



Uso de energía solar fotovoltaica aplicada a la refrigeración de un invernadero

I. Molina López¹, M.A. Muñoz-García¹, R. Moratíel-Yugueros², G. P. Moreda Cantero¹

¹ Dpto. Ingeniería Agroforestal. LPF-TAGRALIA. ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain; irene.molinalo@alumnos.upm.es, miguelangel.munoz@upm.es.

² Dpto. Producción Agraria. ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain.

Resumen: Las energías renovables son imprescindibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En el ámbito agrario, los invernaderos suponen un gasto de energía elevado debido, principalmente, a un uso poco eficiente de la misma. Su tecnificación debe incluir estrategias de ahorro energético incluyendo sistemas pasivos para reducir el coste que supone la refrigeración y calefacción, así como estrategias de reducción de la huella de carbono. El invernadero objeto del estudio se sitúa en Madrid y, aunque cuenta con sistemas pasivos, son insuficientes para el fin para el que se utiliza -la producción de gerbera para flor cortada-. Este trabajo ha analizado los consumos para llevar a cabo el diseño de una instalación de suministro de energía fotovoltaica. De forma que se ha calculado el sistema completo para abastecimiento parcial de energía eléctrica, así como la propuesta de solución conjunta al elevado consumo energético actual en climatización, mediante la incorporación de una bomba de calor reversible. Con el objetivo del ahorro, tanto energético como de costes, por ello se estudiaron diferentes alternativas tras analizar los datos de consumo del *cooling system* y del calefactor. Se determinó que la mejor opción era una instalación conectada a la red eléctrica, dado el reciente cambio de normativa. La instalación de los paneles, se planteó en primera opción sobre la cubierta del invernadero, ya que está orientada al sur. Pero también se barajarán otras opciones que no afecten al desarrollo del cultivo. El sistema planteado resulta amortizable en pocos años, dependiendo del desarrollo final de la nueva normativa, reduciendo en cualquier caso la huella de carbono del invernadero.

Palabras clave: Energías renovables, Consumo eléctrico, Huella de carbono, *Cooling system*.

1. Introducción

La parte experimental de este trabajo se ha desarrollado en un invernadero situado en los Campos de Experimentación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

El invernadero es de cristal tipo “venlo” [1] con material de cubierta tipo *carglass new* de 4 mm de grosor. Tiene unas dimensiones de 6,25 x 23 m, y una altura de 4 metros. Se encuentra adosado a otro invernadero de igual dimensión. El eje longitudinal de ambos invernaderos está orientado en dirección Este-Oeste, siendo el que se encuentra más al sur dónde se ha desarrollado este proyecto.

A la hora de tecnificar la climatización de un invernadero, lo primero que se hará será establecer mecanismos pasivos para ahorrar energía, como pueden ser las ventanas y las pantallas térmicas. Debido a la situación en la que se ubica el invernadero, estos sistemas

pasivos no son suficientes para el desarrollo óptimo de la gerbera, especie que actualmente se cultiva en su interior. Por ello, el invernadero cuenta con dos calefactores eléctricos y dos *cooling system* o equipos de enfriamiento. Los calefactores eléctricos se emplean para evitar un salto brusco de temperatura entre el día y la noche. Tienen una potencia nominal de 30,30 kW en total. Los *cooling system* disminuyen la temperatura del invernadero y aumentan la humedad, puesto que se basan en la refrigeración por evaporación. La potencia nominal de ambos es de 4,04 kW. El sistema de refrigeración funciona de mayo a octubre aproximadamente, y el de calefacción de octubre a mayo. Estas fechas son orientativas, puesto que dependerá de la temperatura exterior.

El objetivo de este trabajo es medir el consumo de los sistemas de climatización actuales y establecer una alternativa para suministrarles electricidad a partir de energía solar fotovoltaica.

2. Materiales y métodos.

Pese a que en un primer momento se pensó que el sistema que mayor consumo presentaría sería el de refrigeración tras un año de análisis de datos del consumo diario de los sistemas de climatización del invernadero, a través de un medidor de energía conectado a la instalación, se observó que son los meses de invierno los que mayor consumo presentan. Esto se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo eléctrico por meses de calefacción y refrigeración. Los meses duplicados se debe a que en ellos se registraron consumos tanto de refrigeración como de calefacción. Fuente: Elaboración propia.

Mes	Consumo (kWh)
Enero	3296,05
Febrero	3123,86
Marzo	1829,89
Abril	1870,04
Mayo*	1297,96
Mayo	605,53
Junio	1979,74
Julio	1881,06
Agosto	1886,18
Septiembre	1816,18
Octubre	1384,14
Octubre*	943,47
Noviembre	1371,20
Diciembre	2366,82

* Consumos de calefacción

Los consumos de octubre a mayo representan los datos de calefacción, y los consumos de mayo a octubre los de refrigeración. En mayo, el consumo de calefacción abarca desde el día 1 al 19, y desde el 20 en adelante la refrigeración. De manera similar, en octubre, el sistema de refrigeración estuvo funcionando del 1 al 20, y del 21 al 31 el dato sería de calefacción. A la vista de los elevados consumos en ambos periodos, se replanteó el estudio orientándolo a una instalación fotovoltaica para el abastecimiento de la climatización en ambos periodos.

A la hora de diseñar una instalación de alimentación mediante energía fotovoltaica, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es la disponibilidad del recurso solar, determinado por medio de las Horas Solares Pico (HSP). Estas representan el número medio de horas al día con una hipotética irradiancia de 1000 W/m². Las HSP serán menores en la época

invernal que en verano. En invierno, la radiación incide con un ángulo mayor respecto a la vertical, por lo que, para aprovechar la energía incidente, se deberían instalar los paneles con una inclinación mayor, de hasta 60° en el caso de Madrid [2].

Por el contrario, durante los meses de verano, la radiación llega a la superficie terrestre con un ángulo cenital menor, más próximo a la perpendicular en las horas centrales del día. Es por ello que, en este periodo, los paneles deberían colocarse con un ángulo menor, de unos 20° en la zona analizada.

Según la latitud a la que se encuentra el invernadero, 40° 26' 21" Norte, para garantizar la máxima captación anual, la inclinación adecuada de los paneles es de 30°. Por lo que, con esta inclinación, en la siguiente Tabla 2 se muestran las HSP según el mes, referenciada en European Commission – JRC [3].

Tabla 2. Las HSP para cada mes para una inclinación del panel fotovoltaico de 30°. Fuente: PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System).

Mes	HSP (30°)
Enero	3,45
Febrero	4,60
Marzo	5,86
Abril	6,06
Mayo	6,58
Junio	7,30
Julio	7,76
Agosto	7,44
Septiembre	6,51
Octubre	5,14
Noviembre	3,76
Diciembre	3,29

Si el diseño de la instalación se realizase para el mes más desfavorable, este sería diciembre o enero. En este caso, además, el mes de enero es el más desfavorable en cuanto a radiación y consumo. No obstante, si se pretende obtener la mayor captación de energía solar a lo largo del año, compensando el déficit de radiación haciendo uso de la red eléctrica, la inclinación de los paneles será la mencionada anteriormente de 30° para la ubicación analizada.

3. Análisis de resultados.

A la hora del diseño de la instalación, se barajaron varias alternativas. En cuanto al tipo de instalación, esta podría ser aislada o conectada a la red. Puesto que el invernadero ya cuenta con conexión a la red eléctrica y la demanda en invierno sería mayor que la demanda de verano, unido al cambio de normativa reciente, que permite compensar los excesos de producción con los consumos, se optó por un sistema conectado a la red eléctrica.

Por otro lado, se consideró la utilización de sistemas de almacenamiento para acumular la energía producida en las horas centrales del día donde, como se ve en la Figura 1, el consumo es inferior a la producción. De esta forma, la energía acumulada se podría usar en horas nocturnas. Sin embargo, al tener un consumo de calefacción muy elevado, serían necesarias bastantes baterías que aumentarían considerablemente el coste de la instalación. Estas, además, tienen una vida útil menor que los paneles solares, por lo que habría que sustituirlas de 2 a 3 veces a lo largo de la vida útil de los paneles. Asimismo, con el nuevo Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica [4], se podría inyectar a la red esta energía excedente, y en las horas nocturnas abastecerse de la red eléctrica. En cada periodo de facturación, la energía comprada a

la red se compensaría con la que se vierta, y aunque el balance no será 0, puesto que existirán unos cargos fijos por potencia, se ahorrarán costes.

Por tanto, se descartó esta opción y se decidió la no utilización de baterías. Por todo esto, el invernadero se acoplaría a la modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes, y acogida a compensación.

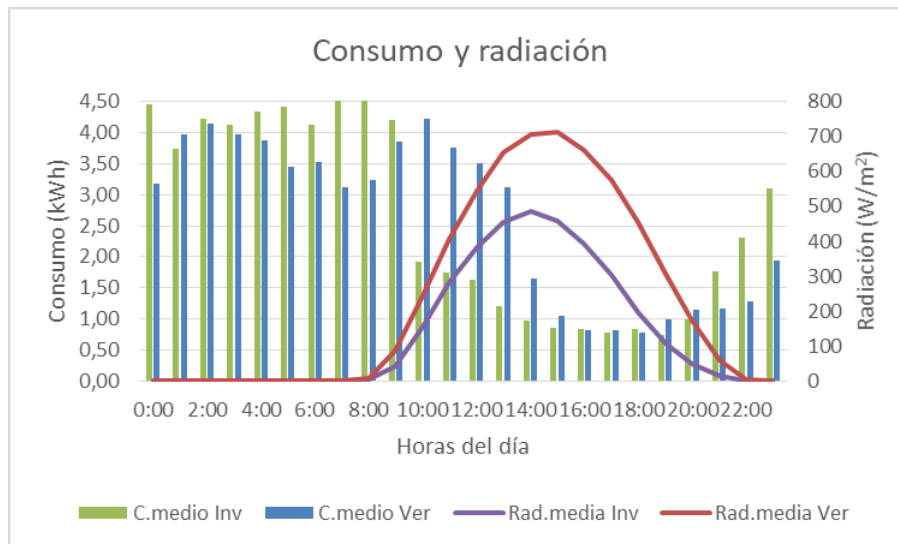


Figura 1. Consumo eléctrico y radiación en las horas del día y según la época del año.

Además, la estructura que soporta los paneles puede ser fija o móvil. Al realizar el estudio comparativo entre estructura con inclinación fija de 30°, y con una estructura móvil que permita inclinar los paneles según la época del año, se observó que no difería mucho el número de paneles necesarios de una estructura móvil a una fija. Además, hay que tener en cuenta que la estructura móvil supone un coste añadido, por lo que la estructura elegida finalmente será fija.

Para el cálculo de la instalación, se eligen las necesidades energéticas medias y disponibilidad de HSP de enero. En este caso, el panel elegido [5] presenta las características técnicas expuestas en Tabla 3.

Tabla 3. Características del panel solar fotovoltaico policristalino.

Potencia pico del panel solar	330 W
Tipo de célula	Policristalino
Dimensiones	1960 x 992 x 40 mm
Tensión Máxima Potencia (V_{mp})	37,95 V
Corriente en Cortocircuito (I_{sc})	9,30 A
Amperios Máximos de Salida (I_{mp})	8,70 A
Tensión en Circuito Abierto (V_{oc})	45,75 V
Voltaje de trabajo del panel solar	24 V

Por lo que,

$$N^{\circ} \text{ Paneles} = \frac{\text{Consumo}}{P_p \times HSP \times 0,8}$$

Siendo,

- Consumo, correspondiente al mes de enero, en Wh/día,
- P_p , la potencia pico del panel, en W_p ,
- HSP, las Horas Solares Pico del mes de enero a una inclinación de 30°, y

- 0,8 es el rendimiento del panel.

$$N^{\circ} \text{ Paneles} = \frac{106324}{330 \times 3,45 \times 0,8} = 116,74 \cong 117 \text{ paneles}$$

Y si realizamos el análisis en términos de potencia, tenemos:

$$P_p = \frac{106324}{3,45 \times 0,8} = 38,53 \cong 40 \text{ kW}$$

Por tanto, a la hora de elegir el inversor, este debe tener una potencia de 40 kWn. El inversor elegido tiene un rango de tensión de entre 330 y 700 V, una tensión máxima de entrada de 105 A [6].

Para calcular el número de paneles que se conectarán a dicho inversor en serie (N_s) y paralelo (N_p), se tendrá en cuenta que:

$$N_s > \frac{V_{min}}{V_{mp} \times \text{pérdidas por } T^a} = \frac{330}{37,95 \times 0,8} = 10,87$$

$$N_s < \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{oc}} = \frac{700}{45,75} = 15,30$$

$$N_p = \frac{N^{\circ} \text{ paneles}}{N_s} = \frac{117}{12} \cong 10$$

Por lo tanto, el número de paneles en serie será de 12, y en paralelo 10, esto dará un total de 120 paneles.

En cuanto al emplazamiento de los paneles fotovoltaicos, las alternativas eran la cubierta del invernadero o el suelo. Debido al elevado número de paneles necesarios, no resulta posible colocarlos en la cubierta del invernadero, por lo que se opta por la colocación en suelo, entre el edificio de Producción Vegetal de la ETSIAAB y el invernadero, ocupando una superficie de 201 m².

La energía generada con un sistema de esta potencia, teniendo en cuenta que las HSP anuales en Madrid está en torno a 1600, podremos obtener.

$$E = P_n * HSP = 40 \text{ kW} * 1600 \text{ HSP} \cong 64 \text{ MWh}$$

Considerando un ahorro en precio de energía tras impuestos de 0.2 €/kWh, la instalación proporciona 12800 € de ahorro anuales. Este dato debe compararse con el coste de instalación, que actualmente está en torno a 1 €/Wp instalado, lo que hace que el coste de la instalación sea de unos 40000 €.

Por tanto, la amortización de la instalación sería de entre 3 y 4 años aproximadamente. Si toda la energía pudiese aprovecharse, bien por su uso directo, o bien por la compensación mediante balance neto entre la energía inyectada en la red y la consumida de la misma. Esto deja un margen amplio para un escenario en el que la energía inyectada en la red se descontase a un precio muy inferior.

Se omite por tanto un estudio basado en la limitación de la energía vertida a la red, puesto que se considera que la nueva ley aún está en desarrollo. No obstante, el análisis aquí plasmado da una referencia de cómo la electricidad de origen fotovoltaico supone una fuente de energía no solo de bajas emisiones, sino también más barata que la de la red eléctrica.

4. Conclusiones

Para la latitud de Madrid, los sistemas de climatización de un invernadero, en concreto el sistema de calefacción, consumen mucha energía (superior a 100 kWh/día para 140 m²). Esto es debido a que los sistemas de calefacción actuales resultan muy ineficientes. Por ello, como solución conjunta al elevado consumo eléctrico de ambos sistemas de climatización (calefacción y refrigeración), se propone sustituirlos por una bomba de calor reversible. Esta disminuiría los consumos del invernadero prácticamente a la mitad, puesto que tiene mayor eficiencia energética. Concretamente, por cada kWh eléctrico consumido, la bomba de calor reversible aporta de 2 a 4 kWh térmicos. Por consiguiente, esta solución también reduciría el número de paneles solares fotovoltaicos necesarios en la instalación.

Con este proyecto se demuestra que es viable la utilización de un sistema de alimentación fotovoltaico y que la inversión se amortiza ampliamente dentro de la vida útil de la instalación. Además, es una solución que contribuye a la reducción del uso de energías no renovables, disminuye la contaminación y los costes.

Referencias

1. Díaz Álvarez, J. R., Pérez Parra, J. Tecnología de invernaderos. 1994, volumen I, 15 – 352 págs.
2. CENSOLAR. La energía solar. Aplicaciones prácticas. Progensa. Sevilla. 2009. 3- 152 págs.
3. European Commission – JRC. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Disponible en: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>. Fecha de consulta: 09/05/2019.
4. RD 244/2019. Disponible en : https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-5089. BOE (Boletín Oficial del Estado). Fecha de consulta: 09/05/2019.
5. Bauer. Ficha técnica del panel. Disponible en: <http://www.bauer-energy.com/wp-content/uploads/2019/05/ficha-tecnica-panel-330-1.pdf>. Fecha de consulta: 09/05/2019.
6. Aros Solar Technology. Ficha técnica del inversor. Disponible en: <http://www.aros-solar.com/en/inverter/solar-inverters-three-phase-sirio-k33>. Fecha de consulta: 09/05/2019.