

Capítulo 4.

Propuesta teórica del diseño e instrumentación de un sistema de agricultura fotovoltaico

Erick Maldonado-Campos¹
Daniel Isai Hernández-De la Cruz²
Rafael Valenzuela-Rodríguez³
Gema Morales-Olan⁴
Pedro Moreno-Zarate⁵

Cítese como: Maldonado-Campos, E., Hernández-De la Cruz, D. I., Valenzuela-Rodríguez, R., Morales-Olan, G. y Moreno-Zarate, P. (2023). Propuesta teórica del diseño e instrumentación de un sistema de agricultura fotovoltaico. En F. C. Gómez-Meneses, E. M. Moncayo-Torres y T. M. Piamba (comps.), *Aplicaciones tecnológicas de la Ingeniería Mecatrónica y sus impactos al desarrollo socioeconómico* (pp. 56-68). Editorial UNIMAR. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.214.c366>

Resumen

Un sistema agro-fotovoltaico se define como la integración simultánea de sistemas para la producción agrícola y fotovoltaica; es decir, lograr optimizar la utilización del suelo, teniendo a la vez y en la misma superficie, a los sistemas de invernaderos con paneles solares. En este estudio se pretende explorar los parámetros para el diseño y desarrollo de este tipo de aplicaciones tecnológicas en la zona de Comalcalco, Tabasco. Comprende desde la selección de los parámetros de estudio, el estudio del envejecimiento y degradación de las celdas a las condiciones de la zona, el diseño de la instrumentación necesaria para el control y la adquisición de datos de las variables del proceso, hasta el diseño de la instrumentación de los sistemas agro-fotovoltaicos.

Previo a la implementación de los sistemas mencionados, se debe realizar estudios para comprender el envejecimiento y degradación de las celdas solares a las condiciones de operación de la zona, como la **temperatura del ambiente**, la **humedad relativa**, los niveles de **radiación solar** y **precipitación**

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco, Tabasco, México.

² Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco, Tabasco, México.

³ Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco, Tabasco, México. Correo electrónico: rafavalenz93@gmail.com

⁴ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Veracruz, México. Correo electrónico: morales.gema13@gmail.com

⁵ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México. Correo electrónico: pemzamx@gmail.com

pluvial. Otros parámetros adicionales a considerar son la **humedad y temperatura del suelo**, los cuales pueden ser de utilidad para el diseño de sistemas auxiliares para riego automatizado.

Mediante el análisis del envejecimiento y degradación de las celdas convencionales y los datos obtenidos en las diferentes estaciones del año, se pretende analizar otro tipo de tecnologías, como las celdas de perovskitas, las cuales son de interés debido a su conformación flexible y semitransparente que las hace ideales para aplicaciones en invernaderos agro-fotovoltaicos al reducirse el efecto sombra, además de probar diferentes configuraciones en la geometría de los invernaderos, incluyendo las celdas como parte de la estructura principal.

Palabras clave: invernadero agrofotovoltaico; celdas fotovoltaicas; diseño; parámetros ambientales; producción de cultivos; APV; PV.

Theoretical proposal for the design and instrumentation of a photovoltaic farming system

Abstract

An agro-photovoltaic system is defined as the simultaneous integration of systems for agricultural and photovoltaic production; that is, to optimize the use of the soil, having at the same time and in the same area, greenhouse systems with solar panels. This study aims to explore the parameters for the design and development of this type of technological application in the area of Comalcalco, Tabasco. It includes the selection of the study parameters, the study of the aging and degradation of the cells to the conditions of the area, the design of the necessary instrumentation for the control and data acquisition of the process variables, the design of the instrumentation of the agro-photovoltaic systems.

Before the implementation of the aforementioned systems, studies should be conducted to understand the aging and degradation of solar cells under the operating conditions of the area, such as **ambient temperature, relative humidity, solar radiation levels**, and **rainfall**. Other additional parameters to consider are **soil humidity** and **temperature**, which can be useful for the design of auxiliary systems for automated irrigation.

By analyzing the aging and degradation of conventional cells and the data obtained in the different seasons of the year, we intend to analyze other types of technologies, such as perovskite cells, which are of interest due to their flexible and semitransparent conformation that makes them ideal for

applications in agro-photovoltaic greenhouses by reducing the shadow effect, in addition to testing different configurations in the geometry of the greenhouses, including the cells as part of the main structure.

Keywords: Agro-photovoltaic greenhouse; photovoltaic cells; design; environmental parameters; crop production; APV; PV.

Proposta teórica para o projeto e a instrumentação de um sistema agrícola fotovoltaico

Resumo

Um sistema agro fotovoltaico é definido como a integração simultânea de sistemas para produção agrícola e fotovoltaica, ou seja, para otimizar o uso do solo, tendo, ao mesmo tempo e na mesma área, sistemas de estufa com painéis solares. Este estudo tem como objetivo explorar os parâmetros para o projeto e o desenvolvimento desse tipo de aplicação tecnológica na área de Comalcalco, Tabasco. Inclui a seleção dos parâmetros de estudo, o estudo do envelhecimento e da degradação das células para as condições da área, o projeto da instrumentação necessária para o controle e a aquisição de dados das variáveis do processo, o projeto da instrumentação dos sistemas agro fotovoltaicos.

Antes da implementação dos sistemas mencionados acima, devem ser realizados estudos para entender o envelhecimento e a degradação das células solares sob as condições operacionais da área, como **temperatura ambiente, umidade relativa**, níveis de **radiação solar e precipitação**. Outros parâmetros adicionais a serem considerados são a **umidade** e a **temperatura do solo**, que podem ser úteis para o projeto de sistemas auxiliares para irrigação automatizada.

Ao analisar o envelhecimento e a degradação das células convencionais e os dados obtidos nas diferentes estações do ano, pretendemos analisar outros tipos de tecnologias, como as células de perovskita, que são de interesse devido à sua conformação flexível e semitransparente, o que as torna ideais para aplicações em estufas agro fotovoltaicas por reduzir o efeito de sombra, além de testar diferentes configurações na geometria das estufas, incluindo as células como parte da estrutura principal.

Palavras-chave: estufa agro fotovoltaica; células fotovoltaicas; projeto; parâmetros ambientais; produção agrícola; APV; PV.

Introducción

En la actualidad, generar energía eléctrica utilizando combustibles fósiles es un proceso costoso y poco amigable con el medio ambiente, debido a la



voracidad de la economía actual, ya que estos recursos naturales se están agotando cada vez más. La energía en la vida moderna es fundamental para la vida que conocemos, ya que la necesitamos para: movernos, comunicarnos, iluminar nuestro hogar y todo relacionado con nuestro bienestar y, para la producción de riquezas y crear bienes.

De ahí que se busquen nuevas alternativas para la producción de energía de forma más limpia y amigable con el medio ambiente, que también sean más económicas y permitan el cuidado y mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

El concepto de aplicaciones agro-fotovoltaicas (Weselek et al., 2019) fue propuesto inicialmente en el año 1982 por Goetzberger y Zastrow, como un medio para modificar el uso del suelo en aplicaciones de plantas de energía solar y permitir la utilización agrícola (producción de cultivos) en la misma superficie. Su idea era elevar los colectores solares a 2 m del suelo y aumentar la distancia entre ellos para evitar la sombra excesiva sobre los cultivos (Goetzberger y Zastrow, 1982); pasaron alrededor de tres décadas hasta que este concepto, denominado Agrofotovoltaico, AgroPV, Agrovoltaiico o Solar Compartido, se implementó en varios proyectos y plantas piloto alrededor del mundo. En estudios recientes se ha demostrado la viabilidad técnica de estos sistemas, ya que la aplicación de este enfoque técnico puede aumentar los ingresos de las explotaciones en más del 30 % (Thompson et al., 2020).

Aquí mostramos los primeros trabajos en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos (FV) para el aprovechamiento de la radiación solar a las condiciones de la zona de Comalcalco, Tabasco, y su uso en aplicaciones agrícolas, con lo que se pretende tener sistemas híbridos que permitan un aprovechamiento más eficiente de los suelos de cultivo, además de un progreso en la eficiencia terminal de los mismos, en términos de crecimiento de las plantas debido a la reducción del efecto sombra y, en las condiciones del proceso de fotosíntesis por una mejor generación de biomasa en las plantas (Weselek et al., 2019). Esto último hace que, instalar estos sistemas en áreas abiertas sea una solución económica si se compara con el consumo convencional proporcionado por la compañía eléctrica. Sin embargo, puede conducir a conflictos de uso de la tierra entre la producción de energía y alimentos y ser una preocupación importante, especialmente en áreas de tamaño limitado o densamente pobladas.

Tanto las plantas como los paneles solares aprovechan la luz solar para producir biomasa a través de la fotosíntesis y generar electricidad a través del efecto fotovoltaico (Wu et al., 2018). Las plantas fotosintéticas y las plantas solares no solo requieren luz solar, sino que también tienen diferentes requisitos en cuanto a calidad y cantidad de luz.

La calidad de la luz absorbida por los paneles solares se puede ajustar para usar todo el espectro solar al que se optimice; los paneles opacos o transparentes teñidos solo usan ciertas partes del espectro electromagnético, mientras que las longitudes de onda que absorben las plantas depende de su pigmentación; de ahí que sí se utilice celdas solares semitransparentes optimizadas en un color específico y que no afecte el crecimiento de las plantas, ya que, teóricamente, estos sistemas solo requerirían un tercio de la radiación entrante y, mejoras técnicas adicionales podrían aumentar su idoneidad para su aplicación en la producción de cultivos (Weselek et al., 2019).

Un sistema de agricultura fotovoltaico tiene los siguientes componentes, que son definidos como:

- **Un sistema fotovoltaico:** es el conjunto de equipo eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar por medio del efecto foto eléctrico. Los FV pueden ser sistemas autónomos y sistemas interconectados a la red eléctrica. Los sistemas autónomos por medio de un panel solar producen energía para, posteriormente, ser almacenada en las baterías y disponer de ella en cualquier momento (Cepeda-Moya, 2017).
- **Una celda fotovoltaica:** es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotoeléctrico. Las celdas están conformadas por materiales semiconductores que controlan el flujo de electrones para formar corrientes eléctricas (Cepeda-Moya, 2017).

Un ejemplo claro de este tipo de sistemas lo dan Chen et al. (2017), al obtener producción de maíz con biogás y mostrar que la productividad de la tierra con energías renovables puede, incluso, duplicarse mediante APV, en comparación con la producción separada de maíz y energía con módulos fotovoltaicos montados en el suelo. Beck et al. (2012) establecieron una instalación de prueba APV para validar sus suposiciones.

Con todo lo anterior en mente, surgió el actual proyecto, con la intención de aplicar estas tecnologías y acercarlas a las comunidades pobres del país, aprovechando programas gubernamentales como es el de ‘Sembrando Vida’.

Marco teórico y problemática a abordar

Aquí sentamos las bases para el desarrollo y el diseño de un invernadero, utilizando celdas solares semitransparentes, con el propósito de optimizar el aprovechamiento de la radiación solar tanto en generación de energía eléctrica como en producción de biomasa en los cultivos, con lo cual mejora la eficiencia de las plantas a producir en este tipo de dispositivos ya que, al pasar

por el proceso de fotosíntesis se garantiza un crecimiento de las mismas y se puede obtener mejores resultados, como se especificó con anterioridad. Con las tecnologías actuales, el posicionamiento de las celdas es fundamental para poder aprovechar la luz solar una mayor cantidad de tiempo; estas tienen que:

1. Colocarse en direcciones que aprovechen hasta cuando se oculta el sol, evitando factores externos al panel solar, que se puede encontrar en aspectos como variaciones climáticas, ángulo de inclinación y sombreado, los cuales afectan el rendimiento del panel considerablemente.

Existen técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) que representan el método más simple para mejorar el rendimiento del módulo fotovoltaico y permiten reducir este tipo variaciones, haciendo que el sistema siempre se encuentre en su MPPT.

2. Se deben considerar las diferentes estaciones del año, dado que, en cada una, existen diferentes condiciones ambientales como:
 - a. Radiación solar
 - b. Temperatura ambiente.
 - c. Humedad

De aquí que, el uso de nuevas tecnologías como las celdas de perovskita, sirva en gran medida para este tipo de desarrollo, tanto por su flexibilidad como por su alta eficiencia energética, ya que estos materiales han sido investigados con resultados alentadores, motivados en gran medida por el rápido aumento de la eficiencia energética, la cual en los últimos cinco años ha producido eficiencias certificadas de hasta el 21,7 %. Su importancia es tal que, para ponernos en contexto, la mejor celda inorgánica de unión-única (GaAs), después de casi 60 años de investigación, alcanzó el 29 % de eficiencia (Manser y Kamat, 2014).

Para poder entender este trabajo haremos a continuación una serie de definiciones que nos ayudarán a entender el porqué de los parámetros a medir en este proyecto, así como, algunas problemáticas a resolver:

Las celdas solares o celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten la luz solar en energía utilizable. La cantidad de luz solar que se puede convertir en electricidad se denomina 'eficiencia de una celda solar'. Hay algunos factores a considerar al elegir un panel solar, para garantizar una eficiencia óptima.

La temperatura óptima de trabajo de los paneles solares está entre 20 y 25 grados. Por encima de esta temperatura, el rendimiento del panel solar disminuirá ligeramente.

Rendimiento de las celdas solares a 40° C ronda el 80 % según la mayoría de fabricantes. Sin embargo, este efecto negativo de la producción de calor se ve compensado por un aumento de las horas de sol. Así es cómo afecta la temperatura al rendimiento de los paneles solares.

Por tanto, el **punto máximo de funcionamiento** del panel solar es cuando el ambiente está más templado; incluso, cuando está nublado. Contrariamente a la creencia popular, los paneles solares generan electricidad en los días nublados. Las nubes afectan a la radiación de tres formas diferentes: la reflejan, la absorben y la dispersan, pero no impiden que la radiación llegue a los paneles solares.

La humedad puede causar degradación y fallos en los paneles convencionales. La humedad en el aire ataca las finas líneas de pasta metálica del anverso de una celda solar convencional.

Irradiación solar y energía disipada: por la mañana, al atardecer y, en especial, durante el invierno, cuando el sol está a baja altura, el valor de la irradiación solar se aproxima con mayor intensidad al valor de la energía disipada; energía disipada = potencia absorbida - potencia desprendida en otros momentos del día o estaciones.

Sombra o suciedad en la estación de medición. En función del lugar de colocación, es posible que plantas o edificios proyecten sombra sobre la estación de medición de su instalación fotovoltaica, provocando un sombreado momentáneo o incluso permanente de la estación de medición. Incluso, piezas de la propia instalación fotovoltaica pueden proyectar sombra sobre la estación de medición, en especial cuando el sol se encuentra a poca altura. El sombreado parcial o total de la estación de medición puede conducir a valores del coeficiente de rendimiento superiores al 100 %. Además, factores ambientales como la nieve, el polvo o el polen pueden ensuciar la estación de medición de su instalación fotovoltaica y generar también valores del coeficiente de rendimiento superiores al 100 %.

Sombra o suciedad en los módulos fotovoltaicos: en función del lugar de colocación, es posible que plantas o edificios proyecten sombra sobre sus módulos fotovoltaicos, provocando así un sombreado momentáneo o incluso permanente de los módulos. También la suciedad; por ejemplo, polvo, polen, nieve, etc., conducen a un sombreado de los módulos fotovoltaicos, haciendo que estos logren absorber menos irradiación solar, reduciendo su efectividad e incrementando, además, el costo del coeficiente de rendimiento de la instalación fotovoltaica.

Descripción del proyecto y parámetros a medir

La instrumentación de este trabajo se muestra en la Figura 1. Los parámetros aquí considerados son de suma importancia para poder tener una referencia sobre la eficiencia de las celdas solares y de todos los parámetros y variables que afectan a los paneles en cuanto a transformación de la energía solar a energía eléctrica, teniendo de manera teórica una efectividad un 24 % de conversión en condiciones estándares, como irradiación solar constante, limpieza en los módulos fotovoltaicos, inclinación angular de 45° , altura mínima de 2 m a nivel del suelo, etc.

B1.- Medición de temperatura: la medición de esta variable ambiental se captará mediante el sensor **BMP180**; a medida que la temperatura vaya aumentando o disminuyendo, según sea el caso, el sensor medirá este tipo de parámetro para la obtención de datos para la eficiencia de las celdas solares:

- Voltaje de operación: $3.3V - 5V DC$
- Rango de presión: 300 a 1100 hPa (0.3 – 1.1bar)
- Resolución: 1 Pa
- Precisión absoluta: 1 hPa
- Medición de temperatura incluida
- Resolución de temperatura: $0.1^\circ C$
- Precisión temperatura: $1^\circ C$
- Frecuencia de muestreo: 120 Hz (máx.)
- Rango de altura medible: 0 – 9100 m.
- Ultra-bajo consumo de energía
- Completamente calibrado.

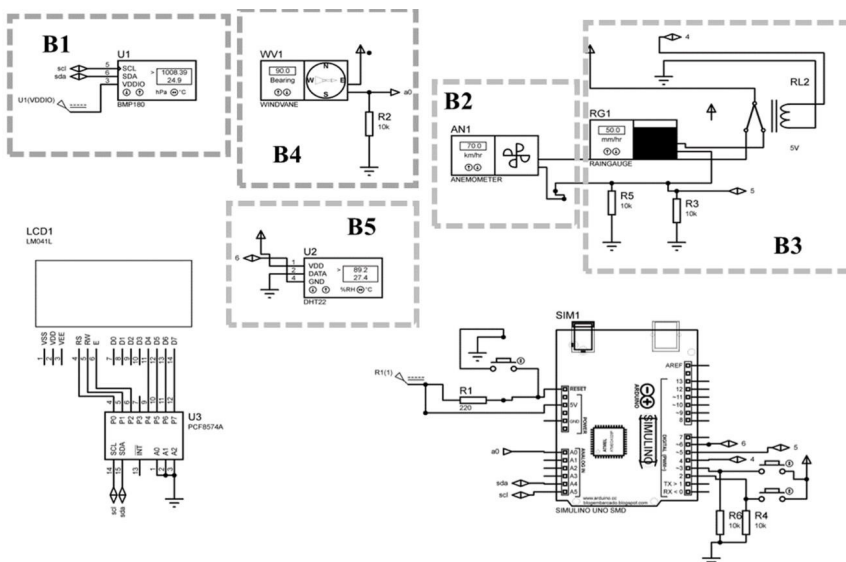
B1.- Medición de presión atmosférica: el sensor **BMP180** registrará las mediciones de la presión atmosférica y temperatura. Conocer la presión atmosférica es esencial para predecir el tiempo y sus variaciones futuras; es un buen complemento para la medición de la temperatura ambiente y la humedad.

- Voltaje de operación: $3.3V - 5V DC$
- Rango de presión: 300 a 1100 hPa (0.3 – 1.1bar)
- Resolución: 1 Pa
- Precisión absoluta: 1 hPa
- Medición de temperatura incluida
- Resolución de temperatura: $0.1^\circ C$
- Precisión de temperatura: $1^\circ C$
- Frecuencia de muestreo: 120 Hz (máx.)

- Rango de altura medible: 0 – 9100 *m*.
- Ultra-bajo consumo de energía.

Figura 1

Circuito de sistema de monitoreo de parámetros ambientales



B1.- Medición de altitud: el sensor **BMP180** registrará las mediciones de la presión atmosférica, temperatura y altitud. La medición de altitud nos dará referencias para conocer las condiciones de la presión atmosférica y las variaciones de temperatura de la zona.

- Voltaje de operación: 3.3V – 5V *DC*
- Interfaz de comunicación: –12 *DC* (3.3V)
- Rango de presión: 300 a 1100 *hPa* (0.3 – 1.1 *bar*)
- Resolución: 1 *Pa*
- Precisión absoluta: 1 *hPa*
- Medición de temperatura incluida
- Resolución de temperatura: 0.1 °C
- Precisión de temperatura: 1 °C
- Frecuencia de muestreo: 120 *Hz* (máx.)
- Rango de altura medible: 0 – 9100 *metros*.

B2.- Medición de velocidad del viento: la medición del aire se realiza mediante un anemómetro **PCEVA 11**. Conocer la variación del viento ayudará a saber cómo la temperatura del ambiente estará variando; esto afecta a las celdas solares en su rendimiento.

- Rango de medición: 0.4 a 30 *m/s*
- Temperatura: –20 a 70 °C

- Unidades: m/s , km/h , mph , ft/min
- Sensor de rueda alada.

B3- Medición de precipitación pluvial: se hace con un pluviómetro **TFA 47**, que permite obtener información acerca de sus características espaciales, su frecuencia y la cantidad precipitada sobre un lugar específico.

- Rango de medida: 0.08 mm a 360 mm .
- Resolución: 0.08 mm aproximadamente (según calibración individual)
- Peso: 6 kg .
- Conector $RJ - 45$. • Consumo: $< 1\text{ mA/h}$.

B4.- Punto cardinales: este tipo de parámetro se mide con una veleta con sensor **FRTI 8000**. Para poder orientarse se debe conocer uno de los puntos cardinales y el sol ayudará a ello. porque siempre sale por el Este y se oculta por el Oeste; esto ayudará a posicionar las celdas fotovoltaicas de manera que aprovechen al máximo la irradiación solar.

- Soporta hasta 200 km/h .
- Alimentación 12 a 30 VDC
- Veleta de $0 - 360^\circ$ sin ángulos muertos
- Deberá orientarse al norte.

B5.- Humedad: la medición de la humedad se realizará mediante el sensor **DHT11**; este tipo de parámetro meteorológico permite saber qué cantidad de humedad tendrán que soportar las celdas solares en la zona de Comalcalco; esto, igual afectará al cultivo que se encontrará dentro del agroinvernadero propuesto.

- Voltaje de operación: $3\text{V} - 5\text{V DC}$
- Rango de medición de temperatura: 0 a 50°C
- Precisión de medición de temperatura: $\pm 2.0^\circ\text{C}$
- Resolución de temperatura: 0.1°C
- Rango de medición de humedad: 20% a $90\% RH$
- Precisión de medición de humedad: $5\% RH$
- Resolución de humedad: $1\% RH$
- Tiempo de censado: 1 seg .

Descripción del agro-invernadero

Diseño prototipo del invernadero para aplicaciones agrofotovoltaicas (APV). El diseño está pensado para optimizar el aprovechamiento de la superficie, en la cual se requiere la simultánea producción agrícola en conjunto con la producción de energía fotovoltaica. Debido a que las celdas que se

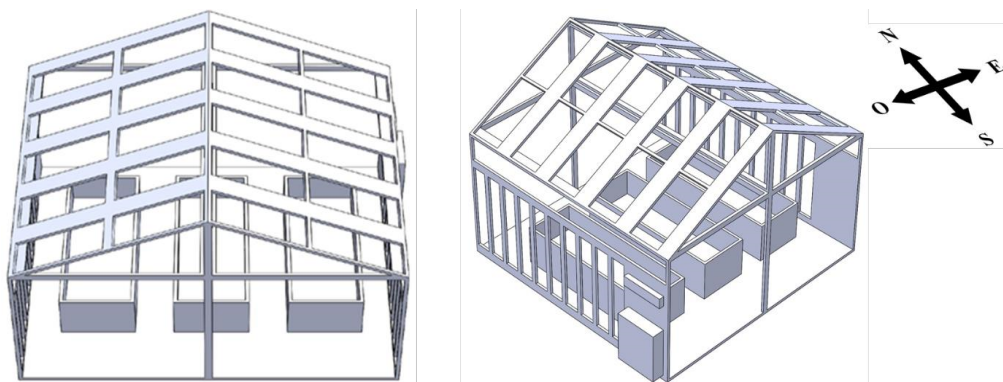
tiene contempladas para la siguiente etapa del proyecto son flexibles y semitransparentes, se pretende que estas formen parte de la estructura del invernadero, como muros y techado. A continuación, se presentan algunas vistas de la propuesta del invernadero (ver Figura 2).

Este diseño integra el uso del suelo para la producción agrícola de plantas, en conjunto con una estructura en la cual se tiene integradas celdas semitransparentes, además de que en uno de los costados está la instrumentación para la toma de parámetros ambientales.

En las siguientes imágenes se puede notar la distribución del invernadero, el cual posee un techado en configuración a dos aguas, además de una distribución uniforme de las plantas, para tener niveles homogéneos de temperatura, humedad y radiación solar.

Figura 2

Diseño del invernadero APV

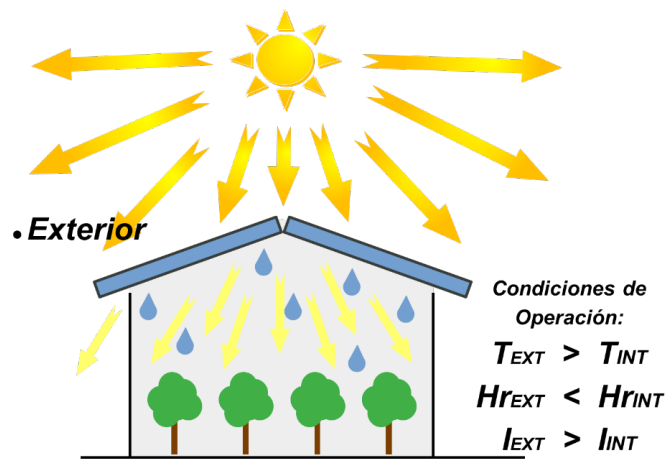


Debido a que la configuración del techado del invernadero es a dos aguas, la cumbrera del mismo debe orientarse perpendicularmente a la trayectoria del sol (Este - Oeste), para favorecer la captación de radiación solar, además de la capacidad de acumulación de calor en el suelo.

Para el almacenamiento de la energía fotovoltaica producida por las celdas, se tiene pensado un sistema de baterías solares, el cual hace las veces de fuente de alimentación del sistema de instrumentación, con lo que se tiene un sistema autosustentable que evita el uso de energía de fuentes convencionales.

Figura 3

Ejemplo de la aplicación del sistema APV



Conclusiones

La demanda de energía solar está aumentando y se está utilizando como un terreno potencial para futuros conflictos económicos, ambientales, políticos y sociales para mejorar nuestras propias posibilidades. APV proporciona soluciones a problemas relacionados con la producción sostenible de alimentos y energía. Se ha demostrado que APV mejora la eficiencia del uso de la tierra, principalmente al permitir el cultivo (ver Figura 3).

La idea es generar plantas de energía solar simultáneamente, en las mismas tierras de cultivo. El efecto técnico de ambos sistemas de producción es el mismo.

Referencias

- Beck, M., Bopp, G., Goetzberger, A., Obergfell, T., Reise, C., & Schindele, S. (2012). Combining Pv and Food Crops to Agrophotovoltaic - Optimization of orientation and harvest. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, February 2019, 4096-4100. <https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2.25>
- Cepeda-Moya, J. S. (2007). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones [Tesis de Pregrado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/4196>

- Chen, B. L., Yang, H. K., Ma, Y. N., Liu, J. R., Lv, F. J., Chen, J., Meng, Y. L., Wang, Y. H., & Zhou, Z. G. (2017). Effect of shading on yield, fiber quality, and physiological characteristics of cotton subtending leaves on different fruiting positions. *Photosynthetica*, 55(2), 240-250. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0209-7>
- Goetzberger, A. & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>.
- Manser, J. S. & Kamat, P. V. (2014). Band filling with free charge carriers in organometal halide perovskites. *Nature Photonics*, 8(9), 737-743. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.171>
- Thompson, E. P., Bombelli, E. L., Shubham, S., Watson, H., Everard, A., D'Ardes, V., Schievano, A., Bocchi, S., Zand, N., Howe, C. J., & Bombelli, P. (2020). Tinted semi-transparent solar panels allow concurrent production of crops and electricity on the same cropland. *Advanced Energy Materials*, 10(35), 2001189. <https://doi.org/10.1002/aenm.202001189>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Wu, Y., Zhao, W., Meng, Y., Wang, Y., Chen, B., & Zhou, Z. (2018). Relationship between temperature-light meteorological factors and seed cotton biomass per boll at different boll positions. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(6), 1315-1326. [https://doi.org/10.1016/S20953119\(17\)61820-3](https://doi.org/10.1016/S20953119(17)61820-3)