

Jornadas de Automática

Implementación de plataforma móvil para medición en sistemas agrivoltaicos

Luis Manuel Fernández-Ahumada^a, Juan Serrano de la Haba^a, Marta Varo-Martínez^a, Rafael López Luque^a

^a Grupo de Investigación Física para las Energías y Recursos Renovables, Universidad de Córdoba, Campus Universitario de Rabanales, 14071, Córdoba, España.

To cite this article: Fernández-Ahumada, LM., Serrano de la Haba, J., Varo-Martínez, M., López-Luque R. . 2026. Implementation of a mobile platform for measurement in agrivoltaic systems, Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13882>

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla el diseño e implementación de una plataforma móvil terrestre con sensores para la medición de irradiancia solar en sistemas agrivoltaicos (SAGV). El objetivo principal es analizar la distribución espacial y temporal de la radiación solar en SAGV, donde los paneles fotovoltaicos generan sombras parciales que influyen en el crecimiento de los cultivos y en la eficiencia energética. Estas sombras se caracterizan por una elevada variabilidad, haciendo necesario medir las variables radiométricas y agroclimáticas en un conjunto amplio de puntos del terreno y para distintos momentos del día y del año. La plataforma, basada en un ESP32-WROOM y una estructura móvil, realizará mediciones en distintos puntos del terreno agrícola, y recopilará una sólida base de datos para optimizar el rendimiento conjunto agrícola y fotovoltaico. Asimismo, el trabajo contempla el diseño mecánico y electrónico de la plataforma, la integración de sensores, el desarrollo del software de control y la monitorización.

Palabras clave: Agrivoltaica, Sensores, Sistemas de control de movimiento, Monitorización, Control.

Abstract

This work presents the design and implementation of a ground-based mobile platform equipped with sensors for measuring solar irradiance in agrivoltaic systems (AVS). The main objective is to analyze the spatial and temporal distribution of solar radiation in AVS, where photovoltaic panels generate partial shading that affects both crop growth and energy efficiency. These shadows are characterized by high variability, making it necessary to measure radiometric and agroclimatic variables at many locations across the field and at different times of the day and year. The platform, based on an ESP32-WROOM microcontroller and a mobile structure, will perform measurements at different points within the agricultural field, enabling the collection of a comprehensive dataset to optimize the combined agricultural and photovoltaic performance. In addition, the work includes the mechanical and electronic design of the platform, sensor integration, software development for control and monitoring, and data acquisition management.

Keywords: Agrivoltaics, Sensing, Motion Control Systems, Monitoring, Control

1. Introducción

1.1 Contexto global: crecimiento poblacional y demanda de recursos.

La población mundial ha estado creciendo en los últimos años y según informes de la ONU, se estima que aumentará casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 8000 millones actuales a los 9700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de cerca de 10.400 millones para mediados de 2080 (Naciones Unidas, 2025). Como consecuencia, las necesidades de alimentación y energía de

la sociedad a nivel mundial también están aumentando, ya que el consumo de energía por parte de la industria se encuentra en constante crecimiento (IRENA, 2021). La agricultura, como una actividad primaria fundamental para el planeta, debería contribuir a mitigar las consecuencias de los problemas mencionados anteriormente. Además, la falta de autonomía alimentaria y energética de los países se utiliza como un elemento de coerción entre naciones y agrava las crisis internacionales. Precisamente, estas crisis internacionales han obligado recientemente a la Unión Europea a impulsar un cambio hacia un modelo energético

más sostenible, en el que las energías renovables cobren protagonismo y se reduzca la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, la energía fotovoltaica (PV) juega un papel clave, y la potencia PV instalada en el mundo está aumentando considerablemente, en parte porque este tipo de energía requiere una menor superficie de suelo en comparación con otras fuentes renovables (Amaducci *et al.*, 2018).

1.2 Limitaciones de la fotovoltaica convencional y transición a la agrivoltaica.

La expansión de la energía fotovoltaica puede reducir la superficie disponible para la producción agrícola, dificultando la satisfacción de la demanda alimentaria, especialmente en regiones con escasez de suelo cultivable. Además, puede afectar negativamente a la economía local al disminuir el empleo agrario y favorecer la despoblación rural. Estos efectos se agravan por una planificación inadecuada, el predominio de criterios de eficiencia energética sobre la multifuncionalidad del suelo y la falta de políticas que integren la generación fotovoltaica con las actividades agrícolas existentes.

Para abordar este desafío, la Agrivoltaica (AgPV) sugiere la integración de la generación de energía solar fotovoltaica y de la agricultura en el mismo terreno (Bellone *et al.*, 2024).

En relación con los cultivos, los paneles fotovoltaicos proporcionan sombra parcial, disminuyendo la cantidad de irradiación solar que impacta en las plantas, lo cual trae diversas ventajas, entre las que se destacan:

- Disminución de la temperatura en los cultivos y en el suelo
- Aumento de la eficiencia del riego debido a la reducción de la evapotranspiración y a la mejora del balance hídrico del suelo
- Aumento en la producción de ciertos cultivos

En los sistemas agrivoltaicos, tanto el rendimiento agrícola como el energético dependen directamente de la irradiación solar, por lo que su caracterización precisa es fundamental. Sin embargo, los modelos existentes para estimar la irradiación no son adecuados para estas instalaciones, ya que no consideran su compleja geometría ni el efecto de las sombras mutuas entre paneles fotovoltaicos y cultivos (Varo *et al.*, 2024). A diferencia de las plantas fotovoltaicas convencionales o de la agricultura tradicional, donde la medición suele realizarse en puntos representativos debido a la relativa homogeneidad espacial, los sistemas agrivoltaicos presentan una elevada heterogeneidad. En ellos coexisten zonas en sombra, parcialmente iluminadas y completamente expuestas, generando fuertes gradientes espaciales y variaciones temporales de irradiación a lo largo del día y del año. Como resultado, la distribución de la radiación es altamente dinámica y compleja. Por ello, no es suficiente con una única estación de medida, sino que es necesario disponer de una red de sensores que permita obtener datos experimentales en distintos puntos de la instalación. Solo así es posible caracterizar correctamente la irradiación disponible tanto para la fotosíntesis como para la producción eléctrica, y comprender el comportamiento global del sistema agrivoltaico de forma precisa y representativa.

2. Metodología de trabajo

Tras exponer todos los conceptos necesarios para entender la ejecución del trabajo, en este apartado se describirán los protocolos de comunicación empleados en este trabajo y los materiales que facilitan la implementación de dichos protocolos.

Primero se detallará la metodología empleada en el trabajo y luego los recursos utilizados, tanto en el hardware del sistema como en el software. En el hardware se presentarán tanto los dispositivos empleados como los drivers, el sensor de PAR, el GPS, el módulo SD y el ESP32 WROOM, así como otros componentes auxiliares empleados durante el desarrollo.

Más adelante, tras la descripción de los elementos utilizados, se expone el diseño del sistema y las conexiones que se realizan entre los diferentes componentes.

2.1. Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo se estructuró en dos fases principales. En la primera, se realizó una revisión bibliográfica sobre los conceptos de irradiación solar y radiación fotosintéticamente activa (PAR), analizando su importancia en sistemas agrivoltaicos. También se estudió la agrivoltaica, sus principios de funcionamiento, configuraciones más habituales y beneficios derivados de la combinación de producción agrícola y energética. Esta revisión permitió identificar los componentes necesarios para el sistema y establecer criterios de selección basados en la precisión de medida, compatibilidad, consumo energético y facilidad de integración. Asimismo, se definieron los protocolos de comunicación más adecuados para garantizar un intercambio de datos fiable.

La segunda fase se centró en el diseño e implementación del sistema, abordando tanto el hardware como el software. El desarrollo del software siguió una estrategia incremental, comenzando con pruebas básicas, continuando con el control de actuadores y la programación individual de cada dispositivo, y finalizando con la integración de todos los elementos en un único programa funcional.

2.2. Recursos

El desarrollo del sistema requirió la integración de diversos dispositivos hardware y herramientas software orientadas al control de una plataforma móvil autónoma destinada a la medición y almacenamiento de datos de irradiación solar. La arquitectura del sistema combina elementos de adquisición de datos, posicionamiento geográfico, almacenamiento de información y control de movimiento, todos coordinados por un microcontrolador central.

2.2.1 Hardware

La base física del sistema es la plataforma móvil Atlas 4x4, un chasis robótico con tracción en las cuatro ruedas mediante motores de corriente continua de 12 V equipados con reductoras metálicas de alto par. Su estructura de aluminio anodizado proporciona una combinación adecuada de resistencia mecánica, ligereza y protección frente a la corrosión. Su robustez facilita que el sistema pueda moverse

automáticamente mientras registra la irradiancia solar en diferentes posiciones, siguiendo un patrón de movimiento programado. Cuenta con un chasis con tracción 4WD y reductoras metálicas de alto par, ideal para la estabilidad en terrenos irregulares de plantas agrivoltaicas

El elemento principal de control es el microcontrolador ESP32-WROOM, seleccionado por su elevada capacidad de procesamiento, conectividad integrada y versatilidad

Para el control de los motores se utilizan dos módulos L298N, cada uno capaz de gestionar dos motores de corriente continua mediante la configuración de puentes H. Estos controladores reciben órdenes del ESP32 y regulan tanto la velocidad como el sentido de giro de los motores, permitiendo ejecutar movimientos como avance, retroceso, giro y parada. Se ha utilizado por su facilidad de conexión y su robustez. Internamente incluye dos puentes H independientes, cada uno formado por transistores Darlingtón que permiten invertir el sentido de la corriente en el motor, logrando que gire en ambos sentidos

La medición de la irradiancia solar se realiza mediante el sensor SP-215, un dispositivo analógico basado en una célula fotodiodo de silicio. La señal analógica generada por el sensor es convertida a un valor digital mediante el convertidor analógico -digital (ADC) del microcontrolador ESP32 WROOM. A partir de esta lectura, se aplica la ecuación (1) correspondiente para calcular el valor de irradiancia en las unidades deseadas.

$$\text{Irradiancia} = \text{Señal salida sensor (mV)} * \text{Factor de calibración (1)}$$

Su factor de calibración de 0,25 W/m² por mV permite convertir de manera directa la señal analógica de salida en valores de irradiancia, asegurando lecturas fiables y consistentes. La incertidumbre de calibración a 1000W/m² es menor al 3%, lo que garantiza que las mediciones realizadas se mantendrán dentro de márgenes de error muy reducidos incluso en condiciones de alta radiación.

Este sensor opera típicamente en un rango espectral de 360 a 1120 nm, abarcando casi toda la banda de radiación solar de onda corta que afecta al ambiente y a sistemas fotovoltaicos. Asimismo, su tiempo de respuesta es inferior a 1 ms posibilitando la captura de modificaciones rápidas en la irradiancia solar, por lo cual es especialmente apropiado para investigaciones dinámicas de radiación y aplicaciones donde se requiere un seguimiento preciso de variables.

Para almacenar la información recopilada se emplea un módulo de tarjeta SD conectado mediante el protocolo SPI. Este módulo permite registrar de forma permanente los valores de irradiancia, las coordenadas geográficas y la fecha y hora asociadas a cada medición.

La georreferenciación de las mediciones se realiza mediante el módulo GPS NEO-6M. Este dispositivo proporciona información de posicionamiento global, incluyendo latitud, longitud, altitud y hora universal coordinada (UTC). El módulo se comunica con el ESP32 a través de una interfaz UART y transmite los datos en formato NMEA.

El sistema dispone de dos fuentes de alimentación independientes para mejorar la estabilidad eléctrica. Por un lado, una batería de plomo-ácido sellada de 12 V y 9 Ah alimenta exclusivamente los motores a través de los

controladores L298N. Por otro lado, una batería portátil tipo power bank de 20 000 mAh suministra energía al ESP32, sensores y módulos auxiliares, garantizando una alimentación estable para la parte electrónica del sistema.

Finalmente, para facilitar la integración de todos los elementos se elaboró un esquema completo de conexiones utilizando la herramienta Fritzing (Figura 1). Este diagrama permite visualizar claramente las interconexiones entre componentes, simplificando tanto el montaje como las tareas de mantenimiento y depuración.

2.2.2 Software

El desarrollo del software se realizó utilizando el entorno Arduino IDE junto con el paquete de soporte para ESP32.

Para la supervisión y el control remoto del sistema se empleó la aplicación *Serial Bluetooth Terminal* para dispositivos Android. Esta aplicación permite establecer una conexión Bluetooth con el ESP32 y actuar como una consola serie inalámbrica. Gracias a ella es posible visualizar en tiempo real los datos obtenidos por los sensores, recibir información de posicionamiento GPS y enviar comandos de control al robot sin necesidad de conexiones físicas. En la sección 3 se desarrolla la estructura del software.

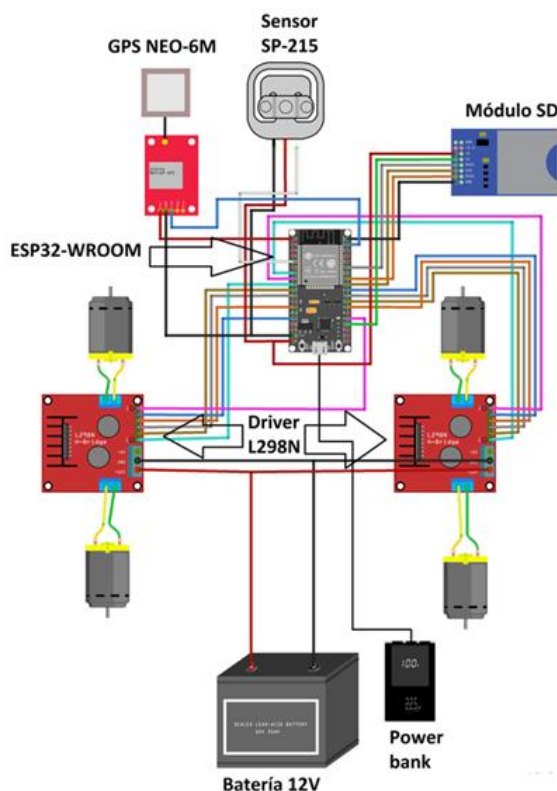


Figura 1. Esquema de conexiones en Fritzing:

2.2.3 Protocolos de comunicación

La comunicación entre los distintos subsistemas se realiza mediante varios protocolos seleccionados en función de las necesidades de cada dispositivo.

El protocolo Bluetooth Classic se utiliza para la comunicación inalámbrica entre el ESP32 y dispositivos externos. El protocolo UART se emplea principalmente para

la comunicación con el módulo GPS NEO-6M. Este protocolo de comunicación serie asíncrona permite recibir las tramas NMEA generadas por el receptor GPS a una velocidad de 9600 baudios. mediante la librería TinyGPSPlus, se extraen y procesan los datos de posición. Por último, el protocolo SPI se utiliza para la comunicación con el módulo de tarjeta SD. A través de SPI se realizan operaciones de inicialización, creación de archivos y escritura continua de datos, garantizando que la información recopilada se almacene de forma eficiente, fiable y segura.

En conjunto, la integración de todos estos elementos hardware y software permite disponer de una plataforma móvil autónoma capaz de desplazarse por diferentes ubicaciones, medir la irradiancia solar, registrar la posición geográfica de cada medición y almacenar toda la información para su posterior análisis.

3. Desarrollo y experimentación

El sistema desarrollado se estructura en torno a un ciclo de operación repetitivo que integra el control del movimiento de la plataforma móvil y la adquisición de datos. Durante la fase de inicio, se inicializan los distintos módulos del sistema y, a continuación, se ejecuta de manera continua un bucle principal en el que se gestionan las comunicaciones, el desplazamiento de la plataforma y la toma de medidas.

En cada iteración del ciclo, la plataforma realiza desplazamientos autónomos siguiendo una trayectoria predefinida con forma de cuadrado, incorporando paradas periódicas destinadas a la estabilización del sistema y a la adquisición de datos. Durante dichas paradas se efectúa la lectura del sensor de irradiancia, así como la obtención de la posición geográfica y la marca temporal mediante el módulo GPS. Toda la información adquirida se almacena en una tarjeta SD y se transmite simultáneamente a través del módulo Bluetooth (Figura 2).

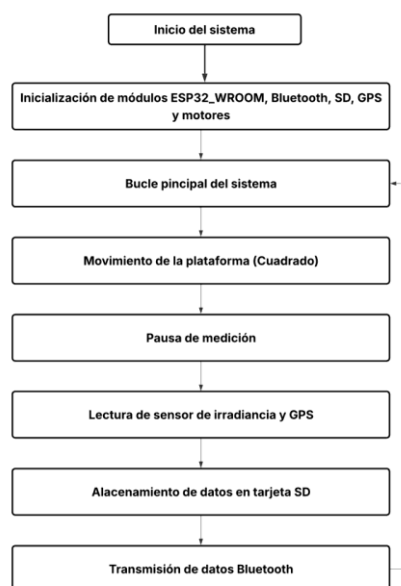


Figura 2: Diagrama general del funcionamiento del sistema

El desarrollo de este diagrama se ha implementado mediante una serie de funciones que se detallan a continuación.

- Inicialización y ciclo principal

El proceso comienza en `setup()`, donde se configuran los pines, se inicializa el bus SPI para la tarjeta SD y se verifica la disponibilidad del GPS antes de habilitar el movimiento. Finalmente, el `loop()` coordina la trayectoria completa del "cuadrado", ejecutando de manera secuencial los avances y giros, mientras verifica en cada paso el estado de la variable `stop` para garantizar una respuesta inmediata ante cualquier comando de emergencia.

- Gestión de sensores y datos

El sistema comienza con la función `readSensorVoltage()`, que garantiza la fiabilidad de las lecturas del sensor SP215 al promediar 10 muestras con un breve retardo entre ellas, mitigando así el ruido eléctrico. Posteriormente, la función `log_data_to_sd_bt()` unifica la información de irradiancia solar, coordenadas GPS y hora, formateándola como CSV para su almacenamiento en la tarjeta SD y enviándola simultáneamente por los canales Serie y Bluetooth para su monitorización en tiempo real.

- Control de comunicaciones y estado

La función `service_communications()` actúa como el núcleo de atención a periféricos, operando de forma constante para actualizar la variable de posición GPS y procesar comandos externos mediante Bluetooth. Es aquí donde se gestiona la lógica de control remoto: al recibir una 'S', el sistema se detiene (ajustando la variable `stop` a verdadero), y al recibir una 'A', se reanuda la marcha.

- Cinemática y ejecución de maniobras

Para el movimiento, `set_motor_speed()` centraliza el control de potencia PWM sobre los cuatro motores, logrando un comportamiento simétrico. Las maniobras se dividen en `avanzar_recto()`, `avanzar_recto_sin_pausa()` y `girar_pivote_90_grados()`, las cuales configuran los pines de dirección y gestionan los tiempos de desplazamiento.

4. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos tras la implementación y puesta en funcionamiento del sistema de control y adquisición de datos basados en ESP32-WROOM. Las pruebas experimentales realizadas se llevaron a cabo en distintos entornos representativos, concretamente en un terreno pedregoso ubicado en el campus universitario de Rabanales (Córdoba, España) (Figura 3) y en superficies asfaltadas. La planificación de estas pruebas consistió en definir una única trayectoria cuadrada como patrón de ensayo, ajustando la potencia y los tiempos de operación según las necesidades que exigía el terreno con el objetivo de validar la correcta realización de la trayectoria, la cual fue programada mediante las funciones de movimiento desarrolladas y descritas en la sección anterior. Se evaluó tanto la adquisición de datos, incluyendo geolocalización (longitud y latitud) y registro de la hora, como la respuesta de control remoto y precisión de los movimientos de la plataforma. Los resultados obtenidos permitieron verificar la correcta integración de los

distintos subsistemas y el cumplimiento de los objetivos planteados



Figura 3. Plataforma en prueba experimental

4.1. Funcionamiento general del sistema

El sistema funcionó de manera estable y coherente con el diseño propuesto. La plataforma fue capaz de iniciar su funcionamiento correctamente tras la fase de inicialización, ejecutar el recorrido programado y responder a las órdenes recibidas mediante comunicación Bluetooth sin necesidad de reiniciar el microcontrolador. La interconexión de los distintos componentes que forman el sistema se realizó conforme al esquema eléctrico definido.

4.2. Control de movimiento

La plataforma ejecutó satisfactoriamente la trayectoria cuadrada programada mediante el uso de señales PWM, que permitieron un desplazamiento estable y una potencia ajustable según el tipo de terreno. Si bien la ejecución del recorrido fue efectiva, se detectaron desviaciones menores en el ángulo de los giros de 90° y en la trayectoria final (Figura 4). Estos errores se atribuyen a factores puramente mecánicos tales como la fricción del suelo, el deslizamiento de las ruedas y las diferencias de tracción entre los motores descartando, por tanto, fallos en la programación. Los resultados subrayan la conveniencia de realizar un estudio previo del terreno en futuras aplicaciones para calibrar los parámetros de tiempo y potencia.

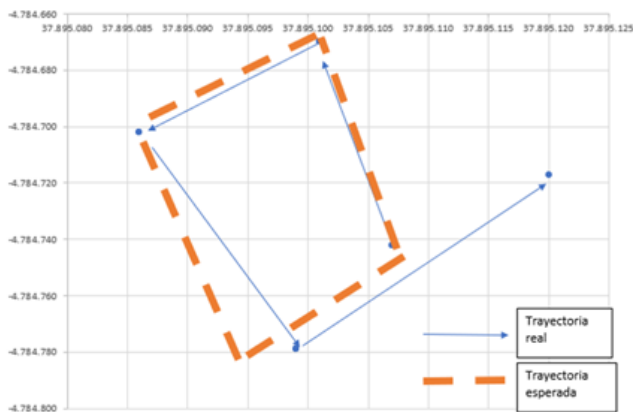


Figura 4. Gráfica trayectoria plataforma

4.3. Registro y almacenamiento de datos

La función de promediado de señales analógicas eliminó el ruido eléctrico, obteniendo datos precisos de irradiancia del sensor SP215. Estos valores, junto con las coordenadas GPS y la marca de tiempo, fueron almacenados correctamente en formato CSV. Este formato resultó óptimo, facilitando una importación directa a hojas de cálculo y herramientas científicas. Gracias a esto, fue posible no solo representar gráficamente la irradiancia en función del tiempo, sino también reconstruir la trayectoria de la plataforma para su análisis espacial (Figura 5), cumpliendo con los objetivos de georreferenciación. A partir de los valores de irradiancia solar, se estima la radiación fotosintéticamente activa (PAR) utilizando el modelo Mariscal. Según dicho modelo, la PAR puede aproximarse como una fracción constante de la irradiancia global incidente, considerando que representa aproximadamente el 45% de la irradiancia solar global (Mariscal et al., 2000).

4.4. Comunicación y posicionamiento GPS

La comunicación Bluetooth Classic operó con gran estabilidad y baja latencia, permitiendo un control remoto efectivo e instantáneo para las órdenes de avance y parada (Figura 6). El módulo GPS NEO-6M proporcionó datos válidos de latitud, longitud y hora durante las pruebas realizadas en exteriores (Figura 7).

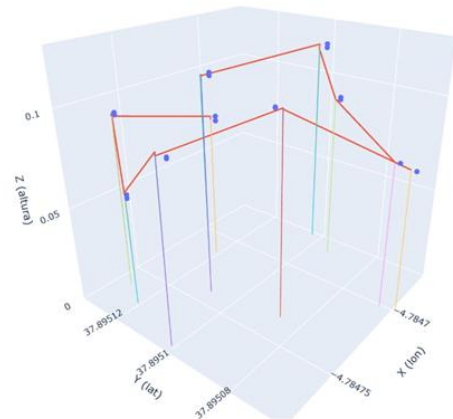


Figura 5. Representación tridimensional de trayectoria e irradiancia solar

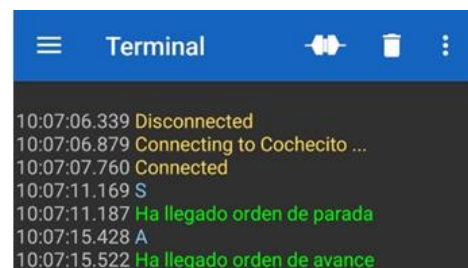


Figura 6. Comandos de parada y avance con sistema remoto

```

$GPRMC,,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPGSV,1,1,00*79
$GPGLL,,,,,V,N*64

```

Figura 7. Estado inicial de los mensajes NMEA del módulo GPS

5. Conclusiones

El trabajo desarrollado ha permitido diseñar e implementar una plataforma móvil funcional para la medición de irradiancia solar, cuyo objetivo ha sido validado mediante ensayos experimentales.

La integración de los distintos elementos hardware, como el microcontrolador ESP32-WROOM, el sensor de irradiancia solar SP-215, el módulo GPS NEO-6M y el módulo de tarjeta SD, ha dado lugar a un sistema funcional que ha podido ser puesto en funcionamiento durante las pruebas realizadas. Asimismo, la comunicación Bluetooth implementada permite la supervisión del sistema y la transmisión de los datos adquiridos.

En lo relativo al software, se ha desarrollado un programa estructurado que gestiona el movimiento del vehículo y la adquisición de datos de manera coordinada. La organización del código facilita su comprensión y permite futuras modificaciones o ampliaciones del sistema.

Durante los ensayos realizados se ha comprobado que el sistema es capaz de registrar la irradiancia solar junto con la información de posicionamiento y la marca temporal, almacenando correctamente los datos en la tarjeta SD.

Aunque no se ha realizado una medición directa de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), su cálculo a través del modelo Mariscal ha permitido validar la efectividad del sistema para su aplicación en entornos agrivoltaicos y corroborar que se han alcanzado los objetivos planteados en el trabajo.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema cumple los objetivos planteados en el trabajo. La plataforma móvil es capaz de desplazarse de forma autónoma siguiendo una trayectoria predefinida, adquirir y registrar datos de irradiancia solar y los datos de posición y hora transmitidos por el GPS, comunicarse de forma inalámbrica con el usuario y responder comandos de control externos.

5.1. Futuros trabajos

Como posibles mejoras futuras, se propone:

Navegación en lazo cerrado y precisión: Para superar la actual dependencia de trayectorias predefinidas por tiempos de ejecución, se plantea la implementación de algoritmos de control en bucle cerrado. Esto incluirá el uso de odometría mediante encoders en los motores permitiendo corregir desviaciones en tiempo real causadas por irregularidades del terreno pedregoso.

Ampliación del sistema de sensores: Se prevé la transición de la estimación matemática del PAR (Modelo Mariscal) hacia una medición directa mediante la integración de sensores específicos.

Autonomía y gestión energética: Para mejorar la limitación actual de las baterías, se integrará un panel fotovoltaico de pequeño formato en la propia estructura de la plataforma. Este sistema permitirá la recarga de las baterías durante las pausas de medición, extendiendo significativamente la operatividad del robot en grandes extensiones agrícolas.

Conectividad IoT y análisis en la nube: Se evolucionará el sistema de almacenamiento local en tarjeta SD hacia una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT). Mediante el uso de protocolos como MQTT y conectividad de largo alcance (LoRa o 4G/5G), los datos podrán ser visualizados y analizados en tiempo real en una plataforma en la nube, facilitando la toma de decisiones agronómicas remotas.

Referencias

- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P. E., & Amaducci, S. (2024). Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. *Applied Energy*, 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Mariscal, M., Orgaz, F. & Villalobos, J. (2000). Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(2-3), 183–197. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00137-9)
- Renewable Energy Agency, I. (2021). RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2021 STATISTIQUES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE 2021 ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA RENOVABLE 2021 About IRENA. www.irena.org
- United Nations. (2025). World Population Prospects 2025. In Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2025
- Varo-Martínez, M., Fernández-Ahumada, L. M., Ramírez-Faz, J. C., Ruiz-Jiménez, R., & López-Luque, R. (2024). Methodology for the estimation of cultivable space in photovoltaic installations with dual-axis trackers for their reconversion to agrivoltaic plants. *Applied Energy*, 361, 122952. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024>