



XIII Congreso Ibérico de Agroingeniería XIII Congresso Ibérico de Agroengenharia 2025



Oral

Integración de paneles fotovoltaicos dispuestos verticalmente con cultivos de secano en la Península Ibérica

Guillermo-Pedro Moreda-Cantero^{1,3}, Luis Juana-Sirgado^{2,3}, Raúl Sánchez-Calvo^{2,3}, Delia Rodríguez Lucas⁴ y Miguel-Ángel Muñoz-García^{1,3*}

¹ LPF-TAGRALIA, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

² Hidráulica del Riego, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

³ ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, Spain

⁴ EKILABS Corp

* Correspondencia: miguelangel.munoz@upm.es

Resumen: En este trabajo se realiza un análisis de dos configuraciones distintas de paneles solares fotovoltaicos intercalados con el cultivo, en lo que se conoce como sistemas agrivoltaicos, desde una perspectiva tanto de la producción eléctrica y agrícola, como de las ventajas e inconvenientes que puedan presentarse. Se estudian sistemas sin seguimiento, por su mayor sencillez y menor coste, con distintas configuraciones de paneles mono y bifaciales y distintas orientaciones y formato de instalación. Los sistemas de paneles verticales orientados norte-sur permiten una distribución más homogénea de la irradiación solar durante todo el día, lo que mejora la eficiencia en la fotosíntesis de cultivos sensibles a la variabilidad de la luz. Esta configuración es particularmente beneficiosa en cultivos extensivos, ya que no limita la posibilidad de mecanizar las labores con maquinaria de alta capacidad de trabajo. El rendimiento energético de estos sistemas está estrechamente relacionado con el albedo del suelo, siendo más eficiente en suelos de alta reflectancia, que incrementan la irradiación capturada por el lado posterior de los paneles bifaciales. Por otro lado, los sistemas de paneles fijos con inclinación este-oeste ofrecen una solución económica y sencilla desde el punto de vista de la instalación, con costes reducidos en comparación con sistemas con seguimiento. Sin embargo, la distribución de la radiación sobre el cultivo no es óptima durante las horas intermedias del día, lo que puede afectar a la productividad de ciertos cultivos.

Palabras clave: Agrivoltaica; Energía solar; Fotovoltaica; Transición energética; Dual land use

1. Introducción

En los últimos años, la agricultura de regadío ha incorporado la energía solar fotovoltaica como fuente de energía para los equipos de bombeo, tanto a nivel de pequeño agricultor como de grandes comunidades de regantes. Al mismo tiempo, muchos países han aumentado considerablemente la potencia fotovoltaica instalada en parques solares, y muchos ciudadanos han instalado paneles fotovoltaicos en el tejado de sus casas para reducir su factura eléctrica. Debido a la necesidad de frenar el aumento de la temperatura media de nuestro planeta, la capacidad fotovoltaica instalada seguirá aumentando, pudiendo llegar a competir con el uso agrícola de la tierra.

En 1982, Goetzberger y Zastrow [1] propusieron la cohabitación de paneles de energía solar fotovoltaica y cultivos en un mismo terreno. Aunque en las décadas siguientes la idea quedó aparcada, desde ca. 2010 se ha retomado, habiéndose acuñado el término de sistemas agrivoltaicos o agro-fotovoltaicos, implementado diversas instalaciones de este tipo e incluso regulado normativamente al respecto en diferentes países.

En comparación con arquitecturas agro-fotovoltaicas de tipo 'pérgolas' o 'marquesinas' como la diseñada por Schindele et al. [2], donde los paneles fotovoltaicos, ya sean monofaciales o bifaciales se disponen inclinados óptimamente con orientación Sur y elevados varios metros sobre el suelo, los sistemas de paneles bifaciales verticales [3,4] presentan una serie de ventajas, como maximización de producción eléctrica en las primeras y últimas horas de luz solar, abaratamiento de la estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos, buena adaptabilidad a terrenos ondulados o menor acumulación de polvo [5]. Maximizar la producción eléctrica en las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde conlleva indudables beneficios económicos para el

generador ya que, en el Mercado Ibérico mayorista de la Electricidad, el precio del kilovatio-hora es más elevado en esas franjas horarias.

En 2023, Hayibo y Pearce [6] propusieron una variante del sistema de paneles verticales, en el que estos pueden oscilar libremente en torno a su arista superior, como si de ropa colgada en un tendedero se tratase. De esta forma, los paneles solo estarían perfectamente verticales en ausencia de viento, viniendo su ángulo de desviación respecto a la vertical determinado por la velocidad y dirección del viento. Hayibo y Pearce [6] estimaron que ese sistema generaría un 12% más de energía eléctrica que su contraparte de paneles verticales fijos. No obstante, la implementación práctica de ese sistema podría acarrear diversos problemas, principalmente riesgo de colisión de los paneles con la maquinaria agrícola en condiciones de viento racheado.

El objetivo de nuestro trabajo es identificar las principales ventajas e inconvenientes de diferentes diseños de estructuras de paneles fotovoltaicos, todas ellas fijas o estáticas (i.e., no dotadas de equipamiento electromecánico ni manual de seguimiento solar) que hagan que la planta fotovoltaica produzca más en las primeras horas de la mañana y últimas de la tarde. Para ello se comparan paneles verticales bifaciales fijos enfrentados al Este-Oeste (vallas fotovoltaicas alineadas en dirección Norte-Sur), paneles enfrentados al Este-Oeste sobre estructura delta-mayúscula o “tejadillo” (diedro en V invertida o “ala delta”), y paneles enfrentados al Este-Oeste sobre estructura en V.

2. Materiales y Métodos

El diseño agrivoltaico de paneles fotovoltaicos verticales mostrado en la Figura 1 es el que por comodidad vamos a denominar valla fotovoltaica. Además de las ventajas enumeradas más arriba, desde el punto de vista de la mecanización de cultivos extensivos como los cereales de invierno, la amplia separación entre filas de paneles que permite el sistema de valla fotovoltaica [4] favorece el poder recolectar con cosechadoras de cereal de gran anchura de cabezal (hasta 13,8 m en un modelo de la marca CLAAS) y gran capacidad de trabajo (ha/h). En cuanto a la operación de fertilización con abonadora centrífuga de discos, que permite grandes anchos de trabajo o distancia entre ejes de pasadas del tractor, un gran espaciado entre las líneas de paneles FV verticales o vallas fotovoltaicas es sinérgico con dicha operación de cultivo. No obstante, existe la posibilidad de impacto de gránulos de fertilizante sólido proyectados por la abonadora contra los paneles FV, por lo que en la fase de diseño se debe tener en cuenta a la hora de establecer la altura libre bajo los paneles. Además, no se debe posponer demasiado la aplicación del abonado de cobertera, para que el cereal no haya adquirido un porte que obligue a subir la altura de la abonadora en el enganche al tractor, lo cual conllevaría una mayor probabilidad de impacto de los gránulos contra los paneles FV. Aunque el vidrio templado que protege a las células solares en principio tiene resistencia mecánica y química frente a los corrosivos gránulos de fertilizante mineral, y el aluminio del marco de los paneles también resiste bien (a diferencia de otros metales como el acero, fuertemente atacados por los abonos), este aspecto podría llegar a ser delicado.

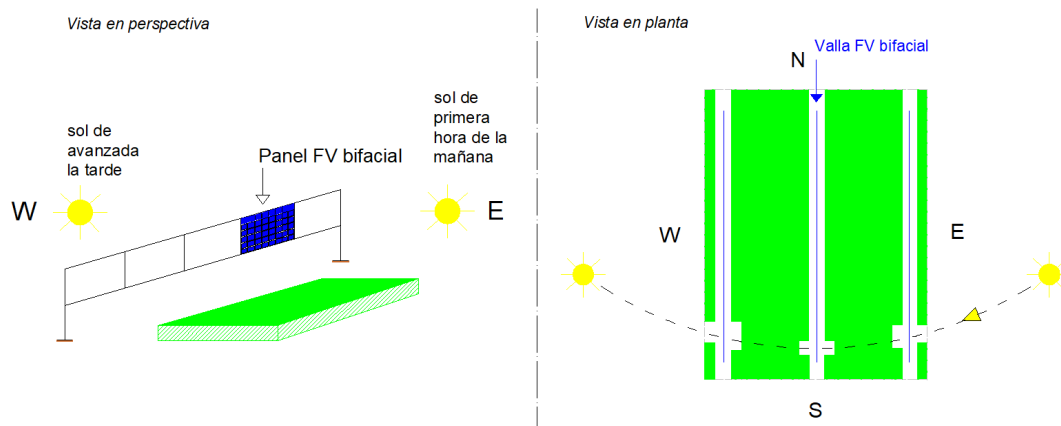


Figura 1 Concepto de paneles fotovoltaicos bifaciales verticales integrados con un cultivo. En la vista en perspectiva no se ha representado el cultivo del lado oeste en aras de la claridad del dibujo. La vista en planta incluye una simplificación de la trayectoria aparente del Sol en invierno, para un emplazamiento en el hemisferio norte.

En la Figura 2 se han representado dos posibles disposiciones de la configuración de paneles verticales: “tumbados” o disposición apaisada (Figura 2, arriba), y ‘de pie’ o en vertical (Figura 2, abajo). En ambos casos se consigue cubrir una longitud de 10 m con 10 paneles. Una diferencia entre la Figura 1-izquierda y la Figura 2-arriba es que los paneles dibujados en la Figura 1, aunque están apaisados, solo hay una altura o “piso” de ellos, frente a dos que hay en la Figura 2. Uno u otro diseño afecta a la distancia mínima recomendable entre vallas, en base al sombreado provocado por una valla sobre la valla más próxima (efecto conocido como autosombreado en diseño de plantas fotovoltaicas). En general, hasta la fecha, la configuración apaisada ha encontrado más aceptación [7].

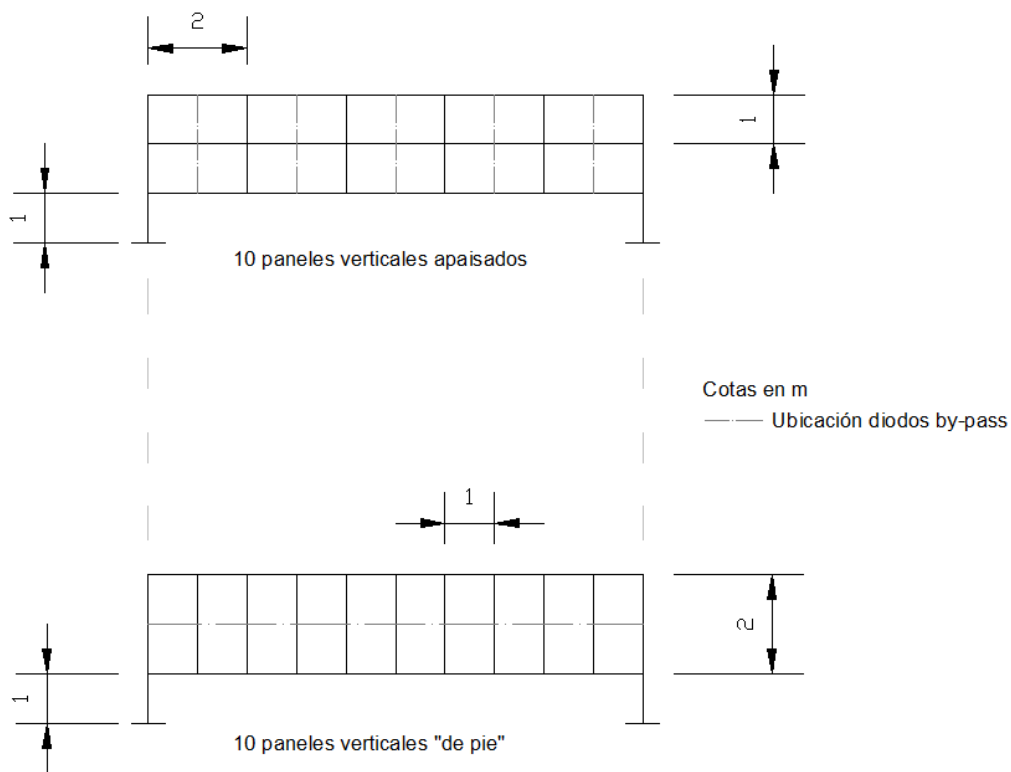


Figura 2 Sistema de valla FV: Dos posibles disposiciones de paneles bifaciales verticales alineados N-S, es decir, con las caras frontal y posterior de los paneles enfrentadas al E-W: Arriba, en disposición apaisada; abajo, en disposición vertical o ‘de pie’.

En relación con el autosombreado de las vallas FV, un aspecto relevante a considerar es la ubicación de los diodos que protegen al panel fotovoltaico del fenómeno del punto caliente, los diodos de derivación o diodos by-pass. El fenómeno de punto caliente se refiere al calentamiento que puede experimentar una célula solar cuando queda sombreada, al convertirse en esa situación en un receptor al que se dirige la corriente generada por las células iluminadas o no-sombreadas. En ambas subfiguras de la Figura 2 (arriba, abajo) se ha dibujado con línea discontinua de trazo largo-punto la alineación donde se ubican esos diodos en un panel FV de última generación. Correspondientemente, las células de cada panel se distribuyen en líneas paralelas al lado largo del panel. Ello conlleva un comportamiento eléctrico diferente cuando se produce sombreado de las células del panel que se encuentran a cota más baja, es decir, más cerca del suelo. En general, la disposición apaisada debería verse favorecida, ya que, ante el sombreado de una fila de células y la subsiguiente activación del diodo protector correspondiente, las filas de células situadas a mayor cota no se ven afectadas, por lo que la producción del panel se ve poco afectada. Sin embargo, en el caso de la disposición “de pie”, el sombreado afecta a la vez a todas las filas de células, con lo que la producción del panel se resiente mucho más. En nuestro caso, no obstante, la amplia separación entre vallas FV minimiza el impacto de este efecto. La Figura 3 muestra la estructura de valla FV instalada en Zamora (España). Como se aprecia en dicha imagen, la alineación N-S del eje longitudinal de la valla coincide sensiblemente con la línea de máxima pendiente del terreno, prueba de la buena adaptabilidad de este sistema a terrenos ondulados señalada anteriormente. Una diferencia del sistema instalado con el esquematizado en la Figura 2-abajo es que el montaje incluye una pequeña separación, de unos 2 cm, entre aristas verticales de paneles contiguos, que alivia parcialmente la carga de viento sobre el conjunto de paneles. En cuanto a la cimentación de la estructura portante, se ha efectuado sin utilizar hormigón, mediante un sistema especial de anclaje.



Figura 3 Sistema de paneles bifaciales verticales instalados en Zamora, España.

En la Figura 4 se han representado el diseño en V (Figura 4, arriba) y el diseño en “tejadillo” o V-invertida (Figura 4, abajo). En ambos casos las caras de los paneles fotovoltaicos quedan enfrentadas al Este-Oeste. Suponiendo una distancia longitudinal a cubrir de 10 m, como en la Figura 2, y disposición “de pie”, tanto para la estructura V como la V invertida, se tendría un total de 20 paneles en cada estructura, el doble de lo correspondiente a la valla fotovoltaica (Figura 2). Ello no quiere decir que la producción sea el doble, ya que las caras de los diedros quedan parcialmente ocultas a la radiación directa en diferentes momentos del día. En todo caso, un parámetro de diseño que determina fuertemente la producción esperable es el ángulo de la V o de la V invertida. En nuestro caso la comparación será con la disposición en V.

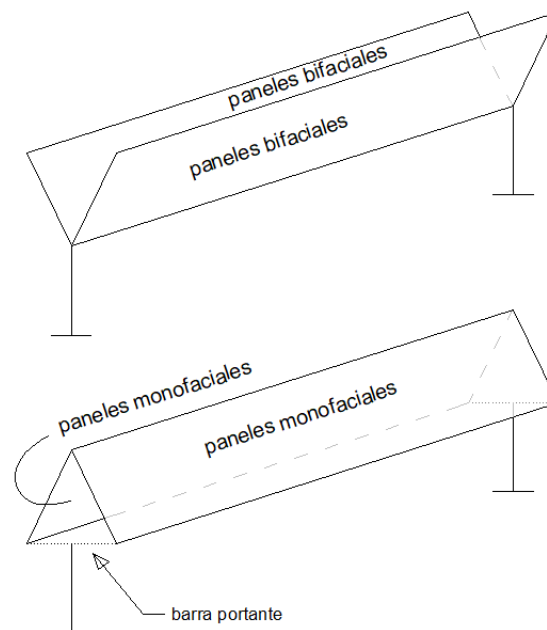


Figura 4 Estructuras fotovoltaicas alineadas en dirección N-S en forma de V (arriba) y de V-invertida (abajo), en las que las caras de los paneles quedan enfrentadas al Este-Oeste.

En plantas fotovoltaicas sobre cubierta plana destinadas típicamente a autoconsumo de naves industriales, en los últimos años se ha producido un aumento considerable de la disposición en V invertida con un ángulo muy abierto, asociado a orientación E-W, de forma que se aprovecha muy bien la superficie de tejado disponible y se consigue una aerodinamicidad muy buena, es decir, los paneles ofrecen poca resistencia al viento. Las naves industriales con ese diseño de estructura portante de los paneles FV asemejan a una sucesión de crestas y valles. No obstante, en nuestro caso un ángulo tan abierto de la V invertida no sería recomendable, ya que el objetivo en el caso agrivoltaico no es conseguir una alta densidad superficial de paneles, sino dejar pasillos para que el cultivo no resulte demasiado sombreado.

3. Resultados

Una diferencia importante entre la disposición en V y en V-invertida (Figura 4), es que la disposición en V se adapta bien al empleo de paneles bifaciales, a diferencia de la disposición en V invertida o delta mayúscula (Δ), donde en principio carece de sentido utilizar paneles bifaciales. Por tanto, atendiendo exclusivamente a este aspecto, cabe esperar mayor producción eléctrica en el diseño en V, de ahí que la estructura en V (Figura 4, arriba) sea la elegida para la comparación con la estructura de valla FV (Figura 2, abajo). Además, la disposición en V permite montar el mismo tipo de panel bifacial que la valla FV.

Los datos obtenidos hasta la fecha con el sistema de valla FV instalado (Figura 3) sugieren que hay un efecto beneficioso consistente en una mejor refrigeración de los paneles en comparación con un sistema convencional de paneles orientados al Paralelo Cero con inclinación óptima según latitud. Típicamente, en esas instalaciones convencionales, la radiación reflejada por el suelo recalienta la parte trasera de los paneles, haciendo que todo el panel se recaliente, lo que va en detrimento de su rendimiento. Por el contrario, la disposición vertical de los paneles alivia ese inconveniente. La disposición en V por su parte presenta el inconveniente frente a la valla FV de interferir más con el paso de la maquinaria de cultivo, viniendo la magnitud de dicha interferencia condicionada por el ángulo de abertura de la V y por la altura del vértice de la V medida desde la superficie del suelo.

En la Figura 5 se ha representado la radiación solar capturada en un día de junio por un panel bifacial vertical con factor de bifacialidad del 90%. El factor de bifacialidad se define como el cociente entre la potencia pico de la cara posterior o secundaria del panel bifacial y la potencia pico de la cara principal o frontal. En la misma figura, a efectos comparativos, se ha incluido la curva de radiación interceptada por un panel orientado al Sur con inclinación convencional óptima para la latitud en cuestión.

Como se observa en la Figura 5, si bien la disposición vertical bifacial no llega a producir tanto como la orientación sur convencional, su producción se acopla muy bien con los momentos del día en que el precio obtenido por la venta de la electricidad generada es más ventajoso.

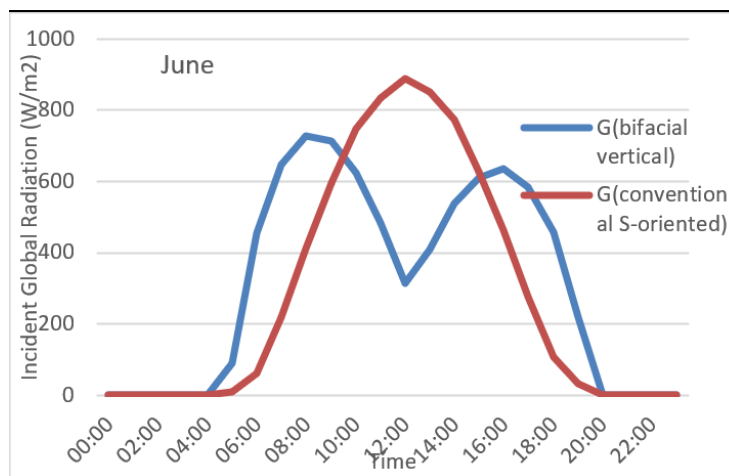


Figura 5 Estimación PVGIS de la radiación solar capturada a lo largo de un día de junio por un panel FV bifacial vertical con un factor de bifacialidad del 90% en Zamora, España; hora UTC.

4. Discusión

El hecho de que en la Figura 5 el pico de radiación interceptada y por tanto de producción a primera hora de la mañana supere a última hora de la tarde se debe a que la cara principal o frontal del panel bifacial está orientada al Este. Además, la Figura 5 corresponde al mes de junio, donde al amanecer no suele haber bancos de niebla. En otras épocas del año, unas nieblas matinales locales persistentes, que no se disipan hasta avanzada la mañana, podrían repercutir negativamente en la producción de la cara del panel que mira al Este, debido a que la niebla conlleva una disminución en la radiación directa que incide en el panel fotovoltaico.

La estructura en V invertida o delta mayúscula (Δ) ha sido propuesta por Almeida et al. [8] para riego fotovoltaico como alternativa estática al seguidor horizontal a un eje N-S, basándose en que la curva diaria de radiación interceptada es igual de constante en ambos diseños. Comparado con el diseño convencional estático de paneles orientados hacia el Paralelo Cero e inclinados óptimamente en función de la latitud, la producción eléctrica de la

configuración delta es menor, pero más constante. En cuanto a la estructura en V, menos estudiada hasta la fecha, su análisis detallado está siendo llevado a cabo actualmente y en futuro trabajo se expondrán los principales resultados obtenidos.

Contribuciones del autor: Conceptualización, M.-Á.M.-G. y G.P.M.-C.; metodología, M.-Á.M.-G., G.P.M.-C y L.J.-S.; validación, M.-Á.M.-G., L.J.-S. y G.P.M.-C.; análisis formal, R.S.C., L.J.-S. y G.P.M.-C.; investigación, M.-Á.M.-G., L.J.-S., G.P.M.-C., R.S.C. y D.R.-L.; recursos, R.S.C., L.J.S., D.R.-L. y M.-Á.M.-G.; curación de datos, M.-Á.M.-G. y G.P.M.-C.; redacción—preparación del borrador original, G.P.M.-C. y M.-Á.M.-G.; Redacción: revisión y edición, M.-Á.M.-G. y G.P.M.-C.; visualización, L.J.-S. y D.R.-L.; supervisión, L.J.-S. y D.R.-L.; búsqueda de financiación, L.J.-S., M.-Á.M.-G. y D.R.-L.; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Este trabajo ha sido financiado parcialmente con la ayuda obtenida para los proyectos PID2023-147841OB-C21 y PID2023-147841OB-C22, financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR”.

PID2023-147841OB-C21: Improvement in the energy efficiency of pressurized irrigation distribution networks through booster pumping in hydrants made feasible with solar photovoltaic power generation (TRICERATOPSES).

PID2023-147841OB-C22: Use of emerging photovoltaic technologies for booster pumping in hydrants adapted to the crop water requirements and the characteristics of the distribution. (EmerPVpump).

Declaración de disponibilidad de datos: Datos disponibles a petición.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] Goetzberger, A.; Zastrow, A. (1982). On the co-existence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1: 55-69.
- [2] Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., et al. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265: 114737.
- [3] Lee, S.M., Lee, E.C., Lee, J.H., Yu, S.H., Heo, J.S., et al. (2023). Analysis of the output characteristics of a vertical photovoltaic system based on operational data: A case study in Republic of Korea. *Energies*, 16: 6971.
- [4] Baricchio, M., Korevaar, M., Babal, P., Ziar, H. (2024). Modelling of bifacial photovoltaic farms to evaluate the profitability of East/West vertical configuration. *Solar Energy*, 272: 112457.
- [5] Moreda, G.P., Sánchez-Calvo, R., Juana, L., Rodríguez-Lucas, D., Muñoz-García, M.A. (2024). Analysis of the use of bifacial solar panels in vertical placement and their temporal coupling in agrivoltaic irrigation. 41st EUPVSEC. Vienna, Austria. 4DV.1.4.
- [6] Hayibo, K.S.; Pearce, J.M. (2023). Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling: A novel approach to agrivoltaics. *Renewable Energy*, 218: 119343.
- [7] Rucker, W.R.; Birnie III, D.P. (2023). Predicting the performance of portrait-aligned vertical bifacial agrivoltaic arrays. *Solar Energy*, 265: 112119.
- [8] Almeida, R.H., Narvarte, L., Lorenzo, E. (2018). PV arrays with delta structures for constant irradiance daily profiles. *Solar Energy*, 171: 23-30.