

Parámetros de ahorro energético en invernaderos

Pizano Licona María Fernanda ¹, Cadenas Hernández Juan Carlos ², Tolentino Cárdenas Josué Candelario ², Nájera Lara Mónica ²

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Cerro de la Venada, Pueblito de Rocha, CP. 36040, Guanajuato, Gto., México.

^{2,3,4}Colegio de Nivel Medio Superior, ENMS Salamanca, Tampico No. 904, CP. 36730; Salamanca, Gto., México.

mf.pizanolicona@ugto.mx¹

jc.cadenashernandez@ugto.mx²

jc.tolentinocardenas@ugto.mx³

mnajera@ugto.mx⁴

Resumen

En México, desde hace algunos años, los invernaderos son cada vez más necesarios debido a que permiten suministrar alimentos de calidad que demanda la población. Para promover el crecimiento de los cultivos al interior de invernaderos se requieren cálculos de humedad, temperatura, ventilación, filtración, decisiones en la elección de materiales de construcción, entre otros. El objetivo de este trabajo es realizar una revisión de diferentes técnicas de ahorro de energía que se pueden aplicar para reducir los costos de calefacción principalmente en la época de invierno. Este proyecto pretende, fortalecer la metodología de investigación, la capacidad de síntesis, la toma de decisiones y la comprensión de los aspectos relacionados en el ahorro energético en invernaderos.

Palabras clave: Eficiencia energética en Invernaderos, Invernaderos Sustentables.

Introducción

Hoy en día, debido al aumento de la población a nivel mundial se requiere un consumo de alimentos cada vez mayor. La agricultura de un ambiente controlado es una solución sostenible que busca alternativas para promover una mayor producción de elevada calidad, disminuyendo el consumo de agua y la demanda energética.

Uno de los retos más importantes en el desarrollo de invernaderos, es el consumo de energía para la calefacción, pues los cultivos deben conservar la temperatura adecuada para el crecimiento de los productos alimenticios, a pesar de los cambios en las condiciones climáticas. (Nasrollahi, H., et al. [1]) ¹. De acuerdo con los impactos adversos de los combustibles fósiles en el medio ambiente, la aplicación de fuentes de energía alternativas y estrategias de ahorro de energía promoverían distintos beneficios. Algunas estrategias de ahorro energético y en general de recursos utilizados involucran a los diseños de invernaderos energéticamente eficientes que relaciona al uso de cubiertas, el uso de cortinas térmicas, la gestión energética de los microclimas interiores, la selección de sistemas de calefacción y el uso de fuentes de energía alternativas (energía solar térmica y fotovoltaica, biomasa, calor geotérmico), entre otras. Amahed, M.S, et. al. [2] ²,

El rendimiento de estas soluciones dependerá de aspectos relacionados a la ubicación, la orientación geográfica del invernadero, su efecto sobre los cultivos y viabilidad económica de las tecnologías de ahorro. La orientación del invernadero tiene influencia en la transmisión y emisión de la radiación dentro del invernadero, sobre todo en los meses invernales. Por otra parte la captación uniforme de la energía solar por parte del cultivo, también estaría relacionada con la orientación del invernadero, la forma y topografía

¹ Nasrollahi, H., et al., *The greenhouse technology in different climate conditions: A comprehensive energy-saving analysis*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021. 47: p. 101455.

² Ahamed, M.S., H. Guo, and K. Tanino, *Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses*. Biosystems Engineering, 2019. 178: p. 9-33.

del terreno, la dirección de los vientos y la propia forma física del invernadero (Intagri [3])³. Por tal motivo, lo primero que se debe analizar es la latitud en donde está ubicado el invernadero y su orientación. La orientación debe permitir una distribución homogénea a lo largo del día, de la radiación solar dentro del invernadero.

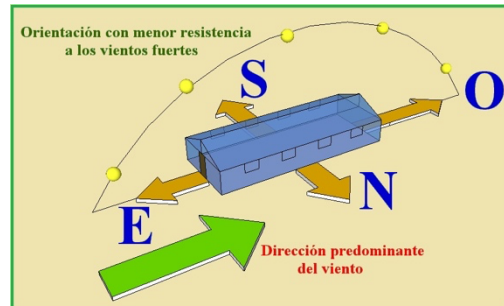


Figura 1. Orientación de un invernadero.[4]⁴

Por otro lado, el viento y sus características (velocidad, temperatura y humedad) influye en gran medida en la pérdida de calor de los invernaderos, por lo que los invernaderos deben estar en un área rodeada por elementos topográficos o tecnológicos (por ejemplo árboles o cubiertas de plástico) que puedan actuar como cortavientos sin que afecten la radiación solar recibida.

Existen varios tipos de invernadero que pueden ser clasificados de acuerdo a los materiales para su construcción, tipo de material de la cubierta o las características del techo. En México es posible encontrar una extensa variedad de modelos de invernaderos como el cenital, túnel, sierra, entre otros. Según la Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos, los invernaderos de túnel o semicilíndricos tienen un mayor control de los factores climáticos, una elevada resistencia a los vientos y su instalación es rápida, pues están constituidos con estructuras prefabricadas. Su característica principal es la forma de su cubierta y su estructura totalmente metálica.

Cubiertas, paredes y pantallas

Entre los materiales más comúnmente usados en la cubierta se encuentran los plásticos de alta difusión de luz, que ayudan a disminuir los problemas debidos a la absorción de luz solar. Esto usualmente es causado por irregularidades en la orientación del invernadero lo que promueve interferencia en la captación de la luz por parte del cultivo. En este tipo de escenarios se utilizan plásticos que disminuyen los contrastes entre sol y sombra, permiten difundir y distribuir en todas direcciones a la luz que entra al invernadero. Con el empleo de este tipo de cubiertas se puede optar por orientar al invernadero con base en la dirección y características de los vientos dominantes o características de la topografía del terreno.[3]³

Otra alternativa es el diseño de un muro norte inclinado, no transparente, que pudiera ser de ladrillo u otro material y su objetivo es el de retener la mayor parte de la radiación solar entrante en el invierno que se recibe a través de el muro sur y el techo sur y que mayoritariamente sería emitida hacia el lado norte. En este instante, el muro norte por su inclinación y caracter reflejante podría aumentar el nivel de iluminación en el piso.

³ www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos.
⁴ <https://agroinvernaderos.webnode.es/construccion-de-un-invernadero/ubicacion/>

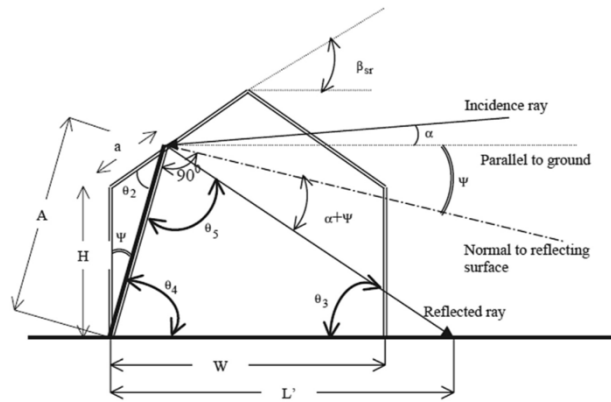


Figura 2. Representación esquemática de una superficie inclinada reflectante adosada al muro norte.[5]⁵

Otra estrategia para la conservación térmica incluye el uso de las pantallas térmicas o cortinas nocturnas que pueden utilizarse para reducir la pérdida de radiación térmica durante el invierno. Las eficiencias de acuerdo al tipo de material se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Resumen del desempeño de varios tipos de pantalla térmica para reducir el requerimiento de calefacción en invernaderos. (Amahed)[2]²

Descripción del invernadero	Tipos de pantalla térmica	Rendimiento térmico
Un invernadero de investigación (38m ²), Nueva Jersey EEUU (40. 6° Norte)	Pantalla térmica de monofilamentos de polipropileno	Ahorro de energía hasta un 58%
Un invernadero acrílico doble (72m ²) en Ohio, EEUU (39. 9° Norte)	Bolitas de poliestireno	Reducción del 60-70% de la pérdida de calor en las noches
Invernadero cubierto de PE en Turquía (37. 6° Norte)	Polietileno	Temperatura interior más alta en 3.4°C
Invernadero cubierto de PE (682m ²) en Ginebra, Suiza (46. 2° Norte)	Pantalla térmica de etileno	Reducción de transmitancia térmica a través del techo de 35-47%
Invernadero (21m ²) en la India (30. 56° Norte)	Poliéster aluminizado	Temperatura interior más alta en 3.4°C
Invernadero túnel cubierto de PE de doble piel (120m ²) en Turquía (36. 9° Norte)	Poliéster	Ahorro del 19.8% por energía de calefacción

² Ahamed, M.S., H. Guo, and K. Tanino, Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. Biosystems Engineering, 2019. 178: p. 9-33.

Ventilación y microclima

El control de las condiciones ambientales interiores de los invernaderos promueve una elevada productividad de los cultivos pero también incrementa un consumo energético considerable debido a la adopción de sistemas mecánicos de ventilación. La ventilación en un invernadero es un fenómeno que consiste en la renovación de la masa de aire interior, al promover la introducción de otra masa de aire procedente del exterior. Esto puede disipar gran parte de la sobrecarga de calor afectando la temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono en el interior. La ventilación se mide en función del flujo de ventilación (m^3/s) que ingresa al invernadero y la tasa de renovación por hora del volumen del aire dentro del invernadero. La ventilación de un invernadero puede hacerse de forma natural o forzada. Los invernaderos usualmente se enfrían mediante ventilación natural, enfriamiento por evaporación o sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Si la ubicación del invernadero coincide con la dirección del viento predominante en las ventanas laterales en las horas de mayor radiación, se puede generar un flujo de ventilación incrementado que coincida también con la apertura de las ventanas y mantener la temperatura entre los parámetros requeridos por los cultivos. En caso contrario si la ubicación o las condiciones ambientales externas no favorecen al cultivo y el microclima del invernadero presenta dificultades en el control de la temperatura y/o humedad, es recomendable la utilización de la ventilación forzada o de métodos que permitan controlar las condiciones microclimáticas.” (Infoagro [6]).

Por otra parte, los invernaderos con control mecánico del ambiente interior, representa una de las soluciones más eficientes para la agricultura en invernaderos. El sistema de control climático genera el microclima interior adecuado para el crecimiento de los cultivos, estos incluyen los parámetros ambientales interiores (por ejemplo, temperatura del aire, humedad relativa, concentración de CO_2 y luz) que proporcionan también en los distintos climas estacionales en los que el cultivo al aire libre sería imposible. El microclima del invernadero es un sistema multifactorial y dinámico, en donde la temperatura depende de la radiación solar, la temperatura exterior, humedad relativa, velocidad del viento, la planta cultivada, etc (Jung et al., 2020b[7]). Además, los materiales de construcción del invernadero como la estructura y el material de cobertura afectan significativamente el microclima al interior del invernadero (Lin et al., 2020[8]).

La mayor parte del consumo energético de los invernaderos se debe a la calefacción que representa entre el 65 y el 85 % del consumo total de energía en el invernadero, mientras que el porcentaje restante se debe a las instalaciones eléctricas, relacionada a los ventiladores y actuadores necesarios para enfriar el invernadero. El comportamiento del clima interior de un invernadero es una combinación dinámica de procesos físicos que involucran transferencia de calor y masa de aire, ambos parámetros son afectados por características dependientes del tiempo: las condiciones climáticas exteriores, el tipo y estado de los cultivos, el sistema de control climático adoptado y la estrategia de operación del invernadero.

Iluminación

A través de la fotosíntesis, la luz es la principal fuente de energía utilizada por los cultivos, esto les permite crecer y desarrollarse, por lo que es fundamental mantener una iluminación adecuada (dependiendo del cultivo) para obtener un rendimiento del crecimiento de los cultivos en invernaderos. Considerando al espectro de la radiación solar, la energía luminosa que es utilizada por las plantas para el proceso fotosintético se limita únicamente a una fracción de la radiación solar captada. Esta porción del espectro se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR) y se encuentra dentro del espectro visible.

La iluminación suplementaria es muy importante en la época en donde la duración del día es más corto y la radiación solar reducida afecta el crecimiento de las plantas en los invernaderos.

⁶ https://www.infoagro.com/documentos/los_procesos_fisicos_y_su_efecto_microclima_un_invernadero.asp.

⁷ Jung, D.-H., et al., Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020. 173: p. 105402.

⁸ Lin, D., L. Zhang, and X. Xia, Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 264: p. 121513.

Para la instalación de lámparas en un invernadero es necesario conocer el tipo de iluminación (Valera, et. al) [9] que es requerido. Las principales características técnicas que se deben considerar para el empleo de la iluminación son:³

- La distribución espectral de la luz emitida.
- El coste de instalación y su consumo de energía eléctrica.
- La potencia de radiación necesaria.
- El rendimiento de la lámpara, que indica el tanto por ciento de la potencia que se transforma en luz.
- Costo y tiempo de vida media de la fuente de luz artificial

Para elegir la fuente de iluminación de un invernadero, se requieren conocer los picos de absorción de radiación. En la figura 3, se muestra un gráfico de absorción relativa de los pigmentos vegetales en función de la longitud de onda (color) dentro de la radiación visible del espectro electromagnético. Los elementos activos en la captación de luz en cultivos están representados por las clorofilas a y b así como los carotenos, los cuales tienen picos de absorción de radiación de 420-450nm (color azul), esta es la longitud de onda más importante para el crecimiento de la planta. Otro pico de absorción de las clorofilas se muestra entre los 600-700 nm (color rojo), en esta zona se favorece la emisión de tallos y la floración.

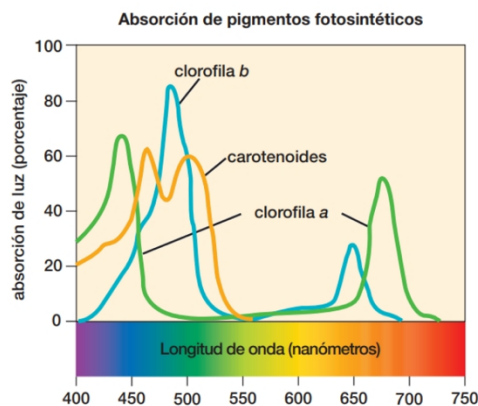


Figura 3. Absorción por fotosíntesis en el campo visible del espectro electromagnético.[10]

⁹ Valera Diego L., M.F.D., Álvarez Antonio J., Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. 2008, Madrid, España.

¹⁰ Audesirk, T., Audesirk, G., Byers B., BIOLOGIA CIENCIA Y NATURALEZA 3era. ed. 2014.

Tabla 2. Tabla comparativa de los tipos de lámparas para iluminación artificial en invernaderos, elaboración propia.
Referencias: [11], [12], [13], [14]

Tipo de lámpara	Espectro	Eficiencia energética / Intensidad	Uso recomendado	Costo	Generan calor	Desventajas	Humedad del aire
Fluorescentes	Visible	Alta / Poca	En cualquier etapa del desarrollo de la planta (desde la creciente plántula hasta su recolección).	Bajo (\$60-\$600)	No	Muy grandes y a base de mercurio.	< 70%
LED	Amplio, de un tono de luminiscencia	Alta	Es posible utilizar para la estación de crecimiento el espectro azul y para la maduración de las frutas el espectro rojo y naranja.	Elevado (\$721-\$4,800)	No	Pierden su intensidad y calidad con relativa rapidez.	Altamente resistentes
Sodio a alta presión (HPS)	Colores rojo y naranja	Alta	En el crecimiento, fortalecimiento y fructificación de las plantas	Medio (\$379-\$527)	Sí	Se requieren medidas de seguridad para su instalación debido a que contienen mercurio-sodio. Además atrae insectos.	
Halogenuros metálicos (MGL)	Colores azul, amarillo o verde	Alta		Alto (\$775-\$1,222)	Sí	Contiene mercurio y haluro metálico; con sobretensión existe peligro de que explote	Resistentes
Infrarrojas para calefacción	No generan un espectro de luz visible			Elevado (\$1,117-\$5,021)	Sí	Existe un riesgo de incendio.	

Aunque el objetivo principal de la iluminación suplementaria es aumentar la tasa de crecimiento al incrementar la fotosíntesis por extender la duración del día (fotoperíodo), esto puede proporcionar una cantidad significativa de calefacción y de iluminación en los invernaderos, considerando los tipos de lámparas utilizadas y en algunos casos incluso, combinando éstas. Los cultivos tienen cálculos de lux necesarios en todo su ciclo vital para dimensionar la intensidad lumínica necesaria para cada cultivo. Sabiendo este parámetro, se optimiza la adquisición de luminarias para tener un equilibrio entre la intensidad lumínica necesaria para una PAR adecuada con un consumo contenido de electricidad.

Energías Alternativas

El sistema de calefacción en invernaderos puede ser en modo activo, pasivo, o combinado. El modo activo de los sistemas de calefacción significa el suministro de calor de otras fuentes para aumentar la temperatura interior. En modo pasivo, la energía solar se utiliza para calentar el invernadero, almacenando el calor utilizando diferentes materiales de almacenamiento de calor. Los sistemas de calefacción pasivos son eficientes en invernaderos pequeños y ubicados en climas moderados. El modo activo del sistema de calefacción generalmente se usa para invernaderos comerciales ubicados en latitudes altas del norte. Finalmente los sistemas combinados permiten abordar cambios meteorológicos imprevistos promoviendo una estabilidad en el crecimiento de los cultivos. En los últimos años, la energía solar ha demostrado un gran potencial para la integración con los invernaderos agrícolas mediante tecnologías que incluyen la fotovoltaica (PV), fotovoltaica-térmica (PVT) y colectores solares térmicos. Los módulos fotovoltaicos montados en techos o paredes de invernaderos causan sombra que puede afectar negativamente la tendencia creciente de los cultivos en el interior. Este problema se puede abordar mediante el uso de módulos fotovoltaicos bifaciales o empleando seguidores solares para crear sombras dinámicas o utilizando terreno adicional en zonas cercanas al invernadero. Los módulos PVT son más eficientes en la producción de calor y electricidad, y se producen menos sombras cuando se emplean módulos de concentración. El uso de colectores solares térmicos, se han reportado valores de rendimiento más altos para invernaderos instalados en condiciones climáticas moderadas. (Shiva Gorjian, et. al, 2020).[15]⁴

Por otro lado, también se ha reportado el empleo de unidades de almacenamiento de energía térmica (TES) como componentes cruciales para el suministro seguro de energía en invernaderos solares, teniendo rendimientos térmicos significativos.

Modelos dinámicos

Actualmente se han desarrollado modelos dinámicos considerando componentes interactivos que permiten identificar la elección adecuada de las medidas de conservación de energía. (Hossein Nasrollahi, 2021) [1], (Laila Ouazzani Chahidi, 2020) [16]. Se requieren algoritmos de aprendizaje automático, estos han demostrado una mejor capacidad para describir el entorno complejo de los invernaderos pero su principal inconveniente es una menor confiabilidad.

Conclusión

En los últimos años, debido al aumento de los costos de energía, los problemas ambientales causados por la utilización de fuentes de energía convencionales, el consumo de energía de los invernaderos agrícolas se ha convertido en un desafío. Las alternativas a este problema son: encontrar fuentes alternativas de energía limpia así como soluciones de ahorro de energía.

Mantener las condiciones más estables dentro del invernadero durante cualquier época del año permitirá generar microclimas que favorezcan el óptimo crecimiento del cultivo. El uso de paredes, cubiertas o pantallas, promoverán que estas variaciones sean menos fluctuantes y aprovechar la radiación solar y los

¹⁵ Gorjian, S., et al., A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 285: p. 124807.

¹⁶ Ouazzani Chahidi, L., et al., Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate - A case study. *Applied Energy*, 2021. 282: p. 116156.

vientos dominantes a favor; en los casos que sea necesario, se buscarán alternativas de iluminación o ventilación.

La implementación de tecnologías solares puede considerarse como una opción compatible para la integración con invernaderos, lo que promueve una disminución de las emisiones de gases de efecto de invernadero. Uno de los parámetros importantes a considerar es el costo beneficio, al decidir el cultivo que se utilizará y los recursos económicos necesarios a invertir para asegurar su crecimiento. Por otra parte, un parámetro importante a decidir en el diseño de un invernadero consiste en establecer si el invernadero será utilizado exclusivamente en un único tipo de cultivo o se promueve un sistema dinámico, que permita el cambiar los cultivos sin modificar el diseño del invernadero.

Referencias

- Nasrollahi, H., et al., *The greenhouse technology in different climate conditions: A comprehensive energy-saving analysis*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021. **47**: p. 101455.
- Ahamed, M.S., H. Guo, and K. Tanino, *Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses*. Biosystems Engineering, 2019. **178**: p. 9-33.
- <https://www.intagri.com/> and E.E. INTAGRI. *Aspectos a Considerar en la Orientación de los Invernaderos*. 2021 [cited 2022 jul 20, 2022]; Available from: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/aspectos-a-considerar-en-la-orientacion-de-los-invernaderos>.
- <https://agroinvernaderos.webnode.es>. *Cultivos Bajo Cubierta*. 2012 Jul 15, 2022]; Available from: <https://agroinvernaderos.webnode.es/construccion-de-un-invernadero/ubicacion/>.
- Gupta, R. and G.N. Tiwari, *Modeling of energy distribution inside greenhouse using concept of solar fraction with and without reflecting surface on north wall*. Building and Environment, 2005. **40**(1): p. 63-71.
- <https://www.infoagro.com/> and S.L. InfoAgro Systems. Available from: https://www.infoagro.com/documentos/los_procesos_fisicos_y_su_efecto_microclima_un_invernadero.asp.
- Jung, D.-H., et al., *Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse*. Computers and Electronics in Agriculture, 2020. **173**: p. 105402.
- Lin, D., L. Zhang, and X. Xia, *Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost*. Journal of Cleaner Production, 2020. **264**: p. 121513.
- Valera Diego L., M.F.D., Álvarez Antonio J.,, *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*. 2008, Madrid, España.
- Audesirk, T., Audesirk, G., Byers B., *BIOLOGIA CIENCIA Y NATURALEZA* 3era. ed. 2014.
- <https://engineer.decorexpro.com/es/>. 2016-2020; Available from: <https://engineer.decorexpro.com/es/elektrika/svetylnik/metallogalogennye-lampy.html#-6>.
- <https://tomahnousfarm.org>. *Lámparas de sodio para invernaderos: principio de funcionamiento, variedades, pros y contras, normas de seguridad*. 2022; Available from: <https://ni.tomahnousfarm.org/5908-sodium-lamps-for-greenhouses-the-principle-of-operat.html#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20las%20ventajas%2C%20las%20luminarias%20tambi%C3%A9n%20tienen,las%20fluctuaciones%20de%20voltaje%20en%20la%20red%20el%C3%A9ctrica%3B>.
- <https://spiegato.com/es/>. *¿Qué son las lámparas de sodio de alta presión?* ; Available from: <https://spiegato.com/es/que-son-las-lamparas-de-sodio-de-alta-presion>.
- <http://es.nextews.com/>. *Lámpara para invernaderos: descripción, tipos, descripción, características y opiniones. invernaderos de iluminación LED y lámparas de sodio*. Available from: <http://es.nextews.com/c9e13bdb/#:~:text=ventajas%20l%C3%A1mparas%20de%20infrarrojos%20por%20s%C3%AD%20mismos%20plantas,entregado%20de%20energ%C3%ADa%20del%20invernadero%20y%20el%20suelo>.
- Gorjian, S., et al., *A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses*. Journal of Cleaner Production, 2021. **285**: p. 124807.
- Ouazzani Chahidi, L., et al., *Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate – A case study*. Applied Energy, 2021. **282**: p. 116156.