

# Instalación Fotovoltaica con Almacenamiento en Baterías de Litio para la Inclusión de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles en las Ingenierías

Orts-Grau, Salvador<sup>1</sup> ([sorts@eln.upv.es](mailto:sorts@eln.upv.es)); Gimeno-Sales, Francisco José<sup>1</sup> ([fjgimeno@eln.upv.es](mailto:fjgimeno@eln.upv.es)); Seguí-Chilet, Salvador<sup>1</sup> ([ssegui@eln.upv.es](mailto:ssegui@eln.upv.es)); González-Altozano, Pablo<sup>2</sup> ([pgaltozano@agf.upv.es](mailto:pgaltozano@agf.upv.es)); Balbastre Peralta, Ibán<sup>2</sup> ([ibbalpe@agf.upv.es](mailto:ibbalpe@agf.upv.es)); Palau Estevan, Carmen Virginia<sup>2</sup> ([virpaes@agf.upv.es](mailto:virpaes@agf.upv.es)); Gasque Albalate, María<sup>3</sup> ([mgasque@fis.upv.es](mailto:mgasque@fis.upv.es)); Escribá Aparisi, Alejandro<sup>1</sup> ([alesap1@upvnet.upv.es](mailto:alesap1@upvnet.upv.es))

<sup>1</sup> Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM)

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria (DIRA)

<sup>3</sup> Departamento de Física Aplicada

Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain

**Abstract**—Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible aprobados por la ONU en 2015 encontramos objetivos vinculados con la formación ofrecida por las universidades en el área de la tecnología electrónica. El derecho a una energía asequible y no contaminante está directamente ligado al desarrollo de tecnologías renovables como la energía eólica y fotovoltaica, además del almacenamiento de la energía eléctrica en baterías de nueva generación. La instalación fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio descrita en la ponencia se configura como un proyecto práctico transversal que interacciona con la mayoría de las asignaturas del grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. La utilización de videos donde se explica la instalación o se plantean problemas relacionados con los equipos utilizados en la planta, demuestra a los alumnos cómo pueden ayudar a facilitar el acceso universal a la energía. En la ponencia se describe un caso práctico que afecta a la primera asignatura de electrónica que se imparte a los alumnos, para demostrar que a lo largo de todo el grado es posible integrar la formación aplicada en estas nuevas tecnologías.

**Keywords**— *formación transversal universitaria, objetivos de desarrollo sostenibles (ODS), energías renovables, gestión de la energía fotovoltaica, bombeo fotovoltaico.*

## I. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático es cada día mayor y es necesario un cambio en el modelo energético actual para conseguir un mix energético sostenible y eficiente. Las tecnologías eólica y fotovoltaica están experimentando un gran auge a nivel mundial por el bajo coste de la energía que generan y son las tecnologías que van a liderar la lucha contra el cambio climático [1]. El almacenamiento de la energía va a presentar en los próximos años un gran auge dado que tanto la eólica como la fotovoltaica son fuentes intermitentes [2].

Las nuevas tendencias en los sistemas fotovoltaicos de conexión a la red incluyen el uso de sistemas de almacenamiento, como las baterías de ion de litio (Li-ion), para aumentar la cuota de la energía auto consumida en sectores domésticos e industriales [3] y para resolver algunos problemas relacionados con la integración con las redes eléctricas convencionales de los sistemas de generación distribuida basados en energías renovables (control de frecuencia, control de potencia activa, control de potencia reactiva, soporte de red dinámica, etcétera).

Existen diversas tecnologías de baterías Li-ion con algunas diferencias en sus prestaciones [4][5]. Los avances tecnológicos en el campo del almacenamiento de energía, principalmente en la industria del vehículo eléctrico, han facilitado la llegada al mercado de las baterías Li-ion con más

de 6800 ciclos de vida útil (más de 18 años con un proceso de carga y descarga por día). La tecnología de baterías Li-ion utilizada en los sistemas fotovoltaicos es la misma que la usada en coches eléctricos, coches híbridos o en sistemas para la gestión de la red de potencia [6][7].

Las baterías Li-ion presentan varias ventajas cuando se comparan con baterías de plomo similares [8]: casi 100% eficaz en el proceso de carga y descarga, vida útil más larga, capacidad constante (más independiente de la corriente de descarga), mayor densidad de energía, reducido mantenimiento, voltaje estable durante todo el ciclo de descarga, permite la conexión de hasta cientos de voltios y miles de Watts-hora, más seguro para el medio ambiente, etcétera. Las baterías Li-ion se están convirtiendo en una solución rentable, confiable, y de alto rendimiento en un amplio número de aplicaciones [7], incluyendo también la generación eléctrica en lugares aislados no conectados a las redes eléctricas convencionales. Hay iniciativas que plantean aprovechar las baterías reemplazadas en los vehículos eléctricos para ser usadas en instalaciones aisladas de generación de energía o microrredes. El uso de sistemas fotovoltaicos combinado con el almacenamiento de energía en baterías [9] puede contribuir significativamente a la sostenibilidad energética en lugares remotos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación in situ, eliminando la dependencia de combustibles fósiles y reduciendo el costo de la energía.

Las necesidades de agua para consumo humano en algunas regiones del África subsahariana se cubren en numerosos casos mediante grupos electrógenos auxiliares que precisan de un suministro continuo de combustible fósil, encontrándose problemas como: elevados precios de los combustibles, dificultad de suministro, costes de mantenimientos elevados, corta esperanza de vida, contaminación acústica y medioambiental. Existe la solución de bombear agua mediante sistemas fotovoltaicos, cuyos costes han decrecido a unos niveles en los que la solución fotovoltaica es más económica que la utilización de la red eléctrica. En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos son una tecnología confiable, segura y barata para el suministro de energía eléctrica en lugares remotos [6][7]. Esta solución resuelve los problemas indicados, aunque la cantidad de agua producida depende del recurso solar existente. La caída de precios de la fotovoltaica junto con la alta irradiación solar de estas regiones, entre otros factores, ha aumentado en los últimos años el interés y el uso de los sistemas de bombeo fotovoltaicos entre las organizaciones humanitarias WASH (Water, Sanitation and Hygiene).

Mientras que los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua empiezan a ser utilizados en muchos países,

principalmente en aplicaciones de riego, la necesidad de mantener el bombeo de agua más allá del día solar es un problema común en zonas con altas densidades de población, como en los campos de refugiados. El ajuste de generación y demanda se ha resuelto de forma clásica mediante la construcción de depósitos con la altura adecuada para proporcionar la presión que se necesita para distribuir el agua. Los sistemas híbridos (fotovoltaica combinada con generadores diésel) permiten gestionar la producción de agua y reducen, aunque no anulan, las dificultades mencionadas relacionadas con el uso de combustibles fósiles. Otra solución consiste en usar baterías para almacenar los excedentes que produce el campo fotovoltaico y tener energía almacenada para que pueda funcionar el conjunto motor-bomba cuando el suministro de agua sea necesario, incluso de noche [7] [8].

Se esperan rápidas bajadas de precio para las baterías Li-ion debido a la alta demanda de estas baterías en aplicaciones emergentes y las economías de escala que puede alcanzarse [7][10]. Esta previsión de reducción de precios permite plantearse que los sistemas de bombeo de agua basados en sistemas fotovoltaicos y baterías Li-ion serán una solución económica para satisfacer la demanda de agua en campos de inmigrantes, refugiados y desplazados, así como en poblaciones remotas de países en desarrollo. El uso de las baterías en sistemas fotovoltaicos de bombeo asegura la disponibilidad de agua incluso durante la noche, períodos de luz baja y días nublados [11]. Otros beneficios adicionales pueden lograrse si los excedentes de energía almacenada en la batería Li-ion se utilizan para otros fines: carga de la batería de pequeños electrodomésticos, iluminación, etcétera. El desafío de combinar nuevas tecnologías energéticas abre nuevas oportunidades para la sostenibilidad a largo plazo de acciones humanitarias al mismo tiempo que se mejoran las condiciones existentes en campos de inmigrantes, refugiados y desplazados, así como en poblaciones remotas de países en desarrollo.

Como continuación de experiencias previas desarrolladas en la Universitat Politècnica de Valencia (UPV) con la tecnología fotovoltaica [12][13], se ha realizado el montaje de una instalación fotovoltaica que incluye almacenamiento en batería de litio y la posibilidad de realizar un bombeo fotovoltaico directo o híbrido. En la instalación participan profesores de los departamentos de Ingeniería Electrónica y de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la UPV. La repercusión del trabajo afecta a diversas asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, así como a diversas asignaturas del Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. La instalación se está poniendo en marcha mediante un programa de apoyo al I+D+i del Área de Cooperación al Desarrollo de la UPV (Programa ADSIDEO-Cooperación 2017) y del Vicerrectorado de Infraestructuras, además de contar con la colaboración de las empresas GoodWe [14] y Carlo Gavazzi [15]. El concepto de proyecto arranca a partir de una petición del International Global Solar Energy & Water Advisor en IOM (International Organization for Migration - [www.iom.int/about-iom](http://www.iom.int/about-iom)). El proyecto propuesto está alineado con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) marcados por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas [16]:

- Objetivo 6: agua limpia y saneamiento.
- Objetivo 7: energía asequible y no contaminante.
- Objetivo 11: ciudades y comunidades sostenibles.

De forma más secundaria también se alinea con el objetivo 3 (salud y bienestar) y 13 (acción por el clima). La inclusión de los ODS en la formación reglada se considera necesaria

para que las próximas generaciones de ingenieros estén más sensibilizadas con la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático. Con la instalación desarrollada planteamos introducir los Objetivos de Desarrollo Sostenibles en las asignaturas de electrónica que son necesarias para que un sistema de este tipo pueda ser funcional: fundamentos de electrónica (semiconductores, células fotovoltaicas...), electrónica analógica (sensores, amplificadores...), instrumentación (equipos de medida, convertidores CAD y DAC), electrónica de potencia (convertidores de potencia, filtros pasivos,...), procesado de señal (adquisición de datos, comunicaciones industriales...), sistemas digitales avanzados (control SPWM y SVPWM, etc.). La instalación permitirá mostrar a los alumnos de los diversos cursos como la implementación de un sistema real precisa de la suma de los conocimientos impartidos en diversas asignaturas a lo largo de toda la titulación, mostrando como la electrónica interacciona con otras disciplinas y como puede ayudar a cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenibles planteados por las Naciones Unidas para 2030, principalmente con el Objetivo 7 (energía asequible y no contaminante).

El artículo está organizado de la siguiente forma. La sección II detalla las principales características de la instalación fotovoltaica con almacenamiento en batería de litio, así como algunas de las experiencias que están previstas desarrollarse en ella. La sección III detalla la implicación de las diversas asignaturas impartidas por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPV en el Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, y qué contenidos pueden reforzarse mediante este caso de estudio. La sección IV presenta los resultados obtenidos y los problemas encontrados. Finalmente se incluyen unas conclusiones finales sobre las principales aportaciones del trabajo presentado.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

La instalación fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio se localiza en el edificio 3P de la UPV, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural (ETSIAMN). La instalación cuenta con 8 módulos fotovoltaicos policristalinos de 305 W<sub>pk</sub> que están situados en la terraza oeste del edificio, inclinados 30° y orientados al sur, en unas condiciones que optimizan la producción anual de la instalación. Los 8 módulos están conectados en serie y proporcionan en condiciones estándar de medida los valores mostrados en la Tabla I.

En la terraza se ha montado un cuadro eléctrico en el que se han dispuesto los siguientes componentes: protecciones DC (seccionador, fusibles y descargador de sobretensiones), sistema monitor Eos Array de Carlo Gavazzi, sistema de medida de velocidad y dirección del viento, y alimentación AC a 230 V y 50 Hz.

TABLA I. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA EN CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA (1000 W/m<sup>2</sup>, T<sub>CELL</sub>=25°C, AM=1.5)

Tensión en circuito abierto (V <sub>OC</sub> )	363.2 V
Tensión en el punto de máxima potencia (V <sub>MPP</sub> )	293.6 V
Corriente de cortocircuito (ISC)	8.8 A
Corriente en el punto de máxima potencia (I <sub>MPP</sub> )	8.3 A
Potencia en el punto de máxima potencia (P <sub>MPP</sub> )	2440 W



Fig. 1. Vista del campo fotovoltaico, se puede ver el cuadro eléctrico en la parte posterior del campo fotovoltaico.

El cuadro eléctrico de la terraza (parte posterior izquierda de la Fig. 1) y del laboratorio de la planta baja de la ETSIAMN (en el centro de la Fig. 2) están separados por una distancia de 140 metros. Los cables que recorren esta distancia son el positivo y negativo del campo fotovoltaico y el cable de comunicaciones RS485. Dentro del cuadro eléctrico se han dispuesto protecciones DC (seccionador, fusibles y descargador de sobretensiones) y diversos componentes de medida, protección y maniobra en AC: magnetotérmico, diferencial, contador de energía, seccionadores, etc.

En el laboratorio de la planta baja de la ETSIAMN se han montado el resto de equipos de esta planta experimental:

- Un inversor híbrido de conexión a red modelo GW3648D-ES del fabricante GoodWe, con una potencia aparente nominal de 3680 VA en las dos salidas AC (salida a red y salida de reserva) y hasta 5520 VA durante 10 segundos en la salida AC de reserva (back-up). (Parte superior izquierda de la Fig. 2).
- Una batería de litio del fabricante LG, modelo RESU3.3, con 3.3 kWh de energía total almacenada, 3.3 kW de potencia pico entregada durante 3 segundos y una tensión nominal de 51.8 V (parte inferior izquierda de la Fig.2).
- Cuadro de control para bombeo solar directo, modelo ESP-2,2/230-IP20-F200, suministrado por la empresa Atersa y que incluye un variador de velocidad de Fuji Electric, así como los circuitos de control y protección necesarios para implementar un bombeo fotovoltaico (parte superior derecha de la Fig.2). Este cuadro admite dos fuentes de energía diferentes: una entrada DC procedente de un campo fotovoltaico más una entrada AC monofásica de 230 V y 50 Hz procedente de una red eléctrica convencional o de un grupo auxiliar.



Fig. 2. Componentes de la instalación montados en el laboratorio.

El cuadro eléctrico del laboratorio permite configurar la instalación para trabajar en diversos modos:

- Sistema aislado de la red para bombeo solar directo: el campo fotovoltaico se conecta a la entrada DC del variador de velocidad. La batería y el inversor híbrido no se utilizan en esta configuración.
- Sistema aislado para bombeo solar con almacenamiento en batería de litio: el campo fotovoltaico se conecta a la entrada DC del inversor híbrido GW3648D-ES. El inversor se configura para trabajar en modo OFF-GRID (instalación aislada de la red) y la energía del campo fotovoltaico se usa para alimentar las cargas AC conectadas en la salida de reserva y recargar la batería. El inversor gestiona el punto de trabajo del campo fotovoltaico para balancear energía demandada y producida, pudiendo darse el caso de que el campo fotovoltaico no genere energía si no hay consumos y la batería está cargada.
- Sistema de conexión a red para autoconsumo con almacenamiento en batería de litio. El sistema es muy similar al anterior, pero se conecta la salida AC-GRID a la red eléctrica y, por tanto, el campo fotovoltaico siempre trabajará en el punto de máxima potencia (MPP). Los excedentes de energía no utilizados por las cargas ni por la batería serán inyectados a la red eléctrica. En este caso el variador de velocidad que controla la bomba sumergible está conectado en la salida de reserva del inversor híbrido GW3648D-ES, como otras cargas críticas que pudieran existir en la instalación.

La Fig. 3 muestra el conexionado de los diversos componentes. La selección de una u otra configuración se realiza mediante el programa monitor del propio inversor y mediante elementos eléctricos de maniobra (fusibles seccionadores e interruptores manuales).

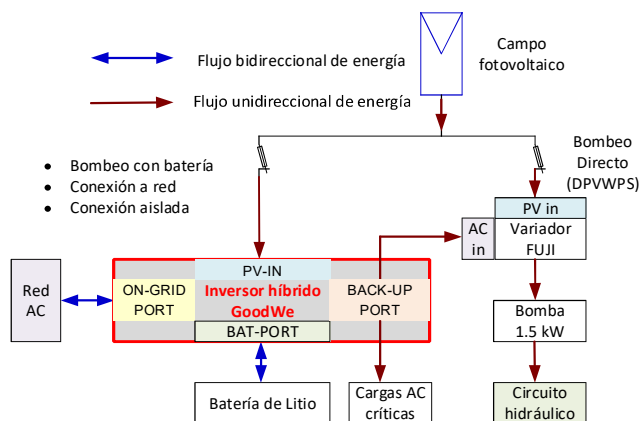


Fig. 3. Diagrama de bloques general de la instalación.

La monitorización del sistema incluye la medida de las siguientes variables:

- Temperatura de célula (modelo TEMPSOL1000) y del ambiente (modelo IKE20001K) mediante una resistencia del tipo Pt1000 conectadas a una unidad VMU-P del Eos Array de Carlo Gavazzi.
- Irradiancia sobre el plano del campo fotovoltaico, medido con un sensor CELLSOL 200 conectada al VMU-P.
- Anemómetro y veleta integrados en el modelo 7911 de la empresa Davis, con salida del tipo 4-20 mA que se conectará a un ADAM 4017+ para que los datos puedan transmitirse por la RS-485.
- Medida de tensión y corriente del campo fotovoltaico con una unidad VMU-S del Eos Array.
- Medida de parámetros eléctricos mediante el analizador de redes EM21072. El medidor utiliza un transformador de corriente de efecto Hall modelo CTD1X605A y se conecta a un sistema AC monofásico.
- Sensores de presión y caudal de diversos modelos, con salidas 4-20 mA y que se conectan a la RS-485 mediante un ADAM 4017+.

El bus RS-485 facilita la comunicación de los datos adquiridos en todos los dispositivos conectados, tal como se muestra en la Fig. 4, disponiéndose al final del bus el UWP3 de Carlo Gavazzi que actúa como pasarela de comunicaciones entre los diversos equipos de medida y el sistema de adquisición de datos (Modbus-RTU sobre RS485 a Modbus TCP). Aunque el UWP3 puede usarse como servidor web, incluyendo un interfaz de usuario, se ha optado por conectar su salida de Ethernet a un sistema embebido (Raspberry Pi), que se conecta a la red de la UPV mediante una conexión WIFI. La Raspberry actúa como cliente sobre el protocolo Modbus TCP del UWP3 y envía los datos a un servidor con una frecuencia de muestreo que puede ajustarse dependiendo del tipo de experimento a realizar, con posibilidad de elegir tiempos de muestreo a partir de los 5 segundos.

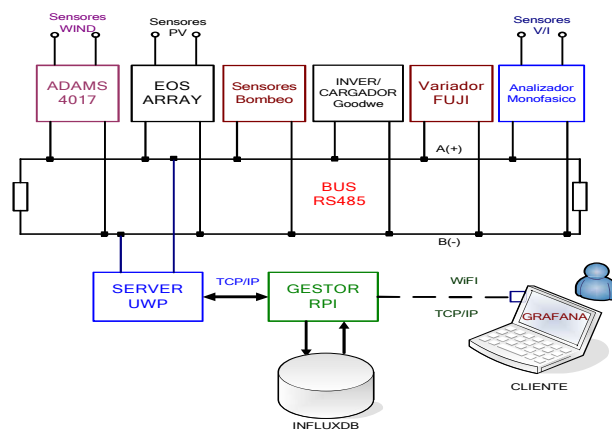


Fig. 4. Diagrama de bloques general de la instalación.

Los datos almacenados en el ordenador central pueden ser visualizados desde cualquier navegador de internet si la IP es conocida, disponiendo de una interfaz gráfica de usuario (GUI o Graphic User Interface) desarrollado en Grafana. Este sistema, frente al incluido en el UWP3, permite hacer adquisiciones con tiempos de muestreo en la escala de segundos (según la cantidad de dispositivos conectados en el bus RS-485), lo que es de suma importancia cuando se realizan trabajos de I+D+i en los diversos campos asociados a esta instalación: eficiencia de la instalación fotovoltaica, estudios del almacenamiento en baterías de litio, ensayos de bombas, comparativas entre diversas técnicas de bombeo, gestión de picos de demanda, etc.

### III. FORMACIÓN TRANSVERSAL EN LOS ODS MEDIANTE CASO DE ESTUDIO EN EL GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

La instalación descrita en la anterior sección aglutina diversas iniciativas surgidas en la UPV alrededor de las energías renovables, la formación universitaria y la cooperación al desarrollo. Por un lado, desde el Centro de Cooperación al Desarrollo se financia en 2017 el proyecto "Caracterización de sistemas sostenibles para el bombeo de agua para consumo humano en regiones en desarrollo y/o campos de refugiados en Kenia mediante la implantación de sistemas fotovoltaicos aislados con baterías de ion litio de nueva generación". El proyecto planteaba la implementación de un prototipo a pequeña escala que permitiera avanzar en el conocimiento de este tipo de sistemas, tratando de cubrir una necesidad expuesta por el responsable de IOM en Kenia que desea reemplazar el uso de combustibles fósiles en el abastecimiento de agua por modernos sistemas de generación y almacenamiento. Por otro lado, encontramos el interés de profesores de la UPV en la introducción de más contenidos en la formación reglada alrededor de la tecnología fotovoltaica y reforzar la idea de que la electrónica es una pieza angular para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenibles. La lucha contra el cambio climático, el acceso a la energía y la mejora de la calidad de vida deben estar presentes en los estudios de los futuros ingenieros, ya que serán ellos los que desarrollarán e implementarán las soluciones que permitan alcanzar la sostenibilidad del planeta.

Además de la inclusión de contenidos en los diversos grados y masters relacionados con la ingeniería agronómica, los profesores pertenecientes al grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática (GIEIA) ven la oportunidad de usar la instalación para crear un caso de

estudio transversal a lo largo de toda la titulación. Dentro de los estudios del GIEIA se encuentran las siguientes asignaturas obligatorias [17]:

- Tecnología Electrónica (9 ECTS - 3<sup>er</sup> semestre).
- Electrónica Digital (7.5 ECTS - 4<sup>o</sup> sem).
- Electrónica Analógica (7.5 ECTS - 4<sup>o</sup> sem).
- Electrónica de Potencia (7.5 ECTS - 5<sup>o</sup> sem).
- Instrumentación Electrónica (6 ECTS - 6<sup>o</sup> sem).

Las asignaturas incluidas en la intensificación de electrónica son:

- Sensores e Instrumentación Virtual (6 ECTS - 7<sup>o</sup> sem).
- Sistemas Digitales Aplicados (6 ECTS - 7<sup>o</sup> sem).
- Sistemas Electrónicos Industriales (6 ECTS - 6<sup>o</sup> sem).

Con el caso de estudio de la instalación fotovoltaica con almacenamiento es posible reforzar los contenidos habituales impartidos en todas las asignaturas anteriores. Como ejemplo, en la primera asignatura relacionada con la electrónica (Tecnología Electrónica) se pueden reforzar los contenidos de las cuatro unidades didácticas en que se divide la asignatura: diodos, transistores, amplificador operacional y electrónica digital. Algunos ejemplos de los contenidos reforzados son:

- La célula fotovoltaica, como elemento de generación de energía, es una aplicación directa de la unión semiconductor y las curvas I-V del diodo.
- Los transistores en conmutación combinados con relés electromecánicos son necesarios para la protección del inversor o la batería de litio frente a valores excesivos en alguna de las variables de operación (corriente o potencia excesiva, sobretemperatura, etc.).
- Los comparadores basados en amplificadores operacionales son parte del sistema de verificación de la calidad de la red AC donde se conecta el inversor híbrido o permiten verificar el rango de tensión de trabajo apropiado de la batería de litio.
- Los circuitos digitales básicos están presentes en la actuación sobre los diodos leds que se utilizan para notificar al usuario el estado de funcionamiento del inversor híbrido o en el circuito combinatorial para gestionar los diversos sensores de nivel que podemos usar en un tanque de almacenamiento de agua.

La metodología para la inclusión del caso de estudio en las diversas asignaturas y unidades didácticas es variada, incluyendo:

- Video explicativo de la instalación: en el video se facilitan las principales características eléctricas del sistema, mostrando el diagrama de bloques general mostrado en la Fig. 1 e incluyendo imágenes y datos de catálogo de cada uno de los componentes principales del sistema. Como muestras, se puede ver la introducción a la instalación en [18], mientras que en [19] se muestran las diversas aplicaciones que permite el sistema implementado.

- Videos explicativos de problemas a resolver por los alumnos: estos videos, grabados en los estudios de la UPV, se incrustan dentro de la herramienta Lessons de la plataforma formativa PoliformaT. Los problemas están relacionados con los contenidos impartidos habitualmente en la asignatura y se plantean como una forma de acercar a la realidad los conceptos impartidos.
- Ejercicios prácticos de aplicación o proyectos dirigidos: los ejercicios se plantean a partir de los requerimientos de determinados subsistemas del caso de estudio. La descripción del problema puede realizarse mediante el típico enunciado (en un fichero) o apoyarse en un video explicativo.

El material multimedia desarrollado alrededor de la instalación fotovoltaica está enfocado para que el alumno pueda trabajar bajo metodología de clase inversa (flip-teaching), dedicándose en las clases a la resolución de los casos prácticos planteados. Un ejemplo de problema a resolver por los alumnos y que interacciona con dos asignaturas de distintos semestres lo encontramos en el circuito de alimentación de la interfaz para programar y monitorizar el variador de velocidad de Fuji Electric utilizado para controlar el conjunto motor-bomba del bombeo fotovoltaico (parte superior de la Fig. 5).

La alimentación necesaria para dicho circuito es de 24 V de continua (Fig. 6), con una posible variación del  $\pm 10\%$  y un consumo de potencia que varía entre 20 W y 40 W según el modelo de pantalla táctil utilizado en la interfaz [20].

Para el variador de velocidad disponemos de dos posibles fuentes de energía:

- Una entrada para red AC, procedente de una red eléctrica convencional o de un grupo auxiliar accionado por combustible fósil.
- Una entrada DC procedente del campo fotovoltaico.



Fig. 5. Imagen de la parte trasera de la interfaz que monitoriza y configura el variador de velocidad donde se observa la propia interfaz (parte inferior) y la fuente de alimentación (parte superior).



Fig. 6. Datos técnicos del circuito de alimentación de la interfaz que monitoriza y configura el variador de velocidad.

TABLA II. DATOS TÉCNICOS DEL VARIADOR DE VELOCIDAD USADO PARA EL ACCIONAMIENTO DEL MOTOR-BOMBA

Generic specifications		
	400 V Motor	200 V Motor
Maximum input voltage (Voc)	800 VDC	360 VDC
Minimum input voltage	400 VDC	180 VDC
Recommended voltage DC (VMPP)	550 - 620 VDC	280 - 330 VDC
Nominal input voltage AC	3ph 380 - 480 V, 50/60 Hz	3ph 200 - 240 V, 50/60 Hz
Nominal output voltage AC	3ph 400 V	3ph 200 V
Output frequency	0 - 400 Hz	
Efficiency (inverter)	97 - 98%	
Ambient temperature range	-10 to 50° C	
Cooling	Natural / by means of internal fan	
Recommended input power	1.2 times the pump capacity (minimum)	
Warranty	3 years	
EMC filter*1 / Motor output	Built-in / optional (from distances over 50 m)	

La interfaz es la misma para todos los modelos del variador, cuyas principales características se muestran en la Tabla II.

A partir de los datos anteriores se establece que el rango de tensiones DC que permiten el correcto funcionamiento del variador puede variar entre los 180 V y los 800 V. A partir de dichas especificaciones se observa que el sistema de alimentación disponible tiene finalmente un rango de tensión de entrada entre 100 V y 1000V. También se puede observar en la Fig. 7 que la etapa de alimentación no tiene polaridad, por lo que puede conectarse tanto en DC como en AC sin necesidad de identificar los terminales positivo y negativo (caso DC) o las fases y el neutro (caso AC).

A partir de los datos anteriores se plantean los siguientes ejercicios:

- Asignatura Tecnología Electrónica - unidad diodos: Determinar y diseñar el circuito que permite disponer de una alimentación que pueda conectarse tanto en una fuente de energía eléctrica DC o AC (monofásica) sin necesidad de tomar en consideración los terminales a los que se conecta. Definir el rango de tensión más adecuado para el correcto funcionamiento del sistema de entre una lista de posibles opciones (pregunta de múltiple selección con respuesta única)
- Asignatura Electrónica de Potencia - unidad convertidores DC/DC: Determinar la topología adecuada y las principales características del convertidor DC/DC necesario para obtener la tensión de alimentación de la interfaz ( $24 V_{DC} \pm 10\%$  y un consumo entre 22 W y 40 W).

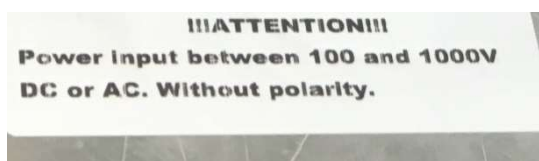


Fig. 7. Datos técnicos del circuito de alimentación de la interfaz que monitoriza y configura el variador de velocidad.

Como ejemplo, el planteamiento del ejercicio de la asignatura Tecnología Electrónica está desarrollado en [21] mientras que la solución se explica en [22]. La interacción de este caso de estudio con las asignaturas del grado GIEIA son elevadas, incluyendo diversas áreas:

- Electrónica analógica: adaptación de señales analógicas, amplificadores, etc.
- Electrónica Digital: procesado de señal, circuitos para señalización de estados del inversor mediante leds parpadeando a distintas secuencias, contadores para iniciar rutinas de puesta en marcha, activación del algoritmo de seguimiento del MPP, etc.
- Instrumentación Electrónica y Sensores e Instrumentación Virtual: sensores de magnitudes eléctricas, sensores de parámetros físicos (temperatura, irradiancia, viento, etc.), equipos de medida, convertidores CAD y DAC, etc.
- Electrónica de potencia: inversores, rectificadores, filtros pasivos, control PWM, etc.
- Sistemas Digitales Aplicados: Programación de micro-controladores y DSPs, comunicaciones industriales, programación de algoritmos de control (seguimiento del MPP).
- Sistemas Electrónicos Industriales: Control de convertidores electrónicos de potencia (FACs, Inversores), control SPWM y SVPWM, etc

La inclusión del caso de estudio a lo largo de todo el grado ayuda a interrelacionar contenidos y permite mostrar a los estudiantes que para abordar el desarrollo e implantación de estos sistemas son necesarios los conocimientos impartidos en las diversas asignaturas que conforman el grado GIEIA. La utilidad de esta formación transversal también se extiende a otros grados y master, siendo utilizada en el Grado en Ingeniería Eléctrica (en las asignaturas Electrónica de Potencia, Sistemas Electrónicos para Energías Renovables y Sistemas Electrónicos para la Eficiencia Energética), así como en el Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica y en el Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos. Como ejemplo de aplicación, todo el desarrollo incluido en la Raspberry para el sistema de comunicación y pasarela RS485 a TCP/IP se aprovecha en las prácticas de las asignaturas Sistemas Digitales Aplicados (optativa en el grado GIEIA) y Diseño Electrónico Avanzado (Master Mecatrónica), donde los alumnos, a lo largo del semestre, van desarrollando diversos bloques funcionales que al combinarlos permiten la implementación de un sistema de monitorización a pequeña escala, similar al desarrollado en esta instalación.

#### IV. RESULTADOS OBTENIDOS

La puesta en marcha de la instalación (inicio del vertido a la red) se ha realizado a finales de febrero de 2020. En el momento de escribir el artículo se están completando los ajustes de la monitorización. Aunque la comunicación entre dispositivos del bus RS-485 de forma individualizada había sido probada en el laboratorio, en el montaje final se han incluido unos cuadros eléctricos en la terraza y el laboratorio. Ambos cuadros, desarrollados para trabajar a la intemperie, han sido cableados por una empresa especializada en la construcción de cuadros para sistemas fotovoltaicos, habiendo sido necesarios algunos ajustes en el cableado para el correcto

funcionamiento del sistema. Los primeros datos adquiridos se muestran en la Fig. 8.

Una vez concluida la puesta en marcha de la monitorización de la instalación, se van a realizar diversos ensayos para verificar las ventajas y desventajas de los diversos sistemas que pueden implementarse: bombeo fotovoltaico directo (solo energía fotovoltaica), bombeo fotovoltaico híbrido (energía fotovoltaica y grupo AC auxiliar o red eléctrica), bombeo fotovoltaico con batería de litio (bombeo directo o bombeo híbrido), sistemas de conexión a red con autoconsumo (con y sin batería, con y sin inyección a red, modo de funcionamiento off-grid). Los resultados del proyecto permitirán incluir en las asignaturas datos reales relacionados con los componentes usados en la instalación: cálculo de eficiencias de los diversos convertidores, eficiencia de la batería en ciclos de carga/descarga, etc. La explicación de las diversas partes del proyecto mediante videos específicos puede servir para la introducción de prácticas en diversas asignaturas:

- Circuitos digitales para adaptar señales de sensores todo-nada como los sensores de nivel de los depósitos de agua.
- Prácticas de Instrumentación Electrónica y Sensores e Instrumentación Virtual relacionadas con la medición de temperatura, irradiancia, presión, flujo, etc.
- Descripción de conversores de señales 4-20 mA a RS485 en Sistemas Digitales Aplicados.

La introducción de todos estos contenidos será acometida a partir de septiembre 2020 dado que la puesta en marcha de la instalación se ha iniciado en febrero de 2020 y debido al COVID-19 no se ha podido completar la puesta en marcha del circuito hidráulico. Así mismo, se demostrará a los alumnos que las capacidades adquiridas durante el grado GIEIA pueden ser aplicadas en el sector del desarrollo humanitario de grupos desprotegidos, facilitando el acceso a una solución altamente sostenible y duradera en el tiempo, libre de mantenimiento y de combustibles fósiles, para garantizar el suministro de agua en todo momento mediante la utilización de módulos fotovoltaicos y baterías de nueva tecnología Li-ion.



Fig. 8. Pantalla donde se muestran algunas de las variables adquiridas.

Reducir la necesidad de utilizar combustibles fósiles para cubrir las necesidades básicas de agua en campos de refugiados, desplazados y/o en comunidades rurales facilitará el empoderamiento de esos grupos sociales desfavorecidos, impulsando un cambio beneficioso en la vida cotidiana de estas personas. Simultáneamente, la utilización de una fuente de energía renovable como es el sol, de gran calidad en dichas ubicaciones (muchas horas de sol con buenos niveles de irradiación), debe aumentar la confianza de la población en las nuevas y sostenibles fuentes de energía, que pueden facilitar una transición al desarrollo que muchas veces se ha visto frenado por el alto coste de los combustibles fósiles que se precisan para el suministro energético. El suministro continuo de agua mediante sistemas fotovoltaicos con baterías de litio incrementa las medidas orientadas a mejorar sus condiciones de vida, en cuanto a la salud, la seguridad y el bienestar de estos núcleos de población.

## V. CONCLUSIONES

Como conclusión final, se puede afirmar que mediante esta instalación fotovoltaica con batería de litio se puede confeccionar una formación transversal en el área de la electrónica que, además de favorecer el aprendizaje con nuevas metodologías y mostrar al alumno la necesidad de una formación completa en diversos aspectos de la electrónica, permite demostrar como la electrónica es una pieza importantísima para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenibles marcados por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

## AGRADECIMIENTOS

Al programa ADSIDEO 2017 por la selección del proyecto “Caracterización de sistemas sostenibles para el bombeo de agua para consumo humano en regiones en desarrollo y/o campos de refugiados en Kenia mediante la implantación de sistemas fotovoltaicos aislados con baterías de ion litio de nueva generación” y la asignación económica recibida.

Al Vicerrectorado de Infraestructuras por el apoyo económico que ha permitido completar la instalación eléctrica del proyecto.

A las empresas GoodWe (inversor híbrido), Carlos Gavazzi (sistema monitor y de adquisición de datos) y Fuji Electric (interfaz de configuración y monitorización del variador de velocidad) por su implicación en el proyecto.

A Alberto Ibáñez Llarío, Global Solar Energy & Water Advisor en IOM (International Organization for Migration [United Nations Agency for Migration]) por introducirnos en el campo de la ayuda humanitaria.

## REFERENCIAS

- [1] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, “The role of renewable energy in the global energy transformation,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [2] S. Greenpeace, GWEC, “Energy [ R ] Evolution: A sustainable world energy outlook 2015,” 2015.
- [3] M. Naumann, R. C. Karl, C. N. Truong, A. Jossen, and H. C. Hesse, “Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application,” in *Energy Procedia*, 2015, vol. 73, pp. 37–47, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.555.
- [4] SAFT, “Lithium-ion battery life,” 2014.
- [5] J. Timpert, “Application note battery energy storage systems:

- efficiency and lifetime,” 2017.
- [6] IEA PVPS, “Trends 2016 in Photovoltaic Applications: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015,” 2016.
- [7] The World Bank and Deloitte, “Solar Irrigation with Electric Vehicle,” 2014.
- [8] S. Anuphappharadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong, and N. Ketjoy, “Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application,” in *Energy Procedia*, 2014, vol. 56, no. C, pp. 352–358, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.167.
- [9] S. S. Chandel, M. Nagaraju Naik, and R. Chandel, “Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1084–1099, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.083.
- [10] D. L. Wood, J. Li, and C. Daniel, “Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 275, pp. 234–242, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.019.
- [11] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, “Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1038–1067, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.021.
- [12] F. Ibáñez, S. Seguí, C. Sánchez, F. Gimeno, and M. Alcañiz, “EraSolar105\_Central\_Fotovoltaica\_con\_conexion\_red\_COLOR,” *Era Solar*, pp. 5–17, 2001.
- [13] S. Seguí-Chilet, P. Montesinos-Sanchis, S. Orts-Grau, and F. J. Gimeno-Sales, “Two years of experience in virtual mobility in renewable energies,” in *GLOBAL*, 2014, pp. 438–448.
- [14] GoodWe, “GoodWe (PV inverters).” [Online]. Disponible en <https://es.goodwe.com/>. [Consultado: 17-abril-2020].
- [15] Carlo Gavazzi Automation, “The evolution of Photovoltaic monitoring,” 2015. [Online]. Disponible en [http://www.gavazzi-automation.com/docs/download\\_area/EOS.pdf](http://www.gavazzi-automation.com/docs/download_area/EOS.pdf). [Consultado: 17-abril-2020].
- [16] UN DESA, “United Nations Department of Economic and Social Affairs,” 2015. [Online]. Disponible en <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>. [Consultado: 28-febrero-2020].
- [17] “Asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.” [Online]. Disponible en [https://www.upv.es/titulaciones/GIEIA/menu\\_1014456c.html](https://www.upv.es/titulaciones/GIEIA/menu_1014456c.html). [Consultado: 28-febrero-2020].
- [18] S. Seguí-Chilet, “Presentación de la instalación de bombeo fotovoltaico con batería de litio del DIRA,” 2020. [Online]. Disponible en <https://media.upv.es/player/?id=39925820-6443-11ea-b7d9-832cbebadcfb>. [Consultado: 10-abril-2020].
- [19] S. Seguí-Chilet, “Aplicaciones de la instalación de bombeo fotovoltaico con batería de litio del DIRA,” 2020. [Online]. Disponible en <https://media.upv.es/player/?id=e608c6b0-6444-11ea-b7d9-832cbebadcfb>. [Consultado: 10-abril-2020].
- [20] Fuji Electric, “Programmable Operator Interface Minitouch V9 series,” 2020.
- [21] S. Seguí-Chilet, “Diodos P01 circuito para interfaz del sistema monitor del bombeo fotovoltaico-planteamiento,” 2020. [Online]. Disponible en <https://media.upv.es/player/?id=7e6e12a0-6447-11ea-b7d9-832cbebadcfb>. [Consultado: 10-abril-2020].
- [22] S. Seguí-Chilet, “Diodos P01 circuito para interfaz del sistema monitor del bombeo fotovoltaico-solución,” 2020. [Online]. Disponible en <https://media.upv.es/player/?id=480ce910-6448-11ea-b7d9-832cbebadcfb>. [Consultado: 10-abril-2020].