

## REVISIÓN DE ALGUNOS ASPECTOS DEL SISTEMA AGROVOLTAICO

### REVIEW OF SOME ASPECTS OF THE AGROVOLTAIC SYSTEM

**Keyla Márquez P<sup>1</sup>, Quiliano Contreras Rubio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería. Núcleo Universitario Alberto Adriani.

Universidad de Los Andes, Mérida -5101- Venezuela

<sup>2</sup>Laboratorio de Química. Universidad Nacional Experimental Sur del Lago,

Jesús María Semprum, Zulia- Venezuela

keylaenator@gmail.com

**Recibido:** 18-08-2023

**Aceptado:** 31-10-2023

#### Resumen

La enorme necesidad de recursos alimentarios, hídricos y energéticos ((FWE) Food, Water, Energy) en un futuro inmediato, unida a la gran preocupación por el cambio climático, exigen nuevas tecnologías, que podrían traducirse en innovaciones FWE integradas, con bajo impacto ecológico y climático. La integración de la energía solar fotovoltaica y las tecnologías agrícolas, es un enfoque prometedor para la doble productividad de la tierra, que podría satisfacer la creciente demanda de alimentos y energía, con énfasis en las poblaciones rurales y remotas. Se trata de la tecnología que denominaremos "agrovoltaica" (AV), que sería de gran utilidad para emplazamientos en climas cálidos y áridos, que consiste en aprovechar una misma superficie de terreno tanto para obtener energía solar como productos agrícolas, con alta iluminación solar. Un sistema optimizado de este tipo, con paneles solares, podría evitar el estrés térmico excesivo durante las inclemencias del tiempo, aumentando así el rendimiento de los cultivos.

**Palabras clave:** Energía solar, Fotovoltaico, Agricultura, Agrovoltaica

#### Abstract

The enormous need for food, water and energy (FWE) resources in the immediate future, coupled with the great concern for climate change, demand new technological alternatives, which could translate into integrated FWE innovations. with low ecological and climate impact.

The fusion of photovoltaic solar energy and agricultural technologies, is a promising approach to dual land productivity that could meet the growing demand for food and energy, with an emphasis on rural and remote populations. This is "agrovoltaic" (AV) technology, which would be of great use for sites in hot and arid climates, which consists of taking advantage of the same surface of land, both to obtain solar energy and agricultural products, with high solar lighting where such an optimized system with solar panels could avoid excessive heat stress during inclement weather, thus increasing crop yields.

**Key words:** Solar energy, Photovoltaic, Agriculture, Agrovoltaic,

**Keyla Márquez:** MSc. En Electroquímica Fundamental y Aplicada ULA. Ingeniero Industrial IUPSM, personal docente y de investigación de la Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario Alberto Adriani. El Vígía estado Mérida, Venezuela  
Email: keylaenator@gmail.com

**Quiliano L. Contreras Rubio:** Doctor en Química Aplicada (ULA), Profesor Titular de la Universidad Nacional Experimental Sur del Lago, Adscrito al PFC Ingeniería de Alimentos, Santa Bárbara de Zulia, Estado Zulia, Venezuela.  
Email: quiliano@gmail.com

## Introducción

El desarrollo a gran escala de la electricidad generada por energía solar, se ve obstaculizado en algunas regiones del mundo por la competencia en el uso del suelo y la resistencia social localizada. Uno de los enfoques para paliar estos problemas es la agrovoltaica: la ubicación estratégica conjunta de la energía solar fotovoltaica y la agricultura.<sup>1</sup> Las investigaciones sugieren que el potencial de un proyecto agrovoltaico para conservar los intereses agrícolas y en consecuencia, aumentar el apoyo local al desarrollo, es la oportunidad más significativa del doble uso de la energía solar.<sup>2</sup>

Cada vez se aplica más la energía solar cuando se combina con el uso compartido de la tierra. Ejemplos actuales son los sistemas fotovoltaicos (PV) que flotan sobre el agua<sup>3</sup> (figura 1), y también los terrenos de doble uso en los que la agricultura se entrelaza con los paneles PV<sup>4</sup> (Figura 2).



Figura 1.- Ejemplo de una estación fotovoltaica flotante.:

<https://interestingengineering.com/innovation/floating-solar-panels-reservoirs>



Figura 2.-Ejemplo de compatibilidad entre agricultura y sistema fotovoltaico: <https://nostresol.com/agrovoltaica/>

Es evidente que este tipo de implantaciones plantea retos, ya sea porque la geografía dificulta la instalación o porque la actividad requiere compartir tanto el terreno como la "cosecha" de fotones de luz.<sup>5</sup>

Debido a estos retos, es necesario optimizar la implantación de la fotovoltaica y otros usos del suelo para extraer un valor significativo que vaya más allá de un mero proyecto de demostración. Pero la diversidad y complejidad de las configuraciones no se prestan a un análisis sencillo. Dada esta complejidad, es necesario desarrollar algoritmos flexibles que puedan tener en cuenta múltiples variables, cuando los datos pueden proceder de múltiples fuentes complejas.

Es precisamente en esta configuración donde las aplicaciones de redes neuronales avanzadas (figura 3)<sup>6</sup> pueden ayudar y orientar la instalación y la gestión de las actividades combinadas de ordenación del territorio. Deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- ⊙ Inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (AA), junto con parámetros y condiciones ambientales influyentes.
- ⊙ La necesidad de desarrollar algoritmos transferibles.
- ⊙ La metodología general para la implementación y extensión al segmento más amplio de uso dual fotovoltaico.

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático<sup>7</sup> se han convertido en importantes soluciones tecnológicas, ya que la industria busca constantemente formas de satisfacer la creciente demanda de energía limpia, barata y fiable. Estas tecnologías avanzadas tienen el potencial de analizar el pasado, optimizar el presente y predecir el futuro.

Esto significa que la IA y el AA tienen el potencial de resolver la mayoría de los desafíos que prevalecen actualmente.

## Técnicas de inteligencia artificial en sistemas fotovoltaicos

Los algoritmos de IA se utilizan en muchos aspectos del dimensionamiento, el modelado

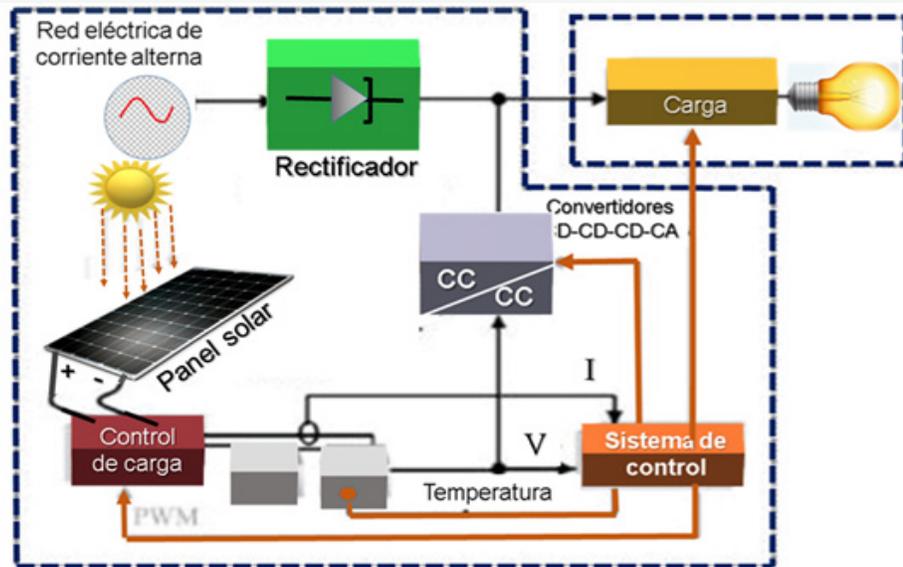


Figura 3.- Aplicaciones de redes neuronales avanzadas para el sistema fotovoltaico

y el control de los sistemas fotovoltaicos.<sup>8</sup> Es muy importante identificar el modelado de celdas solares como una preocupación precisa de las celdas solares en relación con la investigación de sistemas fotovoltaicos. Existen dos circuitos equivalentes para modelar la celda solar: el modelo de diodo único<sup>9</sup> y el de dos diodos.

El modelo de diodo único tiene cinco parámetros: factor ideal del diodo, corriente de saturación del diodo, resistencia en serie, resistencia en derivación y corriente fotogenerada, mientras que el modelo de doble diodo tiene siete parámetros (figura 4).

Estimar con precisión estos parámetros es

fundamental para modelar y dimensionar los sistemas fotovoltaicos.<sup>10</sup>

Existen muchos métodos convencionales en la literatura para la identificación de los parámetros de las celdas solares. La parte analítica se considera una conjetura inicial para la solución numérica.

### Parámetro de búsqueda de patrón (BP)

La extracción de parámetros de modelos fotovoltaicos ((PV) Photovoltaic) basada en datos medidos de corriente-voltaje, desempeña un papel importante en el control, la simulación y la optimización de sistemas PV.<sup>12</sup> El método de búsqueda de patrones se describe para modelos

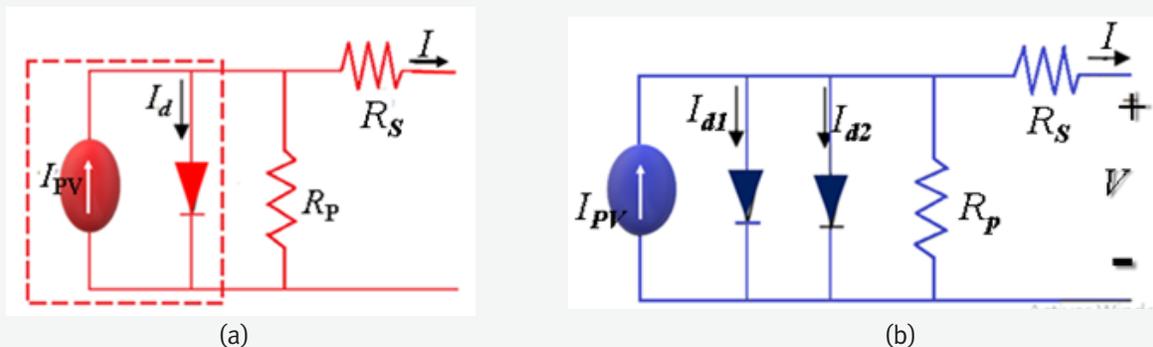


Figura 4.- Circuitos equivalentes para modelar la celda solar: (a) el modelo de diodo único<sup>11</sup> y (b) el modelo de dos diodos.  $R_s$  y  $R_p$  son las resistencias equivalentes en serie y en paralelo, respectivamente,  $I_{PV}$  es la corriente generada por la incidencia de la luz (corriente fotovoltaje),  $I$  es la corriente que pasa por el circuito.  $I_{d1}$  e  $I_{d2}$ , son las corrientes de los diodos 1 y 2, respectivamente.

de diodo único, doble diodo y módulo fotovoltaico. Sin embargo, los métodos convencionales no son capaces de estimar los parámetros de los módulos fotovoltaicos con gran precisión. Esto ha llevado a muchos científicos a buscar técnicas de IA para la identificación de parámetros. La búsqueda de patrones es un optimizador global capaz de resolver una amplia gama de problemas de optimización, y ha estado recibiendo una atención significativa.

A diferencia de muchas técnicas de optimización convencionales, no requiere la información del gradiente para guiar su proceso de búsqueda, ni impone ciertas características a la función objetivo, como la convexidad o la continuidad. Las principales características atractivas de este algoritmo de optimización son la simplicidad del concepto, la facilidad de implementación y la eficiencia computacional.

Se han introducido varias técnicas para el seguimiento del punto de máxima potencia ((MPPT) Maximum Power Point Tracking)<sup>13</sup> de los sistemas fotovoltaicos. En este sentido, se ha publicado la técnica MPPT, aumentada por la conductancia incremental ((INC) Incremental Conductance) y el algoritmo híbrido de salto de rana y búsqueda de patrones ((HSFLA-PS) Hybrid Shuffled Frog-Leaping and Pattern Search algorithm) basado en el sistema de inferencia neuro-fuzzy adaptativo ((ANFIS) Adaptative Neuro-Fuzzy Interference System)<sup>14</sup> para las aplicaciones de sistemas solares fotovoltaicos. Los valores óptimos de las tensiones para diferentes valores de temperaturas e irradiaciones solares se han encontrado utilizando el método HSFLA-PS.<sup>15</sup>

Tras aplicar el proceso de entrenamiento, el ANFIS daría una tensión óptima, teniendo en cuenta diferentes valores de irradiancia solar. El método INC debería inicializarse a partir de este punto para buscar el punto de máxima potencia conocido como "MPP".<sup>16</sup>

El mérito del método combinatorio ANFIS e INC es que necesitaría un menor número de muestras para el proceso de entrenamiento. Se ha informado de que el marco indica que

la técnica combinatoria HSFLA-PS-ANFIS-INC daría lugar a los máximos globales en diversas condiciones climáticas con una mayor tasa de convergencia y eficiencia.<sup>17</sup>

### **Necesidad de desarrollar algoritmos transferibles**

El nivel de penetración de la energía fotovoltaica en la red está aumentando exponencialmente en todo el mundo. Este mayor nivel de penetración plantea retos únicos a los operadores de sistemas. Además de los retos de la integración, persisten otros importantes en los ámbitos de: i) el aumento de la energía captada del sol; ii) la reducción del costo de los componentes necesarios para la conversión de energía, a fin de alcanzar la paridad con la electricidad generada con carbón; y iii) la mejora de la fiabilidad a fin de reducir los costos de sustitución durante la vida útil del sistema.

Los modelos de aprendizaje automático desarrollados sobre un conjunto de datos, que comprende una clase particular de materiales, muestran una escasa transferibilidad entre diferentes clases. El problema puede resolverse parcialmente aumentando la variabilidad del conjunto de datos a costa de la precisión de la predicción. Para desarrollar un modelo en una base de datos altamente variable, se ha propuesto una regresión localizada, basada en el enfoque "patchwork kriging"<sup>18</sup> (extrapolación por retazos) para capturar la mayoría de los detalles complejos de los datos.

En este enfoque, los datos se dividen en regiones más pequeñas, con parches compartidos de pocos puntos de datos a través de los límites vecinos. Se han desarrollado funciones de regresión locales en cada partición, con la restricción de ofrecer un rendimiento similar en el límite, desarrollando un modelo global para toda la base de datos. En resumen, el modelo de enfoque "patchwork kriging" es para desarrollar el modelo de predicción para un conjunto de datos con una enorme variabilidad, donde se desarrollan varios modelos locales sobre los dominios particionados, con parches compartidos

de puntos de datos a través de los límites vecinos. La implicación de la salida objetivo para crear las particiones requiere su estimación de antemano. Se puede desarrollar un modelo global sobre todo el conjunto de datos, que dirija los puntos de datos a una partición específica para una predicción precisa de los valores.

### **Implementación y ampliación al segmento más amplio de uso dual fotovoltaico.**

La intensificación de las demandas de flujo térmico de los concentradores fotovoltaicos exige innovaciones que van más allá de la refrigeración pasiva convencional por aire. La refrigeración pasiva es rentable, fiable y no consume energía. La disposición de las lentes planas debería permitir enfriar grandes disipadores de calor pasivos con concentraciones solares de hasta 2000 a 4000 soles ( $1 \text{ sol} = 1000 \text{ W/m}^2$ ).

Sin embargo, a medida que aumenten las concentraciones solares también lo hará la necesidad de refrigeración activa. La competitividad de la refrigeración activa<sup>19</sup> se ve reforzada por la capacidad de aprovechar la energía térmica que de otro modo se desperdiciaría.<sup>20</sup> La refrigeración activa por microcanales es un buen candidato para satisfacer la creciente demanda de flujo térmico de los concentradores fotovoltaicos. Para satisfacer las demandas de flujo térmico a corto plazo, lo más práctico es la refrigeración monofásica por microcanales. Los microcanales en batería ofrecen un rendimiento superior al de los microcanales monocapa, aunque son más difíciles de fabricar.<sup>21</sup>

Para satisfacer las demandas de flujo térmico a largo plazo, la integración de flujos en ebullición es prometedora. También deben explorarse nuevas vías, como la modificación de los microcanales rectangulares y rectos o el uso de microválvulas para suprimir las inestabilidades de ebullición.

Los módulos de fluido térmico, como los disipadores de calor, se utilizan mucho como dispositivos de refrigeración en aplicaciones de ingeniería. En particular, gracias a los avances en la fabricación de

sistemas microelectromecánicos (MEMS) y a las tecnologías de integración a pequeña escala, los disipadores de calor basados en nanomicrocanales han recibido cada vez más atención por su capacidad para eliminar una energía térmica generosa. En comparación con las tecnologías de gestión térmica convencionales, los disipadores de calor basados en nanocanales/microcanales presentan unas prestaciones de disipación térmica extraordinarias. Los disipadores de microcanales fabricados mediante micromecanizado pueden integrarse en chips semiconductores, lo que los convierte en uno de los métodos de refrigeración de chips más prometedores de la actualidad.

### **El potencial de los sistemas agrovoltaicos**

Los sistemas agrovoltaicos (SAV) ofrecen una estrategia simbiótica para la coubicación de energías renovables sostenibles y la producción agrícola. Esto es especialmente importante en los países en desarrollo y desarrollados densamente poblados, donde el desarrollo de las energías renovables es cada vez más importante; sin embargo, hay que preservar las tierras agrícolas rentables.

Como subraya el nexo entre alimentos, energía y agua (FEW), los avances en los SAV no sólo deben centrarse en la gestión de la energía, sino también en la gestión agronómica (de los cultivos y del agua). Los resultados muestran que la arquitectura fotovoltaica solar y los avances en la gestión agronómica dependen de (i) las cualidades de la radiación solar en términos de intensidad luminosa y radiación fotosintéticamente activa ((PAR) Photosynthetic Active Radiation), (ii) las categorías de SAV, como la centrada en la energía, la centrada en la agricultura y la centrada en la energía agrícola, y (iii) la perspectiva de los accionistas (especialmente los agricultores).

A continuación, son necesarios varios ajustes para la selección y gestión de cultivos debido a la limitación de luz, las condiciones microclimáticas bajo la estructura solar y las limitaciones de la estructura solar. Y lo que es más importante, se requiere un sistema de riego sistemático para evitar daños en la estructura de paneles solares. En resumen,

los avances del SAV deben planificarse cuidadosamente para garantizar los objetivos de reducir la dependencia de fuentes no renovables, mitigar los efectos del calentamiento global y cumplir las iniciativas del FEW.

Para satisfacer la demanda energética mundial con energías renovables limpias, como los sistemas solares fotovoltaicos (PV), se necesitan grandes superficies debido a la naturaleza relativamente difusa de la energía solar. Gran parte de esta demanda puede cubrirse con sistemas fotovoltaicos integrados en edificios y tejados, pero el resto puede satisfacerse con parques fotovoltaicos en tierra. El uso de grandes extensiones de terreno para huertas solares aumentará la competencia por los recursos de la tierra, ya que tanto la demanda de producción de alimentos como la de energía están creciendo. Esta competencia por la tierra se ve exacerbada por el aumento de la población.

El concepto de agrovoltaica puede resolver estos problemas<sup>22</sup> o el aprovechamiento conjunto de la misma superficie de terreno tanto para la producción de energía solar fotovoltaica como para la agricultura convencional. Se desarrolla un modelo de simulación acoplado tanto para la producción fotovoltaica ((PVSyst) Photovoltaic System)) como para la producción agrícola (modelo de cultivo Simulateur multidisciplinaire les Cultures Standard (STICS)),<sup>23</sup> para calibrar el potencial técnico de la ampliación de los sistemas agrovoltaicos.

Los resultados mostraron que el valor de la electricidad generada por energía solar unida a la producción de cultivos tolerantes a la sombra creaba un aumento de más del 30% en el valor económico de las explotaciones que desplegaban sistemas agrovoltaicos en lugar de agricultura convencional.

La utilización de cultivos tolerantes a la sombra, (café y cacao, que son los que más se benefician en sombra, porque la mayoría de los cultivos agrícolas, requieren bastante iluminación), permite minimizar las pérdidas de rendimiento y mantener así la estabilidad de los precios de los cultivos. Además, este

doble uso de las tierras agrícolas puede tener un efecto significativo en la producción fotovoltaica.

La necesidad de nuevas fuentes de energías renovables ha inducido la esperanza de que los cultivos agrícolas puedan ser una fuente de energía renovable para el futuro. Es necesario convertir la radiación solar tanto en energía como en alimentos. Por lo tanto, las plantas solares que utilizan paneles fotovoltaicos competirán con la agricultura por la tierra. Según la literatura, los sistemas agrovoltaicos pueden ser muy eficientes. Mecanismos similares a los evidenciados en los sistemas agroforestales pueden explicar la ventaja de estos sistemas mixtos. Por tanto, las nuevas plantas solares pueden combinar la producción de electricidad con la de alimentos, sobre todo en países donde la tierra de cultivo es escasa.

### **Presupuesto hídrico y modelización de cultivos para sistemas agro voltaicos**

Un nuevo término está de moda: el "agrovoltaísmo".<sup>24</sup> Se presenta como uno de los medios para alcanzar los objetivos fotovoltaicos para Francia. En el mundo agrícola, esta perspectiva suscita esperanzas e inquietudes. Las preocupaciones están relacionadas con las superficies que los promotores solares pretenden utilizar para la producción de energía fotovoltaica: esta cantidad puede considerarse como agricultores que no podrán instalarse. Esta producción solar podría convertirse en la principal producción agrícola. Pero también se plantean algunas cuestiones relativas a la instalación de paneles sobre los cultivos, y se pueden aprovechar algunos avances técnicos para reducir la sombra asociada.

El uso masivo de combustibles fósiles prohíbe perpetuar la producción de energía a nivel mundial y contribuye al inequívoco cambio climático., Las alarmantes consecuencias sobre el mundo agrícola consisten en un aumento de las demandas de agua por parte de las plantas, una disminución o un tope de los rendimientos de los cultivos y una disminución de la disponibilidad de agua en las regiones donde el riego sería necesario. Frente a

los retos energéticos y alimentarios, el agrovoltaísmo aparece como un concepto innovador en todo el mundo. Este concepto consiste en la asociación, en una misma superficie de terreno, de producciones agrícolas y fotovoltaicas, mediante paneles solares (PS) situados a una altura suficiente por encima del cultivo para permitir el paso de la maquinaria agrícola. El agrovoltaísmo (AV) trata por tanto de una especie de producciones eléctricas y agrícolas.

La instalación de paneles solares inclinados sobre las parcelas agrícolas proporciona energía renovable y medios de acción para amortiguar algunos de los efectos y peligros del cambio climático. Cuando los paneles funcionan correctamente, su sombra decreciente reduce el consumo de agua de las plantas, como consecuencia de la alternancia de bandas de sombra y sol, con un impacto a corto plazo en la conductancia estomática y una disminución global de los intercambios de gases.

Esto instó a desarrollar un nuevo modelo de crecimiento de los cultivos y de balance hídrico. El agrovoltaísmo parece una solución de futuro frente al cambio climático y los retos alimentarios y energéticos, típicamente en las zonas rurales y los países en desarrollo.

La combinación de agricultura y energía fotovoltaica en la misma superficie gana en atención y apoyo político en un número creciente de países, acompañada de notables actividades de investigación. En Alemania, entre los cultivos realizados con el sistema AV y en el campo de referencia con arreglo a un sistema de rotación de cultivos figuran la papa, el apio, nabo, la hierba de trébol y el trigo de invierno.

La eficiencia del uso de la tierra, medida por la relación equivalente de tierra ((LER) Land Equivalen Relation),<sup>25</sup> indicó un aumento de entre el 56% y el 70% en 2017, mientras que el verano seco y caluroso de 2018 demostró que el sistema agrovoltaico podría aumentar la productividad de la tierra en casi un 90%. Las simulaciones de radiación mostraron que desviarse del pleno sur unos 30° daba lugar a una distribución equitativa de la radiación

a nivel del suelo, lo que representaba la base del diseño agrovoltaico. Teniendo en cuenta el cambio climático y la creciente escasez de tierras, los resultados generales sugieren un alto potencial de la agrovoltaica como tecnología viable y eficiente para hacer frente a los principales retos del siglo XXI. El actual desarrollo de paneles transparentes en el campo agrovoltaico constituye nuevos aportes, probablemente con resultados exitosos en esta temática.

## **El potencial de los sistemas agrovoltaicos**

Para satisfacer la demanda energética mundial con energías renovables limpias, como los sistemas solares fotovoltaicos, se necesitan grandes superficies debido a la naturaleza relativamente difusa de la energía solar. Gran parte de esta demanda puede cubrirse con sistemas fotovoltaicos integrados en edificios y tejados, pero el resto puede satisfacerse con granjas fotovoltaicas en tierra. El uso de grandes extensiones de terreno para huertas solares aumentará la competencia por los recursos del suelo, ya que tanto la demanda de producción de alimentos como la de energía están creciendo y compiten por los limitados recursos del suelo.

Esta competencia por la tierra se ve exacerbada por el aumento de la población. Estos problemas pueden solucionarse con el concepto de agrovoltaica, es decir, utilizando la misma superficie de terreno para la producción de energía solar fotovoltaica y para la agricultura convencional. Se ha desarrollado un modelo de simulación acoplado para tanto la producción fotovoltaica (PVSyst) como el valor de la electricidad generada por energía solar acoplada a la producción de cultivos tolerantes a la sombra pueden crear más de un 30% de aumento del valor económico de las explotaciones que despliegan sistemas agrovoltaicos en lugar de la agricultura convencional.

La utilización de cultivos tolerantes a la sombra (algunos mencionados en la sección anterior) permite minimizar las pérdidas de rendimiento y mantener así la estabilidad de los precios. Además, este doble uso de

las tierras agrícolas puede tener un efecto significativo en la producción fotovoltaica local. Los resultados mostraron un aumento de la potencia fotovoltaica de entre más de 40 y 70 GW si sólo el cultivo de lechuga se convierte a sistemas agrovoltaicos.<sup>26</sup>

### **Clasificación normalizada e indicadores de los sistemas agrovoltaicos**

Los sistemas agrovoltaicos (agricultura-fotovoltaica) o de aprovechamiento compartido de la energía solar han adquirido un reconocimiento creciente como medio prometedor de integrar la agricultura y la captación de energía solar. Aunque este campo ofrece un gran potencial, los datos sobre el impacto en los cultivos, el crecimiento y el desarrollo son insuficientes.

Es necesario proporcionar una clasificación agrovoltaica general y estandarizada,<sup>27</sup> que incluya nombres y portadas correctos, que sea utilizable en todo el mundo e independiente de las condiciones climáticas locales, las prácticas agrícolas locales y los valores económicos de mercado de los cultivos. Esta clasificación se basa en componentes multidisciplinares (tipo de cultivo, estructura fotovoltaica,), que son elementos únicos para describir adecuadamente cada sistema agrovoltaico. La rápida disminución de los costos de los sistemas fotovoltaicos hace posible el potencial de los sistemas agrovoltaicos.

Estos sistemas de doble uso de la tierra mitigan los conflictos de uso de la tierra para los lugares con espacio abierto limitado y muestran el potencial de valor añadido en los cultivos y la ganadería. Sin embargo, se pueden encontrar muchos nombres diferentes y posibilidades de interacción entre la agricultura y la energía fotovoltaica. Esto dificulta y confunde a las partes interesadas la comparación y la evaluación comparativa de las instalaciones existentes, así como la propuesta y el establecimiento de nuevos regímenes legislativos.

Es necesaria una propuesta de clasificación estandarizada de los sistemas agrovoltaicos, que sea utilizable en todo el mundo. La clasificación debe basarse en la aplicación,

el sistema, el tipo de cultivo, la estructura fotovoltaica y la flexibilidad y ser capaz de categorizar cada instalación agrovoltaica existente correctamente.<sup>28</sup>

Según las diferentes demandas de luz solar, los cultivos pueden clasificarse en tres categorías principales, que incluyen seis clases menores. El punto de adaptación a la luz (PAL) se define como un indicador para aproximar si los cultivos positivos pueden florecer y fructificar con normalidad. Basándose en las horas de sol y en la radiación fotosintéticamente activa ((PAR) Photosynthetic Active Radiation), se propone un método de disposición de los cultivos combinando sus diferentes demandas de luz solar y su diferente distribución luminosa bajo paneles solares. Para ello, debería facilitarse una lista de especies recomendadas.

### **Aspectos económicos de la agrovoltaica (AV)**

La agrovoltaica combina los cultivos con la energía solar fotovoltaica para proporcionar beneficios de sostenibilidad en los sistemas de tierra, energía y agua.<sup>29</sup> Las políticas que apoyan el cambio de la agricultura de regadío a la de secano y la agrovoltaica conectada a la red en regiones que sufren estrés hídrico pueden mitigar tanto el agotamiento de las aguas subterráneas como el CO<sub>2</sub> procedente de la generación de electricidad.

Aquí se integran modelos hidrológicos, de cultivos, fotovoltaicos y financieros para evaluar el potencial económico de la agrovoltaica de secano en regiones con estrés hídrico.<sup>30</sup> El análisis revela un potencial de generación eléctrica de 11,2-37,6 PWh/año, equivalente al 40%-135% del suministro mundial de electricidad en 2018. Casi el 90% del agotamiento de las aguas subterráneas en 2010 (—150 km<sup>3</sup>) se produjo allí donde el costo nivelado de la generación agrovoltaica de secano conectada a la red es de 50-100 USD/MWh. Las posibles pérdidas de ingresos tras el cambio de cultivos de regadío a secano representan entre el 0% y el 34% del costo de generación nivelado. Los futuros análisis de costos y beneficios deben valorar el estrés evitado sobre las

aguas subterráneas desde la perspectiva de la disponibilidad de agua dulce a largo plazo.

Diversos estudios realizados hasta la fecha en varios países sobre el uso de módulos semitransparentes y opacos han demostrado los beneficios económicos resultantes del uso de esta tecnología. La mayoría de los resultados de estos estudios indican que el periodo de amortización de las inversiones en energía solar fotovoltaica en invernaderos oscila entre 4 y 10 años.

En Grecia, el gobierno subvenciona el costo de la electricidad en el sector agrícola para aumentar su competitividad. Al mismo tiempo, ofrece subvenciones económicas al capital invertido en solar-PV en invernaderos. Los resultados publicados sobre el uso de paneles fotovoltaicos solares en invernaderos agrícolas de varios países indican periodos de amortización de entre 4 y 10 años, mientras que en algunos casos los periodos de amortización son superiores, de hasta 25 años. La evaluación económica de las inversiones en energía solar fotovoltaica en invernaderos en Grecia ha indicado que el periodo de amortización varía de 7,2 años, cuando el capital invertido está subvencionado, a 14,4 años sin subvenciones de capital.



Figura 5.- Aspectos de algunos sistemas agrovoltaicos. <https://www.petroenergia.info/post/aplicaciones-de-energ%C3%ADas-renovables-en-la-cadena-de-producci%C3%B3n-agr%C3%ADcola>

La creciente demanda de generación de energía solar provocará un aumento de la competencia por el uso del suelo y, por tanto, posibles conflictos económicos y sociales. Una solución a este reto es producir alimentos y energía dentro de un sistema agrofotovoltaico (AV), como se muestra en la figura 5.

### Diseño arquitectónico de la agrovoltaica

Un sistema solar fotovoltaico (PV) es una unidad de generación de energía formada por un conjunto eléctricamente integrado de un conjunto PV, un inversor y otros componentes. Los paneles PV (también llamados módulos PV) están compuestos por varias celdas fotovoltaicas que convierten la energía de la luz solar en electricidad. Los módulos fotovoltaicos se conectan en serie para formar cadenas fotovoltaicas, que a su vez se conectan en paralelo para formar un conjunto fotovoltaico. El proceso es sencillo, ya que se trata de una conversión directa de luz solar en electricidad sin ningún movimiento mecánico complicado ni liberación de residuos al medio ambiente circundante. La idea del sistema agrovoltaico (AV) se basa principalmente en la adaptación de la tecnología fotovoltaica al uso agrícola, teniendo en cuenta las restricciones de espacio y cableado.<sup>31</sup>

Sin embargo, los AV se configuran de forma diferente a los sistemas fotovoltaicos típicos montados en el suelo (PV-GM), que son más frecuentes debido a sus costos de instalación más baratos y a la mayor densidad de paneles, que mejoran la producción de energía. Se han realizado varios estudios para determinar las características de la estructura fotovoltaica que debe integrarse en el sistema AV.

Los sistemas AV de densidad completa ((FD) Full Density) y de densidad media ((MD) Medium Density)<sup>32</sup> se han desarrollado y probado en estas instalaciones durante casi 10 años. La estructura FD está diseñada para una producción óptima de energía solar, por lo que sólo permite que alrededor del 50% de la radiación solar llegue al cultivo situado bajo el panel. Mientras que la estructura MD está diseñada para equilibrar la generación

eléctrica y la producción agrícola. De este modo, hasta el 70% de la radiación solar llega a los cultivos.

El entorno construido es una de las principales causas del impacto negativo que la actividad humana tiene en el planeta. El diseño de edificios debe adoptar estrategias que contribuyan a paliar esta situación. Por ello, los arquitectos deben ser capaces de captar y aplicar de forma holística e integral todos los aspectos del diseño sostenible, incluidas las tecnologías de vanguardia.

La fotovoltaica integrada en edificios ((BIPV) Building Integrated PhotoVoltaic) representa un importante campo a explorar, ya que los sistemas fotovoltaicos tienen un enorme potencial en el contexto del diseño arquitectónico y urbano. No obstante, su aplicación debe formar parte del proceso de diseño integral, esencial para la creación de una arquitectura sostenible de calidad. Dado que la población urbana mundial crece

constantemente, es necesario adoptar con urgencia enfoques sostenibles de diseño arquitectónico en el entorno urbano.

Sin embargo, el entorno urbano actual presenta grandes dificultades para la aplicación de cualquier nueva tecnología. En un contexto urbano, no sólo es necesario diseñar nuevos edificios, sino que, dado que el tejido urbano ya está en marcha, hay que tener cuidado de no dañar los valores históricos y arquitectónicos. Por lo tanto, es urgente demostrar las posibilidades de la BIPV en relación con la arquitectura sostenible y el entorno urbano, centrándose en explicar la necesidad de proporcionar a los arquitectos una metodología de trabajo con sistemas fotovoltaicos y agrovoltaicos avanzados en el diseño arquitectónico, introduciendo los puntos de partida para esta intención, y demostrando cómo debe crearse dicha metodología y un Manual de Diseño.

## Conclusión

Una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria global, es el crecimiento de la población mundial. En la actualidad, hay más de 7.800 millones de habitantes en la Tierra y, según las previsiones de las Naciones Unidas, la población del planeta alcanzará los 9.100 millones para el 2050, de manera que el calentamiento global y el cambio climático significan un reto importante para la seguridad alimentaria mundial.

Se estima que el cambio climático, entre otros factores, podría reducir la productividad agrícola hasta en un 30% de aquí al 2050. Los investigadores afirman que el cambio climático ha reducido el rendimiento mundial del arroz en un 0,3% y el del trigo en una media del 0,9% cada año. El aumento de la temperatura media anual, la distribución desigual de las precipitaciones, los fenómenos meteorológicos anómalos y la desertización de las tierras impactan drásticamente el rendimiento de los cultivos.

Los desafíos mundiales a la seguridad alimentaria, frente a los retos energéticos y medio ambientales, exigen la búsqueda de nuevas tecnologías para el desarrollo sostenible del sector agrícola. Una de estas tecnologías es la agrovoltaica, la cual consiste en el uso simultáneo de la tierra para cultivar y la generación de electricidad. El uso de esta tecnología podría resolver los problemas de seguridad energética y alimentaria y tendrá un impacto positivo en el crecimiento, con bajas emisiones de carbono de las economías de los países. En la actualidad, la agrovoltaica está en fase de formación, pero en algunos países ya se ha generalizado.

La experiencia mundial demuestra que la clave del desarrollo de la agrovoltaica es la política estatal dirigida a estimular la instalación de sistemas agrovoltaicos para asegurar la eficiencia de la inversión en dichos proyectos. En base a esto, el estudio de la tecnología agrovoltaica, evaluando los beneficios económicos, ambientales y sociales de la implementación de proyectos agrovoltaicos, cobra especial relevancia. Por otra parte, estudios en progreso

reportan paneles solares transparentes, los cuales son en realidad concentradores solares de luz y calor, que pasan la energía a través de materiales ópticamente transparentes (conocidos también como vidrios inteligentes, que bien podrían ser polímeros inteligentes). La energía fotovoltaica puede integrarse como fuente de energía en esos materiales, y de este modo, una superficie transparente podría ser un sistema inteligente completamente autónomo. Esta tecnología aún está en desarrollo y sería una importante solución a futuro, en parte de la problemática actualmente percibida.

## Referencias

- 1.- Hassanien, R. H. E., Li, M., & Lin, W. D. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989-1001.
- 2.- Pascaris, A. S., Schelly, C., Burnham, L., & Pearce, J. M. (2021). Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. *Energy Research & Social Science*, 75, 102023.
- 3.- Gorjian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Scavo, F. B., & Tina, G. M. (2021). Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production*, 278, 124285.
- 4.- Majeed, Y., Khan, M. U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F. & Raza, A. (2023). Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 10, 344-359.
- 5.- Mattiotti F, Mohan Sarovar M, Giusteri GG, Fausto Borgonovi F, Celardo GL (2022). Efficient light harvesting and photon sensing via engineered cooperative effects. *New J. Phys.* 24 013027.
- 6.- Ramesh, G., Logeshwaran, J., Kiruthiga, T., & Lloret, J. (2023). Prediction of Energy Production Level in Large PV Plants through AUTO-Encoder Based Neural-Network (AUTO-NN) with Restricted Boltzmann Feature Extraction. *Future Internet*, 15(2),46.
- 7.- Khanzode, K. C. A., & Sarode, R. D. (2020). Advantages and disadvantages of artificial intelligence and machine learning: A literature review. *International Journal of Library & Information Science (IJLIS)*, 9(1), 3.
- 8.- Ahmed, M., Harbi, I., Kennel, R., Rodríguez, J., & Abdelrahem, M. (2022). Maximum power point tracking-based model predictive control for photovoltaic systems: Investigation and new perspective. *Sensors*, 22(8), 3069.
- 9.- Shannan, N. M. A. A., Yahaya, N. Z., & Singh, B. (2013, November). Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. In 2013 IEEE international conference on control system, computing and engineering (pp. 210-214). IEEE.
- 10.- Vellingiri, M., Rawa, M., Alghamdi, S., Alhussainy, A. A., Althobiti, A. S., Calasan, M., ... & Abdel Aleem, S. H. (2023). Non-Linear Analysis of Novel Equivalent Circuits of Single-Diode Solar Cell Models with Voltage-Dependent Resistance. *Fractal and Fractional*, 7(1), 95.
- 11.- Shannan, N. M. A. A., Yahaya, N. Z., & Singh, B. (2013). Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. In 2013 IEEE international conference on control system, computing and engineering (pp. 210-214). IEEE.

- 12.- Eslami, M., Akbari, E., Seyed Sadr, S. T., & Ibrahim, B. F. (2022). A novel hybrid algorithm based on rat swarm optimization and pattern search for parameter extraction of solar photovoltaic models. *Energy Science & Engineering*, 10(8), 2689-2713. <https://doi.org/10.1002/ese3.1160>.
- 13.- Ali, M., Ahmad, M., Koondhar, M. A., Akram, M. S., Verma, A., & Khan, B. (2023). Maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic system using Adaptive Fuzzy Logic Controller. *Computers and Electrical Engineering*, 110, 108879.
- 14.- Termeh, S. V. R., Khosravi, K., Sartaj, M., Keesstra, S. D., Tsai, F. T. C., Dijksma, R., & Pham, B. T. (2019). Otimização de um sistema de inferência adaptativo neuro-fuzzy para o mapeamento do potencial das águas subterrâneas. *Hydrogeology Journal*, 27, 2511-2534.
- 15.- Guo, S., Abbassi, R., Jerbi, H., Rezvani, A., & Suzuki, K. (2021). Efficient maximum power point tracking for a photovoltaic using hybrid shuffled frog-leaping and pattern search algorithm under changing environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126573.
- 16.- Dileep, G., & Singh, S. N. (2015). Maximum power point tracking of solar photovoltaic system using modified perturbation and observation method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 109-129.
- 17.- Ahmed, E. M., Norouzi, H., Alkhalaf, S., Ali, Z. M., Dadfar, S., & Furukawa, N. (2022). Enhancement of MPPT controller in PV-BES system using incremental conductance along with hybrid crow-pattern search approach based ANFIS under different environmental conditions. *Sustainable energy technologies and assessments*, 50, 101812.
- 18.- Park, C., & Apley, D. (2018). Patchwork kriging for large-scale Gaussian process regression. *The Journal of Machine Learning Research*, 19 (1), 269-311.
- 19.- Molavi, A., Rafee, R., & Aslian, A. (2023). Active cooling of high concentrator panels with multi-junction modules by confined liquid impingement over the extended surfaces. *Energy Conversion and Management*, 293, 117397.
- 20.- Wang, Y., Yang, H., Chen, H., Yu, B., Zhang, H., Zou, R., & Ren, S. (2023). A review: The development of crucial solar systems and corresponding cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113590.
- 21.- Peng, H., Du, Y., Hu, F., Tian, Z., & Shen, Y. (2023). Thermal management of high concentrator photovoltaic system using a novel double-layer tree-shaped fractal microchannel heat sink. *Renewable Energy*, 204, 77-93.
- 22.- Janota, L., Vávrová, K., Weger, J., Knápek, J., & Králík, T. (2023). Complex methodology for optimizing local energy supply and overall resilience of rural areas: A case study of Agrovoltaic system with *Miscanthus x giganteus* plantation within the energy community in the Czech Republic. *Renewable Energy*, 212, 738-750.
- 23.- Jégo, G., Pattey, E., Mesbah, S. M., Liu, J., & Duchesne, I. (2015). Impact of the spatial resolution of climatic data and soil physical properties on regional corn yield predictions using the STICS crop model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 41, 11-22.
- 24.- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and

crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural water management*, 208, 440-453.

- 25.- Ul Mehmood, M., Ulasyar, A., Ali, W., Zeb, K., Zad, H. S., Uddin, W., & Kim, H. J. (2023). A New Cloud-Based IoT Solution for Soiling Ratio Measurement of PV Systems Using Artificial Neural Network. *Energies*, 16(2), 996.
- 26.- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020, June). Theoretical potential of agrovoltaic systems in Europe: a preliminary study with winter wheat. In 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 0996-1001). IEEE.
- 27.- Willockx, B., Herteleer, B., Ronsijn, B., Uytterhaegen, B., & Cappelle, J. (2020). A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. *EU PVSEC Proceedings*.
- 28.- Gorjian, S., Jamshidian, F. J., Gorjian, A., Faridi, H., Vafaei, M., Zhang, F., ... & Campana, P. E. (2023). Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics. *Applied Energy*, 337, 120799.
- 29.- Thomas, S. J., Thomas, S., Sahoo, S. S., Kumar, A., & Awad, M. M. (2023). Solar Parks: A Review on Impacts, Mitigation Mechanism through Agrivoltaics and Techno-Economic Analysis. *Energy Nexus*, 100220.
- 30.- Bawa, R., Dwivedi, P., Hoghooghi, N., Kalin, L., & Huang, Y. K. (2023). Designing Watersheds for Integrated Development (DWID): Combining hydrological and economic modeling for optimizing land use change to meet water quality regulations. *Water Resources and Economics*, 41, 100209.
- 31.- D'Alessandro, F., Sevagian, F., Massulli, A. R., Nardecchia, F., & Pompei, L. (2023). Smart Cities and Communities: a case study of agrovoltaic systems applied to an Italian urban periphery. In 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE.
- 32.- Schuy, C., Weber, U., & Durante, M. (2020). Hybrid active-passive space radiation simulation concept for GSI and the future FAIR facility. *Frontiers in Physics*, 8, 337