

Jornadas de Automática

Sistemas Agrivoltaicos: Nuevos retos para la ingeniería

Sainz de Murieta, J.^a, Burgos, A.^a, Pedroza, A.^a, Villena, U.^b, Álvarez, M.L.^a

^a Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingeniería de Bilbao. UPV/EHU

^b Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería de Bilbao. UPV/EHU.

To cite this article: Sainz de Murieta, J., Burgos, A., Pedroza, A., Villena, U., Álvarez, M.L. 2024. Agri-voltaic systems: New engineering challenges. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10922>

Resumen

El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU confirma la evidencia y efectos del cambio climático, subrayando la necesidad de reducir rápidamente las emisiones de gases de efecto invernadero para alcanzar cero emisiones netas. El sector energético, uno de los principales emisores de estos gases, debe incrementar significativamente la implantación de energías renovables, especialmente la energía solar fotovoltaica.

Sin embargo, la expansión de paneles solares enfrenta el desafío de compatibilizar el uso de la tierra para agricultura y ganadería. Las instalaciones agrivoltaicas, que combinan estos usos con la generación solar, se postulan como una parte de la solución y, a su vez, plantean nuevos retos de ingeniería, algunos de los cuales se analizarán en este artículo.

Palabras clave: Uso de la energía solar en agricultura, Control basado en datos, Sistemas de energía, Sistemas de instrumentación y control

Agri-voltaic systems: New engineering challenges

Abstract

The latest UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report confirms the evidence and effects of climate change, underlining the need to rapidly reduce greenhouse gas emissions to achieve net zero emissions. The energy sector, a major emitter of greenhouse gases, must significantly increase the deployment of renewable energies, especially solar photovoltaics.

However, the expansion of solar panels faces the challenge of reconciling land use for agriculture and livestock. Agrivoltaic installations, which combine these uses with solar generation, are posed as part of the solution and, in turn, pose new engineering challenges, some of which will be discussed in this article.

Keywords: Agricultural solar energy use, Data-based control, Energy systems, Instrumentation and control systems.

1. Introducción

El término de agrivoltaica fue propuesto por primera vez en 1981 por los investigadores alemanes Goetzberger y Zastrow del Instituto Fraunhofer (Goetzberger & Zastrow, 1982) como el concepto de utilización dual del uso de la tierra para la agricultura y la generación de energía.

En la última década, el interés por la agrivoltaica ha aumentado debido a las crisis energéticas y ambientales globales. Esto se refleja en la investigación científica: mientras que entre 2011 y 2020 solo se publicaron 40 artículos

sobre agrivoltaica en la base de datos Scopus, entre 2020 y 2024 se publicaron 333 artículos, según una búsqueda realizada en mayo de 2024.

Este creciente interés por la agrivoltaica se explica desde la obligada atención a las crisis energética y ambiental globales. En 2021, la Unión Europea (UE) adoptó su primera “Ley Europea del Clima” (Parlamento Europeo, 2021) estableciendo en ella los objetivos de ser climáticamente neutra en emisiones de CO₂ para 2050 y reducir un 55 %, en comparación con 1990, las emisiones GHG totales para 2030.

Estos objetivos interpelan directamente al sector de la energía. Según el World Energy Outlook 2023 (IEA, 2023), este sector es responsable de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero que produce el ser humano. Así, la persecución de estos objetivos obliga a una importante reestructuración que conllevará un significativo aumento de la cuota de participación de las fuentes de energía renovables.

Estas proyecciones para la energía solar fotovoltaica supondrían pasar de los ≈ 286 GW de potencia instalados en 2023 a la instalación de 600 GW para 2030 y de 900 GW para 2050 (IRENA, 2023).

En la Figura 1 puede observarse la tendencia de crecimiento en el mercado europeo del sector solar fotovoltaico.

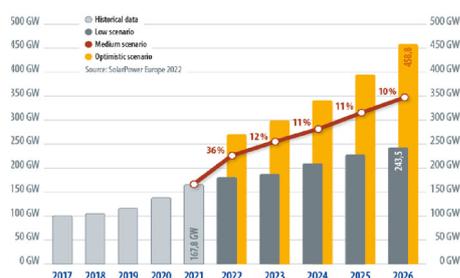


Figura 1: Proyección de desarrollo del mercado fotovoltaico europeo. Fuente: SolarPower Europe 2022

España no es ajena a esta tendencia y, como muestra la Figura 2, en la última década ha sido muy importante el incremento de potencia solar fotovoltaica instalada.

Según la Estrategia de la Energía Solar de la UE (Comisión Europea, 2022), este despliegue de energía solar requeriría, entre otras cosas, de formas innovadoras de instalación que garantizaran la protección del medio ambiente, la agricultura y la seguridad alimentaria.

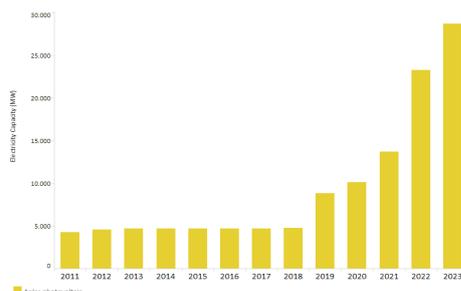


Figura 2: Capacidad solar fotovoltaica en España. Fuente: (IRENA. Abril 2024)

Las políticas energéticas se alinean también con el Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2019) y con sus propuestas de actuación concretadas en las estrategias “De la Granja a la Mesa” (Comisión Europea, 2020) y de biodiversidad hacia 2030 (Comisión Europea, 2020). Éstas están diseñadas para reforzarse mutuamente, poniendo el foco en el cuidado de la naturaleza, la tierra, las empresas y las personas consumidoras.

El uso dual de la tierra para la producción de alimentos y la generación de energía requiere la sinergia entre saberes, técnicas y conocimientos de los sectores agropecuario e

industrial. Así, el uso agrícola y/o ganadero de la tierra puede combinarse con la generación solar fotovoltaica en las denominadas instalaciones agrivoltaicas. En virtud de dicha sinergia, los sistemas de producción de energía solar fotovoltaica contribuyen a la protección de los cultivos y a la estabilización de la producción, sin que la actividad agrícola deje de ser el uso principal de la superficie. (Barron-Gafford, et al., 2019).

En los siguientes apartados se presenta una síntesis del trabajo que nuestro equipo de investigación de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, en colaboración con otras diez instituciones españolas y francesas, está realizando en el marco del proyecto Interreg POCTEFA AgriPower. El objetivo de este proyecto es la puesta en valor de los sistemas agrivoltaicos basados en la monitorización de variables agrícolas, ganaderas, ambientales y energéticas, para aprovechar de mejor manera su potencial para afrontar en conjunto los retos de transición energética y rentabilidad agraria.

El apartado 2 analiza las normativas oficiales y recomendaciones técnicas recientes, las definiciones adoptadas de agrivoltaica y las tecnologías involucradas. El apartado 3 identifica las necesidades de diseño de los sistemas agrivoltaicos, mientras que el apartado 4 aborda los retos actuales técnicos y de gobernanza, así como las oportunidades de desarrollo. El último apartado presenta las conclusiones del trabajo.

2. Estado actual

Siendo el área de la agrivoltaica algo todavía en desarrollo, se han dado algunos avances significativos en los últimos años tanto en el plano normativo como en el plano técnico.

2.1. Normativas y definiciones

La primera definición de agrivoltaica, como ya se ha comentado, se realizó en 1981, sin embargo, las primeras directrices específicas para este tipo de sistemas no se publicaron hasta la primera década del siglo XXI.

En la Figura 3 pueden verse algunos de los principales hitos del sector agrivoltaico en el mundo.

“La Reforma de la Renewable Energy Sources Act” (EEG) de 2010 en Alemania, desempeñó un papel fundamental en el desarrollo y promoción de la tecnología agrivoltaica ya que estableció un marco regulatorio y financiero que incentivó el uso de energías renovables, incluyendo la integración de esta tecnología.

Años más tarde, en mayo de 2021, también en Alemania, de la mano de la Universidad de Hohenheim, junto con expertos del Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar ISE, se publica la norma DIN SPEC 91434. (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2021).

Esta norma define el sistema agrivoltaico y establece requisitos para su planificación, instalación, explotación y mantenimiento. Distingue entre sistemas fotovoltaicos convencionales y agrivoltaicos, y ofrece una guía técnica para su implementación, enfocándose en la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas.

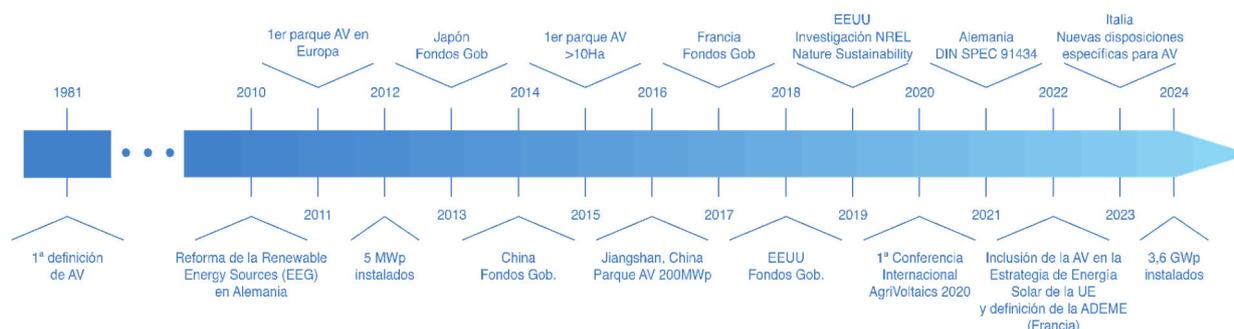


Figura 3: Principales hitos del sector agrivoltaico. Fuente: Elaboración Propia basada en “Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review” (Ghosh, 2023)

La propia definición de agrivoltaica que se da en esta norma, supone un importante avance frente a la primera definición de 1981 ya que, por primera vez, se pone el foco en garantizar los beneficios y cuidados de la tierra, siendo la producción agrícola la primera prioridad y la función principal del terreno.

“La fotovoltaica agrícola (agrivoltaica) es el uso combinado de una misma superficie de tierra para la producción agrícola como uso primario, y para la producción de electricidad, mediante un sistema fotovoltaico, como uso secundario. El uso dual de la tierra no sólo conduce a una mayor eficiencia ecológica y económica del uso de la tierra, sino que en la práctica también conduce a efectos sinérgicos positivos entre la producción agrícola y el sistema agrivoltaico.” (DIN SPEC 91434)

De acuerdo con la normativa, los proyectos agrivoltaicos deben garantizar el uso de la superficie agrícola utilizable después de la instalación. Para lograr esto, se debe realizar un análisis detallado de la explotación agrícola y elaborar un plan de explotación. Además, se deben cumplir los siguientes requisitos: la pérdida de terreno agrícola no debe exceder el 10% para instalaciones elevadas y el 15% para instalaciones a nivel del suelo; se deben instalar sistemas de captación y distribución de agua de lluvia adaptados al cultivo; y el rendimiento de los cultivos después de la instalación agrivoltaica debe ser al menos el 66% del rendimiento de referencia.

En Francia, entre 2017 y 2021 se desarrolló un marco regulatorio específico para los sistemas AV. La Agencia francesa del Medio Ambiente y Gestión de Energía (ADEME, por sus siglas en francés) publica una serie de guías técnicas y estándares de calidad de observancia obligada para la instalación y operación de sistemas agrivoltaicos, con el objetivo de garantizar una influencia positiva de estos sistemas a la productividad agrícola.

Al igual que su homóloga alemana, la definición de AV de la ADEME deja claro que el uso principal de la tierra intervenida debe seguir siendo el agrícola.

“Una instalación fotovoltaica puede calificarse como agrivoltaica si sus módulos fotovoltaicos están situados en la misma superficie de parcela que la producción agrícola y si influyen en ella prestando directamente (sin

intermediario) alguno uno de los siguientes servicios, sin causar ningún deterioro significativo de la producción agrícola (en términos de calidad o cantidad) ni ninguna reducción de los ingresos procedentes de la producción agrícola: servicio de adaptación al cambio climático, servicio de acceso a la protección contra los riesgos, servicio de mejora del bienestar animal, servicio agronómico específico para las necesidades de los cultivos (limitación del estrés abiótico, etc.)”. ADEME

Siguiendo los pasos de Alemania y Francia, el Ministerio dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica de Italia, ha integrado en los últimos años el desarrollo de los sistemas agrivoltaicos en sus planes nacionales de desarrollo energético y agrícola.

Esta preocupación por el conflicto entre usos del suelo, en el caso de Italia, ha derivado en la prohibición por Decreto Ley (Decreto 63/2024) de la instalación de nuevos parques fotovoltaicos en suelo agrícola, excepto para proyectos agrivoltaicos.

En Estados Unidos, Universidades e instituciones de investigación, como el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) están optimizando la eficiencia de estos sistemas, mientras que varios estados han implementado políticas y programas de incentivos para fomentar su adopción.

Japón también ha demostrado interés en los sistemas agrivoltaicos como parte de su estrategia para diversificar fuentes de energía renovable y maximizar el uso de recursos de tierra. El gobierno japonés ha implementado subsidios y programas de apoyo para promover su adopción y se están investigando nuevas tecnologías y métodos para mejorar su integración.

En el caso de España, aunque no hay normativa específica, Cataluña ha implementado un decreto en abril de 2024 que regula y fomenta el desarrollo de sistemas agrivoltaicos en la región. Este decreto busca incrementar la producción de energía renovable mediante la integración de sistemas fotovoltaicos en tierras agrícolas, sin comprometer la productividad agrícola y establece regulaciones estrictas para asegurar que los sistemas agrivoltaicos se implementen de forma sostenible.

Tras este somero repaso a los avances en el plano normativo, en el siguiente apartado se revisarán los datos en el plano técnico.

2.2. Tecnologías

Industria 4.0 y Agricultura 4.0 son conceptos que describen la transformación digital y la adopción de tecnologías avanzadas en sus respectivos campos.

El concepto de Industria 4.0 fue introducido en 2011 en la Hannover Messe formalizando el inicio de la cuarta revolución industrial con un fuerte respaldo académico y científico. [1].

La Industria 4.0 no representa una revolución radical en el sentido tradicional, sino una evolución continua de tecnologías agrupadas bajo un nuevo marco conceptual. Desde esta perspectiva, tecnologías como la IoT (Internet of Things), Inteligencia Artificial (IA), robótica avanzada, Big Data, fabricación aditiva, realidad aumentada, gemelos digitales, etc., han estado en continuo desarrollo durante años. Lo novedoso de estas tecnologías digitales radica en su integración y aplicación holística para transformar los procesos industriales.

La Industria 4.0 busca crear un ecosistema de fabricación inteligente que sea más eficiente, flexible, sostenible y orientado al cliente, utilizando tecnologías avanzadas para transformar cada aspecto del proceso de producción y de la cadena de suministro.

Lo mismo sucede en la Agricultura 4.0 o agricultura digital, de precisión o inteligente. En ella se aplican las tecnologías mencionadas para incidir positivamente en la productividad, sostenibilidad y eficiencia de las prácticas agrícolas

La Tabla 1, compara ambos conceptos y destaca el empleo de tecnologías comunes a ambos.

Tabla 1. Industria 4.0 Vs Agricultura 4.0

Agrivoltaica		
	Industria 4.0	Agricultura 4.0
Ámbito	Energía	Agropecuario
Tecnologías Clave	Comunicaciones, IoT, Big Data, IA, gemelos digitales, etc.	
Objetivo Principal	Producción de energía sin perjuicio de la producción de alimento y de la tierra	Producción de alimento suficiente de forma sostenible y rentable
Beneficios Clave	Descarbonización	Mayor rendimiento, sostenibilidad y trazabilidad.

La integración de estas tecnologías en distintas plantas piloto es también uno de los objetivos del proyecto AgriPower.

Las consideraciones previas para el diseño de estas plantas se analizan en el siguiente apartado.

3. Diseño de Sistemas Agrivoltaicos

El diseño de los sistemas agrivoltaicos, como se verá en los siguientes apartados, es una labor compleja y se encuentra actualmente en el punto de mira de investigaciones y ensayos piloto que se están realizando en todo el mundo.

3.1. Determinación de la tipología de la instalación

La ya mencionada norma alemana DIN SPEC 91434, estableció una primera clasificación de los sistemas agrivoltaicos en función de la forma de disponer los paneles sobre el terreno y, a pesar de que se han desarrollado multitud de variaciones de estas categorías, a día de hoy siguen siendo una referencia a la hora de clasificar los sistemas agrivoltaicos.

Categorías de Sistemas Agrivoltaicos

Como puede observarse en la Figura 4, la categoría I contempla todas aquellas instalaciones en las que los paneles fotovoltaicos se sitúan elevados del suelo (altura libre vertical mínima: 2,1m) permitiendo el cultivo bajo el sistema agrivoltaico. Las hileras de paneles, con orientación sur-norte, pueden ser fijas o estar dotadas de movimiento a uno o dos ejes.



Figura 4. Tipologías de sistemas agrivoltaicos. Fuente: Fraunhofer ISE

Los sistemas agrivoltaicos de categoría II comprenden aquellos en los que los paneles solares están casi a ras de suelo, limitando las áreas cultivables a los espacios entre hileras de paneles. Una variante incluye la instalación de paneles bifaciales verticales con orientación este-oeste, ajustable manual o automáticamente. Es crucial asegurar que aspectos técnicos, como la compactación del suelo durante la instalación, la colocación de postes y las zanjas para el cableado eléctrico, no resulten en una pérdida significativa de terreno cultivable, restricción que en países como Alemania está limitada por normativa a un 10% para la categoría I y un 15% para la categoría II.

La elección entre categorías dependerá del tipo de cultivo, ya que algunos se adaptan a ambas categorías mientras que otros no, aunque estas categorías son solo un punto de partida debido a la gran cantidad de variaciones posibles basadas en factores como el tipo de panel, la estructura fija o móvil, la densidad, el número y la altura de los paneles, y el control automático de sombreados.

3.2. Determinación del número, tipo y disposición de paneles

El diseño de sistemas agrivoltaicos debe considerar, entre otros aspectos, el número, tipo y disposición de los paneles solares, ya que estos factores afectarán a la cantidad de radiación que llega a los cultivos y, por ende, a su rendimiento. El desafío principal es lograr una sinergia entre el uso de la tierra para agricultura y para generación de energía, de manera que se obtenga un rendimiento superior al que se obtendría usando la tierra solo para una de estas actividades. (Figura 5).

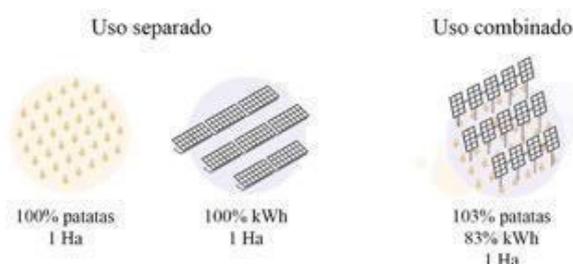


Figura 5. Eficiencia de los sistemas agrivoltaicos. Fuente: Fraunhofer ISE

Analizar este rendimiento requiere del empleo de algún indicador que permita evaluarlo y que, a su vez, sea el objetivo del diseño.

Indicador de Eficiencia: LER

El índice **LER**, (Land Equivalent Ratio) es un indicador de la productividad de la tierra utilizado para evaluar el valor de los sistemas de cultivos mixtos (Mead & Willey, 1980) (Riley, 1984) que también puede emplearse para los sistemas agrivoltaicos.

El LER de un sistema agrivoltaico se define como:

$$LER = \frac{Y_{cultivo AV}}{Y_{cultivo}} + \frac{Y_{energía AV}}{Y_{energía FV}}$$

El LER en sistemas agrivoltaicos se calcula comparando el rendimiento agrícola y el rendimiento energético del sistema con los rendimientos que se obtendrían si el suelo se utilizara exclusivamente para la agricultura o la producción de energía. El equilibrio entre los dos términos es crucial, ya que aumentar el rendimiento agrícola puede afectar negativamente el rendimiento energético y viceversa.

El LER estará influenciado por la densidad de paneles fotovoltaicos y esta, a su vez, está limitada por la necesidad de garantizar que los cultivos reciban suficiente luz para la fotosíntesis.

La PAR (Photosynthetically Active Radiation) es una franja específica del espectro de radiación solar que las plantas utilizan para la fotosíntesis, y su cálculo es una tarea compleja que requiere la consideración de varios factores, incluyendo la irradiación solar, el ángulo de incidencia y la reflectividad de la superficie.

Aunque existen bases de datos de irradiación solar anual y datos meteorológicos, la sombra proyectada por los paneles es dinámica y depende de factores como la latitud, inclinación y acimut de los paneles, lo que dificulta la creación de modelos para estimar con precisión esta variable.

Grado de cobertura de la tierra (GCR)

Ante la dificultad de estos modelos, si bien siguen siendo objeto de investigación y desarrollo (Riaz, Imran, Younas, Alam, & Butt, 2021), para el diseño práctico de los actuales sistemas y plantas piloto, se están empleando aproximaciones, siendo una de las más empleadas el denominado grado de cobertura de tierra (GCR, por sus siglas en inglés) (Dupraz, 2023)

El GCR se define como:

$$GCR = \frac{\text{Área de los paneles solares}}{\text{Área del parque agrivoltaico}}$$

El área del parque es la superficie del terreno utilizada para el sistema fotovoltaico mientras que el área de los paneles, es la suma del área de cada panel.

En el caso de emplear paneles traslúcidos, se añade una corrección al factor GCR:

$$GCR = \frac{\text{Área de los paneles solares}}{\text{Área del parque agrivoltaico}} * (1 - \text{Transmitancia})$$

Siendo la transmitancia de los paneles opacos igual a cero y la de los paneles semitransparentes entre 0 y 0,3.

En el siguiente apartado se hará referencia a otro importante factor que determinará el factor de sombra y, por tanto, la PAR que llega a los cultivos: la presencia o ausencia de sistemas automáticos de orientación de los paneles, los denominados trackers.

3.3. Necesidades de monitorización y control

En instalaciones agrivoltaicas con sistemas automáticos de orientación de paneles, el grado de cobertura de sombra del terreno puede controlarse según las necesidades de los cultivos. Se están desarrollando algoritmos agronómicos que incorporan variables climatológicas y agronómicas para determinar la inclinación óptima de los paneles. Estos seguidores agronómicos utilizan sensores y datos agronómicos para ajustar los paneles según las necesidades de los cultivos, a diferencia de los seguidores astronómicos convencionales que únicamente maximizan la producción energética.

Los seguidores agronómicos son una innovación clave para la resiliencia y sostenibilidad de los parques agrivoltaicos frente a desafíos climáticos y ambientales. En estos sistemas, se incrementa significativamente la cantidad y tipo de datos a registrar y manipular, incluyendo parámetros eléctricos, datos de cultivos (PAR, crecimiento, biomasa), suelo (humedad, nutrientes, pH), clima (velocidad del viento, precipitaciones, radiación solar), paneles, riego, aire, plagas, polinizadores y seguidores.

4. Retos

La Figura 6 muestra esquemáticamente los subsistemas base de un sistema agrivoltaico, destacando los principales retos en su diseño, desarrollo e implementación. Estos subsistemas conectan aspectos energéticos con agropecuarios y medioambientales para lograr beneficios mutuos y cumplir los objetivos esperados. Estas conexiones, así como la gran cantidad de variables implicadas hacen que la gestión de la información sea uno de los principales desafíos para la tecnología agrivoltaica.

4.1. Diseño de sistemas agrivoltaicos

Es necesario desarrollar algoritmos de aprendizaje automático capaces de ensayar instalaciones agrivoltaicas desde múltiples direcciones, optimizando así el sistema. Un componente central en estos desarrollos es el paradigma del gemelo digital, una réplica digital de un sistema complejo que permite su manipulación, mejora y optimización de manera económica y segura en un entorno virtual.

Estos algoritmos permitirán acelerar el diseño y desarrollo de nuevos sistemas para maximizar la eficiencia agrícola, la calidad, la seguridad, la distribución del agua y la gestión de la energía, gracias a la ciencia computacional y la ingeniería de sistemas (Zohdi, 2021).

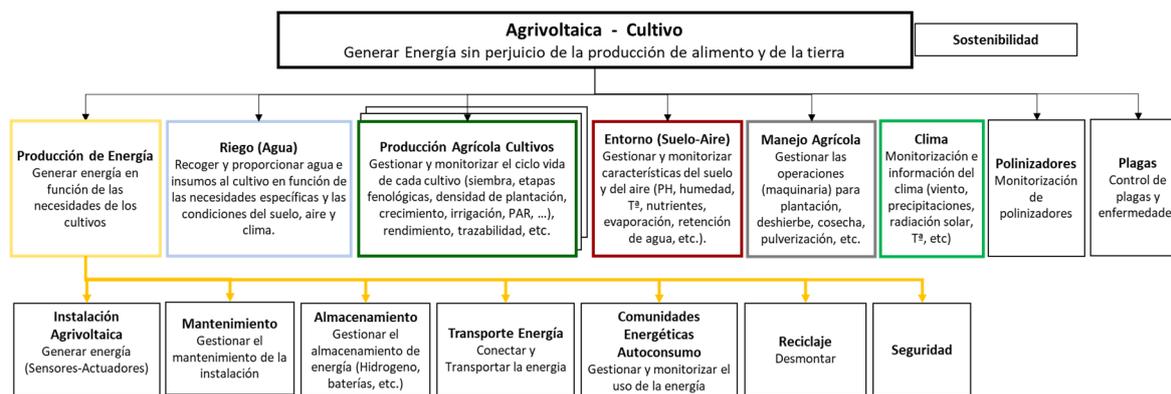


Figura 6. Subsistemas implicados en un sistema agrivoltaico. Fuente: Elaboración propia

4.2. Monitorización y control

Para adquirir y gestionar la variedad de datos en un sistema agrivoltaico, se requieren tecnologías avanzadas para crear redes de sensores y actuadores. Estas redes permiten registrar y tratar los datos, y controlar automáticamente las operaciones necesarias para alcanzar los objetivos del sistema. Además, la monitorización es esencial para evaluar el rendimiento y la sostenibilidad de los parques agrivoltaicos.

4.3. Gobernanza

Los retos de la transición energética requieren innovaciones que no afecten la producción de alimentos.

La tecnología agrivoltaica, si bien es prometedora, necesita de una catalogación de tierras y de un desarrollo normativo específico, ya que, la falta de regulación genera incertidumbre y frena el crecimiento del sector.

Es esencial que las normativas reflejen las características agropecuarias y ambientales locales.

En España, replicar las instrucciones técnicas autonómicas puede ser un buen comienzo para crear una normativa nacional robusta. Esto aportaría estabilidad al sector, protegiendo los intereses de todos los actores involucrados e incentivando la innovación tecnológica.

Además, la aceptación social es clave; involucrar a las comunidades locales y asegurar beneficios tangibles es crucial para el éxito de estos proyectos.

Un enfoque multidisciplinar y colaborativo es fundamental para el desarrollo sostenible del sector.

5. Conclusiones

El proyecto que enmarca este artículo tiene una duración de tres años y, al momento de la publicación, se encuentra en su fase inicial. Actualmente, se está realizando una exhaustiva revisión del estado del arte. Los resultados obtenidos de esta revisión serán fundamentales para la implementación de diversas plantas piloto, donde se aplicarán y evaluarán los conocimientos adquiridos.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por FEDER bajo el proyecto Interreg POCTEFA 2021-2027 EFA030/01 AgriPower.

Referencias

- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Macknick, J. E., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855. doi:10.1038/s41893-019-0364-5
- Comisión Europea, 2019. El Pacto Verde Europeo. Bruselas: Comisión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:4438420>
- Comisión Europea, 2020. Estrategia "De la Granja a la Mesa": objetivos generales. Bruselas: Comisión Europea. Obtenido de https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- Comisión Europea, 2020. Estrategia de la UE sobre la biodiversidad de aquí a 2030: Reintegrar la naturaleza en nuestras vidas. Bruselas: Comisión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:4459196>
- Comisión Europea, 2022. Estrategia de Energía Solar de la UE. Bruselas: Comisión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221#footnote17>
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). (2021). *Agri-photovoltaic systems - Requirements for primary agricultural use*. Berlín: Beuth Verlag.
- Dupraz, C., 2023. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforest Syst.*
- Ghosh, A., 2023. Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review. *Solar Energy*, 266.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A., January de 1982. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1, 55–69. Doi: 10.1080/01425918208909875
- IEA, 2023. *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- IRENA, 2023. *Renewable energy statistics 2023*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Mead, R., & Willey, R., 1980. The concept of Land Equivalent Ratio and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16:217e28.
- Parlamento Europeo, 2021. Ley Europea del Clima. Bruselas. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>
- Riaz, M., Imran, H., Younas, R., Alam, M., & Butt, N., 2021. Module Technology for Agrivoltaics: Vertical Bifacial Versus Tilted Monofacial Farms. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2).
- Riley, J., 1984. A general-form of the land equivalent ratio. *Experimental Agriculture*, 20:19e29.
- Zohdi, T., 2021. A digital-twin and machine-learning framework for the design of multiobjective agrophotovoltaic solar farms. *Computational Mechanics*, 68, 357-370