en la misma cuantía que el resto de consumidores, y se establece que para poder vender el excedente de energía eléctrica se ha de registrar como instalación de producción. Esto se traduce en un aumento de los costes totales al tener que responder a los impuestos, costes de peajes, etc.

Dentro de las modalidades de autoconsumo que encontramos en España, podemos vernos en la situación en la que estemos obligados a regalar el excedente eléctrico sin retribución ninguna, o inscribimos como instalación de producción, dejando de lado el balance neto, el cual nos permitiría recuperar a posteriori la energía vertida a red.

Con todas estas consideraciones, en el caso de usar módulos de vida útil inferior a 3 años, solamente teniendo en cuenta los costes de instalación, podríamos conseguir encontrarnos en una franja donde el precio final del kWh producido sea inferior al que las compañías eléctricas lo venden, pero estaríamos fuera del alcance de unos precios que hicieran rentable su venta en el mercado. Es por ello que estas instalaciones deberían de dimensionarse a la baja con el fin de consumir toda la energía producida para no vernos obligados a regalar o mal vender el excedente.

Podríamos disponer de módulos de mayor vida útil. Aunque, lo ideal sería que el invernadero sea de cubierta rígida con vida útil aproximadamente igual a la del módulo. Dado que si el agricultor dispone de cubiertas flexibles, ya no podríamos contar con una integración desde el origen, donde la cubierta y el módulo se vende como una única entidad, sino que los módulos deberían colocarse de forma independiente. Esto complicaría la instalación de la cubierta dado que la instalación fotovoltaica debería desinstalarse para el cambio de cubierta y posteriormente volverla a apoyar sobre la nueva cubierta, haciendo que todo el proceso sea más complejo exigiendo más volumen de

trabajo.

El gráfico siguiente muestra el coste de de la electricidad producida, considerando solamente el coste de los paneles fotovoltaicos, en la zona de Palos de la Frontera en las mismas condiciones que antes pero para células plásticas de mayor vida útil, entre siete y diez años.

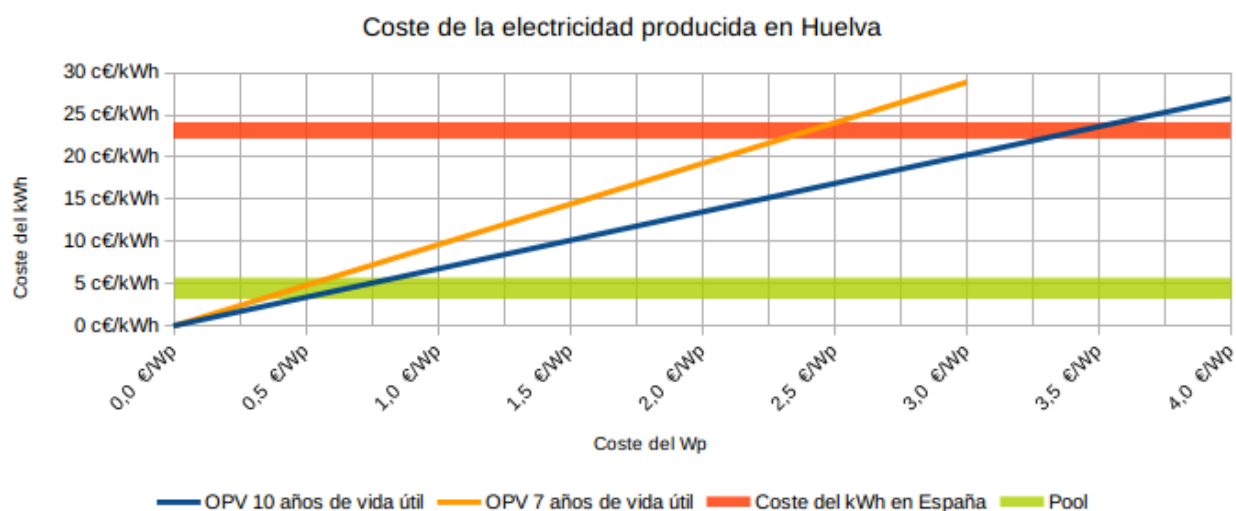


Gráfico 6: Costes de producción en Huelva con módulos inclinados 17°

En esta nueva gráfica, se vuelven a excluir todos los gastos a excepción del coste de los módulos. Aun con estas nuevas circunstancias, con paneles de vida útil de entre 7 y 10 años, si el costo de los módulos es superior a 0,5€/Wp no estaríamos en condiciones de competir en el mercado pool una vez incluidos el resto de gasto e impuestos, pero el abaratamiento de la electricidad consumida pueden hacer rentable la inversión según que casos. Para módulos de vida útil de 10 años con precios solo algo inferiores nos situarían en un posición en el que la venta en el mercado sería rentable.

El mayor consumo eléctrico de un invernadero en la zona del mediterráneo, suele coincidir con los momentos de mayor irradiación, por lo que en este punto estaríamos ahorrando bastantes céntimos de euro por cada kWh consumido, pero si no se consume, estaríamos recibiendo algo menos del coste de producirlo. En tales circunstancias habría que realizar un estudio para cada caso particular con sus consumos propios y las horas a las que éstos se llevan acabo para ver la rentabilidad de la inversión.

Si estudiásemos la misma situación para Almería, tendríamos peores valores de radiación dado que hemos de colocar nuestros paneles en posición horizontal, haciendo que que los costes del kWh generado fuesen mayores en el caso de considerar solo el coste de los módulos, sin embargo el coste del resto de la instalación (ordenada en el origen de las gráficas) podrían ser aproximadamente iguales dado que el aumento del coste causado por la disminución de la irradiancia se compensaría con el menor coste en inversores debido a que podremos tomar valores de dimensionado F_s menores.

A la vista de los resultados y dada la situación actual en España, compensar la inversión no resulta tarea fácil para el agricultor. En otros países con mejores condiciones de radiación, mejor precio de venta en el mercado o mayores costes de la electricidad podría ser una mejor opción. Esto

o encontrarse en una situación donde la conexión a red no sea posible, y solo el autoconsumo sea la única opción posible.

Raro será el agricultor español que no tenga posibilidades de conectarse a red, por lo que si pretende que la inversión le sea rentable se verá obligado a consumir por cuenta propia la energía generada. Pero los consumibles eléctricos que se usan en un invernadero medianamente tecnificado podrían alimentarse sin problemas con bajas densidades de potencia instalada. Sin embargo, muchos agricultores o asociación de ellos, tienen su propia cooperativa donde el producto es preparado para ser puesto a la venta. Estas cooperativas suelen estar cerca, o incluso en la misma finca donde se cultiva, teniendo unos consumos eléctricos debido a la iluminación artificial, climatización, maquinaria, etc que podrían cubrirse con la propia producción fotovoltaica, consiguiendo así una reducción de costes.

4.7 Otros aspectos de la integración

En este punto tocaremos de manera somera algunos puntos que no se han tratado a lo largo del proyecto, pero sería interesante tenerlos en consideración, como son: el reciclaje y algunos problemas que podemos encontrarnos a la hora de realizar la integración.

Se ha planteado la integración sobre el invernadero con el fin de reducir costes al agricultor a la par que reduciríamos emisiones de CO₂, pero una vez acabada la vida útil de los módulos ¿que ocurriría con ellos? ¿Son medioambientalmente amigables? La respuesta es que si, otra de las ventajas que presentan las OPV es la posibilidad de ser recicladas^[18] en más de un 90% una vez llegan a degradarse, para fabricar nuevamente una nueva OPV con sus propiedades renovadas. Otro punto a favor es que las células orgánicas tienen energías de retorno más bajas que podemos encontrar, entre tres y seis meses. Esto quiere decir que la energía que se ha de invertir para fabricar una OPV se recupera tras tres/seis meses de funcionamiento, dependiendo de la localización en la que nos encontremos. Estos estudios^[18] fueron llevados a cabo con células libres de ITO, el cual es el responsable de entre el 50% y el 80% del coste económico y energético, pero hemos visto como el ITO ha de ser sustituido si buscamos una células flexibles, por lo que podemos tomar estos resultados como válidos.

También deberíamos tener en consideración algunos problemas que podríamos encontrarnos :

- Hemos esta considerando geometrías perfectas, pero esto no siempre se cumple y podemos encontrarnos con cubiertas algo irregulares como la mostrada en la siguiente ilustración, la cual nos aportaría orientaciones no deseadas que podrían variar de un módulo a otro. Aunque disponer de microinversores eliminaría problemas, la producción eléctrica podría verse mermada.



Ilustración 16: malla de sombreo con superficie irregular

- Mientras que en los campos solares los módulos fotovoltaicos están bien anclados y fijados, en la integración propuesta, nuestros módulos tendrían como soporte las cubiertas plásticas. Si son cubiertas rígidas, estas aguantan bien las inclemencias del tiempo por su construcción y estructura. Pero si las cubiertas son flexibles pueden estar expuestas a condiciones climatológicas que a veces pueden no llegar a soportar, rompiéndose y teniendo que ser repuestas.



Ilustración 17: cubierta dañada

- Hemos dicho que los módulos pueden llegar a sustituir, al menos parcialmente el sombreado al que suelen estar expuestos los invernaderos para evitar las altas temperaturas. Sin embargo, los paneles fotovoltaicos se calientan, aumentando la temperatura de su medio circundante. Las OPV, en este punto son más ventajosas dado que no se calientan tanto como los paneles de silicio de primera generación. Y aunque la mayor parte de calor se ha de disipar por convección a la atmósfera, parte de la temperatura alcanzada podría llegar al invernadero por transmisión a través de la cubierta. En función del volumen del invernadero, las temperaturas alcanzadas y la radiación disponible habría que estudiar si los paneles realmente tienen efecto de sombreado o por contra causan un aumento de la temperatura del invernadero.

Conclusiones

La integración de las cubiertas plásticas sobre invernadero, podrían ser una realidad con un potencial enorme que podría llegar a cubrir más del 12% de la demanda energética andaluza solamente utilizando los invernaderos situados en Almería y con densidades de 10Wp/m² de invernadero, los cuales no deberían afectar en demasía a la producción agrícola.

Sin embargo el coste del kWh producido, atendiendo a los costes que se esperan por vatio instalado, son inversamente proporcionales a la vida útil de los módulos; y aún en el mejor de los casos, disponiendo de paneles de 10 años de vida útil a un coste de 0,5€/W no serían idóneos si lo que se pretende es la venta a la red eléctrica. Aunque, a partir de tres años de vida útil empieza a ser una inversión atractiva si lo que pretendemos es cubrir los consumos del invernadero y/o la cooperativa, obteniendo precios por kWh más reducidos de los que podemos obtener en el mercado.

Bibliografía

- [1] [FAO- El cultivo protegido en el clima mediterráneo](http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s00.htm#Contents)
<http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s00.htm#Contents>
- [2] [“Invernaderos, innovación para la productividad y el medio ambiente” Roberto Garcia-CEA03](#)
- [3] [“Materiales de cubierta para invernaderos” Enrique Espi- 2012 CEA03](#)
- [4] ["Invernaderos de plástico, tecnología y manejo" N.Castilla 2007](#)
- [5] [“Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos” IDAE - ISBN: 978-84-96680-25-8](#)
- [6] [“Evaluación de la distribución espacial de la radiación PAR en un invernadero raspa y amagado sometido a sombreado selectivo mediante placas fotovoltaicas flexibles instaladas en su cubierta” José Jiménez Martínez](#)
- [7] ["El cultivo de invernadero y su relación con el clima” Pilar Lorenzo 2012 – CEA03](#)
- [8] ["Energías renovables en invernaderos” M. Perez y J. A. Sánchez 2012 – CEA03](#)
- [9] [“Células solares basadas en plásticos semiconductores” \(2014\) M.Campoy](#)
- [10] [N.S.Sariciftci et ál “Photoinduced Electron Transfer from a Conducting Polymer to Buckminsterfullerene”, Science 258, 1474 \(1992\)](#)
- [11] [“A Semi-transparent Plastic Solar Cell Fabricated by a Lamination Process” Adv. Mater. 2008, 20, 415–419](#)
- [12] [Basic UV/Visible Spectrophotometry—Educational-Booklet-07](#)
- [13] [Ying Diao *et al* “Flow-enhanced solution printing of all-polymersolar cell” DOI:10.1038/ncomms8955](#)
- [14] [“Stability of polymer solar cells” Mikkel J., Kion N, C. Krebs et al Adv. Mater. 2012, 24 580-612](#)
- [15] [“Business, market and intellectual property analysis of polymer solar cells" DOI:10.1016/j.solmat.2010.04.074](#)
- [16] [Encapsulation of Tandem Organic Luminescence Solar Concentrator with Optically Transparent Triple Layers of SiO₂/epoxy /SiO₂ Yamna EL Mouedden, Baofu Ding, Qunliang Song, Guangji Li, and Kamal Alameh, Senior Member, IEEE](#)
- [17] [Krebs et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 2009 DOI:10.1016/j.solmat.2008.10.004](#)
- [18] [“Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review” \(2013\) S Lizin, S Van Passel, E De Schepper, W Maes, L Lutsen, J Mancab and D Vanderzandeb DOI: 10.1039/c3ee42653j](#)
- [19] [“Ultrating and lightweight organic solar cells with high flexibility” Martin k. Et al. Nature Communications](#)
- [20] [“25th Anniversary Article: Rise to Power-OPV-Based Solar Parks” Adv. Mater. 2014,26,29-39](#)
- [21] [“Fabrication ans processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques” C.Krebs doi:10.1016/j.solmat.2008.10.004](#)
- [22] [Solar cell efficiency tables -2014, DOI:10.1002/pip.2573](#)
- [23] [“Sharing and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an eastwest orientes greenhouse A. Yano](#)

Webgrafía

- <http://plasticphotovoltaics.org/lc.html>
- <https://www.coursera.org/learn/solar-cell>
- <http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2006/08/invernaderos-estructuras-que-encierran-un-microclima/>
- <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/publicaciones-periodicas/mediterraneo-economico/2/2-15.pdf>
- http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/plasticos.htm
- <http://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/techortimedthm?e=8490508/3798779>
- <http://teca.fao.org/es/read/4018>

Enlaces:

1. http://www.sic.gov.co/drupal/recursos_user/boletines_tecno/boletin_invernaderos_19jun.pdf
2. <http://www.cotec.es/index.php/pagina/sala-de-prensa/notas-de-prensa/show/id/724/titulo/cotec-edita-un-documento-sobre-las-opportunidades-tecnol-amp-oacute-gicas-que-ofrece-el-sector-de-invernaderos-de-pl-amp-aacute-stico--lt-br---gt>
3. http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/00ESPA%C3%91A_tcm7-352546.pdf
4. <http://www.europapress.es/andalucia/almeria-00350/noticia-superficie-invernaderos-crece-105-ultimos-cuatro-anos-llegar-29596-hectareas-20150213102204.html>
5. <https://sites.google.com/site/jdelavegal/fotosintesis>
6. http://www.dbbe.fcen.uba.ar/contenido/objetos/SeminarioFotosntesisFINAL_1379513656715149.pdf
7. http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/plasticos3.htm
8. <https://ec.europa.eu/eip/raw-materials/en/nature-commitments/1-substitution-indium-transparent-conductive-layers>
9. <https://www6.slac.stanford.edu/news/2015-08-12-microscopic-rake-doubles-efficiency-low-cost-solar-cells.aspx>
10. <http://www.coatema.de/en/maerkte/gedruckte-elektronik.html>
11. <http://plasticphotovoltaics.com/lc/lc-fabrication/lc-printing/lc-screen.html>
12. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
13. <http://www.energiasolar365.com/preguntas/que-inclinacion-deben-tener-las-placas-solares>
14. <http://www.europapress.es/andalucia/agro-00478/noticia-andalucia-cuenta-casi-44500-hectareas-cultivo-invernadero-espana-cerca-66000-20090211181821.html>
15. <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>
16. https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/informe_prov_hu_miea_2015_06_30.pdf
17. <http://www.europapress.es/andalucia/almeria-00350/noticia-superficie-invernaderos-crece-105-ultimos-cuatro-anos-llegar-29596-hectareas-20150213102204.html>
18. http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/invernaderos_raspa_amagado.htm
19. https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/dea_2010_web.pdf
20. <http://www.lavanguardia.com/vangdata/20150528/54431917403/hogares-espanoles-pagan-mas-luz-gas-europa.html>
21. <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>
22. <http://generaciondistribuida.blogspot.co.uk/2013/05/caida-historica-del-precio-de-la.html>

Anexo I

Comparación de propiedades de diferentes técnicas de revestimiento e impresión

Técnica	Tinta desperdiciada*	Velocidad*	Viscosidad de la tinta*	Grosor de la capa (micro m)	Compatible R2R
Spincoating	5	–	1	0–100	No
Doctor blade	2	–	1	0–100	Si
Casting	1	–	1	5–500	No
Spraying	3	1–4	2–3	1–500	Si
Knife-over-edge	1	2–4	3–5	20–700	Si
Meniscus	1	3–4	1–3	5–500	Si
Curtain	1	4–5	1–4	5–500	Si
Slide	1	3–5	1–3	25–250	Si
Slot-die	1	3–5	2–5	10–250	Si
Screen	1	1–4	3–5	10–500	Si
Ink jet	1	1–3	1	1–500	Si
Gravure	1	3–5	1–3	5–80	Si
Flexo	1	3–5	1–3	5–200	Si
Pad	1	1–2	1	5–250	Si

Tinta desperdiciada: 1 (nada), 2 (un poco), 3 (algo), 4 (considerable), 5 (significante)

Velocidad: 1 (muy lenta), 2 (lenta <1m/min), 3 (media 1-10 m/min) 4 (rápido 10-100m/min) 5(muy rápido100-1.000 m/min)

Viscosidad: 1(muy baja <10mPa.s), 2(baja 10-100mPa.s), 3(media 0,1-1Pa.s), 4 (alta 1-10 Pa.s), 5 (muy alta 10-100 Pa.s)

Fuente: [Krebs et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 2009 10.1016/j.solmat.2008.10.004](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004)

Anexo II

Valores de radiación incidente para diferentes inclinaciones orientadas al Sur en las provincias de Huelva y Almería.

Lugar: Palos de la Frontera, Huelva (latitud= 37,2°, longitud=-6,8° , Altura=51m)

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
Enero	77	86	94	102	110	116	122	127	131
Febrero	96	104	111	118	124	130	134	138	140
Marzo	153	162	170	177	183	188	191	194	195
Abril	176	181	185	188	190	191	190	189	186
Mayo	213	215	217	216	215	212	208	203	197
Junio	232	233	233	231	228	224	218	210	202
Julio	242	245	245	244	242	237	232	225	216
Agosto	218	223	227	229	229	229	227	223	218
Septiembre	162	169	175	180	185	187	189	190	189
Octubre	123	132	140	147	154	159	163	167	169
Noviembre	87	96	105	113	121	128	134	139	143
Diciembre	68	77	85	93	100	107	113	118	122
Anual	1844	1923	1988	2041	2081	2107	2121	2121	2109

Lugar: Campo de Dalías, Almería (latitud= 36,75°, longitud= -2,7° , Altura= 40m)

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
Enero	91	102	113	124	133	142	149	156	162
Febrero	103	112	120	127	134	140	145	149	152
Marzo	156	165	173	180	186	191	194	197	198
Abril	192	198	203	207	209	210	210	208	205
Mayo	223	226	227	227	226	223	219	213	207
Junio	237	237	237	235	231	226	221	213	205
Julio	241	243	243	242	239	235	230	223	215
Agosto	210	215	219	221	222	221	219	216	211
Septiembre	163	170	176	181	185	188	190	190	190
Octubre	128	138	147	155	162	167	172	176	179
Noviembre	97	108	119	129	138	146	153	159	164
Diciembre	81	91	101	111	120	128	135	141	146
Anual	1917	2005	2078	2138	2184	2217	2236	2242	2232

Fuente: Meteonorm 7.1.6