

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Desarrollo de un sistema de control para un laboratorio real constituido por una batería de Li-Ion y un generador fotovoltaico

**AUTOR/A:** Jhesica Rodriguez Saavedra

**TITULACIÓN:** Electrónica de Comunicaciones

**DIRECTOR/A:** Celena Navarro Lorenzo

**TUTOR/A:** Laura Barrutia Poncela

**DEPARTAMENTO:** EFF

VºBº TUTOR/A

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE/A:** Guido Vallerotto

**TUTOR/A:** Laura Barrutia Poncela

**SECRETARIO/A:** Marta Sánchez Agudo

**Fecha de lectura:** 30 de septiembre 2024

**Calificación:**

El Secretario/La Secretaria,



---

## Resumen

Desde el Acuerdo de París, numerosos países se comprometieron a una transición energética hacia un modelo más sostenible, centrado en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el uso de energías renovables. La energía solar y eólica se han destacado como las principales fuentes renovables, con un crecimiento significativo impulsado por sus menores costos de generación y políticas favorables. España, en particular, ha liderado el crecimiento de la energía solar en 2023, con un enfoque en el autoconsumo que permite a los propietarios ahorrar en la factura de la luz y vender excedentes de energía.

Sin embargo, un desafío clave en la adopción de la energía solar fotovoltaica es su naturaleza intermitente, lo que hace necesario el uso de baterías para adaptar la producción a la demanda. Las baterías de Li-Ion, aunque populares por su rápida carga y larga vida útil, presentan problemas como su alto costo y la necesidad de sistemas de gestión avanzados (BMS) para garantizar su estabilidad y rendimiento óptimo. Esto resalta la importancia de contar con controladores eficientes que regulen la carga y descarga de las baterías, asegurando un funcionamiento fiable del sistema.

Las baterías disponibles en el mercado hoy en día cuentan con sistemas de control cuyas lógicas y códigos suelen ser difíciles de acceder. Por ello, este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un sistema de control en código abierto y flexible, que sirva como base para implementar futuras estrategias de control de baterías con fines de investigación, dando independencia respecto a los distintos fabricantes y a las estrategias de control comerciales, que ya han sido desarrolladas.

El proyecto se llevará a cabo utilizando un PLC M-Duino 50RRA+, programado a través de la plataforma Arduino. Este PLC, en conjunto con una placa PCB diseñada específicamente para el proyecto, conformará el núcleo del sistema de control para un sistema de autoconsumo fotovoltaico. Aunque el sistema real está basado en simulaciones, utilizando señales analógicas y digitales para representar las variables clave como la producción solar y la demanda energética, este enfoque permite una validación eficiente del control sin necesidad de un hardware costoso y complejo desde el inicio.

Con este diseño, se logrará construir un sistema básico pero robusto, que no solo cumplirá con las necesidades inmediatas de este proyecto, sino que también servirá como una base sólida para futuras investigaciones. Además, permitirá una mejor comprensión y optimización de los sistemas de almacenamiento de energía, contribuyendo así al avance de las tecnologías de autoconsumo y gestión energética.



---

## Abstract

Since the Paris Agreement, many countries have committed to an energy transition towards a more sustainable model, focused on reducing greenhouse gas emissions using renewable energies. Solar and wind have stood out as the top renewable sources, with significant growth driven by their lower generation costs and favorable policies. Spain has led the growth of solar energy in 2023, with a focus on self-consumption that allows homeowners to save on electricity bills and sell surplus energy.

However, a key challenge in the adoption of solar PV is its intermittent nature, which makes it necessary to use batteries to adapt production to demand. Li-Ion batteries, while popular for their fast charging and long lifespan, present issues such as their high cost and the need for advanced management systems (BMS) to ensure their stability and optimal performance. This highlights the importance of having efficient controllers that regulate the charging and discharging of batteries, ensuring reliable operation of the system.

The batteries available on the market today are often difficult to access. Therefore, this project has as its main objective to develop an open source and flexible control system, which serves as a basis for implementing future battery control strategies for research purposes.

The project will be carried out using an M-Duino 50RRA+ PLC, programmed through the Arduino platform. This PLC, together with a PCB board designed specifically for the project, will form the core of the control system for a photovoltaic self-consumption system. Although the actual system is based on simulations, using analog and digital signals to represent key variables such as solar production and energy demand, this approach allows for efficient validation of the control without the need for expensive and complex hardware from the start.

With this design, it will be possible to build a basic but robust system, which will not only meet the immediate needs of this project but will also serve as a solid foundation for future research. In addition, it will allow a better understanding and optimization of energy storage systems, thus contributing to the advancement of self-consumption and energy management technologies.

---

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Laura y Celena, por su invaluable guía y apoyo durante todo este proyecto. Su experiencia ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

A mis padres, por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida. Gracias por vuestros sacrificios, por creer en mí y por ofrecerme todas las oportunidades para crecer y alcanzar mis sueños. Vuestro esfuerzo y dedicación han sido la base sobre la cual he construido este logro.

A mi padrino Froilán, por ser mi mayor inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis hermanos, mis mejores amigos. Gracias por estar siempre a mi lado, por vuestras palabras de ánimo y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Creedme que, si yo he podido, vosotros también podéis conseguir todo aquello que os propongáis, con esfuerzo y disciplina.

A Gonzalo, no puedo expresar en palabras lo mucho que te admiro y respeto. Tu paciencia y fe en mí han sido una fuente constante de fortaleza y motivación. Gracias por enseñarme el valor de los pequeños momentos de la vida.

A todos ellos, por no permitirme rendirme y apoyarme a lo largo de esta carrera. Os debo todo lo que soy y todo lo que he conseguido.

Finalmente, a mí, por persistir a pesar de lo difícil y duro que ha sido llegar hasta aquí.

*Dedicado a la memoria de mi mamita María. Siempre llevo tus palabras y recuerdos en mi corazón.*

---

# Índice de figuras

Figura 1. Crecimiento de las instalaciones solares a nivel mundial 2020-2023.....	1
Figura 2. Sistema de almacenamiento. ....	3
Figura 3. Ingecon Sun Manager por comunicación ethernet.....	4
Figura 4. Inversor fotovoltaico .....	5
Figura 5. Sistema PXI.....	5
Figura 6. PLC M-Duino 50RRA+ .....	6
Figura 7. Esquema general del proyecto. ....	11
Figura 8. Imagen PCB 3D del sistema de control .....	15
Figura 9. Símbolo entrada analógica en el PLC .....	16
Figura 10. Conexión entrada analógica .....	16
Figura 11. Previa configuración de una entrada analógica.....	17
Figura 12. Lectura de G.....	17
Figura 13. Filtración señal analógica.....	18
Figura 14. Símbolo salida analógica en el PLC .....	18
Figura 15. Conexión salida analógica .....	18
Figura 16. Previa configuración de una salida analógica .....	21
Figura 17. Escritura en la salida analógica de Potencia de Carga de la batería.....	21
Figura 18. Condensador de desacoplo para salidas analógicas .....	21
Figura 19. Símbolo entrada digital PLC.....	22
Figura 20. Conexión entrada digital .....	22
Figura 21. Símbolo salida digital PLC .....	23
Figura 22. Conexión salida digital.....	23
Figura 23. Visualización del Serial Monitor de Arduino .....	26
Figura 24. Visualización del Serial Monitor de una venta a la red .....	26
Figura 25. Potencia de venta a la red en un polímetro .....	27
Figura 26. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio en modo automático .....	27
Figura 27. Visualización del Serial Monitor de una descarga de la batería .....	28
Figura 28. Visualización del Serial Monitor de la potencia consumida de la red .....	29
Figura 29. Potencia consumida de la red en un polímetro.....	29
Figura 30. Visualización del Serial Monitor del mensaje mostrado por pantalla.....	30
Figura 31. Visualización del Serial monitor en una carga en modo manual .....	31
Figura 32. Visualización placa PCB en una carga en modo manual.....	31
Figura 33. Visualización del serial monitor de una venta a red en modo manual.....	32
Figura 34. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio e interruptor carga activa.....	33
Figura 35. Visualización del serial monitor cuando se pide carga y no se puede realizar la acción.....	33
Figura 36. Visualización del serial monitor en una carga que no puede realizarse.....	34
Figura 37. Visualización del serial monitor cuando no se puede realizar una descarga .....	35
Figura 38. Visualización del serial monitor con descarga activa sin poder realizarse .....	35
Figura 39. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio e interruptor descarga activa.....	36

---

Figura 40. Visualización del serial monitor de una correcta gestión de descarga de la batería en modo manual.....	37
Figura 41. Visualización de la PCB en descarga en modo manual.....	37
Figura 42. Visualización del serial monitor cuando se consume de la red.....	38
Figura 43. Mensaje en el serial monitor cuando la alarma está activa.....	39
Figura 44. Visualización de la PCB cuando la alarma está activa.....	39
Figura 45. Paso 1 interfaz software.....	47
Figura 46. Paso 2 interfaz software.....	48
Figura 47. Paso 3 interfaz software.....	48
Figura 48. Paso 4 interfaz software.....	48
Figura 49. Paso Final interfaz software.....	49
Figura 50. Paso 2 Conectar PLC al PC.....	49
Figura 51. Paso 3 Conectar PLC al PC.....	50
Figura 52. PCB con código de colores para la conexión correcta con el PLC.....	50
Figura 53. Verificación del programa.....	52
Figura 54. Carga del programa.....	52

---

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de los generadores FV.....	4
Tabla 2. Variables batería.....	12
Tabla 3. Variables inversor conectado a red.....	13
Tabla 4. Variables generador fotovoltaico .....	13
Tabla 5. Parámetros del módulo monocristalino ISF .....	14
Tabla 6. Lista entradas analógicas .....	16
Tabla 7. Ecuaciones de conversión para el código Arduino.....	17
Tabla 8. Lista salidas analógicas .....	19
Tabla 9. Solución para el cálculo de la potencia de carga de la batería .....	19
Tabla 10. Solución para el cálculo de la potencia de descarga de la batería .....	19
Tabla 11. Solución para el cálculo de la potencia a consumir de la red.....	20
Tabla 12. Solución para el cálculo de la potencia a vender a la red.....	20
Tabla 13. Lista entradas digitales .....	22
Tabla 14. Lista salidas digitales.....	24
Tabla 15. Tabla de presupuesto final.....	40
Tabla 16. Conexión PLC con PCB.....	51



---

## Lista de acrónimos

<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>
BMS	Battery Management System. Sistema de gestión de baterías.
FV	Fotovoltaica
G	Irradiancia
IDE	Integrated development environment. Entorno de desarrollo integrado
IEA	Agencia Internacional de la Energía
IES	Instituto de Energía Solar
IoT	Internet of Things Internet de las cosas
I/O	Input/Output. Entrada/Salida
LED	Diodo Emisor de Luz
Li-Ion	Lithium-Ion. Litio-Ion
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board. Placa de circuito impreso
PLC	Programmable Logic Controller. Controlador lógico programable
RTU	Unidad Terminal Remota
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SoC	State of Charge. Estado de carga
Tc	Temperatura de célula
TCP	Transmission Control Protocol
VI	Virtual Instrument



---

# Índice de contenidos

<b>Resumen .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de acrónimos.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Marco y motivación del proyecto .....	1
1.2 Laboratorio del Hogar Digital .....	3
1.3 Objetivos técnicos y académicos .....	6
1.4 Estructura del resto de la memoria .....	8
<b>2. Especificaciones y restricciones de diseño .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Descripción de la solución propuesta.....</b>	<b>11</b>
3.1 Componentes principales del sistema.....	11
3.1.1 Sistema de Batería (Simulación): .....	12
3.1.2 Inversor Conectado a la Red (Simulación): .....	12
3.1.3 Generador fotovoltaico (Simulación): .....	13
3.1.4 Demanda de un hogar (simulación):.....	14
3.1.5 Sistema de Control (PLC M-Duino + PCB):.....	15
<b>4. Resultados.....</b>	<b>25</b>
<b>5. Presupuesto .....</b>	<b>40</b>
<b>6. Impacto del proyecto .....</b>	<b>41</b>
<b>7. Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>43</b>
7.1 Conclusiones.....	43
7.2 Trabajos futuros .....	44
<b>8. Referencias .....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>47</b>
A.1 Instalación y configuración del entorno de trabajo.....	47
A.1.1. Interfaz Software .....	47
A.1.2. Conectar PLC Arduino al PC .....	49
A.2 Manual de usuario.....	50

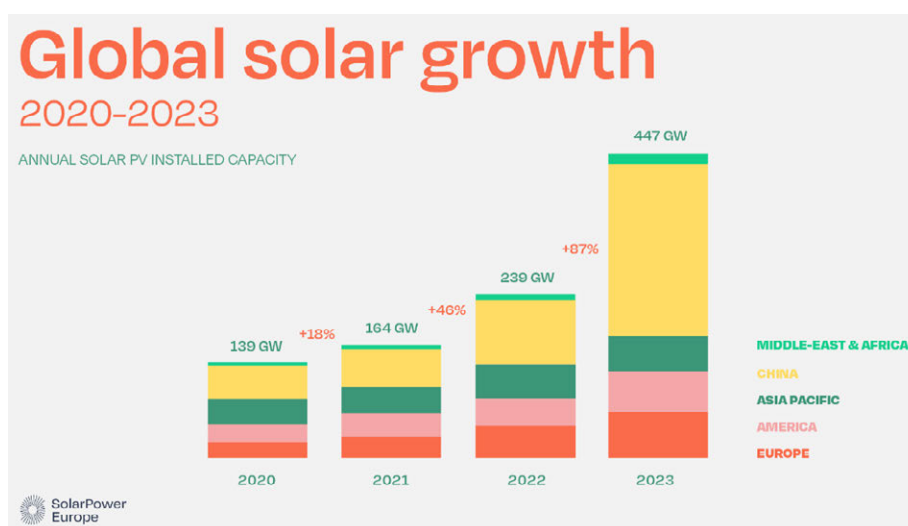
---

# 1. Introducción

## 1.1 Marco y motivación del proyecto

En la lucha para combatir el cambio climático, en 2015 varios países firmaron el Acuerdo de París [1], el cuál impulsó al mundo hacia una transición energética, cuya clave principal es adoptar un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Este modelo se caracteriza principalmente por incentivar la obtención de energía a partir de fuentes renovables y, por tanto, reducir las provenientes de fuentes de combustibles fósiles, principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la energía solar y eólica se han destacado como las energías renovables más promovidas según el reporte Renewables 2023 de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [2]. En la Figura 1 [3], se observa el crecimiento de las instalaciones solares a nivel mundial de los últimos cuatro años. Siendo el año pasado, 2023, donde la capacidad de generación de energía solar casi se duplicó en comparación con 2022. Por otra parte, se prevé que estas representen, en cinco años, el 95% de crecimiento, debido a que sus costes de generación son más bajos que los de las alternativas fósiles y no fósiles en la mayoría de los países y las políticas continúan apoyándolas.



**Figura 1. Crecimiento de las instalaciones solares a nivel mundial 2020-2023**

España es el país europeo que ha liderado el crecimiento de la energía solar en 2023 [4], siendo las inversiones un gran papel en las apuestas por la energía limpia. Para este proyecto destacamos la inversión en autoconsumo [5]. Este tipo de inversión permite al propietario, autoabastecerse y de este modo conseguir un ahorro en la factura de la luz, por otra parte, si hubiese un excedente, este se podría vender, obteniendo beneficios en ambos casos.

La energía solar fotovoltaica es una energía intermitente, es decir, la energía producida depende de las condiciones meteorológicas. Es importante, por tanto, el uso de sistemas de almacenamiento, y en concreto de baterías, en cualquier sistema fotovoltaico, para conseguir una mayor penetración de la energía fotovoltaica, permitiendo la posibilidad de adaptar la producción a la demanda [6], [7].

Actualmente, las baterías de Li-Ion son las más utilizadas en el almacenamiento de energía debido a varias ventajas [8]. Su composición química y diseño permiten una rápida transferencia de iones y una baja resistencia interna, lo que se traduce en varias ventajas:

- Mayor velocidad de carga y descarga en comparación con las de plomo-ácido: Gracias a su capacidad para aceptar una mayor corriente de carga sin generar tanto calor.
- Vida útil considerablemente más prolongada: Debido a su química estable, gestión térmica avanzada y materiales de alta calidad, pueden soportar más ciclos de carga y descarga antes de degradarse, lo que las convierte en una opción eficiente y duradera para sistemas de energía renovable.

Sin embargo, su uso conlleva algunos inconvenientes significativos:

- Debido a que las celdas de la batería tienen límites de corriente/voltaje para la carga y descarga, los fabricantes suelen especificar límites en el estado de carga (SoC) de la batería (por ejemplo, entre el 20% y el 80%), con el fin de promover una mayor vida útil de la misma, así como protección frente a sobrecargas o descargas profundas y una eficiencia energética.
- Son notablemente más caras que las de plomo-ácido, a pesar de tener capacidades similares. Este elevado coste se debe a los materiales más costosos y a la tecnología de fabricación más avanzada y compleja que requieren las baterías de litio.
- Son menos estables en comparación con otras tecnologías, debido a la alta reactividad del litio, que puede provocar sobrecalentamiento, incendios o explosiones si la batería se daña o se carga incorrectamente.

Estos inconvenientes subrayan la importancia de contar con un sistema de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés, Battery Management System), que viene ya integrado con cualquier producto comercializable. Este BMS se encarga del control de corriente, tensión y temperatura por razones de seguridad, y normalmente lleva incorporado un controlador capaz de indicar cuándo cargar y descargar la batería, y a qué ritmo. Para ello, debe monitorizar una serie de señales del sistema (estado de carga, potencia fotovoltaica disponible, demanda de consumo...) para, en función de la lógica de control que se considere más adecuada, enviar las comandas pertinentes [9].

Por tanto, los BMS comerciales actuales no permiten acceso ni modificaciones directas por parte del usuario. Los fabricantes suelen proporcionar aplicaciones que permiten realizar lecturas y operaciones básicas, pero estas no son suficientes para un manejo manual completo. En un contexto de investigación, donde se busca explorar estrategias de control alternativas a las comerciales, es recomendable desarrollar controladores propios que ofrezcan una mayor versatilidad y flexibilidad, permitiendo a los investigadores ajustar y optimizar el sistema según sus necesidades específicas y objetivos experimentales.

El Hogar Digital del Campus Sur de la UPM (Universidad Politécnica de Madrid) cuenta con un laboratorio montado por el IES (Instituto de Energía Solar) constituido por una batería conectada a un generador fotovoltaico y a la red eléctrica a través de un inversor. El controlador

existente de este sistema se implantó hace varios años en un hardware muy costoso y un software cerrado [10]. Por tanto, se pretende con este proyecto sustituir este controlador por uno con código abierto e implementable en cualquier hardware que se programe en Arduino.

## 1.2 Laboratorio del Hogar Digital

Se ha comentado brevemente en el apartado anterior que dentro del Hogar Digital existe un laboratorio de ensayos del grupo de Sistemas Fotovoltaicos del Instituto de Energía Solar (UPM-Campus Sur). En este laboratorio, constituido por una batería conectada a un generador fotovoltaico y a la red eléctrica a través de un inversor, es dónde se ha desarrollado este proyecto.

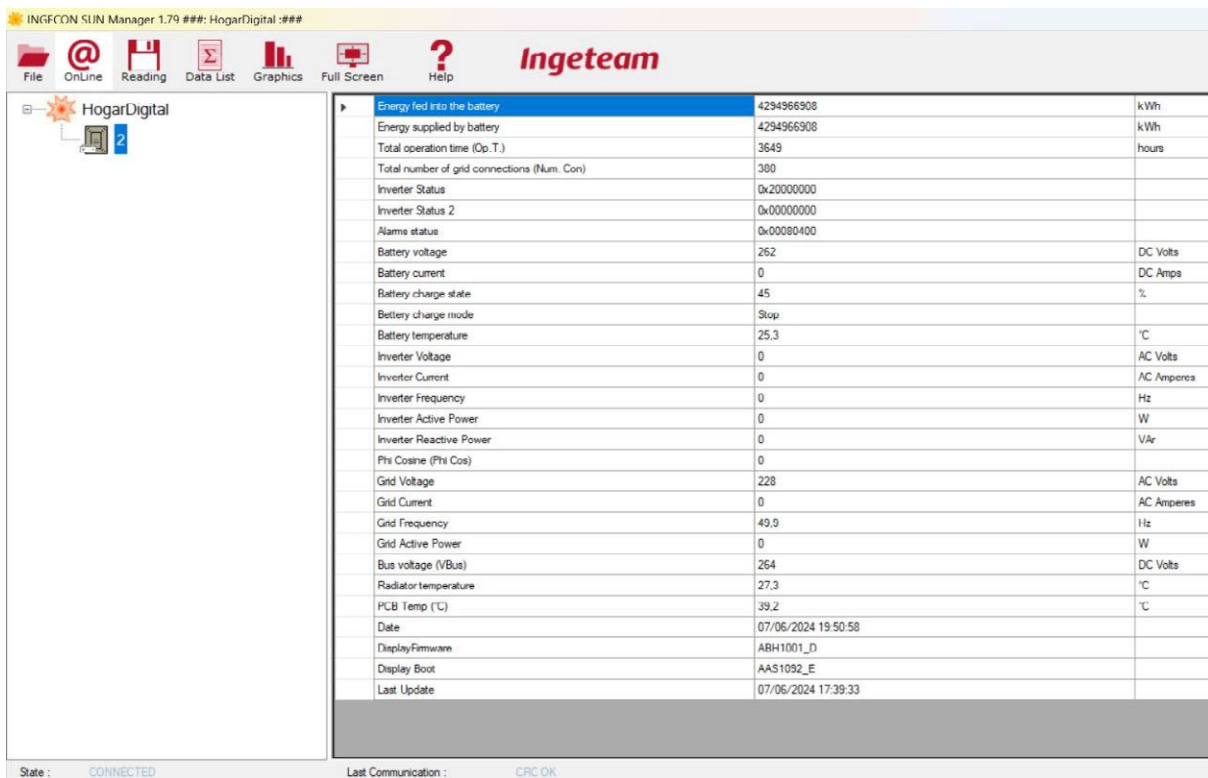
### Sistema de Almacenamiento

Está constituido por una batería de Li-Ion y un inversor-cargador, que conecta la batería a la red eléctrica y está configurado como el BMS. En la Figura 2 se visualiza un esquema del sistema de almacenamiento



**Figura 2. Sistema de almacenamiento.**

El inversor-cargador es el modelo INGECON EMS HOME 5.0 TL fabricado por Ingeteam Power Technology SA. Se trata de un inversor monofásico, sin transformador y con una potencia nominal de 5 kW [10]. Dispone de una tarjeta de comunicaciones INGECON SUN EMS Board [11], que le permite la comunicación por ethernet y modbus. Actualmente este modelo está descatalogado e Ingeteam proporciona una aplicación para que el usuario pueda realizar operaciones básicas, se trata de INGECON SUN Manager [12]. Se muestra en la Figura 3 una captura de los datos que puede visualizar el usuario mediante comunicación ethernet.



**Figura 3. Ingecon Sun Manager por comunicación ethernet**

La batería, fabricada por Cegasa Motion Energy, modelo STLI11\_02 [13], está conformada por 2 módulos de energía conectados en serie. Siendo la capacidad de cada módulo de 5,3 kWh y, por tanto, la total de 10,6 kWh. Sin embargo, debido a restricciones técnicas por el fabricante, la capacidad útil está limitada a 7,42 kWh

### Generador FV

El laboratorio del Hogar Digital cuenta con un conmutador para seleccionar entre dos generadores fotovoltaicos. Uno situado en la pérgola del Hogar digital y otro en la terraza del bloque 3 de la ETSIST. Ambos compuestos por 10 módulos cada uno. Modelos ISF240/20 fabricado por ISOFOTON [14] y JMK295P-72 fabricado por JINKO [15].

Los datos más relevantes de los mismos se muestran en la Tabla 1, que se ha obtenido de la memoria del sistema que se montó hace unos años [16].

	$P_{M\acute{a}x}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$	Eficiencia ( $\eta$ %)
<b>Módulos de pérgola</b>	240 $W_p$	37 V	8.6 A	14.5%
<b>Generador completo pérgola</b>	2160 $W_p$	333 V		
<b>Módulos terraza</b>	295 $W_p$	45.2 V	8.95 A	15.2%
<b>Generador completo terraza</b>	2950 $W_p$	452 V		

**Tabla 1. Características de los generadores FV**

## Inversor

Es el encargado de transformar la corriente continua entregada por el generador fotovoltaico en corriente alterna que inyecta en la red. Modelo Ingecon Sun Lite 5TL [17], monofásico, sin transformador, ver Figura 1Figura 4 y con una potencia nominal de 5kW. Se puede conectar con otros inversores u ordenadores mediante protocolo RS485 o mediante ethernet o modbus si dispone de una tarjeta de comunicaciones.



**Figura 4. Inversor fotovoltaico**

## Sistema PXI

Es el sistema hardware, ver Figura 5, sobre el que se montó anteriormente el controlador, con una comunicación Modbus RTU (Unidad Terminal Remota), este tipo de comunicación permite el intercambio de datos entre los controladores lógicos programables (PLC) y ordenadores (PC).

Se programó un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) mediante Labview, donde una vez compilados los respectivos VIs (Virtual Instrument), forman una aplicación que se transfiere al PXI [18].



**Figura 5. Sistema PXI**

## PLC M-Duino 50RRA+

Es el dispositivo Hardware, ver Figura 6, sobre el que se cargara el control programado en Arduino, lenguaje en código abierto y versátil. Ofrece una comunicación Ethernet, Modbus RTU/TCP y RS-485 gracias a un controlador W5500 que lleva incluida.

Este PLC M-Duino [19], comparado con el sistema anterior montado (la plataforma PXI) ofrece mayor capacidad de I/O, robustez industrial, y opciones avanzadas de comunicación, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones industriales y de investigación. Al mismo tiempo, requiere

de ciertas configuraciones para poder utilizar ciertas entradas o salidas de este. Que se comentaran en el capítulo 3 de esta memoria.



**Figura 6. PLC M-Duino 50RRA+**

La idea principal de este proyecto consistía en sustituir el programa anterior por uno en código Arduino para probar distintas estrategias de gestión de baterías. Este código, entre sus fases incluía establecer una lógica de control básica, una comunicación Modbus TCP implantando una red local y finalmente poder probarlo en el sistema real.

Sin embargo, no ha sido posible establecer el apartado de comunicación Modbus TCP, debido a problemas con la tarjeta de comunicaciones del inversor-cargador. Por tanto, el sistema resultante, consiste en un controlador programado en Arduino dónde se simulan los distintos aspectos del sistema generador FV, sistema de almacenamiento e inversor conectado a la red.

### **1.3 Objetivos técnicos y académicos**

Una vez comentado el contexto del sistema actual, el objetivo principal de este proyecto es sustituir la lógica de control que hasta ahora estaba en Labview por uno en código abierto y versátil, que permitirá, en otro futuro proyecto, implementar estrategias de control de una batería de Li-Ion conectada a un sistema fotovoltaico y a la red eléctrica a través de un inversor. De entre las múltiples opciones que existen, se ha escogido Arduino por la gran cantidad de recursos, soporte comunitario, su facilidad de uso, y bajo coste.

Por ello los objetivos, desde el punto de vista técnico, de este proyecto fin de carrera son:

- Implementar un controlador en código abierto y versátil.
- Desarrollar y programar dos modos de funcionamiento: automático y manual.
- Configurar entradas analógicas, para simular las condiciones de operación de un panel solar (como son la irradiancia y temperatura de célula), así como el estado de carga de una batería, y demanda de energía de una casa.

- Control de indicadores LED (mediante señales digitales) que represente visualmente los diferentes estados operativos del sistema, como carga y descarga de la batería, modo de funcionamiento y alarma.
- Configurar salidas analógicas, para verificar que el sistema funciona correctamente, como son la potencia de carga, descarga de la batería y el consumo o la cantidad que se vende a la red.
- Interfaz de usuario con interruptores, para permitir al usuario cambiar entre los modos de operación y controlar manualmente las salidas del sistema.
- Desarrollo de algoritmos que, en el modo automático, interpreten las señales analógicas y determinen las acciones correctas según las condiciones simuladas.
- Se ha de asegurar que las señales analógicas se interpreten de manera precisa, realizando la calibración necesaria para que las decisiones del sistema sean coherentes con las condiciones simuladas.
- Realizar una documentación exhaustiva del diseño, programación y configuración del sistema, facilitando la comprensión y posible replicación del proyecto.

Desde el punto de vista académico, el proyectista adquiere las siguientes competencias y habilidades:

- Aplicación de conocimientos teóricos de conceptos teóricos en sistemas de control, electrónica analógica, y programación de controladores.
- Desarrollo de competencias técnicas, mejorar las habilidades en el diseño y programación de sistemas basados en Arduino, enfocándose en la implementación de modos de operación, simulación de señales analógicas y control de salidas.
- Planteamiento y ejecución de un plan de pruebas que cubra todos los casos posibles para validar el correcto funcionamiento del sistema de control
- Capacidad de resolución de problemas que surjan durante el desarrollo del sistema, como la interpretación de señales o la implementación de algoritmos de decisión.
- Desarrollo de la documentación técnica y en la comunicación de resultados, facilitando la difusión del conocimiento adquirido a través del proyecto.
- Preparación para proyectos futuros: sentar las bases para investigaciones y desarrollos más avanzados en el campo del control de baterías y gestión de energía, aprovechando el sistema básico creado como una plataforma de aprendizaje y experimentación.

## **1.4 Estructura del resto de la memoria**

Una vez contextualizado el problema y establecidos los objetivos, los próximos capítulos de esta memoria abordarán varios aspectos clave. En el capítulo 2 se detallan las especificaciones y restricciones del diseño, mientras que el capítulo 3 presenta la descripción de la solución propuesta. Los resultados de las pruebas realizadas para validar el diseño se exponen en el capítulo 4. El presupuesto se presenta en el capítulo 5. Y finalmente, las conclusiones y el impacto del proyecto en futuras líneas de investigación se discuten en los capítulos 6 y 7.

## **2. Especificaciones y restricciones de diseño**

Se comentan las especificaciones del diseño:

- El control del sistema está desarrollado utilizando la plataforma Arduino IDE 2.3.2, específicamente para un PLC M-DUINO ETHERNET ARDUINO 50RRA+ [19].
- El control del sistema se ha desarrollado para crear una lógica de control básica para gestionar un supuesto sistema de autoconsumo constituido por un generador fotovoltaico con 16 módulos en serie del modelo A-300P [20], un sistema de almacenamiento de batería, inversor y demanda de una vivienda.
- Se supone como potencia máxima contrada de un hogar de 3,5 kW, siendo esta la misma limitación para vender o consumir de la red.
- La potencia máxima que admite la batería STL011\_2 recomendada por el fabricante es de 5 kW en carga y -5 kW en descarga.
- En el caso de la batería STL011\_2 [13] el fabricante recomienda, para evitar sobrecargas y descargas profundas, colocar un margen de seguridad del 10%, como límite inferior y superior. Es decir, la batería se podrá cargar como máximo hasta el 90% y en ningún caso se podrá cargar hasta el 100%, del mismo modo, se podrá descargar la misma hasta el 10%, no se podrá superar por tanto este límite y descargar totalmente la batería.
- El control del sistema debe incluir dos modos de operación:
  - Automático: El sistema toma decisiones basadas en las señales de entrada. En este modo, no se tendrán en cuenta las acciones del usuario a menos que se cambie el modo de operación.
  - Manual: El usuario controla manualmente las salidas mediante interruptores. Cabe destacar que el sistema no realizará posibles casos que no concuerden, por ejemplo, si la batería estuviese en su porcentaje máximo de descarga, es decir, que no se pudiese descargar más la batería, y el usuario quisiese descargar más, el sistema no se lo permitiría y recomendaría consumir de la red.
- El sistema también incluye el modo alarma, simulada mediante una entrada digital. En este modo el sistema no realiza ninguna acción a menos que la alarma se desactive.
- El sistema debe funcionar con una fuente de alimentación de 24 V proporcionada por una fuente presente en el laboratorio del Hogar Digital, donde se ha realizado este proyecto.
- El sistema contará con cuatro entradas analógicas que simulan las señales provenientes de los paneles solares (irradiancia y temperatura de célula), una batería (estado de carga de la batería) y la demanda de energía de un hogar.
- El interfaz de usuario será simple, basada en interruptores físicos (señales digitales de entrada) que permiten alternar entre los modos de operación y controlar las salidas en

modo Manual. Del mismo modo, se podrán visualizar que operación está realizando el sistema con los leds y si se requiere de más detalles, se podrán visualizar también en el Serial Monitor de Arduino.

- Salidas Digitales (leds): El sistema tendrá cuatro leds que indicarán visualmente los estados operativos: modo de operación, carga de la batería, descarga de la batería y si existe una alarma activa.
- Se implementan algoritmos lógicos básicos para determinar la acción adecuada en el modo automático, basándose en los valores de las señales analógicas y/o las señales digitales de entrada, los interruptores.

Restricciones del diseño:

- Debido a la naturaleza básica del sistema, no se implementará comunicación serial avanzada ni interfaces gráficas de usuario.
- Las señales analógicas simuladas no representan condiciones reales de un sistema de energía, sino que son aproximaciones para fines demostrativos.
- Como se ha comentado al final del apartado 1.2, debido a una avería con la tarjeta de comunicaciones, no se ha podido establecer comunicación con el inversor-cargador del sistema de almacenamiento. Por ende, el sistema no se conectará ni interactuará directamente con la red eléctrica; toda la simulación será interna y basada en leds e interruptores.
- El diseño está pensado para un entorno de laboratorio o demostración y no es escalable a sistemas más grandes sin modificaciones significativas.
- En el modo automático, las decisiones del sistema estarán limitadas por los algoritmos básicos implementados, sin capacidad para aprender o adaptarse a nuevas condiciones.
- El sistema está diseñado para operar en condiciones ambientales estándar (20-25°C), sin protección específica contra humedad, polvo o vibraciones. En caso se ubicarse en el exterior, debería protegerse adecuadamente.
- El proyecto está documentado para ser replicado a nivel educativo o de prototipos, pero no cuenta con soporte técnico oficial ni actualizaciones regulares.

### 3. Descripción de la solución propuesta

Se propone un control del sistema en código abierto y versátil, utilizando un PLC programable (M-duino50rra+). El objetivo es crear una plataforma flexible, modulable y modificable que permita, en futuras etapas, implementar y probar estrategias de control de baterías. Dado que muchos sistemas comerciales de baterías son cerrados y difíciles de modificar, este sistema se propone como una alternativa accesible para la investigación y desarrollo.

Se ha desarrollado, por tanto:

- Un código en Arduino, que debe cargarse en el PLC.
- Una placa PCB, para la interfaz de control del usuario.

\* Si se requieren de más detalles sobre las operaciones que está realizando el sistema, se puede observar el Serial Monitor de Arduino.

#### 3.1 Componentes principales del sistema.

El sistema está compuesto por un PLC que controla una batería, que a su vez intercambia energía con un generador fotovoltaico y con la red eléctrica a través de un inversor. Para la validación del control implementado en el PLC, se simulan distintas condiciones de operación del generador FV (lo cual da lugar a distintas potencias generadas), el estado de carga de la batería y la demanda requerida por una casa.

En los siguientes apartados se comentan los componentes simulados y finalmente el control del sistema desarrollado.

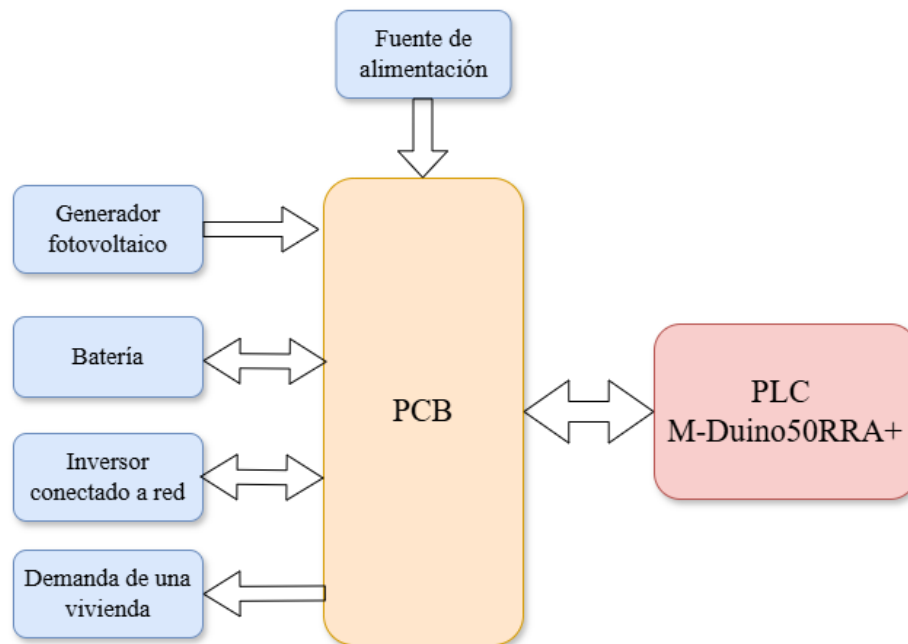


Figura 7. Esquema general del proyecto.

### 3.1.1 Sistema de Batería (Simulación):

Aunque no se utiliza una batería física en esta etapa, el sistema simula el comportamiento de una batería a través de señales que representan dos variables clave, un posible estado de alarma y el estado de carga (SoC) que me indica por tanto la capacidad de almacenamiento de la batería.

Una vez conocidas estas dos variables clave, con la lógica de control programada y cargada en el PLC y Placa de Circuito Impreso (PCB), se podrá simular la potencia con la que debe cargarse o descargarse la batería.

En la Tabla 2 se muestra la variable a simular y cómo se está simulando en este proyecto.

Variable	Cómo se simula	Tipo de variable	Valores que puede tomar	Valores reales a los que corresponde
Estado de alarma	Interruptor	Señal digital de entrada	0-1	Alarma desactivada-activada.
	Led	Señal digital de salida		
Estado de carga de la batería (SoC)	Fuente de alimentación y/o potenciómetro	Señal analógica de entrada.	0-5 V	0% - 100%
Carga de batería	Potencia de carga	Señal analógica de salida	0-10 V	0kW- 5kW
	Interruptor	Señal digital de entrada	0-1	No cargar – Cargar la batería
Descarga de batería	Potencia de descarga	Señal analógica de salida	0-10 V	0kW- 5kW
	Interruptor	Señal digital de entrada	0-1	No descargar – descargar la batería

**Tabla 2. Variables batería**

La simulación de la batería permite probar diferentes estrategias de control sin necesidad de utilizar una batería física, lo que reduce costos y riesgos en la fase de investigación.

### 3.1.2 Inversor Conectado a la Red (Simulación):

El comportamiento del inversor se simula mediante señales de salida del sistema PLC + PCB. Estas serán 2 señales analógicas de salida que me indican si la energía fotovoltaica sobrante, una vez satisfecha la demanda, debe ser inyectada a la red o si, por otra parte, la energía fotovoltaica no satisface la demanda, se debe consumir de la red para satisfacer la misma. Ver Tabla 3.

Variable	Cómo se simula	Tipo de variable	Valores que puede tomar	Valores reales a los que corresponde
Vender a la red	Potencia vendida	Señal analógica de salida	0-10 V	0kW- 3,5kW
Consumir de la red	Potencia consumida	Señal analógica de salida	0-10 V	0kW- 3,5kW

**Tabla 3. Variables inversor conectado a red**

La simulación del inversor permite probar la viabilidad de estrategias de venta y consumo sin necesidad de un inversor físico, lo que simplifica el proceso de experimentación y ajuste de algoritmos.

### 3.1.3 Generador fotovoltaico (Simulación):

Se simulan 2 variables de los paneles solares, irradiancia y temperatura de célula. Estas variables alimentan el sistema de control con datos sobre la cantidad de energía fotovoltaica disponible para comprobar si esta satisface la demanda. Ver Tabla 4.

Variable	Cómo se simula	Tipo de variable	Valores que puede tomar	Valores reales a los que corresponde
Irradiancia	Fuente de alimentación y/o potenciómetro	Señal analógica de entrada	0-5 V	0 W/m <sup>2</sup> - 1250 W/m <sup>2</sup>
Temperatura de Célula	Fuente de alimentación y/o potenciómetro	Señal analógica de entrada.	0-5 V	-20°C - +130°C

**Tabla 4. Variables generador fotovoltaico**

Por otra parte, para el cálculo de la potencia fotovoltaica se ha utilizado la fórmula de cálculo de potencia fotovoltaica por un módulo (1).

$$P_M = P_M^* \frac{G}{G^*} [1 + \gamma(^{\circ}\text{C}^{-1})(T_C - T_C^*)] \quad (1)$$

Siendo:

- $P_M$  = La potencia de un módulo [W]
- $P_M^*$  = La potencia del módulo [W] medida para unas condiciones CEM
- $G$  = Irradiancia
- $G^*$  = Irradiancia en condiciones CEM [W/m<sup>2</sup>]
- $\gamma$  = Coeficiente de variación de la potencia con la temperatura [ $\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$ ]

- $T_C$  = Temperatura de las células de un módulo [°C]
- $T_C^*$  = Temperatura de las células de un módulo en condiciones CEM [°C]

Donde la G y Tc son los parámetros que se van a simular como entradas analógicas. El resto de los parámetros se obtienen de la hoja de datos de los paneles solares instalados en el laboratorio del Hogar Digital, modelo MÓDULO MONOCRISTALINO ISF-240/245/250 INFOSOTÓN siendo los valores que toman los mostrados en la Tabla 5.

Parámetro	Valor de la hoja de datos
$P_M^*$	300 W
$G^*$	1000 W/m <sup>2</sup>
$\gamma$	-0.43 $\frac{\%}{^\circ\text{C}}$
$T_C^*$	25 °C

**Tabla 5. Parámetros del módulo monocristalino ISF**

Como se ha comentado en el capítulo 2, se va a simular que se tienen 16 módulos fotovoltaicos en serie. Siendo la fórmula para la potencia de módulos en serie, la de la ecuación (2).

$$P_{FV} = N_s * P_M \quad (2)$$

Siendo:

- $P_{FV}$  = La potencia fotovoltaica total [W]
- $N_s$  = el número de módulos en serie.
- $P_M$  = La potencia de un módulo [W]

Una vez obtenida la fórmula de potencia para 1 módulo fotovoltaico (1) y la fórmula para la potencia total de módulos en serie (2), el cálculo de la potencia fotovoltaica total será la mostrada en la ecuación (3).

$$P_{FV} = 16 * P_M \quad (3)$$

La simulación de paneles solares elimina la necesidad de contar con un sistema fotovoltaico real durante la fase de desarrollo, facilitando la experimentación en entornos controlados.

### 3.1.4 Demanda de un hogar (simulación):

La simulación de la demanda energética de un hogar se realiza mediante una señal analógica de entrada proveniente de una fuente de alimentación, con un rango de 0 a 5 V, que se corresponde con una potencia de 0 kW a 3,5 kW. Este rango permite representar con precisión distintas condiciones de consumo energético en el hogar. Por ejemplo, el usuario puede simular una demanda baja durante la noche, cuando la mayoría de los electrodomésticos están apagados, o una demanda alta durante el día, cuando varios dispositivos están en funcionamiento. Esta capacidad de simular diversos escenarios de consumo es crucial para optimizar la lógica de control que se está diseñando, asegurando que puedan manejar picos de demanda y periodos de bajo consumo de manera eficiente. Además, esta flexibilidad permite realizar ajustes para

maximizar la eficiencia energética y reducir el desperdicio, adaptándose a las necesidades del hogar en diferentes momentos del día.

### 3.1.5 Sistema de Control (PLC M-Duino + PCB):

El PLC M-Duino actúa como el centro del sistema, controla y monitorea las operaciones simuladas del sistema de energía. Está programado para gestionar una batería que intercambia energía con un generador FV y la red eléctrica a través de un inversor. Este control se realiza en función de una serie de entradas y salidas tanto analógicas como digitales.

Su función es gestionar las señales de entrada que simulan las condiciones de un sistema real (batería, inversor, generador fotovoltaico, demanda de una casa) y controlar las salidas que representan diferentes estados del sistema (carga de la batería, descarga de la batería, consumo de red, venta de energía a la red).

Para este proyecto se ha diseñado una placa PCB, ver Figura 7. Se puede consultar el manual de usuario en el Anexo.

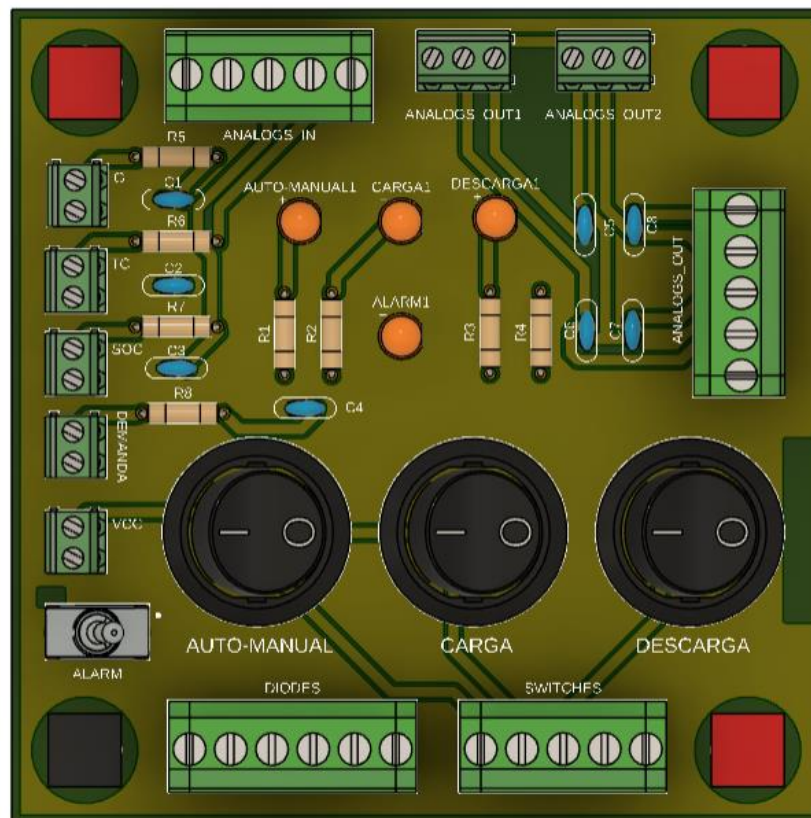


Figura 8. Imagen PCB 3D del sistema de control

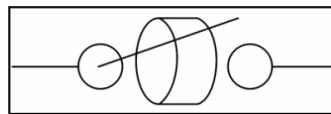
En este proyecto se han utilizado 4 señales analógicas de entrada, 4 señales analógicas de salida, 4 señales digitales de salida y 4 señales digitales de entrada. Se comentan a continuación como se han gestionado estas señales:

### Entradas Analógicas

Se han implementado cuatro entradas analógicas, cuyo símbolo en el PLC se muestra en la Figura 9, su función es simular:

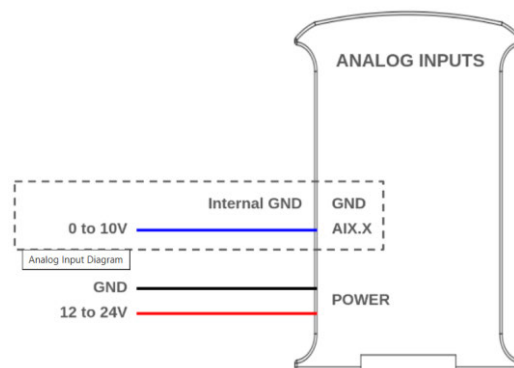
- Las condiciones de operación de los paneles solares, como la irradiancia y la temperatura de las células.
- El estado de carga de una batería SOC, es decir, el porcentaje de carga disponible.
- La demanda del lugar donde se va a utilizar la energía.

En conjunto, estas entradas permiten replicar las condiciones de un sistema de autoconsumo.



**Figura 9. Símbolo entrada analógica en el PLC**

El rango de voltaje de entrada que acepta el PLC va de 0 a 10 V, con una impedancia de entrada de 39 K $\Omega$  y una corriente máxima de entrada de 20 mA. Por simplicidad se decidió que todas las entradas analógicas vayan de es de 0 a 5 V. En la Figura 10 se muestra cómo debe ser el correcto conexionado.



**Figura 10. Conexión entrada analógica**

En la Tabla 6 se muestra el nombre completo de todas las entradas analógicas, el nombre que se le ha dado en el código de Arduino, el nombre de la entrada en el PLC y finalmente el número de pin del PLC al que hace referencia.

Entrada analógica	Nombre en Arduino	Entrada PLC	Pin PLC
Irradiancia	G	I1_5	63
Temperatura de célula	Tc	I1_4	62
Estado de batería	SOC	I1_3	61
Demanda de una casa	Demanda	I1_2	60

**Tabla 6. Lista entradas analógicas**

La resolución de estas entradas es de 10 bits, significa que los valores leídos pueden oscilar entre 0 y 1023. Por otra parte, es necesaria una ecuación de conversión para cada señal, que se muestra en la Tabla 7. En el caso de la irradiancia y la temperatura, se ha tomado como ecuación de conversión la proporcionada por el fabricante de un sensor comercial en concreto el de una célula calibrada 5 V fabricada por Atersa grupo Elecnor [20], que devuelve precisamente dos señales de 0 a 5 V. En cuanto a las señales de estado de la batería y demanda, se ha aplicado una simple regla de tres, donde un valor de 5 V se corresponde con el 100% del estado de la batería y el máximo valor de la demanda de una vivienda, en este caso, 3,5 kW

Entrada analógica	Ecuación de conversión	Unidades
Irradiancia	$\frac{analogRead(pin\_G) * 1250.0}{511.0}$ (4)	W/m <sup>2</sup>
Temperatura de célula	$\frac{analogRead(pin\_Tc) * 130.0}{511.0 - 20.0}$ (5)	°C
Estado de batería	$\frac{analogRead(pin\_SOC) * 100.0}{5.0}$ (6)	%
Demanda de una casa	$\frac{analogRead(pin\_Demanda) * 3.5}{5.0}$ (7)	kW

**Tabla 7. Ecuaciones de conversión para el código Arduino**

Se comenta a continuación cómo se realizan la lectura del pin correspondiente a la Irradiancia en Arduino. La lectura de una entrada analógica requiere de 2 pasos

1. Primeramente, configuramos el pin como entrada, se muestra en la Figura 11.

```
pinMode(63, INPUT); //Pin in analog I1_5 para G
```

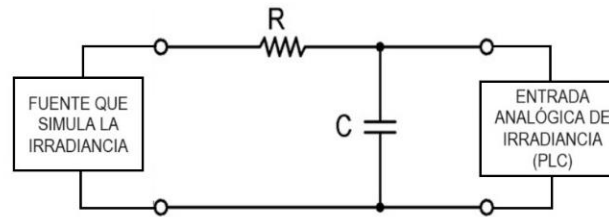
**Figura 11. Previa configuración de una entrada analógica**

2. En la Figura 12 se procede a la lectura, incluyendo la ecuación de conversión correspondiente.

```
G = (analogRead(63))*1250.0/511.0;
```

**Figura 12. Lectura de G**

Para una mejor lectura, en cuanto a precisión, se decidió montar un filtro pasivo RC, con una resistencia de 1kΩ y un condensador de 100nF. En la Figura 13 se muestra cómo queda el conexionado, incluyendo el filtro.



**Figura 13. Filtración señal analógica**

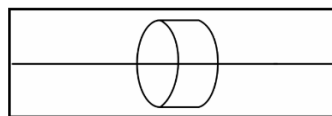
Se realiza el mismo procedimiento de lectura para todas las entradas analógicas.

### Salidas analógicas

Se han implementado cuatro salidas analógicas, cuyo símbolo en el PLC se muestra en la Figura 14, su función es simular:

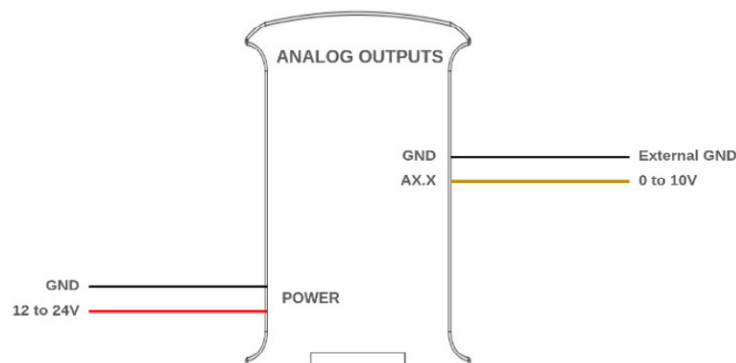
- La potencia de carga o descarga de la batería
- La potencia que se vende o consume de la red

En conjunto, estas salidas permiten mostrar, junto con las salidas digitales, que el sistema de control está funcionando correctamente para un sistema de autoconsumo.



**Figura 14. Símbolo salida analógica en el PLC**

El rango de tensión de salida va de 0 a 10 V, en la Figura 15 se muestra el correcto conexionado para poder leer cualquier salida analógica.



**Figura 15. Conexión salida analógica**

En la Tabla 8 se muestra el nombre completo de todas las salidas analógicas, el nombre que se le ha dado en el código de Arduino, el nombre de la entrada en el PLC y finalmente el número de pin del PLC al que hace referencia.

Salida analógica	Nombre en Arduino	Salida PLC	Pin PLC
Potencia de carga de la batería	pot_carga_bat	A1_1	10
Potencia de descarga de la batería	pot_desc_bat	A1_2	11
Potencia consumida de la red	pot_consumida_red	A2_6	12
Potencia vendida a la red	pot_vendida_red	A2_5	13

**Tabla 8. Lista salidas analógicas**

Las tensiones de salida tienen una resolución de 8 bits, esto significa que, por ejemplo, para colocar en la salida un valor de 10 V, en nuestro código en Arduino deberemos colocar un valor digital de 255. Para realizar una escritura en un pin de salida analógica es necesario tener en cuenta los límites de cada parámetro y finalmente realizar una conversión DAC. Se comentan, a continuación, cómo se ha procedido en cada caso.

**Cálculo de la potencia de carga de la batería:** Para el correcto cálculo de la potencia de carga de la batería, se aplica la ecuación 8 de la Tabla 9

**Solución aplicada:** Calcular la potencia máxima de carga actual, que será el mínimo entre la potencia máxima de carga (5 kW) y, la diferencia de la potencia fotovoltaica ( $P_{FV}$ ) y demanda, ecuación 8.

<b>Parámetro</b>	Potencia máxima de carga actual
<b>Límite</b>	Potencia máxima de carga, 5 kW
<b>Ecuación límite en el código</b>	$P_{\max\_carga\_actual [kW]} = \min (P_{FV} - Demanda, 5)$ (8)

**Tabla 9. Solución para el cálculo de la potencia de carga de la batería**

**Cálculo de la potencia de descarga de la batería:** Para el correcto cálculo de la potencia de descarga de la batería, se aplica la ecuación 9 de la Tabla 10.

**Solución aplicada:** Calcular la potencia máxima de descarga actual, que será el mínimo entre la potencia máxima de descarga (5 kW) y, la diferencia de la demanda y de la potencia FV, ecuación 9.

<b>Parámetro</b>	Potencia máxima de descarga actual
<b>Límite</b>	Potencia máxima de descarga, 5 kW
<b>Ecuación límite en el código</b>	$P_{\max\_descarga\_actual [kW]} = \min (Demanda - P_{FV}, 5)$ (9)

**Tabla 10. Solución para el cálculo de la potencia de descarga de la batería**

Finalmente, es necesaria la conversión DAC de la potencia calculada para la carga o descarga. En ambos casos, se aplica la fórmula 10 para calcular la carga o descarga en voltios, siendo 5 kW el límite máximo de carga o descarga, lo que corresponde a 10 V en la salida. Luego, se utiliza la fórmula 11 para determinar el número digital que debe escribirse para obtener ese valor en voltios en la salida. En este caso, 255 es el número digital que representa 10 V en la salida analógica.

$$P_{carga/descarga\_bat [V]} = P_{carga/descarga [kW]} \times \frac{10 [V]}{5[kW]} \quad (10)$$

$$P_{carga/descarga\_bat\_DAC} = P_{carga/descarga\_bat [V]} \times \frac{255}{10[V]} \quad (11)$$

**Cálculo de la potencia consumida de la red:** Para el correcto cálculo de la potencia a consumir de la red, se aplica la ecuación 12 de la Tabla 11.

**Solución aplicada:** Calcular el mínimo entre el límite de potencia a consumir de la red (3,5 kW) y la diferencia entre la demanda y la potencia FV, ecuación 12.

<b>Parámetro</b>	Potencia máxima a consumir de la red
<b>Límite</b>	Potencia máxima que permite la red, 3,5 kW
<b>Ecuación límite en el código</b>	$P_{\max\_c\_red [kW]} = \min ( Demanda - P_{FV}, 3.5) \quad (12)$

**Tabla 11. Solución para el cálculo de la potencia a consumir de la red.**

**Cálculo de la potencia vendida de la red:** Para el correcto cálculo de la potencia a vender a la red, se aplica la ecuación 13 de la Tabla 12.

**Solución aplicada:** Calcular el mínimo entre el límite de potencia a consumir de la red (3,5 kW) y la diferencia entre la potencia FV y la demanda, ecuación 13.

<b>Parámetro</b>	Potencia vendida a la red
<b>Límite</b>	Potencia máxima que permite la red, 3,5 kW
<b>Ecuación límite en el código</b>	$P_{\max\_v\_red [kW]} = \min ( P_{FV} - Demanda, 3.5) \quad (13)$

**Tabla 12. Solución para el cálculo de la potencia a vender a la red.**

Finalmente, del mismo modo que se procedió para los casos anteriores, de carga y descarga de la batería, es necesario realizar la conversión DAC de la potencia calculada para consumir o vender a la red. En ambos casos, se aplica la fórmula 14 para calcular el consumo o venta en voltios, siendo 3,5 kW el límite máximo de potencia permitida por la red, lo que corresponde a 10 V en la salida. Luego, se utiliza la fórmula 15 para determinar el número digital que debe escribirse para obtener ese valor en voltios en la salida. En este caso, 255 es el número digital que representa 10 V en la salida analógica.

$$P_{vender/consumir\_red [V]} = P_{\max\_vender/consumir\_red [kW]} \times \frac{10 [V]}{3.5[kW]} \quad (14)$$

$$P_{vender/consumir\_red\_DAC} = P_{vender/consumir\_red} [V] \times \frac{255}{10[V]} \quad (15)$$

Se comenta a continuación como se realiza la escritura del valor en el pin de salida correspondiente a la potencia de carga de la batería en Arduino, teniendo en cuenta los factores limitantes, en este caso, que la carga no sobrepase el 90% del SoC.

Una escritura en una salida analógica en Arduino requiere de 2 pasos:

- 1- Establecer el pin correspondiente como salida, por ejemplo, para la potencia de carga de la batería, ver Figura 16.

```
pinMode(A1_1,OUTPUT);
```

**Figura 16. Previa configuración de una salida analógica**

- 2- Figura 17, se tiene una captura del código.

```
// Calcular cuánta energía se puede cargar sin exceder el 90% SOC

double maxCargaPosible = 7.4 * 90 / 100.0 - SOC_kW; // potencia en kW que se puede cargar sin sobrepasar el 90%

// el minimo entre la potencia que se podría cargar (P_fv - DemandaConsumo) y la que se pueda cargar sin sobrepasa el 90%
double pot_carga_bat_kW = min(min(P_fv - DemandaConsumo, 5), maxCargaPosible);

Serial.println(" Estoy cargando la bateria con pot(kW): ");
Serial.println(pot_carga_bat_kW);

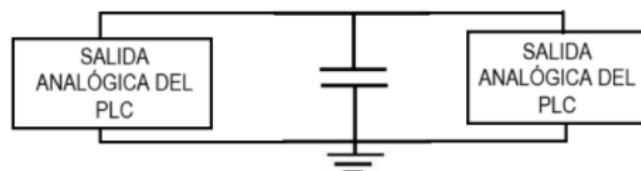
double pot_carga_bat_V = pot_carga_bat_kW * 10 / 5 ;
Serial.println("Valor pot carga bat en V: ");
Serial.println(pot_carga_bat_V);
double pot_carga_bat_DAC = pot_carga_bat_V *255 /10;

analogWrite(A1_1,pot_carga_bat_DAC);
```

**Figura 17. Escritura en la salida analógica de Potencia de Carga de la batería**

Se realiza el mismo procedimiento para la potencia consumida/vendida a la red y potencia de descarga de la batería, se puede consultar desde la Tabla 9 hasta la Tabla 12.

Finalmente, para una escritura, y una posterior lectura desde un polímetro de la salida analógica, en cuanto a precisión, se decidió colocar un condensador de desacoplo de 100 nF a la salida del pin del PLC. En la Figura 18 se muestra el conexionado.



**Figura 18. Condensador de desacoplo para salidas analógicas**

Se procede de la misma forma para el resto de las salidas analógicas.

## Entradas digitales

Se han implementado cuatro entradas digitales, para ello se han utilizado 4 interruptores modelo Interruptor Conmutador Basculante 2P 1C - Tecla Negra IT11352.

El símbolo del pin de entrada digital en el PLC se muestra en la Figura 19. La función de estas entradas digitales es proporcionar al usuario una interfaz, para poder escoger entre los distintos modos de funcionamiento y también poder elegir, en modo manual, si cargar o descargar la batería.

En conjunto, estas entradas permiten al usuario controlar por sí mismo la batería de un sistema de autoconsumo. En la Figura 20 se muestra como debe ser el correcto conexionado.



Figura 19. Símbolo entrada digital PLC

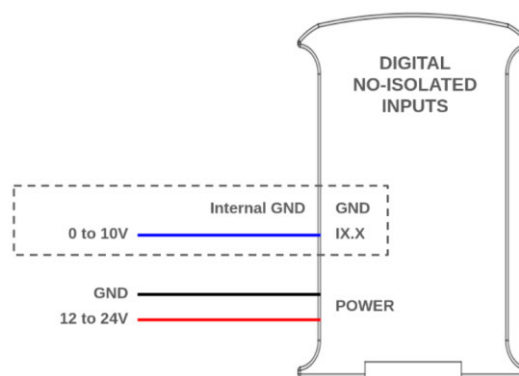


Figura 20. Conexión entrada digital

En la Tabla 13 se muestra el nombre completo de todas las entradas digitales, el nombre que se le ha dado en el código de Arduino, el nombre de la entrada en el PLC y finalmente el número de pin del PLC al que hace referencia.

Entrada digital	Nombre en Arduino	Entrada PLC	Pin PLC
Automático/Manual	sw_auto	I0_3	55
Carga	sw_carga	I0_4	56
Descarga	sw_descarga	I0_5	57
Alarma	sw_alarma	I0_2	54

Tabla 13. Lista entradas digitales

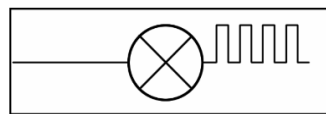
Para una lectura de una entrada digital, se utiliza la función `digitalRead(pin_digitalInPLC)` de la librería de Arduino. Se realiza el mismo procedimiento de lectura para todas las entradas digitales.

### Salidas digitales

Se han implementado cuatro salidas digitales, para ello se han utilizado 4 diodos leds.

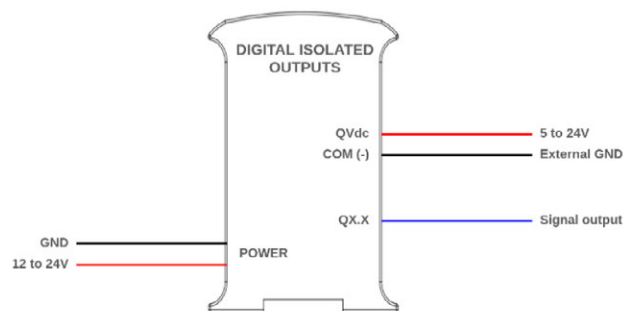
El símbolo del pin de salida digital en el PLC se muestra en la Figura 21. La función de estas salidas digitales es proporcionar al usuario una interfaz visual sobre el modo de funcionamiento y si el sistema carga o descarga la batería.

En conjunto, estas entradas permiten al usuario tener una visión de las operaciones que realiza el sistema de control.



**Figura 21. Símbolo salida digital PLC**

En la Figura 22 se muestra como debe ser el correcto conexionado.



**Figura 22. Conexión salida digital**

La señal QX.X es la señal de salida, que activa o desactiva el led, cabe destacar que, al tratarse de un led, se colocan resistencias de  $1k\Omega$  para controlar la corriente que pasa por la misma.

En la Tabla 14 se muestra el nombre completo de todas las salidas digitales, el nombre que se le ha dado en el código de Arduino, el nombre de la entrada en el PLC y finalmente el número de pin del PLC al que hace referencia.

<b>Salida digital</b>	<b>Nombre en Arduino</b>	<b>Salida PLC</b>	<b>Pin PLC</b>
Automático/Manual	Led_AutoManual	Q2_3	49
Carga	Led_Carga	Q2_2	48
Descarga	Led_Descarga	Q2_1	47
Alarma	Led_Alarma	Q2_0	53

**Tabla 14. Lista salidas digitales**

Para una escritura de una salida digital, se utiliza la función `digitalWrite(PIN,HIGH)` ó `digitalWrite(PIN, LOW )` de la librería de Arduino. Se realiza el mismo procedimiento de escritura para todas las salidas digitales.

## 4. Resultados

En este capítulo se presentan de forma ordenada todas las pruebas realizadas al diseño para verificar su correcto funcionamiento. Es importante destacar que se han llevado a cabo pruebas tanto para los modos de funcionamiento normales como para el modo de alarma. Cabe recordar que el sistema está diseñado de modo que, cuando la batería esté completamente cargada, el excedente de potencia fotovoltaica se venda a la red. De manera similar, cuando la batería no pueda descargarse más, el sistema consume energía de la red.

Cada prueba incluye el objetivo específico, el procedimiento seguido para verificar su correcto funcionamiento y, finalmente, los resultados obtenidos, acompañados de una interpretación. Se han añadido capturas de pantalla del Serial Monitor, imágenes del sistema físico con los leds encendidos, y mediciones de las señales analógicas de salida tomadas con un polímetro. No obstante, para evitar un exceso de imágenes en la memoria, en algunas simulaciones solo se incluye la salida del Serial Monitor, que muestra el modo de operación y la acción que se está realizando.

### Modo automático:

En este modo, el sistema debe tomar decisiones basadas en las lógicas programadas, determinando qué acciones realizar según las entradas analógicas. Para verificar su funcionamiento, se han llevado a cabo cinco pruebas específicas.

- 1- **Carga de la batería.** (Potencia FV > Demanda, SoC < 90%  $\Rightarrow$  Carga)
  - **Objetivo:** comprobar que la batería realiza una correcta carga de la batería. En este caso, una correcta carga implica, que no se cargue más allá del 90%, se encienda el led de carga, para que el usuario pueda visualizarlo y finalmente mostrar la potencia de carga con la que se estaría cargando la batería.
  - **Procedimiento:** para que el sistema realice una carga, tiene que existir un excedente de potencia fotovoltaica y la batería no debe estar llena. En este caso, a modo de ejemplo, se establecen unos valores de irradiancia y temperatura de célula, tal que la potencia fotovoltaica es de 1,21 kW, un valor de SoC del 41,60% y una demanda de 0 kW
  - **Resultados:** se enciende el led de carga y, utilizando un polímetro, se observa que la potencia de carga de la batería es de 1,21 kW, resultado de la ecuación 8 de la Tabla 9. Solución para el cálculo de la potencia de carga de la batería. En la Figura 23 se muestra el Serial Monitor de Arduino.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
261.74
Valor Tc (°C):
32.99
Pot FV (kW):
1.21
Valor SOC (%):
41.60
Demanda Consumo (kW):
0.00
Modo Automático-> Led Manual/Auto parpadea
Pfv > DemandaConsumo y bateria no llena -> Hacemos carga, led Carga ON
Estoy cargando la bateria con pot(kW):
1.21
Valor pot carga bat en V:
2.43
SOC (%):
57.99
    
```

**Figura 23. Visualización del Serial Monitor de Arduino**

- **Interpretación:** se observa que sí se enciende el led de carga de la batería y que, en este caso, al ser la demanda nula y la batería menor al 90%, se carga con una potencia igual a 1,21 kW, que en la salida analógica se interpreta como 2,43 V.

2- **Vender a la red.** (Potencia FV > demanda, SoC = 90% ⇒ Venta a la red)

- **Objetivo:** comprobar que se vende la energía a la red, debido a que la batería está llena y la demanda está satisfecha.
- **Procedimiento:** para que el sistema realice una venta a la red, tiene que existir un excedente de potencia fotovoltaica y la batería debe estar llena. En este caso, se imponen unos valores de irradiancia y temperatura de célula, tal que la potencia fotovoltaica es de 1,21 kW, un valor de SoC del 92,20%, y una demanda de 0 kW
- **Resultados:** los detalles de la simulación se muestran en la Figura 24. Al estar la batería llena y no poder cargarse más, se vende a la red la diferencia entre la potencia demandada y la potencia fotovoltaica, en este caso 1,21 kW. Se observa con un polímetro la potencia de venta a la red, en la Figura 25.

```

Han pasado 10 segundos.
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
261.74
Valor Tc (°C):
32.99
Pot FV (kW):
1.21
Valor SOC (%):
92.20
Demanda Consumo (kW):
0.00
Modo Automático-> Led Manual/Auto parpadea
Excedente de energía y bateria llena -> vendiendo a la red.
Potencia vendida a la red (kW):
1.21
Valor pot vendida a la red (V):
3.42
    
```

**Figura 24. Visualización del Serial Monitor de una venta a la red**



**Figura 25. Potencia de venta a la red en un polímetro**

- **Interpretación:** se observa que los resultados son los esperados. Al ser la demanda de 0 kW y estar la batería llena, se vende a la red toda la potencia fotovoltaica, en este caso 1,21 kW, que se corresponde con 3,42 V

3- **Sistema en equilibrio.** (Potencia FV = Demanda  $\Rightarrow$  sistema en equilibrio)

- **Objetivo:** el sistema no realiza ninguna operación, al estar el sistema en equilibrio. Es decir, no existe un sobrante fotovoltaico una vez satisfecha la demanda.
- **Procedimiento:** colocar un valor de G y Tc tal que la potencia FV sea igual a la Demanda. En este caso 1,40 kW
- **Resultados:** no se carga ni descarga la batería debido a que la potencia FV es igual a la potencia demandada, ver Figura 26.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
320.45
Valor Tc (°C):
46.44
Pot FV (kW):
1.40
Valor SOC (%):
50.80
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Automático-> Led Manual/Auto parpadea
Toda la P_FV se esta consumiendo. No es posible descargar o cargar.
  
```

**Figura 26. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio en modo automático**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados, es decir, el sistema informa al usuario que “Toda la Potencia FV se está consumiendo y, por tanto, no es posible cargar o descargar la batería”. Es necesario recalcar que, en este programa, la potencia fotovoltaica y la demanda se darán por iguales solo con 2 cifras decimales.

4- **Descarga de la batería.** (Potencia FV < Demanda, SoC >10%  $\Rightarrow$  descargar)

- **Objetivo:** comprobar que la batería se descargue cuando la potencia fotovoltaica no satisface la demanda y la batería no está en su límite inferior. También debe comprobarse que, si se descarga la batería, esta no pase del 10%
- **Procedimiento:** en este caso, establecemos unos valores de G y Tc tal que la potencia FV es de 1,39 kW, un valor de demanda de 2,8 kW y un SoC de 88,4%
- **Resultados:** se observa que se enciende el led de descarga y que se descarga la batería. La potencia con la que se descarga la batería será la resultante de la ecuación 9 de la Tabla 10. Solución para el cálculo de la potencia de descarga de la batería, siendo el resultado de 1,41 kW. Se muestra el mensaje por pantalla en la Figura 27.

```
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
308.22
Valor Tc (°C):
38.49
Pot FV (kW):
1.39
Valor SOC (%):
88.40
Demanda Consumo (kW):
2.80
Modo Automático-> Led Manual/Auto parpadea
Pfv < DemandaConsumo y bateria no vacia-> Descargamos la bateria ; led Descarga ON
Estoy descargando de la bateria (kW):
1.41
Valor pot descarga en V:
2.81
SOC (%):
69.39
```

Figura 27. Visualización del Serial Monitor de una descarga de la batería

- **Interpretación:** los resultados son coherentes con lo que se esperaba en el diseño. En el Serial Monitor del Arduino, Figura 277, se muestran los mensajes más relevantes para el usuario. La batería no está vacía y la potencia fotovoltaica no satisface la demanda, entonces se descarga la batería y se enciende el led de descarga.

5- **Consumir de la red.** (Potencia FV < Demanda, SoC = 10%  $\Rightarrow$  Consumir de la red)

- **Objetivo:** el sistema debe consumir de la red debido a que la potencia FV no satisface la demanda y la batería está en su límite inferior.
- **Procedimiento:** en este caso, establecemos unos valores de G y Tc tal que la potencia FV es de 1,40 kW, un valor de demanda de 2,8 kW y un SoC de 9,8%
- **Resultados:** se observa por pantalla (Figura 28) y en el polímetro (Figura 29), que se está consumiendo de la red 1,40 kW (resultante de la diferencia entre la demanda y la potencia fotovoltaica) que se corresponden con 3,99 V

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
310.67
Valor Tc (°C):
38.80
Pot FV (kW):
1.40
Valor SOC (%):
9.80
Demanda Consumo (kW):
2.80
Modo Automático-> Led Manual/Auto parpadea
Pfv < Demanda Consumo, Hay deficit y bateria baja -> Consumimos energia de la red.
Potencia consumida de la red (kW):
1.40
Valor pot consumida de la red (V):
3.99

```

**Figura 28. Visualización del Serial Monitor de la potencia consumida de la red**



**Figura 29. Potencia consumida de la red en un polímetro**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados a los planteados en el diseño. Al existir déficit de potencia fotovoltaica y la batería en su límite inferior, se consume de la red, en este caso 1,40 kW

### Modo manual:

En este modo de funcionamiento, el usuario es responsable de gestionar la carga y descarga de la batería mediante los interruptores correspondientes. Sin embargo, hay situaciones en las que el sistema debe intervenir para evitar acciones inadecuadas. Por ejemplo, si el usuario intenta cargar la batería cuando hay un déficit de potencia fotovoltaica, el sistema solicitará que se seleccione la descarga de la batería en lugar de la carga. Se realizaron cinco pruebas cuando el usuario selecciona la carga, cinco pruebas cuando se activa el pulsador de descarga, y una prueba adicional cuando ambos pulsadores se accionan simultáneamente.

#### 1- Carga y descarga pulsados al mismo tiempo

- **Objetivo:** evitar que el sistema se rompa frente a posibles errores del usuario.

- **Procedimiento:** tener pulsados ambos interruptores.
- **Resultados:** el sistema no realiza ninguna acción más que imprimir por pantalla, en el Serial Monitor de Arduino (Figura 30), una solicitud de seleccionar solo una operación, lo que se traduce en pulsar sólo un interruptor.

```
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
310.67
Valor Tc (°C):
38.80
Pot FV (kW):
1.40
Valor SOC (%):
10.00
Demanda Consumo (kW):
2.80
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
No se puede cargar y descargar a la vez.
Seleccione sólo una operación
```

**Figura 30. Visualización del Serial Monitor del mensaje mostrado por pantalla**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados. El sistema no realiza ninguna acción, es decir, lee los valores analógicos de entrada, pero nunca llega a comparar la potencia fotovoltaica con la demanda y por tanto no realiza ninguna acción de carga, descarga, consumo o venta.

A continuación, se muestran las pruebas, dentro del modo manual, cuando el usuario selecciona solo un interruptor, carga o descarga.

### Interruptor carga ON

#### 1- **Carga de la batería.** (Potencia FV > Demanda, SOC < 90% ⇒ Carga)

- **Objetivo:** comprobar el correcto funcionamiento de carga en modo manual, cuando el usuario solicita su acción por el interruptor.
- **Procedimiento:** se establecen en las entradas analógicas, una irradiancia y temperatura tal que la potencia fotovoltaica sea de 2,66 kW, una demanda de consumo de 1,40 kW, un SoC de 71,40% y se pulsa el interruptor de carga.
- **Resultados:** se observa en el Serial Monitor, Figura 31, los mensajes importantes para el usuario, donde se indica que hay excedente fotovoltaico, que la batería no está llena (indicativo de que se puede cargar) y que, al estar el interruptor de carga pulsado, se enciende el led de carga y se carga la batería con una potencia de 1,26 kW (diferencia entre la producción fotovoltaica y el consumo), que se traducen en 2,52 V

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1259.78
Valor Tc (°C):
155.19
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
71.40
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Carga -> Led Carga ON
Pfv > DemandaConsumo y bateria no llena -> Hacemos carga, led Carga ON
Estoy cargando la bateria con pot(kW):
1.26
Valor pot carga bat en V:
2.52
SOC (%):
88.45

```

Figura 31. Visualización del Serial monitor en una carga en modo manual

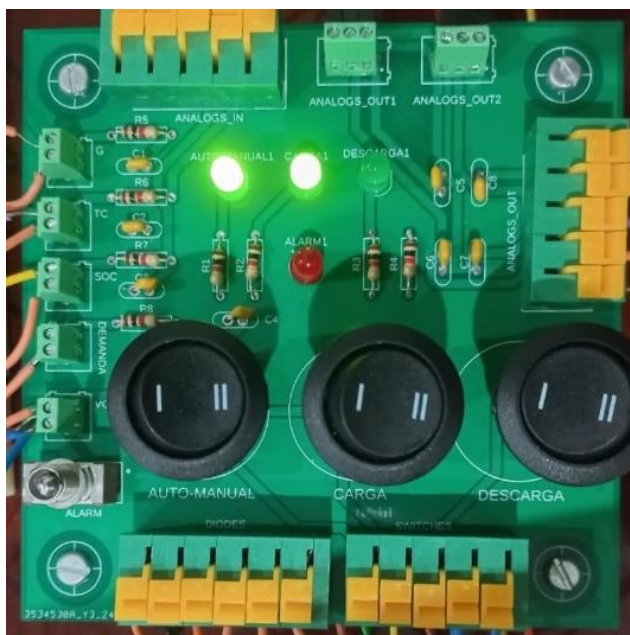


Figura 32. Visualización placa PCB en una carga en modo manual

- **Interpretación:** en la Figura 31Figura 32 se visualiza una captura de la PCB cuando se realizó esta prueba. Observamos, por una parte, que tanto el led como el interruptor de Auto-Manual esta activo, que indica que el sistema está en modo manual. Por otra parte, el led e interruptor de carga están activos. Verificamos entonces que los resultados son los esperados.

## 2- Venta a la red. (Potencia FV > Demanda, SoC=90% ⇒ Vende)

- **Objetivo:** correcta gestión de venta cuando no se puede cargar más.
- **Procedimiento:** partiendo de la misma situación anterior, potencia fotovoltaica de 2,66 kW y demanda de 1,40 kW, al existir una sobrante de energía fotovoltaica, y SoC del 91,4%, si es usuario pulsa cargar, el sistema vende a la red, para una gestión eficiente de energía.

- **Resultados:** se observa en el Serial Monitor, Figura 33, que el sistema indica que hay excedente de potencia fotovoltaica, que la batería está llena y, por tanto, vende a la red el sobrante de energía, en este caso 1,26 kW (diferencia entre la producción fotovoltaica y la demanda) que se corresponde con 3,56 V

```
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1257.34
Valor Tc (°C):
154.89
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
91.40
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Carga -> Led Carga ON
Excedente de energía y batería llena -> vendiendo a la red.
Potencia vendida a la red (kW):
1.26
Valor pot vendida a la red (V):
3.56
```

**Figura 33. Visualización del serial monitor de una venta a red en modo manual**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados. Se vende a la red comprobando previamente que existe excedente para vender y que la batería está cargada. El usuario solicita cargar la batería pulsando el interruptor, entonces el sistema, para una mayor eficiencia, vende a la red ese excedente.
- 3- **Sistema en equilibrio.** (Potencia FV = demanda  $\Rightarrow$  No se puede cargar, no hay excedente)
- **Objetivo:** el sistema no puede cargar cuando la potencia fotovoltaica y la demanda sean iguales, debido a que no existe sobrante de energía.
  - **Procedimiento:** se establece un valor de G y Tc tal que la potencia FV sea igual a la Demanda, en este caso, 1,40 kW y tener pulsado el interruptor de carga.
  - **Resultados:** se le indica al usuario que el sistema se encuentra en equilibrio, es decir ambas potencias son iguales. Por lo tanto, no hay excedente para cargar y no se realiza la carga de la batería. Ver Figura 34.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
320.45
Valor Tc (°C):
46.44
Pot FV (kW):
1.40
Valor SOC (%):
50.80
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
El sistema está en equilibrio. La P_Fv satisface la demanda. No hay excedente para cargar

```

**Figura 34. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio e interruptor carga activa**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados, no se realiza ninguna carga de la batería al no existir un excedente de potencia fotovoltaica. Es necesario recalcar que, en este programa, la potencia fotovoltaica y la demanda se darán por iguales solo con 2 cifras decimales.
- 4- **No se puede cargar.** (Potencia FV < Demanda, SoC > 10%  $\Rightarrow$  recomienda descargar)
- **Objetivo:** el sistema no puede cargar cuando la potencia fotovoltaica no satisface la demanda, recomienda descargar.
  - **Procedimiento:** se imponen unos valores de irradiancia y temperatura de célula tal que la potencia fotovoltaica sea de 2,66 kW, demanda del 3,5 kW y SoC del 91,40%. Hay que recordar que el interruptor de carga debe estar pulsado.
  - **Resultados:** debido a que el usuario solicita cargar, el sistema no carga porque no existe excedente para la misma (la diferencia entre la potencia FV y demanda, sale negativa). Y al estar la batería por encima del límite inferior recomienda al usuario que realice una operación de Descarga, Figura 35.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1257.34
Valor Tc (°C):
154.89
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
91.40
Demanda Consumo (kW):
3.50
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Carga -> Led Carga ON
El sistema está en déficit. No se puede cargar.
SOC>10% -> Se recomienda Descargar la batería.

```

**Figura 35. Visualización del serial monitor cuando se pide carga y no se puede realizar la acción**

- **Interpretación:** se comprueba que el diseño funciona correctamente. Al no realizar una carga, explicando al usuario los motivos e incluso le guía, recomendando que es mejor realizar una descarga.

5- **Consumir de la red.** (Potencia FV < Demanda, SoC=10%  $\Rightarrow$  Recomienda consumir de la red)

- **Objetivo:** el sistema recomiende consumir de la red debido a que la batería está en su límite inferior y la potencia fotovoltaica no satisface la demanda.
- **Procedimientos:** se establece una potencia fotovoltaica nula, una demanda de 2,8 kW y un SoC del 9,8%.
- **Resultados:** se indica al usuario, según la Figura 36, que el sistema está en déficit, es decir, la potencia fotovoltaica no satisface la demanda, por lo tanto, no es posible cargar la batería. Finalmente, al comprobar que el SoC de la batería se encuentra en el límite inferior, se recomienda consumir de la red.

```
Han pasado 10 segundos.  
No hay alarma  
Valor G (W/m^2):  
0.00  
Valor Tc (°C):  
0.00  
Pot FV (kW):  
0.00  
Valor SOC (%):  
9.80  
Demanda Consumo (kW):  
2.80  
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON  
Carga -> Led Carga ON  
El sistema está en déficit. No se puede cargar.  
SOC>=10% -> Se recomienda consumir de la red
```

**Figura 36. Visualización del serial monitor en una carga que no puede realizarse**

- **Interpretación:** el resultado es el esperado, según la Figura 36. Se recomienda consumir de la red. En nuestro diseño, el sistema entra en modo de consumo de la red si se ha pulsado el interruptor de descarga, ya que el programa está diseñado para comprobar primero que no se pueda descargar la batería. Una vez comprobado, el propio sistema consume de la red.

Interruptor descarga ON

1- **No se puede descargar.** (Potencia FV > Demanda, SoC < 90%  $\Rightarrow$  recomienda Cargar)

- **Objetivo:** el sistema recomienda cargar, debido a que existe sobrante de energía fotovoltaica y la batería no está llena.
- **Procedimiento:** se imponen valores de G y Tc tal que la potencia fotovoltaica es de 2,66 kW, demanda de 1,40 kW y un valor de SoC de 71,40%. Se pulsa el botón de descarga.
- **Resultados:** el sistema muestra en pantalla que está en estado de excedente, es decir, existe potencia fotovoltaica sobrante una vez satisfecha la demanda (la diferencia entre la potencia FV y el consumo es positiva). Por lo tanto, recomienda cargar la batería. Ver Figura 37.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1259.78
Valor Tc (°C):
155.19
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
71.40
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Descarga-> Led Descarga ON
El sistema está en estado excedente. Pfv > Demanda.
Se recomienda cargar la batería.

```

**Figura 37. Visualización del serial monitor cuando no se puede realizar una descarga**

- **Interpretación:** los resultados son coherentes con el diseño. Se previene que el usuario realice operaciones ilógicas, se explican los motivos y, finalmente, se guía al usuario con una recomendación, en este caso, una carga.

## 2- Venta a la red. (Potencia FV > Demanda, SOC=90% ⇒ recomienda Vender)

- **Objetivo:** al igual que en apartados anteriores, el objetivo principal es guiar al usuario para que este no realice operaciones que carecen de lógica. En este caso, existen un excedente de energía fotovoltaica y la batería está llena, se recomienda vender.
- **Procedimiento:** se establece una potencia fotovoltaica de 2,66 kW, demanda de 1,40 kW, SoC al 91,40% e interruptor activo de Descarga.
- **Resultados:** el sistema indica que está en estado de excedente, es decir, existe sobrante de potencia fotovoltaica una vez satisfecha la demanda. Al comprobar que la batería está en su límite máximo, recomienda vender a la red el sobrante de energía fotovoltaica, que es el resultado de la diferencia entre la potencia fotovoltaica y demanda. Ver Figura 38.

```

Han pasado 10 segundos.
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1257.34
Valor Tc (°C):
154.89
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
91.40
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Descarga-> Led Descarga ON
El sistema está en estado excedente. Pfv > Demanda.
SOC>=90% -> Se recomienda vender a la red

```

**Figura 38. Visualización del serial monitor con descarga activa sin poder realizarse**

- **Interpretación:** se observa que los resultados son los esperados. No se realiza una descarga porque la batería está en su límite superior y, además, existe un excedente de energía fotovoltaica. Por lo tanto, se recomienda vender a la red. Cabe recordar que el programa está diseñado para vender cuando se ha realizado o se desea realizar una carga y la batería está en su límite superior.

3- **Sistema en equilibrio.** (Potencia FV = Demanda  $\Rightarrow$  No se puede descargar)

- **Objetivo:** no se realiza ninguna acción, debido a que toda la energía fotovoltaica se está consumiendo. No tiene sentido descargar la batería.
- **Procedimiento:** se establecen unos valores de G y Tc tal que la potencia FV sea igual a la Demanda. En este caso 1,40 kW. Y haber pulsado el interruptor de descarga.
- **Resultados:** no se descarga la batería, según la Figura 39. Se muestra en pantalla el motivo por el cual no se realiza la descarga, el sistema está en equilibrio, es decir, la potencia fotovoltaica satisface completamente la demanda.

```
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
320.45
Valor Tc (°C):
46.13
Pot FV (kW):
1.40
Valor SOC (%):
50.60
Demanda Consumo (kW):
1.40
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
El sistema está en equilibrio. La P_Fv satisface la demanda. No se descarga la batería
```

**Figura 39. Visualización del serial Monitor cuando el sistema está en equilibrio e interruptor descarga activa**

- **Interpretación:** los resultados son los esperados. No se realiza una descarga de la batería a pesar de que el usuario lo solicita, ya que no tiene sentido descargar cuando la potencia fotovoltaica satisface completamente la demanda. Es necesario recalcar que, en este programa, la potencia fotovoltaica y la demanda se consideran iguales solo con 2 cifras decimales.

4- **Descarga de la batería.** (Potencia FV < Demanda, SoC > 10%  $\Rightarrow$  descargar la batería)

- **Objetivo:** se realice una correcta descarga de la batería, cuando la potencia fotovoltaica no satisface la demanda y el SoC está encima del límite inferior. También se comprueba que no se supere el límite inferior de descarga de la batería.
- **Procedimiento:** interruptor de descarga activo, se establecen valores de irradiancia y temperatura de célula tal que la potencia fotovoltaica es de 2,66 kW, una demanda de 3,5 kW y SoC de 91,40%.
- **Resultados:** el resultado es el esperado, según la Figura 40 y Figura 41. Se muestra en pantalla que la potencia fotovoltaica no satisface la demanda porque  $P_{FV} < P_{Demanda}$ . Al estar accionado el interruptor de descarga, se realiza una descarga de la batería con una potencia de 0,84 kW, resultante de la

diferencia del consumo y la potencia fotovoltaica, encendiéndose el LED correspondiente de descarga.

```

No hay alarma
Valor G (W/m^2):
1257.34
Valor Tc (°C):
154.89
Pot FV (kW):
2.66
Valor SOC (%):
91.40
Demanda Consumo (kW):
3.50
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Descarga-> Led Descarga ON
Pfv < DemandaConsumo y bateria no vacia-> Descargamos la bateria ; led Descarga ON
Estoy descargando de la bateria (kW):
0.84
Valor pot descarga en V:
1.67
SOC (%):
80.11

```

**Figura 40. Visualización del serial monitor de una correcta gestión de descarga de la batería en modo manual**



**Figura 41. Visualización de la PCB en descarga en modo manual.**

- **Interpretación:** en la Figura 41 se visualiza una captura de la PCB cuando se realizó esta prueba. Observamos, por una parte, que tanto el led como el interruptor de Auto-Manual esta activo, que indica que el sistema está en modo manual. Por otra parte, el led e interruptor de descarga están activos. Verificamos entonces que los resultados son coherentes con lo que se esperaba.

5- **Consumir de la red.** (Potencia FV < Demanda, SOC=10% ⇒ Consumir de la red)

- **Objetivo:** se consume de la red cuando ya no se pueda descargar más. No se puede descargar más si existe déficit de potencia fotovoltaica y la batería está en su límite inferior.
- **Procedimiento:** SoC al 10%, demanda de 2,8kW y una potencia fotovoltaica nula. Además, se tiene activado el interruptor de descarga.
- **Resultados:** el sistema consume energía de la red, ver Figura 42, en este caso se consume la potencia que requiere la demanda debido a que no tenemos potencia fotovoltaica, 2,80 kW

```
No hay alarma
Valor G (W/m^2):
0.00
Valor Tc (°C):
0.00
Pot FV (kW):
0.00
Valor SOC (%):
10.00
Demanda Consumo (kW):
2.80
Modo Manual -> Led Manual/Auto ON
Descarga-> Led Descarga ON
Pfv < Demanda Consumo, Hay deficit y bateria baja -> Consumimos energia de la red.
Potencia consumida de la red (kW):
2.80
Valor pot consumida de la red (V):
8.00
```

Figura 42. Visualización del serial monitor cuando se consume de la red

- **Interpretación:** Los resultados son coherentes con lo esperado. Primero se comprueba si la potencia fotovoltaica satisface la demanda; en este caso, no lo hace. Luego se verifica el SoC de la batería y, al estar en su límite inferior, se consume de la red.

#### Alarma:

En este modo de funcionamiento, al accionar el pulsador que simula una posible alarma de la batería, el sistema debe detener de inmediato la carga, descarga, consumo de la red o venta de energía a la red. El LED de alarma debe encenderse y el sistema debe ignorar todos los demás parámetros de entrada. En resumen, el sistema debe dejar de operar hasta que la alarma sea gestionada, en este caso, hasta que el pulsador sea accionado nuevamente.

- **Objetivo:** el sistema no debe realizar ninguna acción cuando se encienda la alarma, es decir, el usuario pulse el interruptor de alarma en cualquier momento.
- **Procedimiento:** pulsar el interruptor de alarma en cualquier momento. En este caso se pulsa mientras se estaba en la situación anterior de descarga.
- **Resultados:** el sistema enciende el led de alarma (Figura 43) y no realiza ninguna acción más. Se muestra la impresión por pantalla de Arduino, en la Figura 44.

```
-  
Han pasado 10 segundos.  
Hay alarma  
Han pasado 10 segundos.  
Hay alarma
```

Figura 43. Mensaje en el serial monitor cuando la alarma está activa.

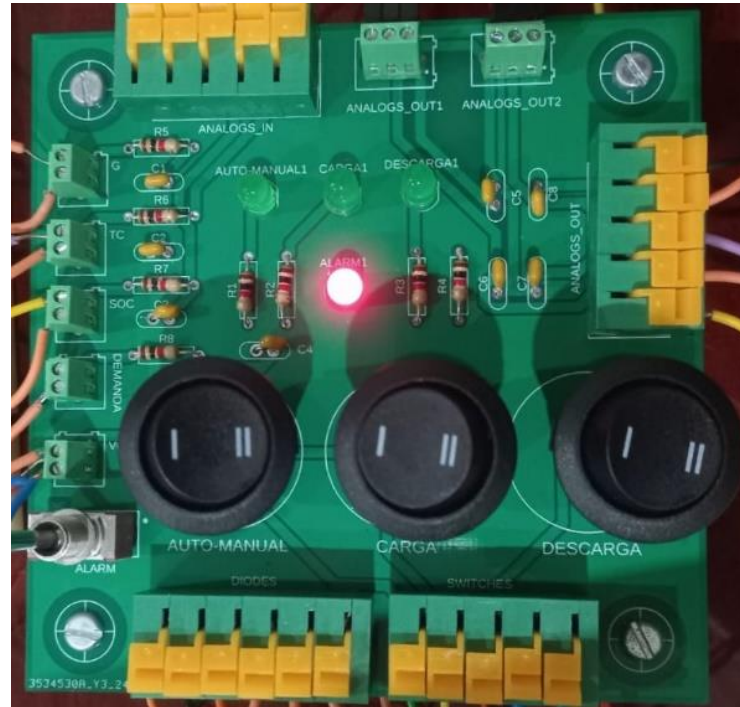


Figura 44. Visualización de la PCB cuando la alarma está activa

- **Interpretación:** el resultado es el esperado. Suponiendo que fuera la alarma de una batería real, el sistema no debería realizar ninguna acción hasta que se gestione el error. En este caso, si se desactiva la alarma el sistema vuelve a leer los parámetros analógicos y digitales, es decir, vuelve al modo manual o automático.

## 5. Presupuesto

Se muestra en la Tabla 15 el presupuesto total de este diseño, indicando una descripción, cuantas unidades se han requerido y finalmente el precio.

<b>Concepto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio</b>
<b>PCB</b>	5	17.8 €
<b>Componentes PCB</b>	20	9.28 €
<b>PLC M-duino 50rra+</b>	1	Cedido por la universidad
<b>Fuente de alimentación</b>	5	Cedido por la universidad
<b>Polímetro</b>	1	Cedido por la universidad
<b>Ordenador con programa Arduino</b>	1	Cuenta propia
<b>Mano de obra</b>	1	4.615,2 €

**Tabla 15. Tabla de presupuesto final**

Es necesario comentar ciertos aspectos a tener en cuenta:

- Para el diseño de la PCB, la empresa encargada de la impresión requería un pedido mínimo de 5 unidades.
- Para el presupuesto de la mano de obra, se ha consultado en internet el precio por hora de un ingeniero junior sin experiencia en España que para el año 2024 es aproximadamente de 12,82€ [21], que se multiplican por las horas de trabajo de este proyecto, en total 360 horas.

## **6. Impacto del proyecto**

El diseño de un sistema de control básico para la gestión de un sistema de autoconsumo fotovoltaico tiene varios impactos significativos. A continuación, se desglosan algunos de los principales impactos que este tipo de proyecto podría generar:

### **Impacto Social:**

A nivel social, un sistema de control accesible y modificable permite a los usuarios finales tener un mayor control sobre su consumo energético, promoviendo una mayor conciencia sobre la eficiencia energética y el uso responsable de los recursos.

Por otra parte, este proyecto puede servir como una herramienta educativa para capacitar a estudiantes, técnicos e ingenieros en el diseño y gestión de sistemas de autoconsumo.

### **Impacto Ambiental:**

Este proyecto contribuye directamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que maximiza el uso de la energía solar, una fuente de energía limpia y renovable, ayudando a combatir el cambio climático.

Se promueve el uso de energías renovables al hacer que los sistemas de autoconsumo sean más atractivos y accesibles, lo que contribuye a la transición hacia un modelo energético más sostenible.

### **Impacto Económico:**

Implementar sistemas de autoconsumo bien gestionados puede ayudar a reducir las facturas de electricidad para los usuarios, especialmente si el sistema de control optimiza el uso de la energía generada y minimiza el consumo de la red.

Proyectos de este tipo pueden fomentar la creación de pequeñas y medianas empresas especializadas en la instalación y mantenimiento de sistemas de autoconsumo, generando empleo y dinamizando la economía local.

### **Impacto Tecnológico:**

Al basarse en un sistema de control abierto y accesible (un PLC basado en Arduino), se promueve la democratización de la tecnología, permitiendo a pequeñas empresas, investigadores y entusiastas acceder a soluciones que de otro modo serían caras o inaccesibles.

Este sistema básico sirve como plataforma para el desarrollo y prueba de nuevas estrategias de control en el ámbito de la energía renovable, permitiendo a los investigadores mejorar la eficiencia y la integración de sistemas fotovoltaicos en la red eléctrica.

Aunque el proyecto sea de naturaleza básica, podría ser el punto de partida para el desarrollo de soluciones comerciales más avanzadas que ofrezcan a los consumidores mayor control y optimización de sus sistemas de autoconsumo fotovoltaico.

### **Impacto Industrial:**

Este sistema de control puede ser una base para que la industria energética explore y desarrolle nuevas formas de integrar la energía renovable en la red eléctrica, mejorando la estabilidad y eficiencia del suministro energético.

El proyecto incentiva la adopción masiva de tecnologías de autoconsumo, impulsando la industria de energía solar y otras energías renovables, así como la industria de control y automatización.

### **Aportación a los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):**

- ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante.
- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.
- ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.
- ODS 13: Acción por el Clima.

En resumen, el impacto de este proyecto es amplio y significativo, abarcando desde la innovación tecnológica y el desarrollo económico, hasta la sostenibilidad ambiental y la educación. Este proyecto no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia y accesibilidad de los sistemas energéticos actuales, sino que también puede catalizar cambios positivos en la sociedad y en el entorno natural.

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

### 7.1 Conclusiones

El presente proyecto ha abordado el diseño de un sistema de control básico para un sistema de autoconsumo fotovoltaico con batería, con el objetivo de crear una solución accesible y abierta que permita gestionar de manera eficiente la energía generada por paneles solares. Se ha propuesto un sistema que simula las señales de una batería, un inversor, un generador fotovoltaico y la demanda de una vivienda a través de señales analógicas, operando en dos modos de funcionamiento: automático y manual. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han identificado y analizado diversos desafíos técnicos y se han implementado soluciones viables para su resolución.

#### **Visión general del trabajo realizado.**

El problema inicial planteado era el diseño de un sistema de control para gestionar de manera eficiente un sistema de autoconsumo fotovoltaico, que pudiera ser implementado y adaptado en futuros proyectos de investigación y desarrollo de estrategias de control de baterías. La solución propuesta ha consistido en el desarrollo de un sistema utilizando un PLC M-Duino 50RRA+, que, a través de señales simuladas, permite experimentar y validar diferentes escenarios de gestión energética, como la carga y descarga de la batería, la venta de energía a la red, y el consumo de la red eléctrica. Para una mayor facilidad de entendimiento, manejo de usuarios que quieran entender su funcionamiento se diseñó una PCB que acompaña al PLC.

Los resultados obtenidos han demostrado que el sistema es capaz de realizar de manera efectiva las funciones básicas requeridas. El control automático responde adecuadamente a las señales simuladas, gestionando la energía de manera óptima en función de los parámetros establecidos. El modo manual proporciona una herramienta de gran valor para la validación y experimentación en diferentes condiciones, lo cual es crucial para una investigación futura.

#### **Conocimientos Derivados y Validez del Sistema**

El desarrollo del sistema ha permitido generar conocimiento valioso en el ámbito del control de sistemas de autoconsumo fotovoltaico. Se ha validado la viabilidad de utilizar un PLC M-Duino para estas aplicaciones, y se ha comprobado que es una herramienta flexible y potente para la gestión de energía en sistemas pequeños y medianos. Además, se ha destacado la importancia de un diseño modular y abierto que facilite futuras modificaciones y ampliaciones del sistema, lo que es especialmente relevante en proyectos de investigación.

No obstante, durante el desarrollo del proyecto se han identificado algunos aspectos que requieren mayor investigación y optimización. Por ejemplo, la simulación de señales analógicas, aunque útil para validar el diseño, podría beneficiarse de un enfoque más realista en futuros trabajos, integrando dispositivos reales para aumentar la precisión y relevancia de las pruebas.

## 7.2 Trabajos futuros

Aunque el sistema diseñado cumple con los objetivos iniciales, no deja completamente resuelto el problema tecnológico abordado. Existen varias áreas que podrían ser exploradas en futuros trabajos:

1. Integración de Dispositivos Reales: Implementar la conexión directa con baterías, inversores y paneles solares reales para mejorar la precisión y validez de los resultados.
2. Optimización del Control Automático: Desarrollar y validar algoritmos de control más avanzados que optimicen aún más la gestión de la energía, considerando factores como la previsión de la demanda, la generación solar (predicción meteorológica), predicción del precio del mercado eléctrico.
3. Ampliación de la Escalabilidad: Adaptar el sistema para gestionar sistemas de autoconsumo más grandes y complejos, incluyendo microrredes o sistemas híbridos con múltiples fuentes de energía.
4. Conectividad y Monitoreo Remoto: Incorporar funciones de monitoreo y control remoto mediante IoT, permitiendo una gestión más flexible y accesible del sistema.

En resumen, este proyecto ha logrado crear un sistema de control sencillo pero efectivo para gestionar un sistema de autoconsumo fotovoltaico con batería. Se ha establecido una buena base que puede servir para futuras investigaciones y desarrollos. Sin embargo, es importante seguir mejorando y ampliando el sistema para resolver los desafíos que se han identificado y aprovechar al máximo el potencial de esta tecnología en el campo de la energía renovable y sostenible.

## 8. Referencias

- [1] UNFCCC, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>, París: UNFCCC, 2015.
- [2] IEA, «Renewables 2023,» IEA, Paris, 2023.
- [3] SolarPower Europe, «Global solar installations almost double in 2023 but leaves emerging economies in the dark,» SolarPower Europe, 2024.
- [4] IEA, «World Energy Investment 2024,» IEA, Paris, 2024.
- [5] J. V. Gascó, «Rankia,» 01 03 2023. [En línea]. Available: <https://www.rankia.com/blog/fondos-inversion/5007283-ventajas-alternativas-para-invertir-energia-solar> . [Último acceso: 06 2024].
- [6] A. M. H. A. Rahmat Khezri, «Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, 2022.
- [7] M. R. e. al., «A Review of Modeling, Management, and Applications of Grid-Connected Li-Ion Battery Storage Systems,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 16, nº 6, pp. 4505-4524, Nov. 2022.
- [8] J. Insa, «monsolar,» [En línea]. Available: <https://www.monsolar.com/blog/baterias-de-ion-litio-ventajas-e-inconvenientes/>. [Último acceso: 09 2024].
- [9] Synopsys, «Synopsys,» [En línea]. Available: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>. [Último acceso: 06 2024].
- [10] Ingeteam, «Ingeteam,» [En línea]. Available: [https://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD\\_1076\\_Archivo\\_ingecon-ems-home-tl.pdf](https://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD_1076_Archivo_ingecon-ems-home-tl.pdf). [Último acceso: 04 2024].
- [11] Ingeteam, «Ingecon Sun Training,» [En línea]. Available: [https://www.ingeconsuntraining.info/?page\\_id=13130](https://www.ingeconsuntraining.info/?page_id=13130). [Último acceso: 05 2024].
- [12] Ingeteam, «Ingeteam,» [En línea]. Available: <https://www.ingeteam.com/Portals/0/Productos/Documentos/24cfdd34-2496-47c8-be9b-92cf939acf9d.pdf>. [Último acceso: 04 2024].
- [13] Cegasa, «Manual técnico STLI11\_02».

- [14] ISOFOTON, «Datasheet Módulo Monocristalino ISF-240/245/250,» ISOFOTON, S.A., 2011.
- [15] JINKO Solar, «Datasheet Mondulo Monocristalino 275-295,» Jinko Solar, China.
- [16] A. L. Zuazo, Control de un sistema fotovoltaico con baterías conectado a red, Madrid, 2015.
- [17] Ingeteam, «Ingeteam,» [En línea]. Available: <https://www.ingeteam.com/Portals/0/Productos/Documentos/16d9c8c7-cfed-4d9e-ba55-b0ca238dd7c0.pdf>. [Último acceso: 04 2024].
- [18] National Instruments, «NI,» [En línea]. [Último acceso: 05 2024].
- [19] Industrial Shields, «Industrial Shields,» Boot & Work Corp. S.L., [En línea]. Available: [https://www.industrialshields.com/es\\_ES/technical-features-industrial-m-duino-plc](https://www.industrialshields.com/es_ES/technical-features-industrial-m-duino-plc). [Último acceso: 04 2024].
- [20] Atersa, «Atersa Shop,» [En línea]. Available: <https://atersa.shop/celula-calibrada-5-v-compensada-atersa/>. [Último acceso: 04 2024].
- [21] Talent, «Talent,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.talent.com/salary?job=Ingeniero+junior>. [Último acceso: 01 09 2024].
- [22] C. García-Ceca, «Energías Renovables,» 06 06 2024. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/la-fotovoltaica-de-espaa-es-la-que-20240606>. [Último acceso: 06 2024].
- [23] A. Silvestre, «Ecología verde,» 17 05 2024. [En línea]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/la-revolucion-verde-como-las-placas-solares-fotovoltaicas-estan-transformando-el-futuro-4692.html>. [Último acceso: 06 2024].

## Anexo

### A.1 Instalación y configuración del entorno de trabajo

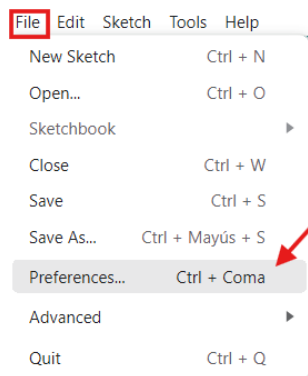
#### A.1.1. Interfaz Software

El proyecto utiliza un PLC M-Duino50RRA+, fabricado por Industrial Shields. Este, nos ofrece instalar sus librerías para programar mucho más fácil los pines correspondientes a nuestro PLC. La instalación de estas librerías se ofrece en el apartado “Software interface” de la guía de usuario. Sin embargo, en orden de que el usuario no encontrase el apartado se replica aquí lo importante, realizado en el ordenador donde se realizó el proyecto.

Es importante tener instalado la versión de Arduino IDE 1.8.0 o mayor.

Pasos:

1.- Abrir Arduino IDE, ir a File → Preferences o se utilizan las teclas de acceso rápido Ctrl+Coma

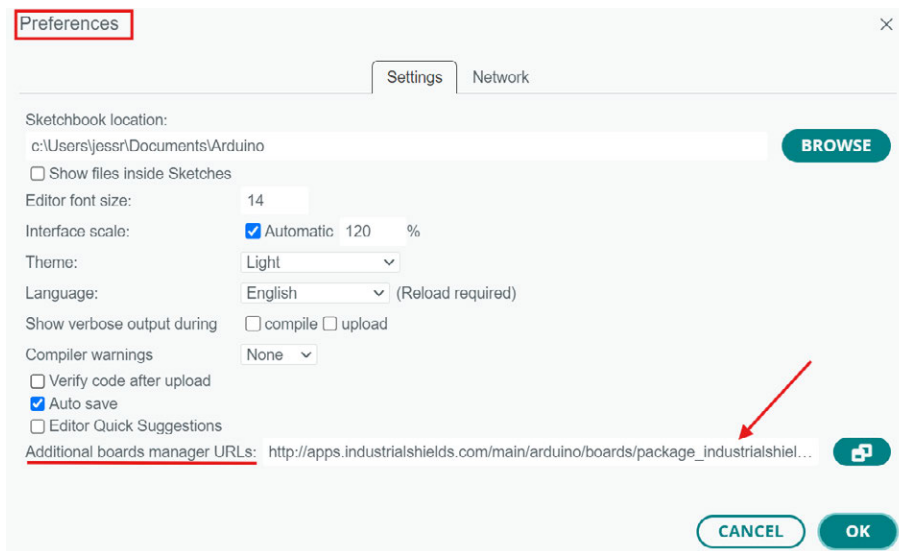


**Figura 45. Paso 1 interfaz software**

2.- En “ Additional Boards Manager URLs” escribir lo siguiente:

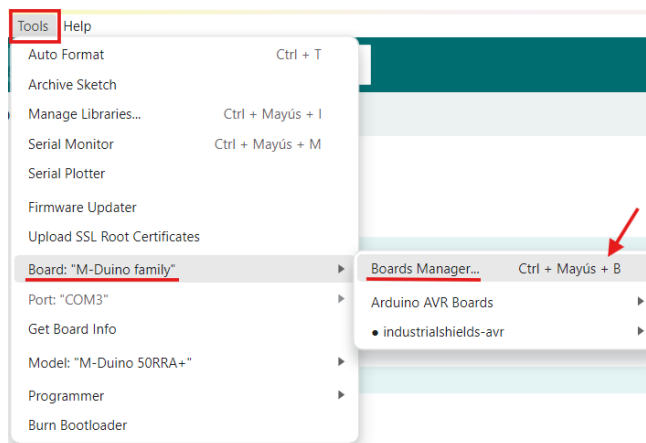
[http://apps.industrialshields.com/main/arduino/boards/package\\_industrialshields\\_index.json](http://apps.industrialshields.com/main/arduino/boards/package_industrialshields_index.json)

Y presionar OK.



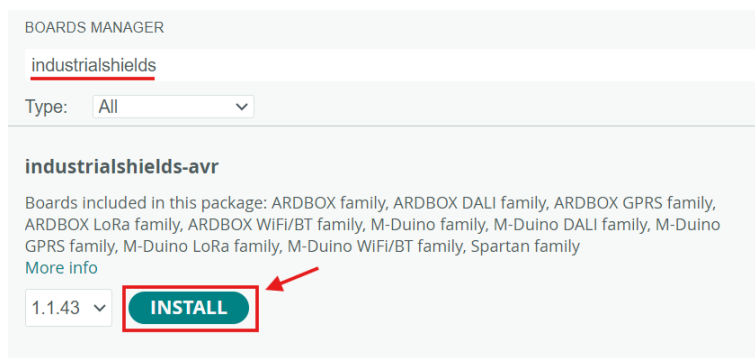
**Figura 46. Paso 2 interfaz software**

3.- Ir a Tools → Board:...→Boards Manager o se utilizan las teclas de acceso rápido Ctrl+Mayús+B



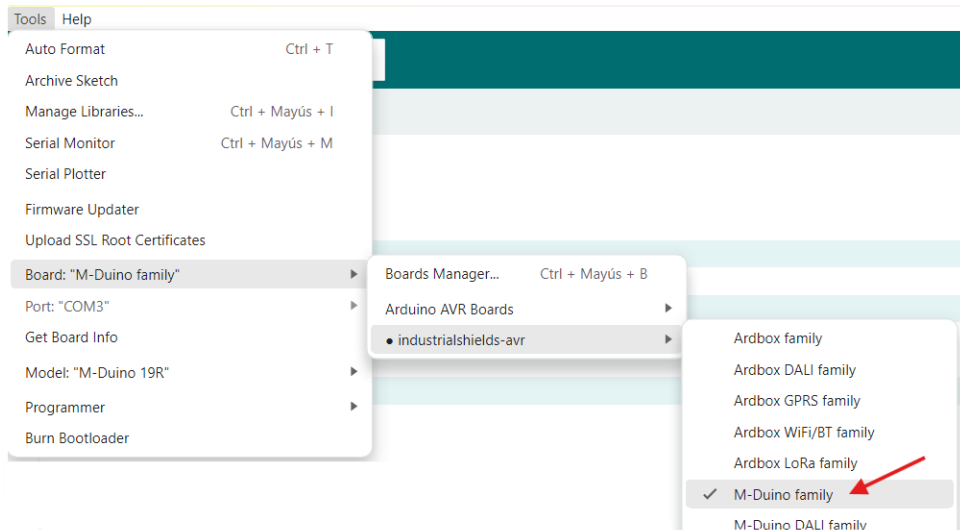
**Figura 47. Paso 3 interfaz software**

4.- Buscar “industrialshields” en el buscador. Y Seleccionar en instalar (seleccionando la última versión).



**Figura 48. Paso 4 interfaz software**

Siguiendo estos pasos, se puede observar que ya se tienen todas las placas de Industrial Shields:

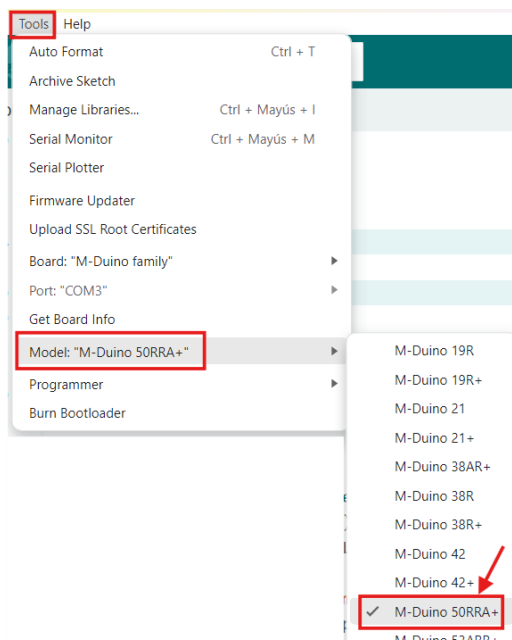


**Figura 49. Paso Final interfaz software**

### A.1.2. Conectar PLC Arduino al PC

Por otra parte, para poder cargar nuestro programa en el PLC, se especifica en el propio manual de usuario los pasos para conectar el PLC con nuestro PC, consultar apartado, “How to connect PLC Arduino to PC” del manual de usuario del PLC, sin embargo, en orden de que el usuario no encontrase el apartado se replica aquí lo importante.

- 1.- Conectar el cable USB entre el PLC y el PC. La familia M-Duino usa un cable USB-B.
- 2.- Seleccionar el modelo de nuestra placa, en este caso M-Duino 50RRA+. (Es necesario haber realizado el apartado A.1.1):



**Figura 50. Paso 2 Conectar PLC al PC**

### 3.-Seleccionar el puerto.

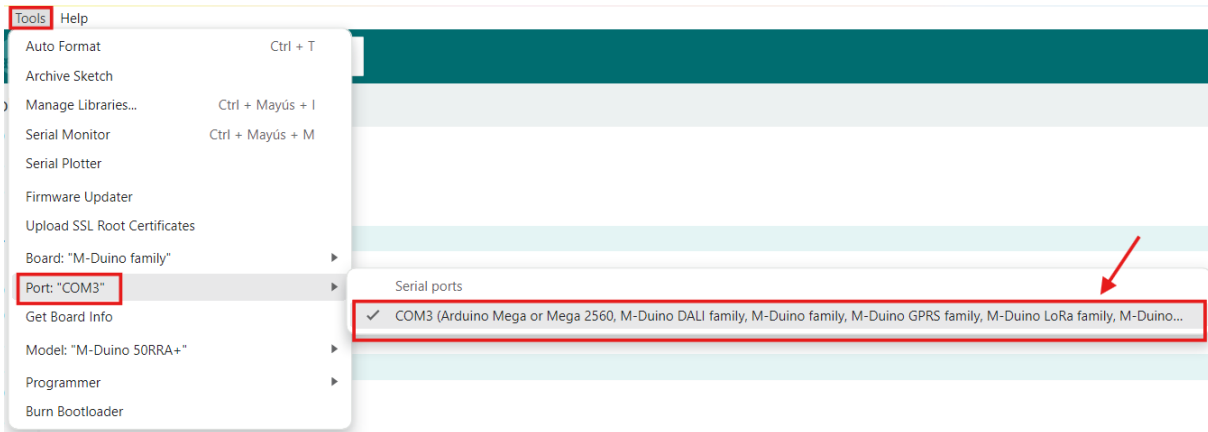


Figura 51. Paso 3 Conectar PLC al PC

## A.2 Manual de usuario

Si se desea ejecutar el sistema de control de este proyecto, se comentan los pasos a seguir.

1.- Realizar los pasos del A.1.1

2.- Conectar mediante cables, todas las señales entre el PLC y la PCB. Se muestran en la Figura 52 el código de colores para conexiones necesarias y en la Tabla 16 la conexión de pines.

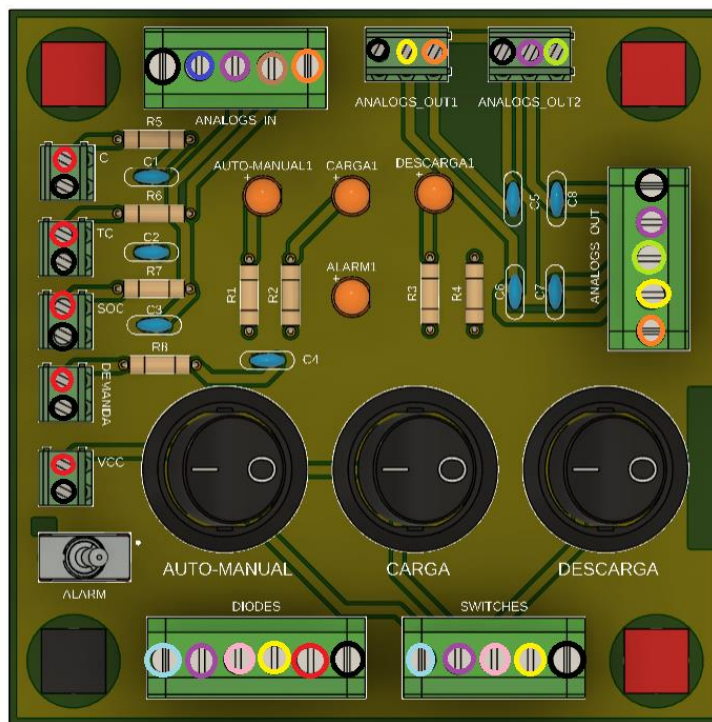


Figura 52. PCB con código de colores para la conexión correcta con el PLC

<b>Componente al que hace referencia</b>	<b>Pin PLC</b>	<b>Pin PCB</b>
<b>Leds</b>		
Automático/Manual	Q2_3	DIODES – color azul
Carga	Q2_2	DIODES – color violeta
Descarga	Q2_1	DIODES – color rosa
Alarma	Q2_0	DIODES – color amarillo
Vcc	Qdc	DIODES – color rojo
GND	COM(-)	DIODES – color negro
<b>Interruptores</b>		
Automático/Manual	I0_3	SWITCHES – color azul
Carga	I0_4	SWITCHES – color violeta
Descarga	I0_5	SWITCHES – color rosa
Alarma	I0_2	SWITCHES – color amarillo
GND	GND	SWITCHES – color negro
<b>Entradas analógicas</b>		
G	I1_5	ANALOGS IN – color naranja
Tc	I1_4	ANALOGS IN – color marrón
SOC	I1_3	ANALOGS IN – color violeta
Demanda	I1_2	ANALOGS IN – color azul
GND	GND	ANALOGS IN – color negro
<b>Salidas analógicas</b>		
pot_carga_bat	A1_1	ANLOGS_OUT1 – color amarillo
pot_desc_bat	A1_2	ANLOGS_OUT1 – color naranja
GND	GND	ANLOGS_OUT2 – color negro
pot_consumida_red	A2_6	ANLOGS_OUT2 – color verde
pot_vendida_red	A2_5	ANLOGS_OUT2 – color violeta
GND	GND	ANLOGS_OUT2 – color negro
<b>Alimentación</b>		
Vcc	Vdc	Vcc – color rojo
Masa	GND	Vcc – color negro

**Tabla 16. Conexión PLC con PCB**

3.- Alimentar la PCB a 24V. Conectar el terminal positivo de la fuente en Vcc – color rojo y el terminal negativo de la fuente en Vcc – color negro.

4.- Conectar las fuentes de alimentación que simulan la irradiancia (G), temperatura de célula (Tc), estado de carga de la batería (SoC) y la demanda de una vivienda (Demanda) en los respectivos pines señalizados en la placa PCB. En la Figura 52, el terminal positivo de cada fuente va en el pin redondeado de color rojo, el terminal negativo esta señalizado con el color negro.

Por otra parte, si el usuario no posee de tantas fuentes de alimentación. Es posible utilizar 4 potenciómetros para cada señal analógica de entrada. Siguiendo estos pasos:

- Conecta un extremo del potenciómetro (terminal 1) al positivo de la fuente de 24V.
- Conecta el otro extremo del potenciómetro (terminal 3) al negativo (tierra) de la fuente de 24V. Este terminal se conectará al pin negro de su respectivo pin de la PCB (G, Tc, SOC o DEMANDA) ver figura 46
- La salida de 0 a 5 V se obtiene del terminal central (cursor) del potenciómetro. Este terminal se conectará al pin rojo de su respectivo pin de la PCB (G, Tc, SOC o DEMANDA) ver figura 46

La salida de tensión  $V_{out}$  en el cursor del potenciómetro viene dada por la expresión (16):

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

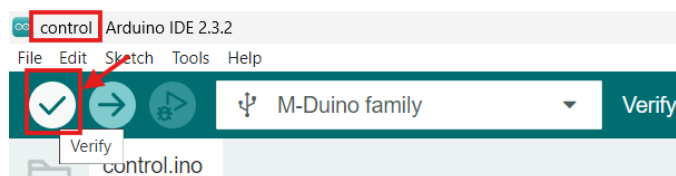
Donde:

- $V_{in} = 24V$  (tensión de entrada)
- $R_2$  es la resistencia desde el cursor hasta el terminal conectado a tierra.
- $R_1$  es la resistencia desde el cursor hasta el terminal conectado a la tensión de 24V.

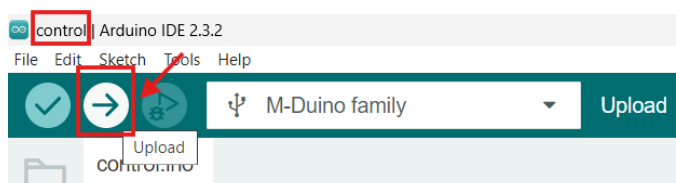
Un potenciómetro de 20k o 50k permitirá ajustar el divisor de voltaje adecuadamente para cubrir el rango de 0V a 5V

4.- Conectar un polímetro para medir las tensiones analógicas de salida a cualquiera de los terminales de ANALOGS\_OUT de la PCB. EL pin de color negro es el reservado para masa.

5.- Finalmente, abrir el programa “control.ino”, verificar y cargarlo en el PLC. (Es necesario haber realizado el apartado A.1.2)



**Figura 53. Verificación del programa**



**Figura 544. Carga del programa**