

## ENERGÍAS RENOVABLES EN LOS INVERNADEROS

*Manuel Pérez García y Jorge Antonio Sánchez Molina  
Universidad de Almería*

### RESUMEN

Los invernaderos son sistemas productivos caracterizados por un aprovechamiento intensivo y eficaz de los recursos primarios. De forma adicional y fuera de lo que son los procesos favorecidos por su propia configuración estructural como los relacionados con el acondicionamiento climático interior y la aportación de radiación fotosintéticamente activa a las plantas, es posible realizar en los mismos contribuciones relevantes de energía procedente de fuentes de tipo renovable, ayudando de esta manera a reducir la dependencia externa propia de las fuentes fósiles, a incrementar el valor añadido de la producción hortícola y, en contextos de intercambio de energía con las redes de distribución favorables, obtener un beneficio económico procedente bien de una tarifa bonificada o bien, y más deseable, de la reducción de aportaciones externas de energía. En este capítulo se realiza una revisión de las tecnologías renovables disponibles para su uso en los invernaderos y de las experiencias y expectativas planteadas en función de los distintos programas de implantación existentes.

### SUMMARY

*Greenhouses are productive systems characterized by an intensive and efficient use of primary resources. Additionally and out of what are the processes involved in its configuration and function related to indoor climate conditioning and the contribution of photosynthetically active radiation for plants, it can done important contributions of energy from renewable sources , thereby helping to reduce external dependence of fossil fuel, increasing the added value of horticultural production and, eventually, economic benefit of electricity selling. In this chapter we review the available renewable technologies suitable for their use in greenhouses and the experiences and expectations expressed in terms of the different existing implementation programs.*

## 1. Introducción

Las fuentes renovables de energía constituyen, en sus diversas modalidades y aplicaciones, una de las alternativas más abordables al actual modelo de transformación de energía primaria, caracterizado por su alto impacto ambiental y por el tamaño finito de las reservas de tipo convencional. El sol, el viento o la biomasa no fosilizada garantizan una aportación ilimitada y sostenible de energía que, si bien en términos económicos y funcionales aún precisa de algunos avances específicos, permite cubrir demandas completas o fracciones elevadas de las mismas en multitud de aplicaciones, así como está permitiendo contar en los últimos años con elevados porcentajes de participación eólica y solar en el mix de generación eléctrica nacional.

La agricultura es uno de los sectores con mayor potencial de utilización de este tipo de fuentes de energía y, en este sentido, son abundantes las experiencias en explotaciones agrícolas que acreditan un uso viable y eficaz de sistemas autónomos de electrificación y bombeo alimentados por energías renovables.

En el caso de de los invernaderos puede decirse, además, que estos en sí mismos constituyen dispositivos de transformación energética a partir una fuente renovable como es el sol; aunque hay que decir también que la existencia de cultivos en su interior hace que el tratamiento de flujos de masa y energía deba ser mucho más sofisticado que en el de un colector solar térmico, Boulard y Baille (1987); Abdel-Ghany y Al-Helal (2010). Esta analogía de partida, junto con el condicionante genérico en este tipo de explotaciones de optimización de consumos -agua, energía, materiales,...- actúa a favor de la implantación de fuentes renovables en mayor medida que en otros entornos productivos.

Con todo, a la hora de plantearse cualquier proyecto de integración de fuentes renovables en invernaderos debe partirse de las siguientes consideraciones:

- La condición de mínima interferencia de los sistemas renovables instalados en los ciclos productivos propios de los invernaderos.
- La asunción de un modo de operación en consumo autónomo (térmico y/o eléctrico) o un modo de operación en inyección a la red preexistente.

La primera consideración aparece debido a que la naturaleza dispersa de algunos recursos renovables, especialmente en el caso de la radiación solar, exige en algunos casos que las superficies de captación de los dispositivos de transformación puedan alcanzar valores significativos y provocar una reducción del área disponible para cultivos, bien por ocupación directa de espacio de la explotación o bien por el incremento de las áreas sombreadas en el interior del invernadero.

En el segundo caso, se trata de adecuar la función de la instalación de producción de energías renovables a las necesidades concretas del invernadero. Para ello se debe partir de un conocimiento exhaustivo de la demanda eléctrica y térmica de cada explotación, cuestión ésta difícilmente sistematizable dada la enorme variedad de estructuras, equipamientos, condiciones climáticas, ciclos de producción y necesidades de los cultivos existentes. Con todo, la asignación de costos anuales medios de explotación de los invernaderos en Almería correspondientes a la energía, aunque gradualmente creciente en los últimos años y a la expectativa de los nuevos precios determinados por el agotamiento de las fuentes convencionales, es en los últimos años de sólo un 2 %, frente a otros costes como los de mano de obra y semillas, que se llevan el 40 % y el 8 % respectivamente (Cabrera *et al.*, 2010). Esta circunstancia determina que los proyectos de energías renovables en invernaderos en condiciones de autoconsumo, de acuerdo a los costes de inversión actuales, sólo sean considerados hasta la fecha en explotaciones aisladas sin acceso técnico o económicamente viable a las redes de distribución convencionales, situación muy poco habitual, o en explotaciones caracterizadas por altas demandas, especialmente térmicas<sup>1</sup>, en las que los flujos de caja negativos asociados a los consumos de combustible convencional puedan verse compensados por la amortización de la instalación de sistemas renovables.

Al contrario que en el modo de autoconsumo, la inyección a red no tiene que partir de una demanda previa a cubrir con la energía, normalmente eléctrica, producida por la instalación renovable sino que se trata de realizar una aportación directa a la red de distribución preexistente. Esta aportación, deducida la parte consumida por los sistemas internos del invernadero y adecuadamente contabilizada, podría admitir una tarificación bonificada que supondría un ingreso adicional para la explotación agrícola. Este esquema es el que ha propiciado el impulso a las grandes plantas de producción eólicas, fotovoltaicas y termosolares existentes en nuestro país y en otros de nuestro

<sup>1</sup> No existe a la fecha actual capacidades para el almacenamiento masivo de electricidad y, por lo tanto, las instalaciones renovables de generación eléctrica en autoconsumo están sujetas a la disponibilidad de viento o radiación solar.

entorno y es el que subyace, por ejemplo, en los proyectos de cogeneración a gas natural en los invernaderos que vierten a la red, a un precio de 14,5 c€/kWh para potencias instaladas de menos de 500 KWe y de 12 c€/KWh para potencias instaladas de entre 500 KWe y 1.000 KWe<sup>2</sup>.

Es esperable sin embargo que esta tarifa de inyección a red bonificada, creada por normativa<sup>3</sup> para favorecer la implantación y el desarrollo de las distintas tecnologías renovables o energéticamente eficientes, como es el caso de la cogeneración, se vaya aplicando de forma cada vez más selectiva y vaya sufriendo ajustes para, finalmente, desaparecer o ser considerada exclusivamente en instalaciones inequívocamente innovadoras, Haas *et al.* (2011). Esta circunstancia debe ser tenida en cuenta por lo tanto en la implantación de proyectos de energías renovables en invernaderos cuya justificación tenga una base preponderantemente financiera.

Por el contrario, en un escenario de tecnologías maduras y precios altos de las fuentes convencionales, las energías renovables en los invernaderos presentan un gran potencial desde un punto de vista de integración en sistemas inteligentes de distribución (Chicco y Mancarella, 2009) en los que ya no solo se deben de tener en cuenta los consumos propios sino la sincronía de operación con el resto de infraestructuras colindantes (almacenes, centros de manipulado, industrias auxiliares,...). Este potencial queda corroborado, en el caso de la provincia de Almería, por el peso del consumo eléctrico del sector agrícola que en el año 2009 fue el 12,6 % del consumo total, frente al 4 % que supuso el mismo sector para el resto de provincias andaluzas (Figura 1).

De forma suplementaria a la generación térmica y eléctrica, las energías renovables presentan un gran interés para el sector de los invernaderos a través de aprovechamientos indirectos, que pueden dividirse en dos modalidades:

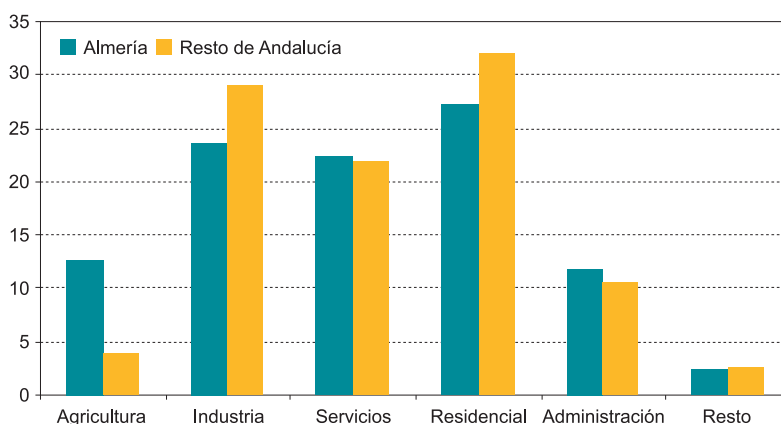
- a) Mecanismos de optimización a través de almacenamiento térmico<sup>4</sup> en sus tres modalidades: almacenamiento en medios convencionales (agua, grava,...), almacenamiento en el terreno y almacenamiento en medios avanzados, especialmente en materiales en cambios de fase (PCM). El almacenamiento

<sup>2</sup> Tarifa segundo trimestre de 2011.

<sup>3</sup> Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

<sup>4</sup> International Energy Agency. ECES Energy Conservation through Energy Storage Program. Thermal Energy Storage Applications in Closed Greenhouses Sub-program (Annex 22).

**Figura 1: Porcentaje sobre el consumo total de electricidad para distintos sectores para la provincia de Almería y para el resto de Andalucía** AGR: Agricultura, IND: Industria, SERV: Comercio-Servicios, RES: Sector Residencial, ADM: Administración y Servicios públicos y REST: Resto de consumos



Fuente: Instituto Estadístico de Andalucía, año 2009.

térmico debe ser considerado, independientemente del aprovechamiento o no de fuentes renovables, como uno de los pilares de cualquier proyecto de eficiencia energética en invernaderos (Valera *et al.*, 2008).

- b) Uso de las energías renovables en el tratamiento de agua (Blanco *et al.*, 2009), que, a su vez, admite tres sub-modalidades: desalación, tanto por destilación térmica (integrada, García Mari *et al.*, 2007), o anexa en el invernadero) como por membrana, desinfección y regeneración de efluentes.

Existen de hecho experiencias como el invernadero Watergy (Zaragoza *et al.*, 2007), construido y ensayado en la Estación experimental de Cajamar que combinan de forma eficiente diversos de los conceptos mencionados (Figura 2). También son mencionables otros prototipos y conceptos como los de los



**Figura 2: Prototipo watergy instalado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar (Almería)**

proyectos "inversos", "cenit-mediodía" o "euphoros" en las que, de nuevo, se integran mecanismos de aprovechamiento de la radiación solar, almacenamiento de calor y dispositivos de acondicionamiento innovadores que demuestran la viabilidad funcional de los sistemas renovables en los invernaderos y, especialmente, su contribución a la mejora de la propia producción hortícola<sup>5,6</sup>.

## 2. Tecnologías renovables aplicables a los invernaderos

Las energías renovables abarcan un amplio abanico de tecnologías cuyo nexo común es el uso de fuentes primarias de carácter permanente y origen natural que, aún contando con un gran potencial, se presentan de forma dispersa en el espacio y, en algunos casos cuando la fuente tiene una naturaleza climática, como el sol o el viento, está sujeta tanto a ciclos naturales como a eventos impredecibles que condicionan su uso continuo y estable. Por el contrario, las fuentes convencionales de origen fósil permiten un aprovechamiento intensivo de las centrales de transformación a costa, sin embargo, de un fuerte impacto ambiental y del agotamiento de los yacimientos.

En una primera aproximación, es posible identificar como aplicables a los invernaderos las siguientes tecnologías renovables.

- Energía solar térmica de baja temperatura.
- Energía solar fotovoltaica.
- Energía de la biomasa.

Existen otras energías renovables como la energía micro y mini-eólica<sup>7</sup> y la geotérmica<sup>8</sup>, ambas de alto potencial y cuyo aprovechamiento en invernaderos no requiere, en principio, un tratamiento diferenciado ya que podrían ser aplicadas siempre que existiesen los recursos climáticos o geológicos adecuados, independientemente de la integración estructural o no de los sistemas.

<sup>5</sup> [www.cenitmediodia.com](http://www.cenitmediodia.com)

<sup>6</sup> [www.euphoros.wur.nl](http://www.euphoros.wur.nl)

<sup>7</sup> Micro eólica: P<1 KW, Minieólica: P<100 KW.

<sup>8</sup> Especialmente la denominada energía geotérmica somera o de baja entalpía.

## 2.1. Energía solar térmica de baja temperatura

Como se ha dicho, la analogía entre un invernadero y un colector solar aunque no estricta, resulta de gran utilidad a la hora de justificar el potencial de aprovechamiento de las energías renovables en este sector. De hecho, durante los años 80, a raíz de la primera gran crisis del petróleo, se realizaron multitud de experiencias en Europa (Von Zalbetitz, 1987), con el fin de evaluar distintas configuraciones de captadores solares aplicables a invernaderos, distinguiéndose entonces básicamente las siguientes tres modalidades:

- a) Captadores térmicos externos al invernadero.
- b) Captadores térmicos integrados en la cubierta del invernadero.
- c) Utilización del invernadero como captador solar.

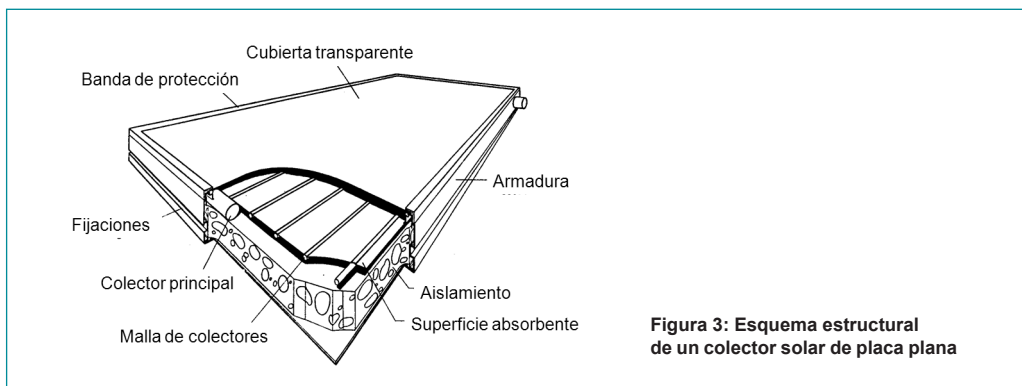
En los dos primeros casos, el punto de partida fueron tanto captadores planos convencionales como desarrollos específicos de bajo costo de caucho EPDM y captadores de aluminio de tipo Roll-Bond, Montero *et al.* (1985). Experiencias posteriores han corroborado el potencial, ampliándose incluso las opciones de captadores de bajo costo por el uso placas de polietileno alveolar transparente en el interior del propio invernadero (Bargach *et al.*, 2004), o sistemas de calentamiento de aire constituidos por revestimientos plásticos sobre lechos absorbentes de arena situados sobre el terreno (Ghosal *et al.*, 2005).

Independientemente de su emplazamiento, materiales o configuración, la capacidad de generación térmica de un captador solar va a estar determinada por su curva característica, que relaciona el rendimiento del captador,  $h$ , definido como el calor útil producido  $Q_u$  (W) dividido por la energía solar incidente, igual a la irradiancia solar global  $G$  (W/m<sup>2</sup>) por la superficie del captador,  $S$  (m<sup>2</sup>), con parámetros característicos  $a$  y  $b$  obtenidos de acuerdo a ensayos normalizados y con las condiciones de funcionamiento:  $T_a$  temperatura ambiente,  $T_{fe}$  temperatura del fluido a la entrada del captador.

$$\eta = \frac{Q_u}{GS} = F_R \bar{\tau} \bar{\alpha} - U_L F_R \left( \frac{T_{fe} - T_a}{G} \right) = a - b \left( \frac{T_{fe} - T_a}{G} \right)$$

De la expresión de la curva se deduce la existencia de un término fijo en el rendimiento relacionado con las características de absorción solar del captador y un término variable de pérdidas que se incrementa para valores de aislamiento reducidos ( $U_L$  altos) o para mayores temperaturas de operación. Así, por ejemplo, los colectores de bajo costo lo son en función de la no utilización de cubiertas transparentes o cubiertas poco aislantes lo que determina una operación óptima a bajas temperaturas, pero pérdidas de rendimiento importantes cuando dichas temperaturas se hacen mayores.

Los colectores de placa plana convencionales, cuya estructura puede apreciarse en la figura 3, cuentan con valores de  $a$  que oscilan entre 0,7 y 0,8 y valores de  $b$  que oscilan entre 4 y 7  $W/K \cdot m^2$ .



Los colectores de tubo de vacío, captadores avanzados en los que el absorbente en lugar de ocupar una cavidad rectangular se coloca en un tubo de cristal que se ha sometido al vacío para mejorar su aislamiento, cuentan con peor rendimiento óptico pero sin embargo presentan valores de  $b$  más elevados y, por lo tanto, mejores rendimientos energéticos a temperaturas más elevadas. A grosso modo puede plantearse como rangos térmicos con rendimientos aceptables, dependiendo de la demanda, del orden de 35-45 °C para colectores sin cubierta, de 40 a 80 °C para colectores planos convencionales y a partir de 70 °C para tubos de vacío.

Es precisamente este factor de rendimiento el principal elemento limitador de aplicación de esta tecnología en los invernaderos ya que en aplicaciones en calefacción, los valores de radiación disponible en invierno combinados con las pérdidas propias



del proceso de conversión determinan que las superficies de captación necesarias para la generación de fracciones de cobertura solar elevadas conlleven una ocupación del terreno considerables.

Este factor limitante para la implantación de sistemas solares térmicos en los invernaderos puede solventarse en las siguientes circunstancias:

- a) A través del aprovechamiento solar en los meses de máxima disponibilidad en la generación de frío mediante máquinas de absorción, (Sethi y Sharma, 2007).
- b) A través de planteamientos integrados que incluyan centralizaciones y redes de distribución térmica en las que pueden tener cabida otro tipo de fuentes no estrictamente solares (biomasa, calores residuales de industrias auxiliares,...) y que incluyan mecanismos de almacenamiento estacional como los que ya existen para algunos entornos urbanos (Pinel *et al.*, 2011).

En los invernaderos, junto a las modalidades de captación solar mencionadas, se han identificado siguientes modalidades de almacenamiento térmico según Sethi y Sharma (2008), todas ellas orientadas a combatir el ciclo térmico diario gracias al excedente de energía obtenido durante las horas de sol:

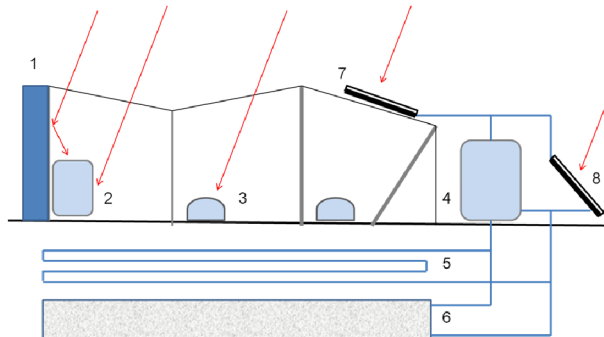
- a) Bolsas/tubos de plástico.
- b) Depósitos rígidos en el interior del invernadero.
- c) Tanques de almacenamiento convencionales exteriores.
- d) Almacenamiento en lecho de roca (grava, guijarros, hormigón,..).
- e) Almacenamiento en el terreno.
- f) Almacenamiento en materiales de cambio de fase.

Después de una primeras experiencias en Almería con bolsas de PE negro (Castilla *et al.*, 1985), experiencias posteriores (Montero, 1992), con tubos de polietileno transparente de 250 mm con un porcentaje de suelo cubierto entre el 30 y el 40 % y

agua acumulada a razón de 70-100 l/m<sup>2</sup> de suelo de invernadero demostraron un rendimiento de captación solar entre el 30 y el 50 % a precios aproximados de de 0,20 €/m<sup>2</sup> consiguiéndose incrementos medios de las temperaturas mínimas de hasta 3 °C y en días muy favorables de hasta 5 °C. A pesar de ser considerado como un buen sistema antiheladas, la alta ocupación del suelo interior de los invernaderos que supone la utilización de estos sistemas limita su aplicación por las dificultades introducidas en labores como la recogida, la aplicación de fitosanitarios, etc.



**Figura 4: Almacenamiento sensible en bolsas de PE negras utilizadas como captadores solares**



**Figura 5: Esquemas de acoplamiento captador solar/almacenamiento térmico en invernaderos.**

**1:** Acumulación en muro norte, **2:** acumulación depósitos interiores (agua/PCM), **3:** acumulación bolsas/tubos PE, **4:** acumulación depósito convencional exterior, **5:** acumulación en terreno por distribución con agua, **6:** acumulación en lecho de roca, **7:** captador solar integrado y **8:** captador solar externo

## 2.2. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es, dentro de las energías renovables, la de mayor potencial de integración estructural en los invernaderos. Esto es así porque desarrollos recientes de módulos permiten contar con soluciones acoplables a cubiertas tanto desde el punto de vista de peso y flexibilidad como desde el punto de vista de transparencia. La cuestión clave, al igual que en el caso anterior, se trata de que la disposición espacial de estos elementos garantice una producción ajustada a la demanda programada, tanto en autoconsumo como en inyección a red y, a la vez, no altere la calidad de los frutos y la productividad del invernadero.

Aunque existe mucha experiencia sobre la influencia del sombreado de la cubierta de los invernaderos en los cultivos (Callejón-Ferre *et al.*, 2009; López *et al.*, 2008; Kittas *et al.*, 2003; Baille *et al.*, 2008), la misma está asociada a la utilización de mallas de sombreado o al encalado del plástico que son operaciones de carácter estacional que no sirven de referencia en el caso de los módulos fotovoltaicos que, una vez instalados, deben permanecer fijos en la estructura el mayor tiempo posible.

A efectos descriptivos, podemos considerar un módulo fotovoltaico como un generador eléctrico cuya producción se encuentra directamente relacionada con la cantidad de radiación solar que incide sobre el mismo. Esta cantidad de electricidad va a tener también, aunque en menor medida y según el tipo de módulos, una variabilidad en función de la temperatura. El parámetro que nos va a determinar esta capacidad de producción es el rendimiento del módulo que definiremos de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{FV}}{GS}$$

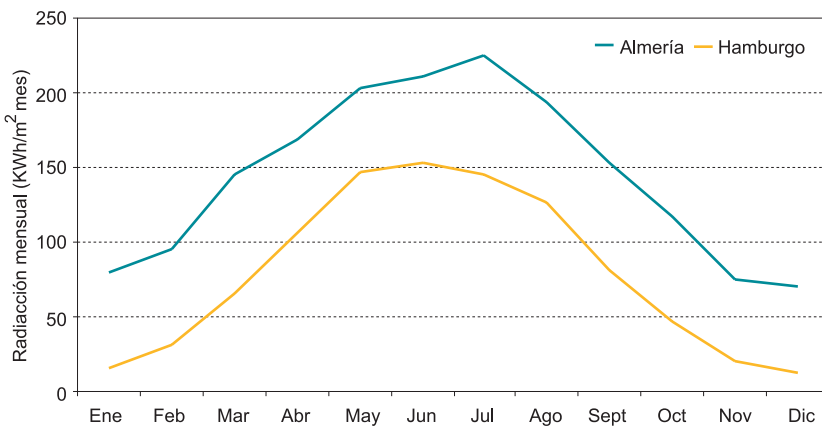
En esta expresión,  $P_{FV}$  (W) es la potencia eléctrica aportada por el módulo o célula fotovoltaica,  $S$  es la superficie del mismo ( $m^2$ ) e  $G$  la irradiancia solar incidente ( $W/m^2$ ). Esta expresión admite lógicamente integraciones temporales en energía pasándose del rendimiento instantáneo al rendimiento diario, mensual, etc. Los rendimientos de conversión varían en un amplio margen en función de la tecnología de los módulos, aunque se pueden plantear dos horquillas para las tecnologías con mayor potencial de implantación en los invernaderos, entre [4-12 %] para módulos de lámina delgada y [10-20 %] para módulos de silicio cristalino.

El valor de G es crucial junto con el valor del rendimiento del módulo para valorar la producción eléctrica. Este valor, tanto en términos instantáneos como en términos integrados en  $\text{KWh/m}^2\text{día}$  se obtiene a partir de bases de datos o de medidas experimentales y forma parte del potencial climático propio de cada emplazamiento (Figura 6).

Sobre la base de este valor climático, es necesario realizar una proyección a la inclinación y orientación, normalmente sur, de la superficie de los módulos sobre las que ya se pueden incluir condicionantes específicos como una mayor producción en los meses de verano, por lo que las inclinaciones deberán ser algo inferiores a la latitud del emplazamiento, una mayor producción en invierno, con inclinaciones mayores que la latitud y una producción uniforme y máxima acumulada anual que exige inclinaciones próximas a la latitud del lugar.

El efecto térmico está muy vinculado al tipo de célula, de tal manera que en los módulos de silicio cristalino la potencia disminuye aproximadamente un 4 % por cada  $10^\circ\text{C}$  de aumento de la temperatura con relación a la temperatura que alcanza la célula en las condiciones estándar de ensayo. En el caso de los módulos de lámina delgada, este efecto de reducción de rendimiento por incremento de temperatura es menos relevante, con valores en el orden del 2 %.

**Figura 6. Radiación global mensual tipo para una superficie horizontal en Almería y Hamburgo**



Fuente: Meteonorm v.5.1.

Los distintos procedimientos de fabricación y materiales empleados determinan los distintos tipos de células pudiendo distinguirse entre tecnologías de silicio cristalino, obtenidas por diversos procesos de agregación sólida a partir de silicio fundido de alta pureza y células de lámina delgada obtenidas por deposición de vapor de silicio u otros materiales fotovoltaicos (TeCd,CIGS,..) sobre sustratos específicos (cristal, láminas metálicas o plásticas,...) Mientras en el primer caso se obtienen obleas compactas de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup> y unos 300 mm de espesor, en el segundo se obtienen láminas fotovoltaicas de no más de 10 mm de espesor con formas, conformación y sustratos adaptables y menor precio (Hegedus, 2006). Los rendimientos en el primer caso son mayores, como se ha dicho, pero en el segundo caso puede contarse con módulos más ligeros, flexibles o semitransparentes, de gran interés para su integración en las cubiertas de los invernaderos (Tabla 1). Existen alternativas recientes con materiales fotovoltaicos orgánicos y materiales sensibilizados por colorante (Huang *et al.*, 2010) que constituyen los denominados módulos de 3<sup>a</sup> generación que presentan propiedades interesantes de transparencia, peso y, especialmente de costo. Pero, además de un rendimiento reducido, cuentan con problemas de estabilidad que hacen que esta tecnología no sea equiparable, hasta la fecha, con la lámina delgada.

**Tabla 1. Resumen de características de módulos cristalinos y de lámina delgada sobre sustrato plástico**

Tecnología	$\mu$ Módulo	Peso de células	Peso de módulos	Producción
Silicio Cristalino	10-20 %	1.200-1.500 gr/m <sup>2</sup>	10-20 Kgr/m <sup>2</sup>	150 Wp/m <sup>2</sup>
Lámina delgada	4-12 %	4-5 gr/m <sup>2</sup>	0,5-4 Kgr/m <sup>2</sup>	100 Wp/m <sup>2</sup>

Fuente: European Photovoltaic Industry Association (EPIA).

Los módulos comerciales están constituidos por células fotovoltaicas convenientemente conectadas entre sí, encapsuladas y protegidas contra la intemperie por diversos recubrimientos de acuerdo a la configuración final adoptada por el fabricante. Estos conexiones y recubrimientos reducen los rendimientos correspondientes a las células pero, por otro lado, garantizan un funcionamiento óptimo de las mismas para períodos superiores a los 20 años. Las tensiones nominales de los módulos oscilan entre los 10 y los 50 V en la mayor parte de los casos y las intensidades pueden llegar hasta los 20 A en condiciones de máxima incidencia de radiación solar. Cada instalación alojará la combinación serie/paralelo más conveniente de acuerdo a la carga a la que se dirija la electricidad producida por los módulos. Si se trata de una instalación autónoma tendremos que considerar la existencia de una batería electro-química, un regulador

de carga y los convertidores a tensión continua o alterna requeridos por los elementos (bombas, motores, lámparas,...) a los que la instalación esté conectada. En el caso de una instalación conectada a red, el único elemento a considerar es el denominado inversor que no es otra cosa que un convertidor de corriente continua a corriente alterna con capacidad para sincronizarse en frecuencia y tensión con la red pre-existente sobre la que se inyecta la carga procedente de los módulos fotovoltaicos.

En cuanto las opciones de transparencia de las instalaciones, distinguiremos entre las siguientes opciones:

- Módulos opacos completos, tanto flexibles como rígidos, dispuestos en las cubiertas para minimizar los efectos de sombreo sobre el cultivo. En este caso hay dos opciones de emplazamiento, el alineamiento al tresbolillo o la cobertura de áreas inactivas como pasillos o zonas perimetrales.
- Módulos de células opacas discontinuas, constituidos por células individuales entre dos cubiertas transparentes, normalmente vidrio/vidrio. La disposición y separación de las células habilita distintos niveles de transparencia (Figura 7).
- Módulos semitransparentes, constituidos por células de lámina delgada continuas sometidas a procesos de texturización láser que producen una malla de alta densidad de aperturas puntuales o lineales sobre la célula que permiten el paso de la luz a través de ella. La densidad de malla determina la transparencia del módulo (Figura 8).



**Figura 7. Configuración de módulos semitransparentes a partir de células opacas**



Figura 8. Módulos semitransparentes continuos de lámina delgada (SOLIKER-UNISOLAR)

La literatura especializada recoge algunos ejemplos de invernaderos equipados con módulos fotovoltaicos en aplicaciones autónomas para alimentar sistemas de ventilación (Janjai *et al.*, 2009; Yano *et al.*, 2007; Nayak y Tiwari, 2008) o de módulos en sistemas combinados incluyendo captadores térmicos y bombas de calor geotérmicas (Ozgener y Hepbasli, 2007; Nayak y Tiwari, 2009). Además de almacenamiento eléctrico en baterías, también se han estudiado en invernaderos opciones como electrolizadores combinados con pilas de combustible (Ganguly *et al.*, 2010). En términos generales, las aplicaciones anteriores no han precisado de la integración estructural de los módulos y por lo tanto no ha existido afectación al cultivo.

Rocamora y Tripanagnostopoulos (2006) han propuesto un esquema de integración basado en un tipo de módulos fotovoltaicos híbridos que contienen en su parte posterior un entramado que permite la circulación de agua y su posterior calentamiento, cuestión ésta que beneficia también el funcionamiento fotovoltaico ya que se reduce la temperatura de la célula (Figura 9). Sobre una demanda máxima de electricidad de un invernadero piloto en Cartagena estimada en 1,73 kWh/m<sup>2</sup> en enero y 0,25 kWh/m<sup>2</sup> en agosto. Los cálculos realizados para una ocupación del 5 % de la superficie de cubierta determinan que la producción de electricidad excede en un 12 % el consumo propio del invernadero.

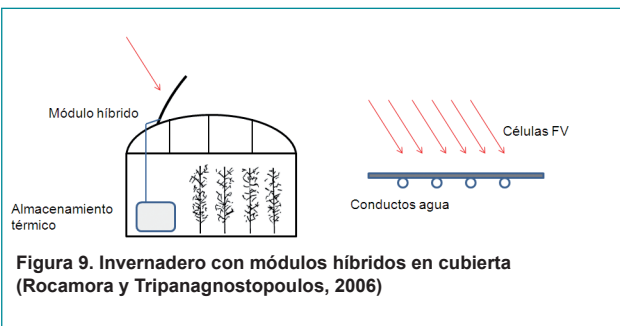


Figura 9. Invernadero con módulos híbridos en cubierta (Rocamora y Tripanagnostopoulos, 2006)

Yano *et al.* (2010) han estudiado la distribución espacial de radiación en el interior de un invernadero orientado este-oeste de cubierta curva y 12,9 % de ocupación de la misma en la ciudad de Matsue en Japón. En el trabajo también se valoró la producción eléctrica de dos configuraciones de módulos, en ambos casos situados en el interior del invernadero: un alineamiento continuo y un alineamiento al tres bolillo de 30 módulos flexibles de 90x46 cm<sup>2</sup> cada uno (Figura 10). Los resultados demuestran una distribución de radiación interior más uniforme en el alineamiento al tres bolillo. La estimación de la producción fotovoltaica anual fue del orden 8 kWh/m<sup>2</sup>

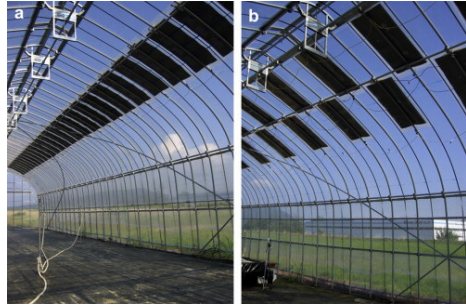
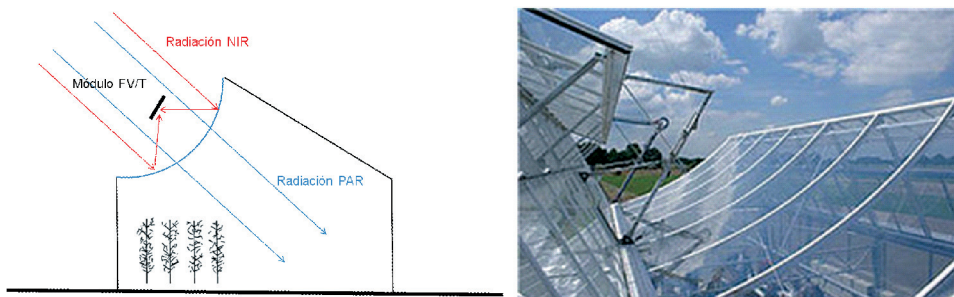


Figura 10: Invernadero con módulos flexibles en disposición lineal (a) y en disposición al tres bolillo (b), Yano *et al.* (2010)

Sonneveld *et al.* (2010) han diseñado y ensayado un nuevo tipo de invernadero, invernadero ELKAS, que utiliza una cubierta curva como superficie reflectante de la radiación solar en el infrarrojo cercano (NIR) hacia un módulo híbrido como el mencionado anteriormente. Además de la generación de calor y electricidad, este diseño reduce el área de sombreado ya que por efecto de la concentración, del orden de x30, se obtienen flujos energéticos más elevados sobre el módulo y por lo tanto no se hace necesaria una mayor ocupación. La producción eléctrica anual de este invernadero está en el orden de 20 kWh/m<sup>2</sup> y la producción térmica es de 576 MJ/m<sup>2</sup>.

Figura 11. Invernadero ELKAS (Sonneveld *et al.*, 2010)





De forma suplementaria, Sonneveld *et al.* (2011) también han propuesto y ensayado la integración en la cubierta del invernadero de concentradores transparentes tipo Fresnel sobre módulos híbridos termo-fotovoltaicos. El redireccionamiento de la radiación procedente del disco solar bloquea la entrada en verano del 75 % de la aportación solar al interior del invernadero reduciendo su carga de refrigeración en un factor 4. El factor de concentración en este prototipo es de x25, siendo la producción eléctrica de 29 kWh/m<sup>2</sup> y la producción térmica de 518 MJ/m<sup>2</sup>, lo que de acuerdo a los autores del estudio supone que el sistema podría hacer frente a la demanda energética completa de un invernadero bien aislado en el norte de Europa.

En Almería, experiencias realizadas en la finca experimental UAL-ANECOOP con 24 módulos de lámina delgada flexibles opacos de 300x40 cm<sup>2</sup> dispuestos al tres bolillo y cubriendo un 10 % sobre la cubierta del invernadero piloto, (Pérez *et al.*, 2010) obtuvieron una producción de 8,25 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 12. Principio de funcionamiento de un invernadero con concentrador lineal Fresnel (Sonneveld *et al.*, 2011) e invernadero Technokas, EZ Idea Solution**



### 2.3. Energía de la biomasa

El empleo de la biomasa como fuente de energía ha experimentado un importante desarrollo en los últimos años, debido a las diferentes iniciativas puestas en marcha desde organismos e instituciones en política de energías renovables. El aprovechamiento energético de la biomasa tiene como principal ventaja respecto a los combustibles fósiles, el presentar un ciclo neutro de CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, no contribuir al efecto invernadero atmosférico (Werther *et al.*, 2000). Otras ventajas son la menor emisión de partículas y gases contaminantes como CO, HC y NO<sub>x</sub> (IDAE, 2007). En el caso de los invernaderos,

deros, el uso de la biomasa tiene el valor añadido de que pueden llegar a obtenerse balances negativos de CO<sub>2</sub> por la reutilización de las emisiones de la combustión en el enriquecimiento carbónico de los cultivos.

El PANER, Plan de Energías Renovables 2011-2020 destaca el aprovechamiento energético de la biomasa como una de sus prioridades y realiza una primera valoración de estado a la que es esperable que se incorpore de forma específica la biomasa vinculada a la agricultura intensiva.

En general, el empleo de los residuos vegetales como fuente de energía presenta una serie de problemas prácticos relacionados con la baja densidad, que da lugar a altos costes de transporte y almacenamiento, y con el alto contenido de humedad, que favorece la degradación biológica y dificulta el control de procesos. Por estas razones, la masa vegetal no se puede utilizar directamente como combustible. Es necesario someterla a algún proceso de transformación. Los más empleados son la pirolisis, la gasificación y la densificación.

Durante la densificación, la masa vegetal es sometida a elevadas presiones para obtener elementos con una mayor densidad volumétrica y energética, más fáciles de almacenar y transportar, además de ser elementos más homogéneos en características y propiedades, más limpios y mucho más fáciles de manejar (Werther *et al.*, 2000, Ortiz *et al.*, 2003). Las técnicas de densificación más empleadas son el briquetado y el pelletizado.

Las briquetas y los pellets presentan unos valores similares en cuanto a poder calorífico, humedad y propiedades químicas. La principal diferencia está en el tamaño y en la densidad. Los pellets son elementos cilíndricos con un diámetro comprendido entre 6 y 8 mm y longitudes entre 6 y 12 mm, con una elevada densidad. Las briquetas son elementos, normalmente cilíndricos de mayor tamaño que los pellets (diámetros comprendidos entre 5 y 10 cm y longitudes entre 15 y 50) y menor densidad. Los pellets presentan ciertas ventajas sobre las briquetas. Al tener menor tamaño que las briquetas su movimiento puede automatizarse, y ocupan menos espacio en el transporte y en almacenaje pues su densidad es, como mínimo, dos veces mayor.

Actualmente la mayor parte de elementos densificados son pellets realizados con restos forestales (serrín, virutas de madera,...). Sin embargo, el incremento de la demanda de elementos densificados ha dado lugar a que, en países como Dinamarca

y Noruega, se haya alcanzado el límite de producción. Esta situación, unida a la importancia que tiene la agricultura en algunos, ha originado que se estudie el potencial que presentan los residuos agrícolas como materias primas para la fabricación de elementos densificados, fundamentalmente pellets (agri-pellets, Figure 13).

La utilización de los residuos agrícolas presenta algunos problemas como son: el origen muy diverso: tallos de algodón (Abasaed, 1992), residuos de trigo mezclados con papel (Demirbaş, 1998), residuos de té (Demirbaş, 1999), restos de olivo Yaman (2000), cardo “*Cynara cardunculus L.*” (Alonso, 2004), esparto (Debdoubi, 2005), caña de azúcar (Erich, 2005), cáscara de arroz (Maiti *et al.*, 2006); su contaminación con productos tóxicos procedentes de los tratamientos fitosanitarios realizados durante el desarrollo del cultivo (Callejón-Ferre, 2011), se han cuantificado niveles elevados de hasta 70 sustancias tóxicas en residuos vegetales de cultivos de judía, sandía y melón (Garrido-Frenich, 2003); la elevada dispersión encarece el transporte y, la generación de residuos no se genera de forma homogénea durante todo el año, tiene sus picos a finales de las diferentes campañas agrícolas.

En general, de los diferentes estudios realizados con agri-pellets se desprende que presentan una mayor friabilidad (facilidad de desmenuzamiento) y un poder calorífico ligeramente inferior a los wood-pellets (Tabla 2, Tabla 3).



Figura 13. Diferentes presentaciones de los residuos vegetales utilizados en las calderas de biomasa; de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, cáscara de almendra, Hueso de aceituna triturado, agri-pellets de tomate de invernadero y pellets de restos de pino

Tabla 2. Poder calorífico de algunas biomasas, Valera (2008)

Tipo de biomasa	PCI <sup>1</sup> (Kcal/kg)
Pellets de madera	>4.000
Hueso de aceituna	> 3.800
Cáscara de almendra	>3.700
Orujo de uva seco	>3.800
Astillas de madera	~1.600- 3.300

**Tabla 3. Poder calorífico de biomásas procedentes de residuos de invernadero (Callejón-Ferre, 2011)**

Tipo de biomasa	PCI (Kcal/kg)
Cucurbita pepo L.	3.570
Cucumis sativos L.	3.500
Solanum melongena L.	4.590
Solanum lycopersicum L.	4.120
Phaseolus vulgaris L.	4.730
Capsicum annum L.	4.240
Citrillus vulgaris Schrad.	3.960
Cucumis melo L.	3.750

Además la combustión de los agri-pellets, respecto a la de los wood-pellets, origina una mayor emisión de partículas, mayor generación de residuos y problemas de corrosión, debido a que presentan un mayor contenido de nitrógeno (N), azufre (S), cloro (Cl) y potasio (K) que los residuos forestales. No obstante, estos problemas pueden solucionarse utilizando tecnologías de filtrado de gases, calderas de combustión apropiadas, y en cualquier caso, son menores que los originados por los combustibles fósiles (Pastre, 2002).

En el mercado en la actualidad existen un elevado número de calderas de biomasa, cada una de ellas está definida para uno o varios tipos de biomasa, de tal forma que cuando se utiliza otra biomasa diferentes y con condiciones distintas el rendimiento energético de la caldera baja, pudiendo aparecer problemas debido a las cenizas. Es importante elegir bien el tipo de caldera atendiendo al tipo de biomasa que se va a utilizar, así como la potencia de calefacción requerida por el sistema en función de las condiciones de entorno y el salto térmico deseado.

Durante el funcionamiento de la caldera se van a generar una serie de subproductos, entre estos se encuentran los gases generados en la combustión. Estos gases tienen como característica una alta concentración de CO<sub>2</sub> y un bajo contenido de residuos, lo que facilitaría su utilización para el enriquecimiento carbónico de los cultivos de invernadero, como se ha comentado con anterioridad. Por lo tanto, una caldera de biomasa debería ser capaz de generar el calor necesario para la calefacción del invernadero y a su vez generar los gases de combustión suficientes para el enriquecimiento carbónico durante el periodo iluminado.

Este enriquecimiento es importante en los países de clima templado donde, en ausencia de otros métodos de refrigeración, el control de la temperatura se realiza mediante el intercambio convectivo de aire entre el exterior y el interior del invernadero (exterior normalmente más frío) (Kläring, 2007; Rodríguez, 2002), que se produce a través de las ventanas y afecta también a otras variables como, por ejemplo, la concentración de  $\text{CO}_2$ . Este control puede provocar decrementos en la concentración de  $\text{CO}_2$  del 20 % respecto a la exterior, (Lorenzo, 1990), aun cuando las ventanas permanecen abiertas, especialmente cuando la velocidad del viento es baja, lo que va repercutir en un descenso en la tasa de fotosíntesis (Rodríguez, 2002). Por otra parte, diversos autores han mostrado que aumentando la concentración en el interior del invernadero también aumenta la producción (Sánchez, 2009; Hao, 2008; Edwards, 2008; Tremblary, 1998; Schmidt, 2009; Nederhoff, 1990; Portree, 1996; Zabri, 1998; Sánchez-Guerrero, 2005) y, se reduce el consumo de agua (Sánchez-Guerrero, 2005).

La instalación de un sistema de calefacción (Figura 14) mediante biomasa consta de los siguientes elementos: depósito de almacenamiento de la biomasa, cámara de combustión transporte, caldera (vapor, agua caliente, aceite térmico), equipo de transporte y dosificación de la biomasa desde el depósito a la cámara de combustión, recuperadores auxiliares de calor, depuración de gases, extracción de cenizas (en la caldera de biomasa las cenizas se han de retirar periódicamente) y equipo recuperación de gases para el enriquecimiento carbónico (en el caso de utilizarse).

**Figura 14. Sistema de calefacción por combustión de biomasa instalado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar**



**Figura 14a. Quemador de biomasa con todos los elementos, incluso depósito para pellets.**



**Figura 14b. Sistema de almacenamiento de  $\text{CO}_2$  producido durante la combustión**

Del mismo modo, el uso de la caldera para enriquecimiento requiere la adición de un subsistema, bien para el almacenamiento del calor para calefacción o, bien para el almacenamiento del CO<sub>2</sub> para inyección carbónica a los cultivos. Esto se debe a que ambos *inputs* del sistema proceden del mismo generador (la caldera) y difieren en los tiempos en los que son administrados en el sistema (noche/día). Por una parte, el calor para calefacción es necesario sobre todo durante la noche (en clima templados/mediterráneos), y en muy pocas ocasiones, en un ciclo de cultivo, el aporte de calor es requerido durante el día. Por el contrario, el enriquecimiento carbónico es necesario durante las horas de sol, sobre todo cuando la radiación solar es máxima. Ante esta situación se hace necesaria la instalación de un sistema diurno de almacenaje de calor para calefacción o nocturno de almacenaje de CO<sub>2</sub>.

### 3. Conclusiones

Los invernaderos constituyen un ámbito muy favorable para la implementación de sistemas energéticos renovables aunque, al igual que en el caso de otros aspectos básicos de su funcionamiento como las estructuras, los sistemas de acondicionamiento y control climático o fertirrigación, no es posible asumir la existencia de soluciones de tipo general reproducibles de manera sistemática como ocurre, p.e. en el caso de la aportación de agua caliente a las viviendas o en las plantas eólicas o solares de producción de electricidad. Solventadas las cuestiones básicas como la preservación de la función productiva del invernadero, especialmente, y la adopción de un modelo de generación determinado (autoconsumo o inyección a red), existen en la actualidad tecnologías lo suficientemente fiables como para garantizar coberturas de demanda importantes para el consumo total energético de todo el sector en la provincia de Almería. Los aspectos económicos de esta implantación, si bien no se han tratado en profundidad en este texto, no deben resultar un factor condicionante en un escenario de curvas de aprendizaje muy acusadas –la tecnología fotovoltaica ha reducido sus costes en un factor de tres en los últimos cuatro años– y de incremento de los precios de la energía, como el actual. Por el contrario, los beneficios ambientales obtenidos y el valor intangible de una producción sostenible en todos sus procesos, deben justificar los futuros desarrollos en este ámbito.

## Referencias bibliográficas

- Abasaeed, A. E. (1992): "Briquetting of carbonized cotton stalk"; *Energy*, 17(9); pp. 877-882.
- Abdel-Ghany, A. M. y Al-Helal, I. M. (2011): "Solar energy utilization by a greenhouse: General relations"; *Renewable Energy*, 36(1); pp. 189-196.
- Adaro, J. A.; Galimberti, P. D.; Lema, A. I.; Fasulo, A. y Barral J. R. (1999): "Geothermal contribution to greenhouse heating"; *Applied Energy*, 64(1-4); pp. 241-249.
- Agencia Andaluza de la Energía (2008): "Situación de la biomasa en Andalucía. Consejería de Innovación Ciencia y Empresa"; Junta de Andalucía. [http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/portal/combin/contenidos/proyectos/areas/energiasRenovables/biomasa/proy\\_biomasa1/1202479474122\\_la\\_biomasa\\_en\\_andalucxa\\_en08.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/portal/combin/contenidos/proyectos/areas/energiasRenovables/biomasa/proy_biomasa1/1202479474122_la_biomasa_en_andalucxa_en08.pdf).
- Alonso, J. J. (2004): "Dinamización de los municipios segovianos de Abades, Fuentemilanos y Valdeprados, mediante la instalación de una industria de pelletizado de cardo (*Cynara cardunculus* L.) para su posterior uso como combustible. Aplicación al caso particular de la sustitución de gasóleo C por pellets en la residencia de Válidos de Segovia, para la obtención de calefacción y agua caliente sanitaria"; Proyecto fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid.
- Baille, A.; Kittas, C. y Katsoulas, N. (2008): "Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning"; *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(4); pp. 293-306.
- Bargach, M. N.; Tadili, R.; Dahman, A. S. y Boukallouch, M. (2004): "Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco"; *Renewable Energy*, (29); pp. 1.073-1.083.
- Blanco, J.; Malato, S.; Fernández-Ibañez, P.; Alarcón, D.; Gernjak, W. y Maldonado, M. I. (2009): "Review of feasible solar energy applications to water processes"; *Review Article Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7); pp. 1.437-1.445.

- Boulard, T. y Baille. A. (1987): "Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector"; *Energy in Agriculture* 6(1); pp. 17-26.
- Boulard, T. y Baille, A. (1986): "Simulation and Analysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse"; *Energy in Agriculture*; pp. 175-184
- Cabrera, A.; Marzo, B.; Uclés, D.; Molina, J.; Gázquez, J. C. y García, R. (2010): "Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería Campaña 2009/2010"; *Informes y Monografías*. Fundación Cajamar.
- Callejón-Ferre, A. J.; Velázquez-Martí, B.; López-Martínez, J. A. y Manzano-Agugliaro, F. (2011): "Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (15); pp. 948-955.
- Callejón-Ferre A. J.; Manzano-Agugliaro, F.; Díaz-Pérez, M.; Carreño-Ortega, A. y Pérez-Alonso, J. (2009): "Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions"; *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(1); pp. 41-49.
- Chaibi, M.T. (2000): "Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof"; *Desalination*, (128); pp. 123-138.
- Chicco, G. y Mancarella, P. (2009): "Distributed multi-generation: A comprehensive view"; *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 13(3); pp. 535-551.
- Debdoubi, A.; El Amarti, A. y Colacio, E. (2005): "Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed"; *Energy Conversion and Management*, (46); pp. 1.877-1.884.
- Demirbaş, A. y Şahin, A. (1998): "Evaluation of biomass residue - briquetting waste paper and wheat–straw mixtures"; *Fuel Processing Technology*, 55(2); pp. 175-183.
- Demirbaş, A. (1999): "Evaluation of biomass materials as energy sources-upgrading of tea waste by briquetting process". *Energy Sources*, 21(3); pp. 215-220.



- Erlich, C.; Öhman, M.; Björnbom, E. y Fransson, T. H. (2005): "Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets"; *Fuel*, (84); 569-575.
- Edwards, D.; Jolliffe, P.; Baylis, K. y Ehret, D. (2008): "Towards a plant-based method of CO<sub>2</sub> management"; *Acta Hort.* (ISHS), (797); pp. 273-278.
- García Mari, E.; Gutiérrez Colomer, R. P. y Adrados Blaise-Ombrecht, C. (2007): "Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse Desalination"; *Solar Energy*, (203); pp. 435-443.
- Garrido-Frenich, A.; Arrebola, F. J.; González-Rodríguez, M. J.; Vidal, J. L. (2003): "Rapid pesticide analysis, in post-harvest plants used as animal feed, by low-pressure gas chromatography-tandem mass spectrometry"; *Anal. Bioanal. Chem.* (377); pp. 1.038-1.046.
- Ganguly, A.; Misra, D. y Ghosh, S. (2010): "Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse"; *Energy and Buildings*, 42(11); pp. 2.036-2.043.
- Ghosal, M. K.; Tiwari, G. N.; Das, D. K. y Pandey K. P. (2005): "Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse"; *Energy and Buildings*, (37); pp. 613-621.
- Haas, R.; Panzer, C.; Resch, G.; Ragwitz, M.; Reece, G. y Held A. (2011): "A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries"; *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 15(2); pp. 1.003-1.034.
- Hao, X.; Wang, Q. y Khosla, S. (2008): "Responses of greenhouse tomatoes to summer CO<sub>2</sub> enrichment"; *Acta Hort.* (ISHS), (797); pp. 241-246.
- Hegedus, S. (2006): "Thin Film Solar Modules: The Low Cost, High Throughput and Versatile Alternative to Si Wafers"; *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, (14); pp. 393-411.
- Huang, J.; Li, G. y Yang Y. (2008): "A Semi-transparent Plastic Solar Cell Fabricated by a Lamination Process"; *Advanced Material*, 20(3); pp. 415-419.

- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2007): "Energía de la Biomasa. Manuales de energías renovables 2"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_2.1.7\\_Biomasa\\_9f14f7de.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Biomasa_9f14f7de.pdf).
- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2005): "Plan de Energías Renovables en España 2005-2010"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Plan\\_de\\_Energias\\_Renovables\\_en\\_Espana\\_completo\\_49e2ac7d.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Plan_de_Energias_Renovables_en_Espana_completo_49e2ac7d.pdf).
- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2011): "Plan de Energías Renovables en España 2011-2020"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Resumen\\_PER\\_2011-2020\\_26-julio-2011\\_58f27847.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_PER_2011-2020_26-julio-2011_58f27847.pdf).
- Kittas, C.; Katsoulas, A. y Baille, A. (2003): "Influence of aluminized thermal screens on greenhouse microclimate and night transpiration"; *Acta Hort*, (614); pp. 387-392.
- Kläring, H. P.; Hauschild, C.; Heißner, A.; Bar-Yosef, B. (2007): "Model-based control of CO<sub>2</sub> concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield"; *Agricultural and Forest Meteorology*, (143); pp. 208-216.
- Wang, L.; Fang, X. y Zhang, Z. (2010): "Design methods for large scale dye-sensitized solar modules and the progress of stability research"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9); pp. 3.178-3.184.
- Lopez, J. C.; Baille, A.; Bonachela, S. y Perez-Parra J. (2008): "Analysis and prediction of greenhouse green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in a Mediterranean climate"; *Biosystems Engineering*, 100(1); pp. 86-95.
- Lorenzo, P.; Maroto, C. y Castilla, N. (1990): "CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in almeria (Spain)". *Acta Horticulturae (ISHS)*, (268); pp.165-170.
- Mahmoudi, H.; Abdul-Wahab, S. A.; Goosen, M. F. A.; Sablani, S. S.; Perret, J.; Ouagued, A. y Spahis, N. (2008): "Weather data and analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries". *Desalination*, 222(1,3); pp. 119-127.

- Maiti, S.; Dey, S.; Purakayastha, S. y Ghosh, B. (2006): "Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source"; *Bioresource Technology*, (97); pp. 2.065-2.070.
- Milenić, D.; Vasiljević, P. y Vranješ, A. (2010): "Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes"; *Energy and Buildings*, 42(5); pp. 649-657.
- Montero, J. I.; Castilla, N. y Bretones, F. (1985): "Evaluación de colectores solares térmicos de bajo costo"; Actas IX Reunión de Bioclimatología. Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería, octubre.
- Montero, M.; Marfa, M.; Serrano, T. y Anton, S. (1987): "Use of solar energy for heating of greenhouses"; Von Zabeltitz, C. (eds.): *Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*. REU Technical Series 3. FAO, ENEA, Roma; pp. 133-139.
- Nayak, S. y Tiwari, G. N. (2008): "Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse"; *Energy and Buildings*, 40(11); pp. 2.015-2.021.
- Nayak, S. y Tiwari, G. N. (2009): "Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods"; *Energy and Buildings*, 41(8); pp. 888-896.
- Nederhoff, E. M. (1990): "Technical aspects, management and control of CO<sub>2</sub> enrichment in greenhouses"; *Acta Hort. (ISHS)*, (268); pp. 127-138.
- Ortiz, L.; Tejada, A.; Vázquez, A. y Piñeiro, G. (2003): "Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria, III: Producción de elementos densificados. CIS-Madera (España)"; Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera de Galicia, (11); pp. 17-32.
- Ozgener, O. (2010): "Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings"; *Energy*, 35(1); pp. 262-268.

- Ozgener, O. y Hepbasli, A. (2005): "Performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study"; *Building and Environment*, (40); pp. 1.040-50.
- Ozgener, O. y Hepbasli, A. (2007): "A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse"; *Building and Environment*, 42(1); pp. 11-2.
- Pastre, O. (2002): "Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues"; Pellets for Europe <http://www.pelletcentre.info/resources/1094.pdf>.
- Pérez, J.; Carreño, A.; Pérez, M.; Callejón, A. J. y Vázquez F. J. (2010): "Experiences on the integration of thin film photovoltaic modules in a Mediterranean greenhouse". *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)*. Québec, Canada, 13-17Junio, 2010.
- Pinel, P.; Cruickshank, C. A.; Beausoleil-Morrison, I. y Wills, A. (2011): "A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications"; *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 15(7); pp. 3.341-3.359.
- Portree, J. (1996): "Greenhouse vegetable production guide for commercial growers"; Province of British Columbia Ministry of Agriculture, *Fisheries and Food*.
- Qingfen, M.; Hui L. (2011): "Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art"; *Desalination*, 277(1-3); pp. 274-280.
- Rocamora, M. C. y Tripanagnostopoulos, Y. (2006): "Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses"; *Acta Horticulturae*, (719); pp. 239-245.
- Rodríguez, F. (2002): "Modelado y control de crecimiento de cultivos en invernadero"; Tesis doctoral, Universidad de Almería (España), p. 210.

- Sánchez, J. A.; Berenguel, M.; Guzmán, J. L.; Ación, F. G. y López, J. C. (2009): "Estrategias de control de temperatura incrementando la concentración de CO<sub>2</sub> por combustión en cultivo bajo plástico"; V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico AGROINGENIERÍA 2009. Lugo, España.
- Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Castilla, N.; Soriano, T. y Baille, A. (2005): "Effect of variable CO<sub>2</sub> enrichment on greenhouse production in mild winter climates"; *Agricultural and Forest Meteorology*, (132); pp. 244-252.
- Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Baille, A. y Castilla, N. (2009): "Effects of EC-based irrigation scheduling and CO<sub>2</sub> enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop"; *Agricultural water management*, (96); pp. 429-436.
- Schmidt, U.; Huber, C.; Rocks, T.; Salazar Moreno, R. y Rojano Aguilar, A. (2008): "Greenhouse cooling and carbon dioxide fixation by using high pressure fog systems and phytocontrol strategy"; *Acta Hort. (ISHS)*; (797); 279-284.
- Sethi, V. P. y Sharma S. K. (2008): "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications"; *Solar Energy*, 82(9); pp. 832-859.
- Sethi, V. P. y Sharma, S. K. (2007): "Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications"; *Solar Energy*, 81(12):1447-1459
- Sonneveld P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Van Tuijl, B. A. J.; Janssen, H. J. J.; Campen, J.; Bot, G. P. A. (2011): "Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses"; *Solar Energy*, 85(3); pp. 432-442.
- Sonneveld P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Campen, J.; Van Tuijl, B. A. J.; Janssen, H. J. J.; Bot, G. P. A. (2010): "Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production"; *Biosystems Engineering*, 106(1); pp. 48-57.

- Valera, D.; Molina, F. y Alvarez, A. J. (2008): "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), Madrid. p. 72.
- Zambeltitz, V. (1987): "Greenhouse Heating with Solar Energy"; Roma. FAO-CNRE.
- Tremblary, N. y Gosselin, A. (1998): "Effect of carbon dioxide enrichment and light"; *HortTechnology*, 8(4); pp. 524-528.
- Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E. U.; Ogada, T. y Siagi, Z. (2000): "Combustion of agricultural residues"; *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(2000); pp. 1-27.
- Yaman, S.; Şahan, M.; Haykiri-Aşma, H.; Şeşen, K. y Küşükbayrak, S. (2000): "Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste"; *Fuel Processing Technology*, (68); pp. 23-31.
- Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu F. y Noda. S. (2010): "Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse"; *Biosystems Engineering*, 103(2); pp. 228-238.
- Yano, A.; Tsuchiya, K.; Nishi, K.; Moriyama, T. y Ide, O. (2007): "Development of a Greenhouse Side-ventilation Controller driven by Photovoltaic Energy"; *Biosystems Engineering*, 96(4); pp. 633-641.
- Zabri, A. y Burrage S. (1998): "The effect of vapor pressure deficit (DPV) and enrichment with CO<sub>2</sub> on Water relations, photosynthesis, stomatal conductance and plant growth of sweet pepper grown by NFT"; *Acta Horticulturae*, (449); pp. 561-567.
- Zaragoza, G.; Buchholz, M.; Jochum, P. y Pérez-Parra, J. (2007): "Watergy project: Towards a rational use of water in greenhouse agriculture and sustainable architecture"; *Desalination*, 211(1-3); pp. 296-303.