

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO:

Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos de radiación solar.

TITLE:

Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Solar Radiation Monitoring

AUTOR/A: Ainhoa Sainz Gordo

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

TUTOR/A: Ignacio Antón Hernández

DEPARTAMENTO: Ingeniería Telemática y Electrónica

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: Ignacio Gómez Revuelto

TUTOR/A: Ignacio Antón Hernández

SECRETARIO/A: Javier Malo Gómez

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a Ignacio Antón Hernández, por compartir conmigo sus conocimientos y brindarme su orientación a lo largo de todo el proyecto. Asimismo, quisiera agradecer de manera especial a Luis Javier San José Gallego, por su disposición y ayuda en la realización de los experimentos.

A mis padres, Toñi y Joaquín, por haber creído en mí incluso cuando yo misma dudaba. Gracias por brindarme el apoyo incondicional en los momentos más difíciles, por estar siempre a mi lado y darme la fuerza para seguir adelante.

A mis compañeros de la universidad, quienes me han acompañado durante todo este ciclo formativo. No puedo olvidar aquellas largas horas en el laboratorio, donde siempre sabíamos la hora de entrada, pero nunca la de salida. Gracias por las risas, el compañerismo y los momentos compartidos.

Finalmente, agradezco a mis amigos por su comprensión y constante apoyo en los buenos y malos momentos, sin vosotros esto no habría sido posible.

Resumen

El aumento del calentamiento global ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles que contribuyan a reducir la huella de carbono, donde destacan la energía solar fotovoltaica y la eólica. La energía solar está ganando mayor relevancia en la lucha contra el cambio climático, lo que la convierte en objeto de intensas investigaciones a nivel mundial. En este contexto, los módulos solares bifaciales han emergido como una solución prometedora, ya que permiten captar radiación por ambos lados del panel, lo que puede aumentar la producción de energía hasta en un 20% en comparación con los módulos monofaciales tradicionales.

A pesar de sus beneficios, uno de los principales desafíos de esta tecnología es medir con precisión la contribución del albedo, que corresponde a la radiación reflejada por el suelo hacia la parte posterior de los paneles. El albedo es un factor crucial para optimizar el rendimiento de los módulos bifaciales, ya que influye directamente en su eficiencia energética.

Este proyecto busca desarrollar una red de sensores inalámbricos para monitorizar la radiación solar, utilizando sensores autónomos y energéticamente eficientes. Para ellos se emplea la tecnología ZigBee, un protocolo de comunicación inalámbrica ideal para redes de sensores gracias a su bajo consumo energético y capacidad para manejar múltiples dispositivos en una red de malla.

Para gestionar la red de sensores, se desarrolla un software específico para cada tipo de nodo que conforma la red, diferenciando entre nodo coordinador y nodo final, siendo estos últimos los encargados de la recolección de datos. Además, se crea una interfaz gráfica intuitiva que permite a los usuarios gestionar los sensores y visualizar los datos recopilados para su posterior análisis.

En la fase experimental del proyecto, se llevan a cabo pruebas en una maqueta de un seguidor solar, distribuyendo estratégicamente los sensores de radiación para evaluar la influencia del albedo en diferentes momentos del día. Se modifican las posiciones y alturas de los sensores para observar cómo la distancia al suelo afectaba la cantidad de radiación que alcanzaba las células fotovoltaicas traseras. Los resultados demuestran que al aumentar la altura de los módulos se incrementa la captación de radiación reflejada, lo que mejora la producción de energía al reducir el sombreado producido por los propios sensores.

Palabras Clave

Radiación solar, albedo, redes inalámbricas, Zigbee, WSN, módulos bifaciales, paneles fotovoltaicos.



Abstract

The rise in global warming has driven the search for sustainable energy alternatives that help reduce the carbon footprint, with solar photovoltaic and wind energy standing out. Solar energy is gaining increasing relevance in the fight against climate change, making it the focus of intense research worldwide. In this context, bifacial solar modules have emerged as a promising solution, as they can capture radiation from both sides of the panel, potentially increasing energy production by up to 20% compared to traditional monofacial modules.

Despite their benefits, one of the main challenges of this technology is accurately measuring the contribution of albedo, which corresponds to the radiation reflected by the ground toward the back of the panels. Albedo is a crucial factor for optimizing the performance of bifacial modules, as it directly influences their energy efficiency.

This project aims to develop a wireless sensor network to monitor solar radiation, using autonomous and energy-efficient sensors. ZigBee technology is employed for this purpose, a wireless communication protocol ideal for sensor networks due to its low energy consumption and its capacity to handle multiple devices in a mesh network.

To manage the sensor network, specific software is developed for each type of node in the network, distinguishing between coordinator nodes and end nodes, with the latter being responsible for data collection. Additionally, an intuitive graphical interface is created to allow users to manage the sensors and visualize the collected data for further analysis.

In the experimental phase of the project, tests are conducted on a model of a solar tracker, strategically distributing the radiation sensors to evaluate the influence of albedo on energy efficiency. The positions and heights of the sensors are modified to observe how the distance from the ground affected the amount of radiation reaching the rear photovoltaic cells. The results show that increasing the height of the modules enhances the capture of reflected radiation, improving energy production by reducing the shading produced by the sensors themselves.

Keywords

Solar radiation, albedo, wireless networks, ZigBee, WSN, bifacial modules, photovoltaic panels

Índice de figuras

Figura 1. Estructura genérica de un nodo de una WSN.	4
Figura 2. Protocolos de comunicación de IoT.....	5
Figura 3. Modelo OSI de protocolos IEEE 802.15.4 y Zigbee	8
Figura 4. Topologías de redes Zigbee	10
Figura 5. Comportamiento de la luz.....	12
Figura 6. Funcionamiento célula fotovoltaica.....	13
Figura 7. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.....	13
Figura 8. Curva I-V	14
Figura 9. Distribución células en módulo fotovoltaico	15
Figura 10. Componentes de un módulo fotovoltaico	15
Figura 11. Seguidor de Eje Horizontal.....	18
Figura 12. Seguidor de Eje Vertical o Azimut	18
Figura 13. Seguidor de Eje Inclinado.....	18
Figura 14. Seguidor Polar.....	18
Figura 15. Seguidores de doble eje Tip-Tilt.....	19
Figura 16. Seguidor de dos ejes Azimut-Altitud.....	19
Figura 17. SFA para carga DC	20
Figura 18. Ángulos sobre módulo fotovoltaico.....	23
Figura 19. Maqueta del ISE.....	27
Figura 20. Módulo SM141K07L.....	29
Figura 21. Módulo KXOB121K04F-TR.....	29
Figura 22. Familia de módulos Xbee3	30
Figura 23. Tipos de pilas según su tamaño.	32
Figura 24. Arquitecturas de los multiplexores.	33
Figura 25. Símbolo esquemático y <i>footprint</i>	37
Figura 26. Esquema general de configuración del AEM10941.	38
Figura 27. Modos funcionamiento AEM10941	38
Figura 28. Esquema simplificado del AEM10941	39
Figura 29. Esquema Detallado Conexión de Componentes AEM10941	43
Figura 30. Diseño fuente de alimentación del Xbee3.	43
Figura 31. Topologías de ADC	44
Figura 32. Multiplexación del ADC.....	44
Figura 33. Conexión leds indicadores	45
Figura 34. Integración módulos fotovoltaicos con multiplexores ADG709	47
Figura 35. Curva I-V de una célula fotovoltaica.....	47
Figura 36. Distribución de Componentes en la PCB –Caras Mediación Albedo.....	49
Figura 37. Distribución de Componentes en la PCB – Cara Orientada al Sol	50
Figura 38. Tamaño pista mediciones.....	51
Figura 39. Tamaño pista HVOUT y GND	52
Figura 40. Izquierda Pick and Place y Derecha Dispensador de Pasta a presión.	53
Figura 41. Pasta de Soldadura en <i>Pads</i> del chip AEM10941	53
Figura 42. Horno de reflujo.....	53
Figura 43. Perfil reflujo Pasta de Soldadura Sn63Pb37	54
Figura 44. Perfil de Reflujo de Soldadura de Pasta Sn42Bi57.6Ag0.4	54
Figura 45. Resultado final del sensor de radiación. Izq. Cara Trasera Dcha. Cara Frontal.	55
Figura 46. Red Zigbee.....	56
Figura 47. Pantalla Principal de la GUI de radiación.....	57
Figura 48. Pestaña Excel	58

Figura 49. Formato Excel de Mediciones.....	58
Figura 50. Ventana Información de la Aplicación de Radiación.....	59
Figura 51. Información memoria nodo final	62
Figura 52. Intercambio de mensajes en modo continuo.	63
Figura 53. Intercambio de mensajes en modo barrido.....	64
Figura 54. Intercambio mensaje para dormir dispositivo final.....	65
Figura 55. Intercambio de mensajes al resetear coordinador	65
Figura 56. Escaneo de la red Zigbee a través de GUI	67
Figura 57. Verificación funcionalidad en modo continuo.	68
Figura 58. Verificación funcionalidad en modo intervalo.....	70
Figura 59. Medida de V_{src} y V_{batt}	71
Figura 60. Medidas V_{boost} y V_{buck}	72
Figura 61. Medida V_{HVOU}	72
Figura 62. Colocación células en seguidor de doble eje.....	73
Figura 63. Piranómetro del IES	74
Figura 64. Disposición de las células	75
Figura 65. Maqueta de un seguidor de módulos bifaciales del IES.....	77
Figura 66. Posiciones de la maqueta modo barrido.....	78
Figura 67. Conexionado para estimar consumo de corriente del Xbee3	95
Figura 68. Red Zigbee	96
Figura 69. Resultado transmisión mensajes entre dispositivos cercanos.....	97
Figura 70. Software XCTU	120
Figura 71. Configuración Serial Xbee3.....	120
Figura 72. Iconos programa XCTU.....	121
Figura 73. Descubrimiento de los dispositivos en XCTU	123

Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa de los diferentes protocolos utilizados en las WSN.....	6
Tabla 2. Descripción de seguidores solares uniaxiales.	18
Tabla 3. Descripción de seguidores solares doble eje.	19
Tabla 4. Características Técnicas Módulos Fotovoltaicos del Sensor de Radiación.....	29
Tabla 5. Características Técnicas módulo Xbee3 seleccionado.	31
Tabla 6. Comparativa de pilas Ión Litio del mercado	32
Tabla 7. Características técnicas pila LIR2450.....	33
Tabla 8. Características Técnicas ADG709BRUZ.....	34
Tabla 9. Comparativa reguladores de carga solar.	35
Tabla 10. Datos de consumo proporcionados por fabricante y experimentales.	36
Tabla 12. Características Eléctricas Típicas a 25°C.....	40
Tabla 12. Compatibilidad entre AEM10941 y módulo SolarMD	40
Tabla 13. Pines para configurar MPPT	41
Tabla 14. Configuración de los modos de funcionamiento del AEM10941.	41
Tabla 15. Cumplimiento alimentación Xbee3.....	42
Tabla 16. Código Binario para seleccionar Canales del Multiplexor.....	46
Tabla 17. Estimación de R_{shunt}	48
Tabla 18. Resultado mediciones modo barrido.....	68
Tabla 19. Periodo de Muestra Sensores.....	69
Tabla 20. Desfase entre los canales de los diferentes sensores	69
Tabla 21. Desfase entre canal del sensor.....	69
Tabla 22. Resultado mediciones experimento larga duración.....	70
Tabla 23. Variaciones en el periodo de muestreo	71
Tabla 24. Relación V_{shunt}/GNI de los módulos albedo del sensor 0013A2004243CEAF	76
Tabla 25. Relación V_{shunt}/GNI de los módulos albedo del sensor 0013A200423EE703.....	76
Tabla 26. Relación V_{shunt}/GNI de los módulos albedo del sensor 0013A2004243D058.....	76
Tabla 28. Presupuestos materiales para unidad del sensor de radiación.	83
Tabla 29. Presupuesto material auxiliar para programación módulos Xbee.	83
Tabla 30. Presupuesto equipos para soldadura y testeo Sensor de Radiación.....	84
Tabla 31. Presupuesto de los programas empleados en el proyecto.....	84
Tabla 32. Presupuesto total.	84
Tabla 33. Medidas de consumo módulo Xbee3	96
Tabla 34. Valores asignados a cada dispositivo.....	122
Tabla 35. Configuración E/S de los nodos finales	122

Índice de gráficos.

Gráfica 1. Comparación de Carga. Orientación al Albedo vs. Radiación Directa	73
Gráfica 2. Experimento 17:28. Sensor posicionado en el extremo de la maqueta.....	79
Gráfica 3. Experimento 17:28. Sensor posicionado en medio – arriba de la maqueta	79
Gráfica 4. Experimento 17:28. Sensor posicionado en medio – abajo maqueta	79
Gráfica 5. Experimento 18:46. Sensor posicionado en el extremo de la maqueta.....	80
Gráfica 6. Experimento 18:46. Sensor posicionado en medio – arriba de la maqueta	80
Gráfica 7. Experimento 18:46. Sensor posicionado en medio – arriba maqueta.....	81
Gráfica 8. Medida Radiación Directa de los 3 sensores.	81

Lista de acrónimos

AADAT	<i>Azimuth-Altitude Dual-Axis Tracker</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AM	<i>Air Mase</i>
AP	<i>Access Point</i>
APL	<i>Application Layer</i>
APS	<i>Application Support Sublayer</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
Eagle	<i>Easily Applicable Graphical Layout Editor</i>
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>
GDL	Grados de Libertad
GFV	Generador Fotovoltaico
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HIT	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin-layer</i>
HSAT	<i>Horizontal Single – Axis Tracker</i>
HSP	Hora Solar Pico
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IBC	<i>Integrated Back Contact</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IES	Instituto de Energía Solar
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LDO	<i>Low Dropout Regulators</i>
LED	<i>Light Emitting Diodes</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NREL	<i>The National Renewable Energy Laboratory</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>

PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PERC	<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>
PERL	<i>Passivated Emitter Rear Locally-diffused</i>
PERT	<i>Passivated Emitter Rear Totally diffused</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PSAT	<i>Polar Aligned Single-Axis Tracker</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAE	Real Academia Española
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RDIF	<i>Radio Frequency Identification</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RP-SMA	<i>Reverse Polarity SubMiniature Version A</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SAR	<i>Successive Approximation Register</i>
SFA	<i>Stand-Alone Photovoltaic Systems</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SOSUS	<i>Sound Surveillance System</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TSAT	<i>Tilted Single – Axis Tracker</i>
TTDAT	<i>Tip-Tilt Dual-Axis Tracker</i>
U. FL	<i>Ultra Miniature Coaxial Connector with a Female Contact</i>
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
VSAT	<i>Vertical Single - Axis Tracker</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
ZDO	<i>Zigbee Device Objects</i>
ZigbeeHA	<i>ZigBee Home Automation</i>

Índice de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
Índice de gráficos	XII
Lista de acrónimos	XIII
1. Introducción	1
1.1. Marco y motivación del proyecto.....	1
1.2. Objetivos técnicos y académicos.....	1
2. Marco tecnológico	3
2.1. Internet de las Cosas.....	3
2.2. Redes Inalámbricas de Sensores.....	4
2.2.1. Introducción a las WSN.....	4
2.2.2. Estructura de un nodo.....	4
2.2.3. Tecnologías Inalámbricas. Estándares para Sensores Inalámbricos.....	5
2.3. Tecnología Zigbee.....	7
2.3.1. Estándar IEE 802.15.4.....	7
2.3.2. Dispositivos de una red Zigbee.....	9
2.3.3. Topologías de red basadas en Zigbee.....	9
2.4. Energía Fotovoltaica.....	10
2.4.1. Historia de la Industria Fotovoltaica.....	10
2.4.2. El recurso solar.....	11
2.4.3. La célula solar.....	13
2.4.4. El módulo fotovoltaico.....	14
2.5. Módulos Bifaciales.....	16
2.6. Seguidores Solares.....	17
2.6.1. Sistemas de paneles fijos.....	17
2.6.2. Tipos de seguidores solares.....	17
2.7. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos.....	19
1.1.1. Componentes Principales SFA de Carga DC.....	20
1.1.2. Dimensionado de un SFA.....	21
3. Especificaciones y restricciones de diseño	27
4. Descripción de la solución propuesta	29
4.1. Sensor de Radiación Inalámbrico.....	29
4.1.1. Módulos Fotovoltaicos.....	29
4.1.2. Dispositivo De Transmisión De Datos Inalámbrica. Módulo Xbee.....	30
4.1.3. Sistema De Almacenamiento. Batería.....	32
4.1.4. Multiplexor Analógico.....	33
4.1.5. Regulador De Carga Solar.....	34
4.2. Diseño de la PCB del Sensor de Radiación.....	37
4.2.1. Creación de las Librerías de Componentes.....	37
4.2.2. Configuración Regulador AEM10941.....	38

4.2.3.	Configuración del transceptor de radiofrecuencia Xbee.....	43
4.2.4.	Integración Multiplexor y Módulos Fotovoltaicos	46
4.2.5.	Resistencias De <i>Shunt</i> Y Precisión ADC.....	47
4.3.	Distribución de componentes en PCB	48
4.3.1.	Distribución de los Componentes.....	48
4.3.2.	<i>Layout</i>	50
4.4.	Fabricación de los módulos.....	52
4.5.	Desarrollo Software del Sistema.....	56
4.5.1.	Programa Interfaz GUI	57
4.5.2.	Programación Nodo Coordinador.....	59
4.5.3.	Programación Nodo Dispositivos Finales.....	60
4.5.4.	Intercambio de mensajes entre los diferentes elementos de la red	63
5.	Resultados.....	67
5.1.	Pruebas Software	67
5.1.1.	Conexión y Configuración.....	67
5.1.2.	Verificación Experimento Modo Barrido.....	68
5.1.3.	Verificación Experimento Larga Duración.....	69
5.2.	Validación fuente de alimentación del sensor.....	71
5.2.1.	Funcionamiento normal.....	71
5.2.2.	Carga de Batería.....	72
5.3.	Calibración de las Células	74
5.3.1.	Sensor 0013A2004243CEAF	76
5.3.2.	Sensor 0013A200423EE703.....	76
5.3.3.	Sensor 0013A2004243D058.....	76
5.4.	Ensayos en la maqueta del Instituto Solar de Energía.....	77
6.	Presupuesto	83
6.1.	Lista de Materiales para Sensor de Radiación.....	83
6.2.	Equipos para Fabricación	84
6.3.	Licencias de Software Utilizadas.....	84
6.4.	Presupuesto total.....	84
7.	Impacto del proyecto	85
7.1.	Aspectos Éticos.....	85
7.2.	Aspectos ambientales.....	86
7.3.	Aspectos sociales.....	86
8.	Conclusiones.....	87
8.1.	Trabajos futuros.....	87
9.	Bibliografía.....	89
Anexo	95	
A.1	Estimación del Consumo del Módulo Xbee3	95
A.2	Latencia Envío de Datos en una red Zigbee.....	96
A.3	Software Nodo Coordinador.....	99
A.4	Software Nodo Final.....	103
Planos.....	111	
Manual de usuario.....	119	
1.	Equipos necesarios.....	119
2.	Software Necesario.....	119

3.	Configuración Xbee3 con XCTU.....	120
4.	Configuración Entorno Pycharm.....	123
4.1.	Configuración Pycharm e instalación de plugins para los Xbee3	123
4.2.	Métodos para cargar el software en los módulos Xbee3	124
4.3.	Configuración Pycharm para ejecución Interfaz de Usuario.....	126



1. Introducción

1.1. Marco y motivación del proyecto

En los últimos años, la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad urgente de reducir las emisiones de carbono han impulsado una transformación en el sector energético mundial. Las energías renovables han emergido como una solución clave para enfrentar estos desafíos ambientales. En este contexto, España ha destacado por su liderazgo en la adopción de energías limpias, con más del 58% de su capacidad eléctrica proveniente de fuentes renovables. [1] Teniendo en cuenta que es el país de Europa con mayor radiación media al año, sus condiciones climáticas son óptimas para apostar por la energía fotovoltaica. Entre todas las fuentes de energía renovable, la energía solar es la que presenta mayor potencial productivo, lo que lleva a la industria a mejorar continuamente sus tecnologías para maximizar su aprovechamiento.

Actualmente, el mercado fotovoltaico está evolucionando hacia el uso de módulos bifaciales, diseñados para captar la energía solar por ambos lados del panel. Esta tecnología puede aumentar la capacidad de producción hasta un 20% en comparación con los paneles monofaciales [2]. Un obstáculo significativo que se ha presentado es la cuantificación precisa de la energía eléctrica generada procedente de la radiación reflejada en el suelo, conocida como albedo. La medición de esta radiación es crucial para evaluar el verdadero potencial y eficiencia de los módulos bifaciales.

Ante esta necesidad, surge la motivación de diseñar un sensor de radiación inalámbrico capaz de medir el albedo asegurando al mismo tiempo su autonomía y eficiencia energética mediante el uso de componentes de bajo consumo. Esta iniciativa no solo busca resolver el desafío de medir la radiación reflejada, sino también implementar una red de sensores estratégicamente distribuida en un modelo a escala de tres seguidores bifaciales desarrollado por el grupo ISI del Instituto de Energía Solar.

1.2. Objetivos técnicos y académicos

- **Diseño de Sensor de Radiación Inalámbrico.** Desarrollar un sensor capaz de medir el albedo, asegurando su autonomía y precisión. El sensor debe ser eficiente en términos de consumo.
- **Implementación de Red de Sensores.** Distribuir estratégicamente una red de sensores para obtener la mayor cantidad de datos posibles, garantizando una cobertura completa de la maqueta del IES para una caracterización precisa.
- **Desarrollo de Interfaz Gráfica.** Crear una interfaz gráfica intuitiva para controlar la red Zigbee, facilitando la visualización de datos y el control remoto de los sensores.
- **Ensayos Experimentales.** Realizar ensayos en una maqueta con tres seguidores para verificar el correcto funcionamiento del sensor y caracterizar la contribución del albedo.

Desde el punto de vista académico, este proyecto permite adquirir las siguientes competencias y habilidades:

- **Diseño de Placas de Circuito Impreso.** Utilización de software profesional, seleccionando e integrando componentes electrónicos.
- **Desarrollo de Software.** Dominio en la programación de microcontroladores para el control y gestión de los sensores, así como creación de interfaces gráficas intuitivas para el monitoreo y control de sistemas.
- **Tecnología Zigbee.** Conocimiento en la tecnología Zigbee y su aplicación en redes de sensores, desarrollando habilidades para diseñar, desplegar y mantener redes de comunicación inalámbrica eficientes.

2. Marco tecnológico

El avance tecnológico continuo ha generado un impacto significativo en las rutinas diarias de las personas, marcando el comienzo de la era digital. Este cambio, impulsado por la accesibilidad a Internet, ha transformado radicalmente la manera de interactuar con los dispositivos electrónicos y el entorno, dando paso a lo que hoy día se conoce como **IoT** (*Internet of Things* o Internet de las Cosas).

Dentro del ecosistema del IoT, emerge el concepto de las **WSN** (*Wireless Sensor Networks* o Redes Inalámbricas de Sensores), constituidas por una serie de nodos que integran sensores y dispositivos de comunicación inalámbrica. Estos elementos tienen la capacidad de recopilar y transmitir información de manera autónoma y eficiente.

Aunque las WSN tiene sus orígenes en proyectos militares, su versatilidad las ha llevado a implementarse en diversos sectores, como el sanitario, automovilístico, domótica e industrial, entre otros.

Este proyecto de ingeniería se centra en el análisis de las WSN aplicadas en el sector industrial de las energías renovables, específicamente en el ámbito de la energía fotovoltaica. El objetivo es capturar parámetros esenciales como la radiación solar a través del despliegue estratégico de sensores en una infraestructura fotovoltaica.

Con el fin de comprender la situación tecnológica, en este capítulo se profundiza en los siguientes puntos:

- Internet de las cosas.
- La tecnología Zigbee
- La energía fotovoltaica.

2.1. Internet de las Cosas

Según la definición de la RAE (Real Academia Española), el término **IoT** se define como la “interconexión digital de personas, animales y cosas (electrodomésticos, coches, etc.) con internet”. [3] No obstante, este concepto abarca un significado más amplio. El IoT constituye un conjunto de objetos físicos, como dispositivos, vehículos, edificio, que interactúan entre sí mediante conexiones inalámbricas. Esto posibilita la recopilación e intercambio de datos, permitiendo el control remoto de los objetos a través de infraestructuras de red existentes.

El término de IoT se atribuye al británico Kevin Ashton, cofundador del Laboratorio Auto-ID del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). En 1999 propuso un sistema donde los objetos identificables del mundo físico podían conectarse de manera única a Internet apoyándose con tecnología de RDIF¹. Sin embargo, la discusión sobre la existencia de una red de dispositivos comenzó en 1982, cuando la Universidad de Carnegie Mellon modificó una máquina expendedora de Coca-Cola para informar sobre el inventario, convirtiéndola en el primer electrodoméstico conectado a Internet. [4]

Finalmente, la Recomendación UIT-T Y.2060 (06/2012) define el IoT como una infraestructura global para la sociedad de la información, que permite servicios avanzados mediante la interconexión de cosas (físicas y virtuales) basadas en tecnologías de la información y comunicación interoperables existentes y en evolución.

¹ **RDIF** (*Radio Frequency Identification* o Identificación por Radio Frecuencia), consiste en un sistema de identificación, monitoreo, autenticación y alerta a través de un intercambio de datos entre una etiqueta y un lector mediante señales de radio. Las etiquetas almacenan y transmiten datos a los lectores, los cuales recopilan la información de las distintas etiquetas y la envían al servidor para su análisis y procesamiento adicional.

2.2. Redes Inalámbricas de Sensores

2.2.1. Introducción a las WSN.

Al analizar la evolución de las tecnologías de la información y comunicación, se evidencia una marcada inclinación hacia dispositivos embebidos cada vez más compactos y eficientes en términos de consumo energético, sin sacrificar la elevada capacidad de almacenamiento y procesamiento. Esta tendencia ha despertado un gran interés en la investigación de las **WSN**, en particular en su aplicación industrial, donde ofrecen un potencial significativo para la supervisión y control de procesos.

Las WSN, como muchos avances en el ámbito tecnológico, tienen sus raíces en la Guerra Fría. Estados Unidos puso en marcha el despliegue de una red de sensores acuáticos en el fondo del mar, conocida como SOSUS (*Sound Surveillance System*) con el objetivo de desvelar la ubicación de los sigilosos submarinos. Este sistema marcó un hito importante en el desarrollo de las WSN y sentó las bases para su evolución y aplicación en diversos campos. [5]

Actualmente, se conocen las WSN como redes conformadas por múltiples dispositivos inteligentes, denominados **nodos o motas**, distribuidos en un espacio determinado y comunicados de manera inalámbrica. Estas redes tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores, como el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión y la industria. Su capacidad para recopilar y transmitir datos en tiempo real las convierte en una herramienta esencial para la automatización y optimización de procesos, consolidando su papel fundamental en el avance de las tecnologías modernas y IoT.

2.2.2. Estructura de un nodo

En una WSN, los **nodos** son los dispositivos que permiten la monitorización en tiempo real de diversas variables físicas o condiciones ambientales como temperatura, sonido, vibración, radiación, entre otros. Independientemente de la función específica que desempeñen, cada nodo se compone por una serie de componentes esenciales que garantizan su operatividad.

Como se muestra en la Figura 1, la estructura genérica de un nodo incluye varios módulos: un microcontrolador, una fuente de energía, un transceptor de radio y un elemento sensor. [6]

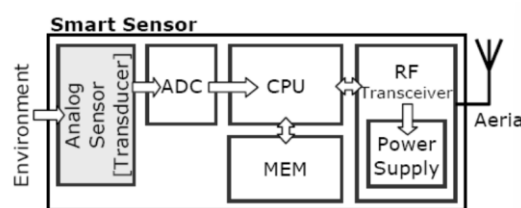


Figura 1. Estructura genérica de un nodo de una WSN.

El **elemento sensor** se encarga de medir las magnitudes físicas deseadas según su propósito. El sensor puede ser integrado durante la fabricación del dispositivo junto al microcontrolador o añadido posteriormente mediante interfaces digitales como puertos serie, bus I2C (*Inter-Integrated Circuit* o Circuito Inter-Integrado), entradas GPIO (*General-Purpose Input/Output* o Entrada/Salida de Propósito General), o mediante un ADC (*Analog-to-Digital Converter* o Convertidor Analógico Digital).

El **microcontrolador** actúa como el núcleo central, procesando datos y gestionando las operaciones. Este módulo incluye una CPU (*Central Processing Unit* o Unidad de Procesamiento), memoria RAM (*Random Access Memory* o Memoria de Acceso Aleatorio) y almacenamiento permanente (como EEPROM o memoria Flash). Adicionalmente incluye varias interfaces de comunicación como Ethernet, WiFi, Zigbee o Z-Wave, los cuales serán abordados en apartados siguientes.

Otro de los módulos clave es el **transceptor de radiofrecuencia**, un dispositivo electromecánico encargado de la transmisión y recepción de señales en un rango específico de frecuencias de radio. Este módulo alberga una antena encargada de irradiar y captar las ondas de radio en la frecuencia asignada a la WSN. También incluye circuitos dedicados a modular y demodular las señales de radio recibidas, complementados con amplificadores de bajo ruido y filtros selectivos.

Por último, la **fente de energía** de los nodos suele ser provista por baterías, asegurando así la autonomía eléctrica requerida para operar de forma independiente en localizaciones remotas o inaccesibles.

2.2.3. Tecnologías Inalámbricas. Estándares para Sensores Inalámbricos.

La influencia significativa de las WSN ha dado lugar a una amplia variedad de opciones de conectividad, cada una ofreciendo unas ventajas y capacidades únicas. Entre las más destacadas en el ámbito comercial se encuentran ZigBee, Z-Wave, Bluetooth y Wi-Fi. La Figura 2 ofrece una comparación entre diversos protocolos de comunicación, esencial para comprender sus diferencias y seleccionar el más apropiado en función de las necesidades de velocidad y alcance.

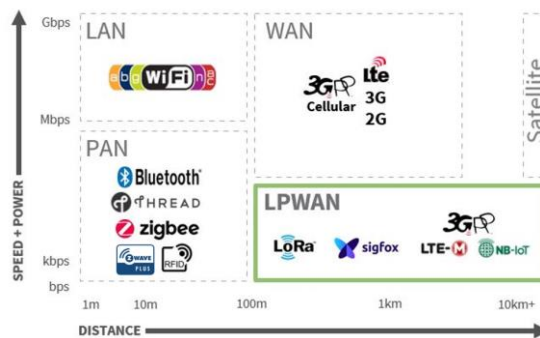


Figura 2. Protocolos de comunicación de IoT

A continuación, se presentan brevemente las principales tecnologías en el ámbito de las WSN. El protocolo Zigbee se analizará en detalle más adelante debido a su relevancia en este proyecto.

WiFi (*Wireless Fidelity* o Fidelidad Inalámbrica)

El estándar IEEE 802.11 a/b/g, conocido como Wi-Fi, transformó la conectividad al permitir el acceso inalámbrico a Internet y la compartición de datos a través de dispositivos móviles. Basado en la transmisión de datos mediante ondas de radio, este estándar facilita la comunicación entre dispositivos a través de AP (*Access Point* o Punto de Acceso) o en configuraciones Ad Hoc². [7]

Wi-Fi opera principalmente en dos bandas de frecuencia, 2,4 GHz y 5 GHz. Con la introducción de la banda de 6 GHz en Wi-Fi 6E (definido en 2021), se ha logrado un aumento significativo en la capacidad de la red, alcanzando hasta 9,6 Gbps. Se espera que Wi-Fi 7, evolucione hasta alcanzar velocidades de transmisión de 36 Gbps [8]

En términos de cobertura, Wi-Fi varía según el entorno. En interiores, el alcance típico es de 35 metros, mientras que en exteriores puede alcanzar varios cientos de metros. Aunque un AP puede admitir teóricamente hasta 250 dispositivos, en la práctica, factores como el rendimiento de la red y la congestión limitan la efectividad de esta capacidad. [9]

² Las redes WiFi Ad Hoc, también conocidas como redes P2P (*Peer-to-Peer* o punto a punto), se distinguen por su naturaleza descentralizada, prescindiendo de la necesidad de un router o punto de acceso centralizado. En este tipo de red, cada dispositivo participante asume el rol de nodo, actuando tanto como cliente como servidor.

Bluetooth

La tecnología Bluetooth, desarrollada en 1994 por Intel, Ericsson y Nokia, surgió con el propósito de ofrecer una solución inalámbrica capaz de reemplazar cables en periféricos de computadora como ratones, teclados, joystick e impresora.

Cada dispositivo Bluetooth opera en la frecuencia de 2.4 GHz. Al conectarse varios dispositivos, se forma una red llamada **piconet**, donde un dispositivo es el maestro y los demás actúan como esclavos, permitiendo hasta 8. Además, es posible conectar dos piconets para formar una **scatternet**. La cobertura de una piconet puede llegar a 100 metros con amplificadores de señal, aunque normalmente se limita a un radio de 30 metros. La velocidad de transmisión en esta red puede alcanzar hasta 720 kbps. [10]

La evolución de Bluetooth conduce a mejoras significativas en términos de eficiencia energética. Se destaca la introducción de BLE (*Bluetooth Low Energy* o Bluetooth de baja energía), que ofrece un consumo de energía variable entre 30 μ A y 30 mA durante la transmisión, con una tensión de alimentación de 2,7 V.

Z-Wave

En 2001, la empresa Zensys introduce **Z-Wave** como un protocolo de automatización del hogar, convirtiéndose en el principal competidor de Zigbee. A pesar de su amplia aceptación en el mercado gracias a su fiabilidad en comunicaciones inalámbricas basadas en red de malla de bajo consumo energético, este estándar de comunicación no se encuentra disponible como código abierto y solo es accesible para los clientes de Zensys. [10]

La tecnología de radio Z-Wave opera en la banda de frecuencia sin licencia de 900 MHz ISM (*Industrial, Scientific and Medical* o Industrial, Científica y Médica), utilizada principalmente en Australia, Israel y América del Norte. Al trabajar dentro de esta banda, Z-Wave logra un mayor rendimiento al evitar la saturación de la banda de 2,4GHz. Z-Wave emplea una topología de malla alcanzando una cobertura media entre dos nodos de aproximadamente 30 metros en interiores y 100 metros en exteriores, con un ancho de banda de 40 kbps.

En la Tabla 1 se recopilan todas las características previamente expuestas con el objetivo de realizar una comparativa detallada.

Tabla 1. Comparativa de los diferentes protocolos utilizados en las WSN

	WIFI	ZIGBEE	Z-WAVE	BLUETOOTH
IEEE.	802.11 ^a /b/g	802.15.4	-	802.15.1
BANDA DE FRECUENCIA ISM	2.4GHz 5GHz	Opera en las bandas libres 2.4 GHz 868MHz 915MHz	Opera en una frecuencia diferente en cada región Europa: 868MHz América: 908MHz	2.4GHz.
MAX. CANTIDAD DE DISPOSITIVOS	250	> 65535 (Malla)	230	8
VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA	54 Mbps (2.4 GHz)	250 kbps (2.4GHz) 40 kbps (915MHz) 20 kbps (868MHz)	100 kbps	1 Mbps
TOPOLOGÍA	Estrella/Malla	Estrella /Árbol/Malla	Malla	AD-HOC
ALCANCE	70-250 metros	10-20 metros, ampliación con <i>routers</i> llegando hasta los 100 m	30 metros interiores 100 metros exteriores	Hasta 30 metros
IMPLEMENTACIÓN	Compleja	Código completamente abierto	Z-Wave no es completamente de código abierto	Software libre

2.3. Tecnología Zigbee

La observación del patrón de comunicación en zigzag, empleado por las abejas para transmitir información vital dentro de una colmena, ha sido fuente de inspiración para la denominación de uno de los estándares más utilizados en conectividad inalámbrica: Zigbee.

En 2004, el protocolo Zigbee surge de la colaboración entre el IEEE y la Alianza ZigBee, basado en el estándar global abierto IEEE 802.15.4. Este protocolo se diseñó con el objetivo establecer un estándar versátil que garantizara comunicaciones inalámbricas seguras, con un enfoque en aplicaciones de bajo consumo energético y rentabilidad económica, priorizando la conservación de la vida útil de las baterías. Como resultado, la eficiencia energética se ve potenciada, ya que la mayoría de los dispositivos que emplean la tecnología Zigbee solo necesitan 1 mW para su funcionamiento.

Zigbee, al admitir diversas topologías de red, siendo la topología de malla una de las más utilizadas, tiene la capacidad de implementarse y ajustarse a diferentes entornos, logrando alcanzar hasta 100 metros de cobertura. Esta distancia se logra mediante el uso de la técnica DSSS³.

El protocolo Zigbee opera en diversas bandas de frecuencia. En Europa, utiliza la banda de 868 MHz, mientras que en América del Norte y Australia emplea la banda de 915 MHz. Por último, se encuentra la banda de 2.4 GHz disponible en todo el mundo. Estas bandas ofrecen diferentes tasas de datos, 20 kbps, 40 kbps y 250 kbps, respectivamente.

En resumen, la tecnología Zigbee es elegida para este proyecto debido a:

- Admisión de alto número de nodos sin comprometer el rendimiento. Hasta 65535 dispositivos en topología de malla. [11]
- Capacidad de auto-reparación y tolerancia a fallos.
- Eficiencia energética que permite uso de baterías.
- Basado en estándares abierto que facilita la interoperabilidad.
- Costo de hardware y desarrollo reducido en comparación con otras tecnologías.
- Tecnología respaldada por una industria consolidada que ofrece una variedad de productos.

2.3.1. Estándar IEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 desarrollado por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), establece las normativas técnicas y los requisitos que deben cumplir los niveles de red que brindan servicios a las PAN (*Personal Area Network* o Redes de Área personal) representadas en la Figura 3. [12]

La primera edición del estándar IEEE 802.15.4 publicada en mayo de 2003, definió, en términos de arquitectura, las dos capas inferiores del modelo OSI (*Open Systems Interconnection* u Organización Internacional para la Normalización): la PHY (*Physical Layer* o Capa Física) y la capa MAC (*Media Access Control* o Capa de acceso al medio).

Un año después, la Alianza ZigBee y IEEE colaboraron para especificar una pila completa de protocolos destinada a comunicaciones de corto alcance, velocidad de transferencia de datos reducida, requisitos de bajo consumo de energía y una comunicación por radiofrecuencia de complejidad mínima.

³ DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum* o Espectro ensanchado por secuencia directa) es una técnica de modulación utilizada en comunicaciones inalámbricas donde se expande la señal transmitida sobre un ancho de banda mucho mayor que el requerido originalmente. Esto se logra mediante la multiplicación de la señal de datos por una secuencia de chips pseudoaleatoria conocida como secuencia de dispersión. Esta técnica mejora la resistencia al ruido y la interferencia.

La especificación ZigBee, lanzada en diciembre de 2004 y recientemente disponible al público, define las capas superiores del modelo OSI: la **NWK** (*Network Layer* o Capa de red) y la **APL** (*Application Layer* o Capa de aplicación). Para facilitar la comunicación entre estas capas, cada una se conecta con las capas adyacentes a través de puntos **SAP** (*Service Access Point* o Puntos de Acceso de Servicio).

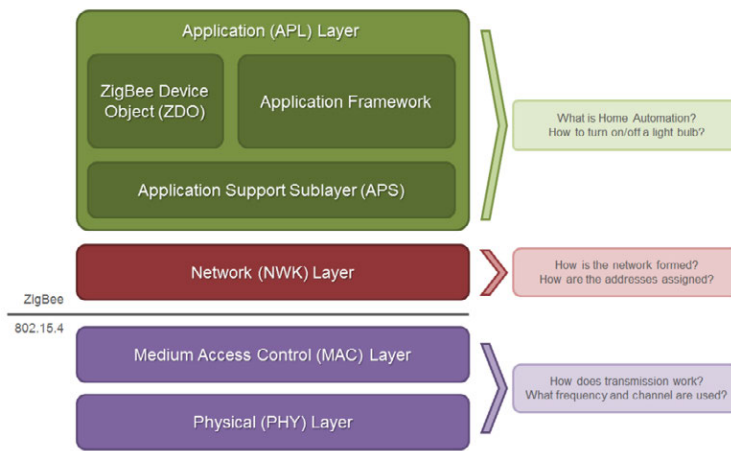


Figura 3. Modelo OSI de protocolos IEEE 802.15.4 y Zigbee

PHY

La capa física representa la interfaz más próxima al hardware y se encarga de gestionar la comunicación con el transceptor de radio. En esta capa, se definen las frecuencias de operación empleadas en las conexiones por radio, junto con los mecanismos de control de nivel inferior. El estándar IEEE 802.15.4 tienen la capacidad de operar en tres bandas de frecuencia diferentes: 868 MHz (para Europa), 915 MHz (en Norteamérica y Australia) y 2.4 GHz (disponible a nivel mundial).

MAC

La capa MAC es la responsable de gestionar el acceso al canal de radio físico. Entre los requisitos fundamentales de esta capa se incluyen: la asignación de canales, técnicas de prevención de colisiones, la estructura de las tramas y las funciones necesarias para la difusión y modulación.

NWK

La capa de red asume el control del flujo de datos al dirigir las operaciones de enrutamiento, siendo responsable de establecer el camino óptimo para la transmisión de la información. Adicionalmente, alberga funciones para la detección y corrección de errores de transmisión, asegurando así una comunicación fiable y eficiente. Dentro del protocolo Zigbee, la tarea de seleccionar la ruta de retransmisión hacia el destino establecido recae en el coordinador Zigbee o en los enrutadores. Estos dispositivos son cruciales en la estructura de la red, donde se establecen tres topologías básicas: en estrella, en árbol y en malla.

APL

La capa de aplicación es fundamental para dotar a los dispositivos funcionalidades específicas y mantener las tablas de enlaces (*binding*). Cada subcapa se define de la siguiente manera:

- **APS** (*Application Support Sublayer* o Subcapa de Soporte de Aplicaciones): Define varios objetos de direccionamiento como perfiles, clúster y puntos finales. Estos objetos son fundamentales para detectar otros dispositivos que funcionan dentro del mismo espacio operativo.

- **ZDO** (*Zigbee Device Objects* u *Objetos del Dispositivo Zigbee*): juega un papel fundamental en la configuración, definiendo el papel de un dispositivo, ya sea como coordinador, *router* o dispositivo final. Además, se encarga del mantenimiento de la red Zigbee, garantizando un funcionamiento eficiente y fiable de la misma.

2.3.2. Dispositivos de una red Zigbee

En una red Zigbee, los nodos pueden desempeñar los siguientes roles:

Coordinador

El coordinador en una red Zigbee es un componente esencial, encargado de la gestión de la red. Dado que solo hay un coordinador, este debe operar de manera ininterrumpida, sin la opción de entrar en modo reposo, con el fin de asegurar la estabilidad y la continuidad en la comunicación.

Su función principal consiste en establecer y configurar la red, configurando parámetros operativos clave como el canal de frecuencia y el identificador único de red (ID de PAN). Además, el coordinador es responsable de asignar las direcciones de red, facilitando la conexión efectiva de enrutadores y dispositivos finales. Una característica importante es su capacidad para almacenar y gestionar paquetes de datos, especialmente aquellos destinados a dispositivos finales que entran en modo reposo. En estos casos, el coordinador retiene los paquetes hasta que los dispositivos vuelven a estar activos, asegurando que la información no se pierda y que la comunicación se mantenga eficiente.

Router

Los enrutadores desempeñan un papel fundamental en la ampliación de la cobertura de la red Zigbee, actuando como nodos intermedios que posibilitan el envío, recepción y enrutamiento de información entre dispositivos distantes que no pueden comunicarse directamente entre sí. Al igual que el coordinador, tienen la capacidad de almacenar los datos destinados para nodos en reposo y deben permanecer operativos siempre.

Dispositivos Final

Un nodo final representa una versión simplificada del enrutador. Posee la capacidad de conectarse en redes existentes y facilitar el intercambio de información, sin embargo, carece de la funcionalidad de actuar como intermediario entre dispositivos.

Estos dispositivos tienen la capacidad de entrar automáticamente en un estado de reposo intermitente, lo que optimiza el consumo energético, permitiendo su funcionamiento a través de baterías. Adicionalmente, están capacitados para recopilar datos de sensores e interruptores, pero requieren de un enrutador o coordinador para su correcta integración en la red.

2.3.3. Topologías de red basadas en Zigbee

La tecnología Zigbee destaca por su capacidad para una disposición flexible de dispositivos, lo cual permite una amplia variedad de configuraciones para la implementación eficiente de redes de sensores en distintos entornos. La Figura 4 [13] presentan los tipos de topologías de red compatibles con Zigbee.

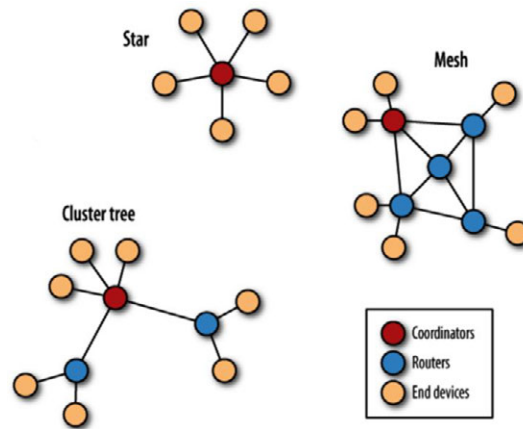


Figura 4. Topologías de redes Zigbee

Topología en estrella

La topología de estrella facilita la intercomunicación entre los dispositivos finales mediante un único controlador central denominado **coordinador de PAN**. Este dispositivo tiene la capacidad de establecer su propia red eligiendo un identificador que no esté en uso por otra red dentro de su área de cobertura. Esto permite que cada red en estrella opere de manera independiente.

Topología árbol de grupos

Esta topología adopta un enfoque híbrido al combinar una estructura de árbol con múltiples estrellas, configurando un conjunto de redes en estrella interconectadas, donde cada estrella representa un grupo o “*cluster*”. En este contexto, la mayoría de los nodos asumen el rol de *router*, proporcionando servicios de sincronización con otros nodos.

No obstante, uno de estos nodos debe desempeñar la función de coordinador del PAN. En otras palabras, este coordinador se conecta a varios *routers*, y estos, a su vez, se conectan con dispositivos finales. La principal desventaja de esta configuración radica en que, si el coordinador o alguno de los *routers* experimenta una falla, podría dejar inoperativa toda o parte de la red Zigbee.

Topología mesh

Esta topología, similar a una estructura de árbol, posiciona al coordinador en la cima de la jerarquía, conectándose con *routers* y dispositivos finales. Los *routers* también conectan con otros *routers* y dispositivos finales, actuando como sus hijos y permitiendo una expansión en múltiples niveles. La comunicación directa entre *routers* ocurre si están dentro del rango de transmisión. Una ventaja de esta topología es el ruteo dinámico, que facilita la propagación eficiente de mensajes y proporciona rutas alternativas ante fallos de enlace o congestión en la red Zigbee.

2.4. Energía Fotovoltaica

2.4.1. Historia de la Industria Fotovoltaica

La evolución de la industria fotovoltaica ha sido marcada por hitos significativos desde sus inicios a finales del siglo XIX. El efecto fotovoltaico, descubierto por primera vez por Alexandre-Edmond Becquerel en 1839, sentó las bases teóricas para la conversión directa de la luz solar en electricidad mediante materiales semiconductores. Lo descubrió tras observar el incremento de corriente en una pila electrolítica con electrodos de platino expuestos a la luz. Años más tarde, en 1920, Albert Einstein explicó el **efecto fotovoltaico** describiendo como los electrones absorben fotones de energía de la luz, logrando el Premio Nobel de Física en 1921.

Sin embargo, fue durante la década de 1950 cuando *Bell Laboratories* desarrolló la primera célula solar moderna con un rendimiento de 6% utilizando silicio cristalino. Este avance tecnológico marcó el comienzo de una expansión gradual pero constante hacia aplicaciones comerciales. Esto hizo posible que, en 1962, el satélite Telstar se convirtiera en el primer satélite comercial de telecomunicaciones en utilizar energía fotovoltaica para su funcionamiento. [14]

El interés en las células solares durante la crisis energética de la década de 1970 aceleró el desarrollo y la implementación de tecnologías fotovoltaicas. Instituciones de investigación y empresas en todo el mundo comenzaron a invertir en la mejora de la eficiencia de las células solares y la reducción de los costos de producción. Durante este periodo, también se iniciaron estudios sobre los módulos bifaciales.

A lo largo de los años y gracias a investigaciones exitosas, en 1985, las aplicaciones terrestres superaron a las espaciales, logrando hitos como las células solares con un rendimiento del 20% desarrolladas por la Universidad de *New South Wales*. [15]

La industria fotovoltaica ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, impulsada por avances en investigación y desarrollo, así como por políticas de apoyo y subsidios en muchos países. La reducción de costos de los paneles solares, junto con mejoras en su eficiencia y durabilidad, ha consolidado a la energía solar como una fuente de energía renovable viable y competitiva a nivel mundial.

2.4.2. El recurso solar.

El Sol radia isotrópicamente, es decir, con la misma intensidad en todas las direcciones. La potencia total emitida por el Sol (PTS) puede caracterizarse en cualquier punto del espacio a una distancia R del Sol mediante la **irradiancia**, que es la densidad superficial de potencia recibida sobre una superficie perpendicular al radio vector que va del Sol a ese punto. Dicha irradiancia, es lo que conocemos como "constante solar", B_0^R definida con la siguiente formula:

$$B_0^R = \frac{PTS}{4\pi R^2} \quad (1)$$

El pirheliómetro permite medir la irradiancia solar directa, estableciendo $B_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. Debido a la órbita elíptica de la Tierra, que varía su distancia al Sol, B_0 , se mide en los equinoccios, que corresponden al comienzo de la primavera (20-21 de marzo) y otoño (21-22 septiembre). Estos son momentos en los que la Tierra se sitúa en una posición orbital que hace que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre el ecuador terrestre, resultando en una radiación solar directa más intensa y uniforme.

Para entender la radiación recibida en la Tierra, es necesario conocer el **AM** (*Air Mase* o Masa de Aire), que indica el espesor relativo de la atmósfera que la luz solar atraviesa en su camino hacia la superficie terrestre. La ecuación para calcular se define como:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

Siendo θ_z el ángulo cenital, es decir, el ángulo formado entre el Sol y la vertical con respecto al observador en la Tierra.

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, se ve afectada por tres fenómenos distintos: reflexión, dispersión y absorción, los cuales se pueden observar en la Figura 5. El AM permite describir cómo estos fenómenos atmosféricos afectan la intensidad de la radiación solar. Además, ayuda a

optimiza el diseño y la orientación de los paneles solares, y también influye en los modelos climáticos y pronósticos meteorológicos al prever la radiación solar que alcanza la superficie.

- **Reflexión:** La cantidad de radiación solar reflejada depende del tipo de superficie. Por ejemplo, las nubes reflejan más radiación que los desiertos, y estos a su vez más que el mar. En promedio, la Tierra refleja aproximadamente un tercio de toda la radiación solar que recibe.
- **Dispersión:** la radiación solar, que llega del Sol con una sola dirección, al atravesar la atmósfera se divide en dos componentes: la que no resulta dispersada y mantiene la dirección del Sol, conocida como **radiación directa**, y la que resulta dispersada y llega al suelo procedente de todas las direcciones del cielo, denominada **radiación difusa**.
- **Absorción:** En condiciones de cielo claro, el 7% de toda la radiación solar que llega al borde superior de la atmósfera resulta absorbida por las moléculas del aire antes de llegar al suelo. Cuando hay nubes, la absorción puede ser mucho mayor, como claramente demuestra la sombra que producen. Este proceso de absorción contribuye al calentamiento de la atmósfera.

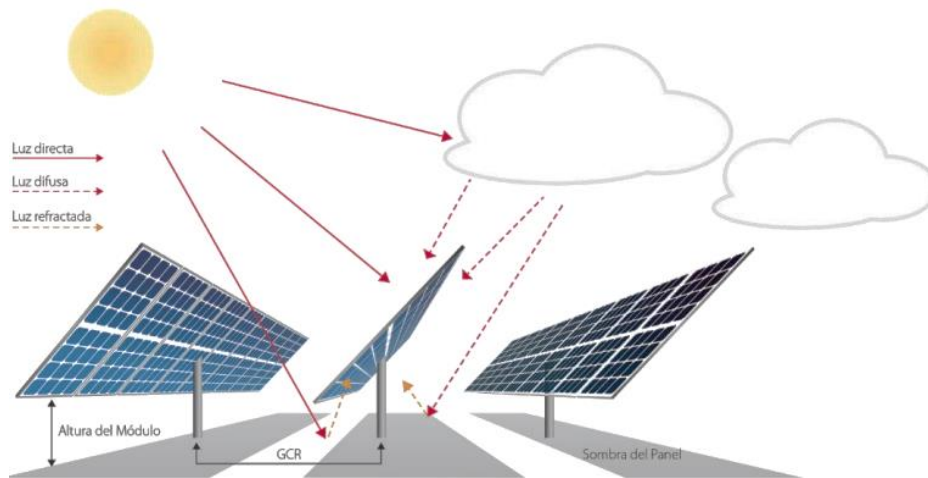


Figura 5. Comportamiento de la luz.

La naturaleza de la luz ha sido objeto de investigación a lo largo de la historia, culminando en la teoría de la **dualidad onda-partícula**. Esta teoría establece que la luz, y en general toda radiación electromagnética, puede comportarse tanto como onda como partícula. Esta dualidad fue presentada por Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico, y posteriormente desarrollada por de Broglie y otros físicos cuánticos donde la luz puede ser descrita por partículas discretas de energía llamadas **fotones**.

Cada fotón tiene una energía **E** definida como:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

Siendo:

h : Constante de Planck, $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$

c : velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

λ : Longitud de onda de la luz incidente en m

La energía de los fotones de luz solar es crucial para entender cómo se puede optimizar el diseño y mejorar la eficiencia de las células solares. Cuando la luz solar incide sobre una superficie perpendicular bajo condiciones específicas como cielo claro y atravesando una atmósfera estándar AM1.5, la irradiancia alcanza aproximadamente 1000 W/m^2 . Esta medida representa la energía total de los fotones incidentes después de considerar la absorción y reflexión en la atmósfera.

2.4.3. La célula solar

Una **célula solar** es un dispositivo semiconductor que convierte la energía luminosa en energía eléctrica. Este proceso (Figura 6) se basa en la excitación de electrones en el material semiconductor, que, al ser energizados por fotones de luz, son extraídos y dirigidos a través de un circuito externo, generando así una corriente eléctrica. Para optimizar esta extracción de electrones, se emplean contactos adecuados que permitan una eficiente transferencia de carga: el contacto n (negativo) que extrae los electrones energizados de la banda de conducción, y el contacto p (positivo) que devuelve los electrones libres a la banda de valencia después de haber entregado su energía a una carga, como una lámpara o un motor eléctrico.

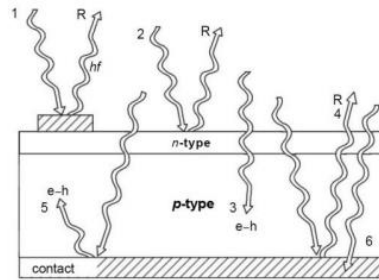


Figura 6. Funcionamiento célula fotovoltaica

Este comportamiento es similar al del **diodo**, compuesto por una unión P-N, donde el contacto N actúa como el cátodo y el contacto P como el ánodo. Para modelar una célula solar, se utiliza un circuito equivalente, mostrado en la Figura 7, que consiste en un diodo ideal en paralelo con una fuente de corriente, que representa la corriente generada por la luz incidente, denominada corriente de fotogeneración, I_{ph} .

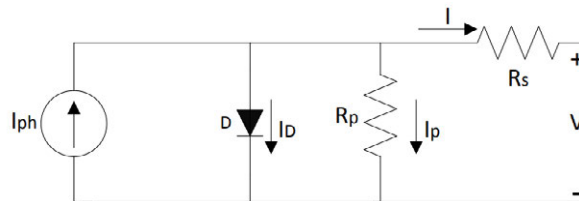


Figura 7. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica

La Ecuación 4 describe el cálculo de la corriente en una célula solar, considerando tanto los efectos ideales como los no ideales. Los términos I_D y I_p representan respectivamente la corriente que circula a través del diodo y la corriente de fuga:

$$I = I_{ph} - \underbrace{I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right)}_{I_D} - \underbrace{\frac{V + IR_s}{R_p}}_{I_p} \quad (4)$$

Siendo:

k : Constante de Boltzmann, $1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

T : Temperatura (K)

I_0 : Corriente de saturación inversa del diodo (A)

I : Fotocorriente (A)

I_{ph} : la corriente de fotogeneración (A)

q : la carga del electrón

En la Figura 8 se presenta la curva I-V (corriente-voltaje) de una célula solar representando los tres puntos característicos que describen su funcionamiento:

- I_{sc} (*Short-Circuit Current* o **Corriente de cortocircuito**): es la corriente que suministra la célula cuando se conectan directamente sus terminales, es decir, cuando la tensión es $V_{oc} = 0$. Esta situación es equivalente a conectar la célula a una carga con resistencia nula.
- V_{oc} (*Open – Circuit Voltage* o **Tensión de circuito abierto**): es la tensión entre los terminales de la célula cuando no están conectados, lo que significa que la corriente es $I_{sc} = 0$. Esta situación es equivalente a conectar la célula a una carga con resistencia infinita.
- **MPP** (*Maximum Power Point* o **Punto de Máxima Potencia**) es donde la célula solar genera la máxima potencia $V \times I$. En este punto, la célula opera con la máxima eficiencia, con corriente y tensión designadas como V_M y I_M respectivamente.

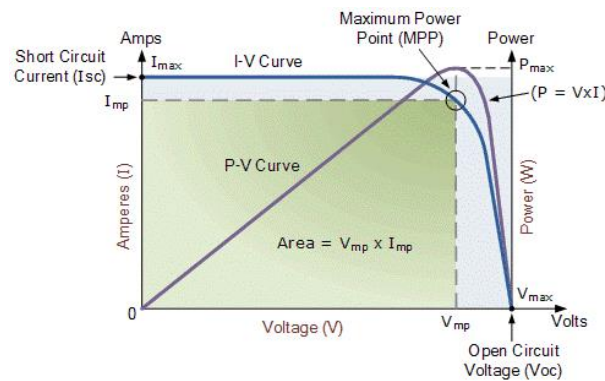


Figura 8. Curva I-V

Conocidos estos valores, podemos definir el rendimiento de la célula mediante la Fórmula 5 donde la potencia eléctrica entregada por una célula es la obtenida en el MPP, donde A es el área de la célula y G la irradiancia incidente.

$$\eta = \frac{P_{eléctrica}}{P_{luminosa}} = \frac{I_M V_M}{A \cdot G} \quad (5)$$

En una célula de silicio todos los fotones con longitudes de onda superiores a los 1,1 μm (es decir, energías menores a 1,12 eV) se pierden, y de los fotones con longitud de onda inferior a 1,1 μm (energías mayores a 1.12 eV), sólo se aprovecha de forma efectiva 1,12 eV de cada uno de ellos. Del espectro solar, buena parte del rango infrarrojo se pierde y del resto (ultravioleta y visible) se aprovecha aproximadamente la mitad. De donde se puede deducir haciendo cálculos que la máxima eficiencia teórica de una célula de silicio es del **29%** aproximadamente. [16]

2.4.4. El módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de células solares interconectadas y encapsuladas que convierten la energía luminosa en energía eléctrica de corriente continua. Este dispositivo se constituye de múltiples células solares dispuestas en serie y paralelo para aumentar tanto la tensión como la corriente de salida.

Cada célula solar puede generar corrientes diferentes debido a variaciones en la radiación solar incidente y otros factores como roturas o sombreados, lo que puede reducir drásticamente la generación de energía. Si una célula no genera corriente, toda la energía generada por las células vecinas se disipa en ella, creando un punto caliente que puede dañar el cristal o el aislamiento.

Para evitar este problema, se colocan **diodos bypass** de forma que cuando la célula está operando en condiciones normales no actúan, pero si hay una circulación de flujo de forma inversa hacen pasar el flujo por ellos evitando el deterioro de las células y el módulo en general. Idealmente, se instalaría un diodo por célula, pero por razones económicas, se agrupan varias células para compartir un diodo. Estos grupos suelen incluir entre 10 y 15 células y los diodos deben poder soportar al menos el doble de la tensión de circuito abierto y 1.3 veces la corriente de cortocircuito del módulo solar.

Adicionalmente en algunos casos, se añade un **diodo de bloqueo** en la salida del módulo para evitar que la red eléctrica pueda inyectar energía hacia los módulos, lo cual podría dañarlos irreversiblemente. La Figura 9 muestra la disposición de las células solares en un panel fotovoltaico, junto con los **diodos bypass** y los **diodos de bloqueo**.

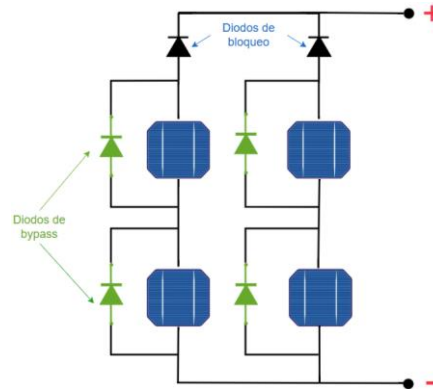


Figura 9. Distribución células en módulo fotovoltaico

Una vez conocida la disposición de las células, Figura 10 muestra las partes de un módulo fotovoltaico completo.

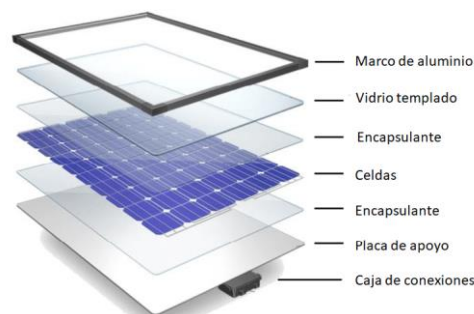


Figura 10. Componentes de un módulo fotovoltaico

- **Vidrio templado.** típicamente de 2 a 4 mm de espesor cuya función es aumentar la resistencia mecánica y térmica del módulo. Protege el módulo de las condiciones meteorológicas como lluvia, acumulación del polvo y partículas contaminantes. Además, su transparencia y, en algunos casos, capas anti-reflectantes, mejoran la captación de luz solar, lo que permite alcanzar una mayor eficiencia en el módulo fotovoltaico.
- **Encapsulado.** Como su nombre indica sirve para encapsular las células fotovoltaicas y mantenerlas en una posición fija. El material utilizado más habitual es el EVA (*Ethylene Vinyl Acetate* o Acetato de Etileno y Vinilo). En un estado inicial está en estado sólido, pero cuando se someten al proceso de laminación se transforma en un líquido con consistencia de gel.
- **Células solares o celdas:** Principalmente fabricadas con silicio cristalino (monocristalino o policristalino), las células solares están interconectadas mediante cintas de cobre. La cantidad de células en serie y paralelo determina la tensión y la corriente de salida del módulo. Los módulos suelen estar compuestos por 60, 72, 96, 120 o 144 células.

- **Placa de apoyo.** Es una estructura de soporte interna que brinda estabilidad mecánica adicional al conjunto del módulo. Garantiza que las células solares estén correctamente alineadas y protegidas contra tensiones mecánicas durante la vida útil del módulo
- **Caja de conexiones.** Es una caja sellada ubicada en la parte trasera del módulo, donde se encuentran los diodos de bypass y las conexiones eléctricas. Protege estos componentes vitales contra la entrada de humedad y contaminantes.

2.5. Módulos Bifaciales

Los **módulos bifaciales** representan una tecnología innovadora que mejora la producción de energía en comparación con los módulos monofaciales. La particularidad de estos paneles radica en que no solo absorben la radiación solar a través de su cara frontal, sino que también poseen células en la cara trasera del módulo diseñada para convertir la radiación reflejada por la superficie terrestre o **albedo**. [17] Cabe destacar que el porcentaje de radiación reflejada varía según el tipo de superficie, siendo más elevada cuando más clara sea esta.

La primera industrialización de esta tecnología bifacial fue realizada por la empresa española Isofotón, fundada en 1981 en Málaga como spin-off del IES de la Universidad Politécnica de Madrid. Liderada por el profesor Antonio Luque, Isofotón se convirtió en la primera empresa mundial en producir, comercializar e instalar en masa esta tecnología, aprovechando las investigaciones iniciadas en 1975 y convirtiéndose en un referente global en energía fotovoltaica. [18]

Desde 2018, el interés por esta tecnología bifacial ha aumentado debido a la significativa reducción de los costos nivelados de electricidad producida mediante energía fotovoltaica, que en algunos casos ya es inferior al de los combustibles fósiles. Este resurgimiento también se debe a la posibilidad de obtener mayores eficiencias mediante pequeñas modificaciones de bajo costo en tecnologías existentes, como la **PERC⁴** (*Passivated Emitter and Rear Cell* o Emisor pasivo y célula trasera).

La ganancia obtenida por un módulo bifacial, también conocida como **ganancia bifacial**, es la cantidad adicional de energía eléctrica que genera un módulo bifacial en comparación con un módulo monofacial equivalente.

Aunque en estudios iniciales se reportaron ganancias bifaciales de hasta el 50% en comparación con los módulos monofaciales orientados e inclinados de forma idéntica, estudios más recientes han analizado el rendimiento considerando factores intrínsecos como el autosombreado, la elevación, la orientación y la intensidad de la irradiancia.

En el estudio “*Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective*” [19] se demostró que, con un albedo típico de 0,25 (como el de la vegetación o el suelo), la ganancia bifacial es inferior al 10%. No obstante, esta ganancia puede aumentar al 20% con un albedo de 0,5 (como el de superficies reflectantes) y al 30% elevando el módulo 1 metro sobre el suelo, dado que la sombra proyectada por los paneles sobre la superficie se difumina cuanto mayor es la altura.

⁴ La tecnología PERC introduce una capa de óxido de aluminio seguida de una capa de aluminio en la parte trasera de la célula solar, la cual está diseñada para reducir la recombinación de portadores de carga y mejorar la reflexión de la luz no absorbida de vuelta a la célula. Esta tecnología aumentando así la eficiencia que oscila entre el 20% y el 22%.

2.6. Seguidores Solares

Cuando se trata de generar energía eléctrica a partir de la radiación solar, maximizar la captura de energía disponible es crucial. La eficiencia de los módulos fotovoltaicos depende en gran medida de cómo estén orientados con respecto a la posición del sol.

- **Paneles Fijos:** se instalan con una inclinación y orientación fijas, determinadas principalmente por la latitud del lugar y otros aspectos de diseño. Al permanecer estáticos, no pueden adaptarse al movimiento del sol a lo largo del día, lo que impacta en su eficiencia. Además, factores como el sombreado y la acumulación de suciedad también pueden reducir su rendimiento óptimo.
- **Seguidores solares:** están diseñados con el propósito de posicionar los paneles solares de manera perpendicular a los rayos solares incidentes, con el fin de capturar la mayor radiación posible a lo largo del día y durante las diferentes estaciones del año.

2.6.1. Sistemas de paneles fijos.

Los sistemas de paneles solares fijos son una solución ampliamente utilizada en proyectos fotovoltaicos para la captación de energía solar. Estos paneles, montados en estructuras estáticas, se orientan típicamente hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, con un ángulo de inclinación óptimo respecto al suelo o al tejado de un edificio.

La determinación del ángulo de inclinación óptima de los paneles solares requiere un análisis riguroso de los datos de radiación solar recopilados a lo largo de varios años, así como estimaciones de radiación mensuales considerando la ubicación geográfica exacta del proyecto. Estos datos suelen expresarse en **HSP** (Hora Solar Pico), definidas como el periodo durante el cual la energía total recibida alcanza $1kWh/m^2$.

Al recopilar los datos de radiación, es necesario distinguir entre la radiación directa y difusa para calcular con precisión el ángulo de inclinación. Para este propósito, se emplean una variedad de instrumentos de medición, que van desde heliógrafos básicos hasta dispositivos más avanzados que hacen uso de efectos termoelectricos, capaces de medir exclusivamente la radiación directa.

Además de analizar la radiación solar, es fundamental considerar otros factores como la cobertura nubosa y su variabilidad anual, que afectan directamente a la radiación recibida y, por tanto, la eficiencia de los paneles solares.

2.6.2. Tipos de seguidores solares.

Los seguidores solares se categorizan según GDL (Grados de Libertad), es decir, los ejes de movimiento rotacional que emplean. Se distinguen dos tipos: los seguidores de un eje y los seguidores de dos ejes.

Los **seguidores de un eje** rotan alrededor de un único eje para seguir el desplazamiento del sol de este - oeste durante el día. Por otro lado, los **seguidores de dos ejes** tienen la capacidad de ajustar tanto la elevación como la orientación, permitiendo el seguimiento solar tanto de este - oeste como norte-sur. Estos sistemas, equipados con sensores solares y algoritmos de seguimiento, optimizan la orientación de los paneles para maximizar la captación de radiación solar.

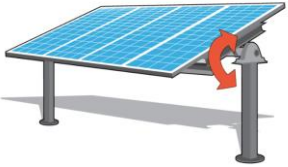



Eduardo Turillas en su proyecto de fin de grado titulado “Estudio Comparativo de la Eficiencia Energética en Seguidores Solares” analizó la eficiencia de diversos tipos de seguidores solares. Como resultado obtuvo que los seguidores de un eje y de dos ejes incrementaron la producción de energía en un 30.41% y 39.35%, respectivamente, en comparación con los sistemas estáticos. [20]

A pesar de que los seguidores solares de dos ejes logran una producción de energía superior en comparación con los seguidores de un eje, es poco común encontrar plantas fotovoltaicas equipadas con estos sistemas. Esto se debe principalmente al considerable aumento en los costos asociados, que provienen de la necesidad de estructuras más robustas y sofisticadas.

- **Estructuras móviles de un eje.**

El eje se posiciona a lo largo del meridiano verdadero norte, una línea imaginaria que se extiende desde el Polo Norte hasta el Polo Sur, lo que facilita una captación óptima de la luz solar. Se diferencian 4 tipos de seguidores solares uniaxiales, cuyas diferencias se detalla en la Tabla 2. [21]


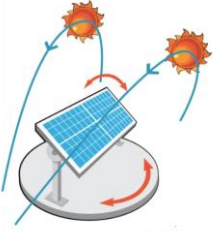
Tabla 2. Descripción de seguidores solares uniaxiales.

<p style="text-align: center;">HSAT (<i>Horizontal Single – Axis Tracker</i> o Seguidor Eje Horizontal)</p> <p>El eje de rotación es paralelo al suelo y realiza un movimiento de rotación de este a oeste a lo largo de su eje, siguiendo la trayectoria normal del Sol. Esta configuración es la opción más utilizada debido a su bajo coste. [22]</p>	 <p style="text-align: center;">Figura 11. Seguidor de Eje Horizontal</p>
<p style="text-align: center;">VSAT (<i>Vertical Single - Axis Tracker</i> o Seguidor de Eje Vertical)</p> <p>El eje de rotación es perpendicular al suelo y realiza un movimiento de este a oeste durante todo el día. Esto conlleva la necesidad de estructuras de soporte con alta integridad estructural para sostener el panel debido al aumento en las cargas de viento. En términos de producción de energía los VSAT superan a los HSAT en altitudes más elevadas, entre 40° y 55°. [23] Sin embargo, requieren más superficie de terreno para evitar sombreados. [24]</p>	 <p style="text-align: center;">Figura 12. Seguidor de Eje Vertical o Azimut</p>
<p style="text-align: center;">TSAT (<i>Tilted Single – Axis Tracker</i> o Seguidor de Eje Inclinado)</p> <p>Es una combinación entre HSAT y VSAT. Se refiere a los seguidores cuyos ejes de rotación presentan una inclinación entre la vertical y la horizontal con respecto al suelo. Aunque estos seguidores pueden seguir el movimiento diario del sol este – oeste, ajustándose a la latitud, su capacidad para seguir el movimiento anual norte - sur está limitada a un ángulo de 23,5° en relación con la normal a la superficie. [25] Los ángulos de inclinación suelen limitarse para reducir el perfil de viento.</p>	 <p style="text-align: center;">Figura 13. Seguidor de Eje Inclinado</p>
<p style="text-align: center;">PSAT (<i>Polar Aligned Single-Axis Tracker</i> o Seguidor Polar)</p> <p>Es una variación del TSAT. En esta implementación el ángulo de inclinación del módulo de seguimiento se iguala a la latitud en la que se instala el seguidor. Debido a esta razón, el eje de rotación del seguidor está alineado con el eje de rotación de la Tierra. Estos seguidores rara vez se utilizan debido a su perfil de viento relativamente alto.</p>	 <p style="text-align: center;">Figura 14. Seguidor Polar</p>

- Estructuras móviles de dos ejes

Los sistemas de seguimiento de doble eje, definidos en la Tabla 3, cuentan con dos grados de libertad, lo que implica la capacidad de movimiento tanto en un eje horizontal (este-oeste) como en vertical (norte- sur). Como resultado, estos seguidores tienen el potencial de maximizar la producción de energía al exponer los paneles directamente a la luz solar durante la mayor cantidad de horas posibles.

Tabla 3. Descripción de seguidores solares doble eje.

TTDAT (<i>Tip-Tilt Dual-Axis Tracker</i> o Seguidores de doble eje Tip-Tilt)	
<p>Suelen alinear sus ejes con la dirección este-oeste o norte-sur. Los paneles solares se montan sobre la punta de un poste sólido y alto. El movimiento este-oeste del panel solar se controla girando el conjunto alrededor de la parte superior de la columna. Esto se logra mediante el montaje de los paneles sobre un cojinete giratorio, con un soporte en forma de T o H que facilita la rotación vertical de los paneles y actúa como los principales puntos de fijación del grupo. El rodamiento permite que el conjunto se mueva horizontalmente (en acimut) alrededor del eje vertical, mientras que el soporte proporciona la inclinación vertical. [21] [24]</p>	 <p>Figura 15. Seguidores de doble eje Tip-Tilt</p>
AADAT (<i>Azimuth-Altitude Dual-Axis Tracker</i> o Seguidor de dos ejes Azimut-Altitud)	
<p>El eje primario, identificado como eje azimutal, se encuentra en posición vertical con respecto al suelo. De manera complementaria, el eje secundario, denominado eje de elevación, suele situarse perpendicular al eje primario. Este diseño de seguidor es capaz de soportar una matriz más extensa de paneles solares fotovoltaicos en comparación con el TTDAT. En este caso, la matriz solar no se sustenta en la parte superior de la estructura vertical; en su lugar, se posiciona entre un anillo horizontal amplio y el eje primario mediante una estructura radial. Esta disposición posibilita que la matriz ejecute movimientos tanto horizontales (azimutales) como verticales (de elevación o altitud). [21] [26] [27]</p>	 <p>Figura 16. Seguidor de dos ejes Azimut-Altitud</p>

2.7. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Dentro del marco de este proyecto, resulta fundamental abordar en detalle la teoría y funcionamiento de los **SFA** (*Stand-Alone Photovoltaic Systems* o Sistemas Fotovoltaicos Autónomos) para una comprensión completa de la selección y la implementación de los componentes que constituirán la fuente de energía del sensor de radiación.

La gran parte de los dispositivos electrónicos utilizados en la vida cotidiana son dispositivos que requieren suministro constante de energía para funcionar de manera eficiente. Dispositivos como *smartphones*, ordenadores portátiles o *tablets* emplean baterías recargables que almacenan energía eléctrica de manera temporal, permitiendo utilizar dispositivos cuando no se dispone de una conexión permanente a la red eléctrica.

A la hora de la generación de energía a través de módulos fotovoltaicos en entornos donde no existe acceso a la red eléctrica o se busca independencia energética, como en zonas rurales o lugares remotos, surge la necesidad de utilizar **SFA**. Estos sistemas dependen exclusivamente de la radiación solar como fuente principal de generación de energía eléctrica.

Dado que la radiación solar es variable a lo largo del día, los SFA deben asegurar un suministro de energía constante para las cargas conectadas. Para superar esta limitación, se incorporan sistemas de almacenamiento, generalmente baterías. A continuación, se presentan los esquemas de conexiones de los equipos que componen un SFA. Como se puede observar en Figura 17, en un SFA diseñado para dispositivos que consumen corriente continua, solo se requieren los módulos fotovoltaicos, el regulador de carga y las baterías.

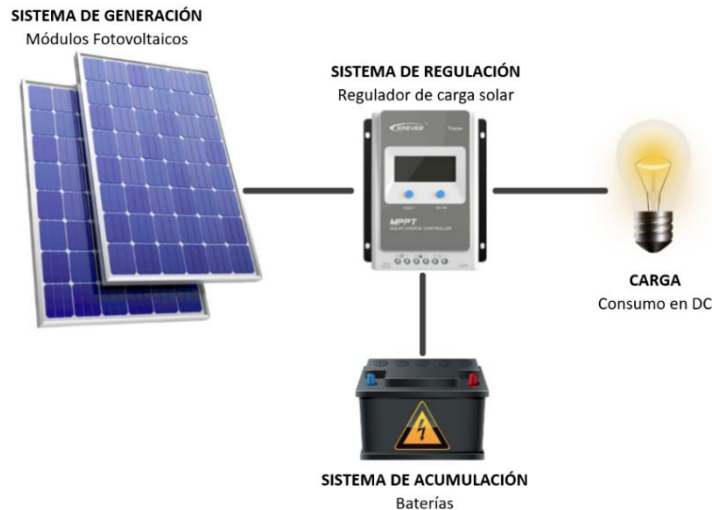


Figura 17. SFA para carga DC

Sin embargo, cuando la carga está compuesta por equipos que funcionan con corriente alterna, es necesario introducir un componente adicional, **el inversor**.

El inversor es un dispositivo electrónico que transforma una corriente continua de entrada en una corriente alterna de salida. Funciona mediante el uso de interruptores electrónicos, como transistores o tiristores, para modular la tensión y frecuencia de la señal de salida.

1.1.1. Componentes Principales SFA de Carga DC.

Tras analizar en detalle el funcionamiento y la importancia de los módulos fotovoltaicos en la generación de energía en las secciones anteriores, este apartado se enfoca en los componentes adicionales que conforman un SFA de carga de DC, dado que todos los elementos del sistema funcionarán únicamente con este tipo de corriente.

Baterías [28]

A pesar de que los módulos solares son el elemento principal de los SFA, son las baterías las que presentan mayores preocupaciones al diseñador debido a su vida útil y su coste económico. Por lo tanto, es esencial considerar cuidadosamente la gestión de las baterías para garantizar un rendimiento óptimo y una larga durabilidad de todo el sistema fotovoltaico autónomo.

A la hora de seleccionar una batería adecuada, es fundamental considerar una serie de aspectos clave. En primer lugar, se debe evaluar la capacidad de la batería en términos de almacenamiento de energía para asegurar el funcionamiento continuo del sensor de radiación en el contexto de este proyecto. Además, es importante que la tensión de la batería sea compatible con el resto de los dispositivos y con el sistema en general. También se debe considerar la profundidad de descarga de la batería.

Otro aspecto que considerar es si se requiere una batería recargable. En este contexto, resulta fundamental evaluar el ciclo de vida de la batería, que indica cuántas veces puede ser recargada y descargada sin degradar significativamente su rendimiento.

Regulador de carga solar [29]

En sistemas de carga de baterías, es fundamental incorporar un dispositivo específico para gestionar el proceso de carga y descarga de las baterías, comúnmente denominado **regulador de carga**. Este componente tiene un impacto significativo en la vida útil de la batería y en el funcionamiento global del sistema. Sus funciones principales incluyen:

- Evitar sobrecargas de las baterías.
- Actuar como limitador de tensión, evitando una descarga excesiva de las baterías.
- Ajustar la tensión de carga de las baterías.
- Proporcionar información sobre el estado de carga de las baterías.

En sistemas de carga donde la energía fotovoltaica es la principal fuente de alimentación, se emplea un tipo particular de regulador conocido como **regulador de carga solar**. Aquí, se distinguen dos tipos principales:

El **regulador MPPT** (*Maximum Power Point Tracking* o Seguimiento del punto de Máxima Potencia) se basa en un convertidor DC – DC diseñado para reducir las tensiones elevadas generadas por los paneles solares y ajustarlas a una tensión de carga óptima para las baterías.

El **regulador PWM** (*Pulse Width Modulation* o Modulación de Ancho de Pulso) es una tecnología más sencilla en comparación con el regulador MPPT. Su funcionamiento implica la conexión directa del panel solar a la batería mediante un interruptor. El regulador PWM hace que el panel solar funcione a la tensión de la batería en cada etapa de carga, es decir, cuando la tensión de la batería sea de 11V, la tensión de operación del panel solar se situará en torno a dicha tensión.

La distinción principal entre los reguladores MPPT y PWM reside en la capacidad del regulador MPPT para monitorear la potencia máxima generada por los paneles solares y ajustarla según las necesidades de carga de la batería. Esto asegura un aprovechamiento óptimo de la energía solar disponible en cualquier momento. Por consiguiente, la elección de un regulador MPPT claramente proporciona un rendimiento más eficiente en un sistema solar.

1.1.2. Dimensionado de un SFA

Al abordar el diseño de un SFA en el marco de este proyecto, es esencial seguir una serie de pasos para asegurar que la fuente de alimentación del sensor de radiación cumpla con todas las especificaciones requeridas. En esta sección, se detallarán estos pasos, destacando el uso exclusivo de corriente continua y prescindiendo, por lo tanto, de la necesidad de un inversor.

1.1.2.1. Estimación del consumo

A la hora de abordar el dimensionado de un SFA, uno de los pasos más críticos es el cálculo aproximado del consumo eléctrico de los distintos dispositivos que conformaran la carga del sistema. Para poder hacer una estimación del consumo lo más precisa posible es necesario conocer la energía consumida de cada dispositivo de manera individual, es decir, analizar la potencia consumida en cada modo de funcionamiento, así como el tiempo medio de uso de cada uno de ellos.

Una vez son conocidos todos los datos de los dispositivos que conformaran el sistema, podemos calcular el consumo media diario, E_{md} , que representa la cantidad de electricidad consumida promedio en un día cualquiera medida en $Wh/día$.

Diferenciando entre dispositivos alimentados por corriente alterna y continua, su cálculo se realiza utilizando las siguiente formulas:

$$E_{md,AC} = \sum P_{AC_i} \cdot t_{d_i} \quad (6)$$

$$E_{md,DC} = \sum P_{DC_i} \cdot t_{d_i} \quad (7)$$

Siendo:

$E_{md,AC}$: Energía consumida en AC (Wh/día)

$E_{md,DC}$: Energía consumida en DC (Wh/día)

P_{AC_i}, P_{DC_i} : Potencia nominal (W)

t_{d_i} : Tiempo diario de uso (h/día)

Para determinar el consumo medio diario total del sistema, se consideran los rendimientos de las diferentes etapas, utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{md_{total}} = \frac{E_{md,DC} + \frac{E_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{con}} \quad (8)$$

Siendo:

$E_{md_{total}}$: Consumo medio diario total (Wh/día)

η_{bat} : Rendimiento de la batería

η_{inv} : Rendimiento del inversor

η_{con} : Factor de rendimiento de los conductores.

Para calcular el consumo total en amperios hora (Ah), es necesario determinar la tensión del sistema, un factor que no solo impacta en la eficiencia y en cómo se distribuye la energía, sino que también influye en la capacidad de almacenamiento y la elección de los dispositivos que se integraran con el sistema. La conversión de Wh/día a Ah se lleva a cabo utilizando las siguientes fórmulas:

$$Q_{total} = \frac{E_{md_{total}}}{V_{sist}} \quad (9)$$

Siendo:

Q_{total} : Carga diaria del sistema (Ah)

$E_{md_{total}}$: Consumo medio diario total (Wh/día)

V_{sist} : Tensión del sistema (V)

1.1.2.2. Dimensionado del generador fotovoltaico

El dimensionamiento del GFV (Generador Fotovoltaico) se lleva a cabo considerando dos factores esenciales: el consumo eléctrico de la carga que se desea alimentar y la cantidad de radiación solar disponible en el lugar donde se instalará el sistema. La elección de las fórmulas y expresiones específicas a utilizar dependerá del método de cálculo seleccionado para este propósito.

- **Posición óptima de los módulos fotovoltaicos**

Una vez conocido la demanda energética de la carga, el siguiente paso es determinar la inclinación y orientación óptima de la superficie receptora donde se ubicarán los módulos fotovoltaicos. A pesar de la capacidad de los módulos para generar electricidad en ausencia de luz solar directa, se busca que la radiación solar incida perpendicular al plano del módulo con el fin de obtener un máximo aprovechamiento del recurso solar disponible. La disposición del módulo fotovoltaico está determinada por dos ángulos específicos representados Figura 18.

- **Ángulo de inclinación:** se refiere al ángulo de elevación de los paneles solares con respecto a la horizontal. Este parámetro determina la inclinación óptima del módulo para maximizar la captura de radiación solar directa durante todo el año.
- **Ángulo de orientación:** es el parámetro que define la dirección hacia la cual se posicionan los paneles solares en relación con los puntos cardinales. En la mayoría de los casos, se busca que los paneles estén orientados hacia el sur (en el hemisferio norte) o hacia el norte (en el hemisferio sur) para recibir la máxima exposición a la radiación solar durante el día.

Hay que tener en cuenta que ambos ángulos, tanto el de inclinación como orientación, varían según la ubicación geográfica y estación del año (primavera, verano, invierno, otoño) debido a las variaciones en la posición del sol diarios y anuales.

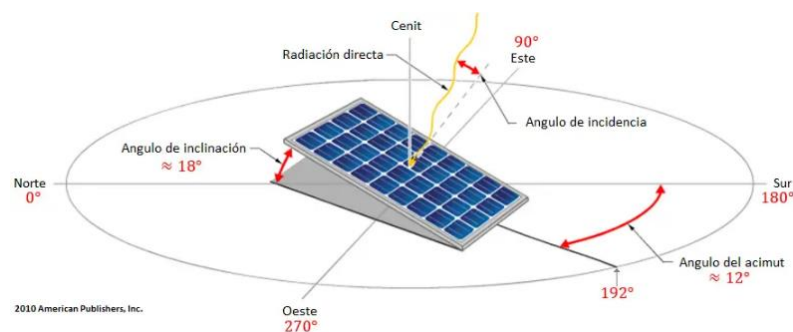


Figura 18. Ángulos sobre módulo fotovoltaico.

Para calcular el ángulo óptimo de inclinación de un panel solar, es crucial identificar el mes con el peor escenario de luz solar, considerando tanto la baja insolación como una posible alta demanda energética, ya que el sistema debe diseñarse para estas condiciones. La orientación óptima es hacia el sur, y la inclinación óptima se puede determinar usando el criterio de máxima captación energética anual o, más comúnmente, el criterio del mes crítico o mes peor.

- **Cálculo de la inclinación y tamaño óptimos de los módulos fotovoltaicos.**

A la hora de establecer la inclinación y el tamaño óptimo de los módulos fotovoltaicos se dispone de una variedad de enfoques y métodos de análisis. El enfoque de este proyecto se centrará en la evaluación de estos parámetros para mejorar la eficiencia del generador fotovoltaico. Con este propósito, se ha de seleccionar un regulador adecuado que permita al generador fotovoltaico operar en MPPT en STC (*Standard Test Conditions* O Condiciones estándares de medida). En puntos posteriores, se profundizará más sobre el regulador de carga solar.

El primer paso en el cálculo del ángulo de inclinación es determinar la ubicación geográfica del generador fotovoltaico. Una vez identificada esta ubicación, es esencial obtener información sobre la radiación solar global, G_d , que incide sobre el generador fotovoltaico en dicha localización. Normalmente, estos datos se representan en tablas que registran la G_d en intervalos mensuales, evaluando diversas inclinaciones.

En este proyecto, es fundamental considerar que los sensores se implementarán en una maqueta equipada con seguidores bifaciales permitiendo la optimización del ángulo de inclinación de los paneles solares para maximizar la captación de radiación solar.

1.1.2.3. Dimensionado del sistema de acumulación

Como se ha mencionado anteriormente unos de los aspectos más críticos a la hora de dimensionar un SFA es el dimensionado del acumulador, es decir, la batería. Para definir el tamaño adecuado entran en juego dos conceptos importantes:

- **Máxima Profundidad de Descarga:** es el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador para no dañar su capacidad o su vida útil. Se expresa generalmente en términos de un porcentaje con respecto a la capacidad nominal de la batería. En baterías de plomo - acido un valor adecuado de este parámetro es del 50%, mientras que en baterías de ion-litio se habla de un 95% o más de su capacidad nominal. [30]
- **Días de autonomía:** es el periodo de tiempo durante el cual el sistema de acumulación es capaz de satisfacer las demandas de consumo en ausencia de fuente de generación, en el contexto sin contar con radiación solar directa.

La capacidad de la batería es la cantidad de energía eléctrica que es capaz de almacenar para asegurar los días de autonomía. Generalmente se expresa en amperios-hora (Ah) y la expresión para hallar su valor es:

$$C_n = \frac{Q_{total} \cdot N}{P_d} \quad (10)$$

Siendo:

C_n : capacidad nominal de la batería (Ah)

Q_{total} : Carga diaria del sistema (Ah)

N : número de días de autonomía

P_d : Máxima profundidad de descarga de la batería

1.1.2.4. Dimensionado del regulador

A la hora de dimensionar un regulador es necesario conocer la corriente máxima que va a circular por el sistema. Para ello, es esencial conocer la corriente que produce el generador fotovoltaico, y la corriente que consume la carga, la máxima de estas dos corrientes será la que determinará que regulador necesitará el sistema.

$$I_{regulador} = \max (I_{GFV_{SC}}, I_c) \quad (11)$$

La máxima intensidad de corriente que puede producir el generador es la corriente de cortocircuito del generador:

$$I_{entrada} = I_{GFV_{SC}} = I_{sc} \cdot N_p \quad (12)$$

Siendo:

$I_{GFV_{SC}}$: Corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico (A)

I_{sc} : Corriente de cortocircuito del módulo (A)

N_p : Número de ramas en paralelo del generador

La intensidad que consume la carga se determina teniendo en cuenta la corriente máxima de la carga:

$$I_{salida} = I_c = \frac{P_{DC}}{V_{bat}} \quad (13)$$

Siendo:

I_c : Corriente que consume la carga (A)

P_{DC} : Potencia de las cargas en DC (W)

η_{inv} : Rendimiento del inversor

V_{bat} : tensión nominal de la batería (V)

3. Especificaciones y restricciones de diseño

El mercado fotovoltaico está evolucionando hacia el uso de módulos bifaciales, gracias a su capacidad de aumentar la generación de energía al aprovechar ambas caras del panel. Esta tecnología permite captar no solo la radiación solar directa, sino también el albedo. Sin embargo, la variabilidad en la intensidad y el ángulo de la luz reflejada, junto con las diferencias en los patrones de reflexión debido a diversos tipos de superficies, dificultan la tarea de medir con exactitud cuánta de la energía captada proviene de la luz reflejada por la superficie y cuánta es producto de la radiación solar directa.

En un proyecto titulado “Control y monitorización de un seguidor solar de un eje para el estudio de la ganancia energética de módulos fotovoltaicos bifaciales” desarrollado por Sandra Ures [31], se desarrolló un sensor de radiación para abordar este desafío permitiendo medir con precisión la contribución del albedo.

Aprovechando los avances tecnológicos y como continuación de ese trabajo, se plantea rediseñar los sensores de radiación incorporando tecnologías de IoT, eliminando la necesidad de cables y facilitando su instalación una maqueta desarrollada por el ISI del Instituto de Energía Solar, mostrada en la Figura 19, la cual sirve como plataforma para realizar ensayos.



Figura 19. Maqueta del ISE

Gracias al empleo del IoT, se espera ampliar la cobertura y aumentar la cantidad de datos recopilado sin la necesidad de modificar la maqueta. Además, para mejorar la eficiencia y la autonomía del sistema, los nuevos sensores estarán alimentados por baterías recargables que se cargarán mediante la energía generada por los propios módulos fotovoltaicos que contiene el sensor.

Con el objetivo de obtener los resultados esperados se definen las siguientes especificaciones y restricciones de diseño:

- El sensor de radiación deberá cumplir con unas dimensiones máximas de **212 mm x 112 mm** para asegurar su correcto montaje en la maqueta.
- Entre el borde de la PCB y los módulos fotovoltaicos deberá haber una **separación mínima de 2 mm**, debido a los rieles mecánicos de sujeción de los sensores.
- El sensor de radiación deberá incorporar el mayor número de sensores posible dentro de las limitaciones físicas de la PCB. Se estima que, dadas las dimensiones de la placa, se podrán integrar entre **15 y 30 sensores**, garantizando una alta densidad de puntos de medición que permitirá un análisis detallado del albedo.

- Los sensores estarán alimentados por **baterías recargables** que se cargarán a través de los **módulos fotovoltaicos integrados** en cada sensor. Esto garantizará la independencia energética del sistema.
- La interconexión inalámbrica entre los sensores se establecerá mediante protocolos consolidados en el mercado, para garantizar una conexión confiable y segura.
- Los sensores deben ser capaces de adquirir, procesar y analizar los datos recogidos sobre la radiación solar. Esto implica el uso de un **microprocesador** que gestione los datos de forma eficiente, permitiendo su almacenamiento y procesamiento local.
- El sistema deberá entregar **mediciones precisas** que permitan realizar un estudio detallado de la uniformidad o variabilidad de la radiación recibida en cada sensor.
- El software y los componentes utilizados en el sistema deberán estar basados en **soluciones de código abierto** para facilitar su implementación, escalabilidad y mantenimiento.
- El diseño debe permitir la **ampliación número de sensores de irradiancia** sin comprometer el rendimiento del sistema. Cada nuevo módulo debe ser capaz de integrarse en la red inalámbrica sin necesidad de modificaciones en el software base,
- Se promoverá el diseño modular y el uso de componentes estándar disponibles en el mercado durante toda la vida útil del proyecto, lo que facilitará su mantenimiento y reemplazo en caso necesario.
- Se desarrollará un software específico para el monitoreo de la red de sensores. Este software deberá ofrecer una **interfaz gráfica intuitiva** que permita gestionar y visualizar los datos recogidos.

4. Descripción de la solución propuesta

La solución propuesta para superar las limitaciones en la medición del albedo supone el despliegue de una red de sensores de radiación en la maqueta desarrollada por del IES. Esta maqueta posicionará estratégicamente los sensores inalámbricos con el objetivo de medir el albedo en distintos momentos del día.

Una decisión clave en el diseño de estos sensores es la utilización de comunicación inalámbrica mediante el protocolo Zigbee, lo cual permite eliminar los cables, simplificar la instalación y facilitar la expansión del número de sensores.

Para garantizar una operación autónoma, los sensores están equipados con baterías recargables. Estos sensores disponen de módulos en ambas caras: los módulos ubicados en la cara frontal capturan la luz solar directa para recargar las baterías, mientras que los módulos en la cara trasera se dedican a medir el albedo. La cara trasera cuenta con un mayor número de módulos, lo que permite tener diferentes configuraciones y realizar un análisis más detallado de la no uniformidad de la radiación reflejada en la superficie en cada punto del módulo.

El control y la gestión de los sensores se realizan mediante el coordinador de la red Zigbee, que comanda el inicio de las mediciones en los diferentes sensores operativos de la red e indica el modo de operación. Para facilitar el control de la red, se diseña una interfaz gráfica de usuario que permite iniciar la recolección de datos, visualizar en tiempo real los niveles de radiación y exportar la información para análisis posteriores.



En este apartado, se detallan las decisiones tomadas para desarrollar el sensor de radiación, así como la descripción del software específico implementado en los dispositivos que conforman la red Zigbee.

4.1. Sensor de Radiación Inalámbrico

4.1.1. Módulos Fotovoltaicos

Considerando las dimensiones del módulo de la maqueta, se han elegido módulos monocristalinos del fabricante Anysolar para el sensor de radiación que permiten integrar 15 o 30 módulos en la cara de albedo. Específicamente, se han seleccionado las referencias detalladas en la Tabla 4, donde se presentan características destacables.

Tabla 4. Características Técnicas Módulos Fotovoltaicos del Sensor de Radiación.

SM141K07L [32]		KXOB121K04F-TR [33]	
$V_{oc} = 4.84 V$	$I_{sc} = 58.6 mA$	$V_{oc} = 2.76 V$	$I_{sc} = 50,2 mA$
$V_{mmp} = 3.91 V$	$I_{mmp} = 55.1 mA$	$V_{mmp} = 2.23 V$	$I_{mmp} = 47.2 mA$
			
Figura 20. Módulo SM141K07L		Figura 21. Módulo KXOB121K04F-TR	

Tras un envío a fabricación del módulo compuesto por ambas células, surgieron limitaciones de espacio al colocar el sensor en la maqueta. Por ello, se opta diseñar dos PCB diferentes, cada una compuesta por un solo tipo de módulo. La elección de distintos tamaños de módulos se realiza con el propósito de tener la flexibilidad necesaria para configurar diversas opciones al caracterizar la contribución del albedo.

Para realizar las pruebas de este proyecto, se empleará la PCB que incorpora los módulos SM141K07L.

4.1.2. Dispositivo De Transmisión De Datos Inalámbrica. Módulo Xbee.

Desde su lanzamiento al mercado, la tecnología Zigbee ha experimentado una notable aceptación, ofreciendo soluciones tanto en el ámbito industrial como doméstico.

En noviembre del año 2007, ZibBee Alliance hizo pública la *ZigBee Cluster Library* bajo el nombre comercial de ZigbeeHA (*ZigBee Home Automation*), una especificación que define el conjunto de comandos y atributos estandarizados utilizados en los dispositivos ZigBee.

La empresa conocida hoy como Digi, tomó este estándar y se enfocó en brindar a los desarrolladores una herramienta sencilla de utilizar y robusta, creando XBee.

Los **módulos Xbee**, son transceptores de radio que operan en diferentes protocolos de comunicación, sin embargo, su fama aparece por ser los más populares y usados para la creación de redes Zigbee. Dentro de los módulos XBee enfocados a este protocolo se distinguen las siguientes familias:

- **Digi Xbee 802.15.4 (Serie 1):** Representa la primera generación de módulos Xbee fabricados.
- **Digi Xbee Zigbee (Serie 2):** Se destaca como la versión mejorada de la Serie 1. Integra el chip SiliconLabs EM357 para una eficiencia energética superior y posibilita actualizaciones de firmware inalámbricas.
- **Digi XBee 3 Zigbee:** Elimina la necesidad de un controlador externo, permitiendo nodos finales inteligentes con MicroPython. Además, incorpora *Bluetooth Low Energy* para funciones de balizamiento, conexión a sensores *Bluetooth* y configuración a través de Digi XBee Mobile.

Cada familia incluye la versión estándar XBee, diseñada para aplicaciones de alcance medio que necesitan un menor consumo de energía y una reducción de costos. Por otro lado, la versión XBee PRO destaca por su capacidad de largo alcance, siendo adecuada para distancias de 3 km a 105 km, pero requiere un mayor consumo.

Considerando las distintas opciones disponibles, en este proyecto se elige la familia **XBee3** debido a la integración de un microcontrolador, lo que reduce la dependencia de componentes externos y facilita la adquisición de datos.

La Figura 22 muestra los tipos de módulos de esta serie, clasificados por tamaño y método de montaje: micromontaje, agujero pasante y montaje en superficie.

Los módulos XBee proporcionan una gran variedad de opciones de antenas, cada una diseñada para satisfacer diferentes necesidades. Dentro de la serie XBee3, se encuentran las siguientes: [34]



Figura 22. Familia de módulos Xbee3

- **CHIP.** Antena montada directamente en el módulo XBee, utiliza un chip de cerámica plano. Destacada por su utilidad en diseños extremadamente compactos.
- **PCB.** La antena de PCB se forma directamente en el módulo XBee mediante trazas conductoras. Funciona de manera análoga a una antena de cable, proporcionando un rendimiento superior a la antena chip. A pesar de su eficacia mejorada, sigue permitiendo una reducción de espacio.
- **RF PAD.** Algunos proyectos requieren una antena o un conector integrado en la placa del dispositivo anfitrión. Para ello existen los módulos Digi XBee con un simple pad de RF. Al soldar el módulo a la placa de circuito impreso del dispositivo anfitrión, se conecta automáticamente a la antena o al conector preexistente del mismo.
- **U. FL** (*Ultra Miniature Coaxial Connector with a Female Contact* o Conector Coaxial Ultraminiatura con Contacto Femenino). Esta opción es adecuada cuando se requiere que la antena esté ubicada fuera del encapsulado del XBee. Se utiliza comúnmente con antenas dipolo, proporcionando flexibilidad en la disposición de la antena externa.
- **RP-SMA** (*Reverse Polarity SubMiniature Version A* o Versión A de Subminiatura con Polaridad Inversa). Conector más robusto que permite la conexión de una antena externa cuando se necesita ubicar la antena fuera del encapsulado del XBee. Aunque es más grande que U. FL, su solidez la hace adecuado para aplicaciones donde la resistencia y el rendimiento son fundamentales.

Después de examinar las distintas antenas disponibles y considerando el tipo de montaje de los dispositivos dentro de la familia Xbee3, se selecciona el módulo **XB3-24Z8PT**. Las características más destacables de este módulo se resumen en la Tabla 5 justificándolas con las restricciones del diseño.

Tabla 5. Características Técnicas módulo Xbee3 seleccionado.

XB3-24Z8PT		
TIPO DE MONTAJE	Orificio pasante	El montaje a través de orificio proporciona una mayor estabilidad mecánica y facilita el proceso de programación del dispositivo al poder extraerlo fácilmente de la PCB donde se integra.
ANTENA	Antena PCB incorporada en el módulo	Reduce la complejidad del diseño y minimiza el espacio necesario en la PCB
CONSUMO DE ENERGÍA	Bajo	Para maximizar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de la batería
PROGRAMACIÓN	Compatibilidad con Micropython	La compatibilidad con Micropython ofrece una amplia gama de opciones de programación, lo que facilita la transmisión de datos entre dispositivos.
INPUT ANALÓGICAS	4 ADC	Permiten la lectura simultánea de múltiples señales analógicas permitiendo medir los valores de radiación de los diferentes módulos.
INPUT/OUTPUT DIGITALES	15 DIO	Los 15 DIO proporcionan una gran flexibilidad para controlar y monitorear diversos dispositivos digitales. En el sensor se utilizarán para conmutar los canales de los multiplexores incorporados y control de leds indicadores.

4.1.3. Sistema De Almacenamiento. Batería.

Dentro de los criterios a considerar para la selección de una batería, una de las primeras decisiones a tomar está relacionada con las dimensiones de la pila. Hoy en día existen varios tipos de pilas entre las cuales se encuentran las pilas de botón, cilíndricas y rectangulares, con diferentes tamaños, capacidades y dimensiones, como se observa en la Figura 23.



Figura 23. Tipos de pilas según su tamaño.

En el caso del diseño de un sensor que presenta restricciones de tamaño, la elección más apropiada es la pila de botón, debido a su forma compacta y dimensiones reducidas. Sin embargo, suelen tener una capacidad inferior en comparación con otros tipos de pilas. Para garantizar una mayor autonomía y un funcionamiento sostenido en el tiempo del sensor, se opta por una pila de botón recargable que pueda soportar la demanda energética del dispositivo.

Existen dos tipos principales de pilas de botón según su composición química:

- **Pilas de botón de ion- litio:** se caracterizan por tener una tensión nominal más alta, generalmente de 3.6V o 3.7V, y ofrecen una capacidad variable, ciclo de vida prolongado y baja autodescarga.
- **Pilas de botón NiMH:** tienen una tensión nominal de 1.2V, una capacidad y ciclo de vida también variables, pero pueden presentar una tasa de autodescarga ligeramente más alta que las de ion-litio.

Considerando las especificaciones del dispositivo Xbee3, el cual demanda una tensión de alimentación en el rango de 2.1V a 3.6V, es necesario optar por una pila de botón de ion litio debido a sus 3.6V de tensión nominal, que la hace completamente compatible con el dispositivo.

La Tabla 6 muestra las capacidades de diversas opciones de pilas de ion-litio, concluyendo que la pila **LIR2450** es la elección más adecuada dada su capacidad de 120mAh [35] y su tensión nominal de 3.6V. Para facilitar la integración con el sensor, se utiliza una porta pilas compatible con montaje SMD (*Surface Mount Device* o Dispositivo de Montaje en Superficie).

Tabla 6. Comparativa de pilas Ión Litio del mercado

	V_{bat}	C_n
LIR2450	3.6V	120mAh
LIR1254	3.6V	45mAh
LIR2025	3.6V	25mAh

La Tabla 7 muestra las características técnicas de la pila LIR2450, especificando que para recargar la batería se requiere un voltaje de carga de 4,2V y una corriente de 24mA. Estos parámetros son fundamentales, ya que determinarán la elección adecuada del regulador de carga.

Tabla 7. Características técnicas pila LIR2450

Capacidad	120mAh
Voltaje Nominal	3.6V
Especificaciones Carga	
Voltaje de Carga	4.2V
Corriente de Carga	24mA
Descarga Batería	
Cortar el voltaje de descarga	2.75V
Ciclos de Vida	>500 ciclos 0.2mA descarga

4.1.4. Multiplexor Analógico

Un multiplexor es un dispositivo capaz de seleccionar una de múltiples entradas analógicas y encaminarla hacia su salida, que es única. Consta de un conjunto de interruptores analógicos cuyas salidas están conectadas a un mismo punto, y de un circuito de control capaz de seleccionar y activar el interruptor deseado a partir de un código digital.

Cuando las señales a conmutar no son unipolares, sino diferenciales, se pueden emplear modelos que conmutan simultáneamente dos líneas de entrada a dos líneas respectivas de salida. En la Figura 24, se observan las diversas arquitecturas de los diferentes tipos de multiplexores mencionados.

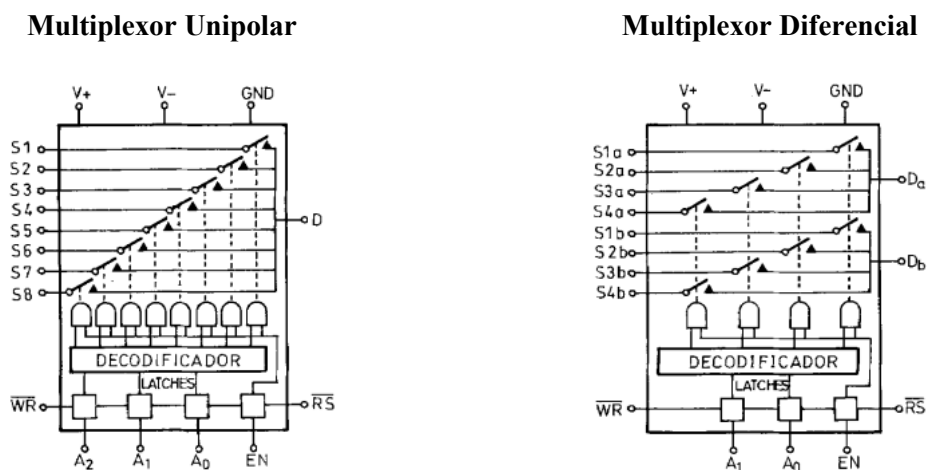


Figura 24. Arquitecturas de los multiplexores.

Al seleccionar un multiplexor adecuado es fundamental considerar la variación máxima de la resistencia de encendido, ΔR_{ON} , existente entre los diferentes canales. Si los valores de R_{ON} no son uniformes entre canales, la señal transmitida a través de este puede sufrir errores significativos. Esta resistencia genera un efecto de divisor de tensión junto con la resistencia de carga, influyendo directamente en la precisión y la fiabilidad de la señal multiplexada. Por este motivo, en aplicaciones donde la precisión es crítica se buscan ΔR_{ON} mínimas. [36]

En la selección de un multiplexor para el sensor de radiación, la elección más apropiada es un multiplexor diferencial. Esta elección es justificada por su capacidad para gestionar eficientemente señales diferenciales y mitigar la susceptibilidad a interferencias y ruido eléctrico. Los multiplexores diferenciales transmiten dos señales simultáneamente: la señal original y su inversa. Esta configuración permite que cualquier interferencia o ruido eléctrico que afecte ambas señales de manera similar se cancele al combinar las señales en el receptor.

Dada la necesidad de gestionar múltiples entradas del sensor de radiación, así como el número correspondiente de ADC, se emplean 4 multiplexores diferenciales 4:1 modelo **ADG709BRUZ** de *Analog Device*.

Las características principales se detallan en la Tabla 8, donde se destaca su capacidad para operar con alimentación unipolar, compatible con la fuente de alimentación de 3,3V.

Tabla 8. Características Técnicas ADG709BRUZ

ADG709BRUZ
$V_{DD} = 3\text{ V} \pm 10\%$ siendo $V_{DDmax} = 7\text{ V}$
$I_{DD} = 0,001\mu\text{A}$
$\Delta R_{ON} = 0,4\Omega$
$V_{INH} = 2 V_{min}$
$V_{INL} = 0,8 V_{max}$
$t_{TRANSITION} = 10\text{ ns}$

4.1.5. Regulador De Carga Solar

La elección del regulador de carga solar adecuado es un paso crítico para asegurar el correcto funcionamiento del sensor dado la importancia que tiene en un SFA como se ha explicado anteriormente en *1.1.2.4 Dimensionado del regulador*. En este punto, se presentarán las características de tres reguladores que se consideran adecuados para el sensor de radiación. Cada uno de estos reguladores ofrece ventajas particulares en términos de eficiencia, capacidad de carga, funcionalidades de protección y control, y compatibilidad con diversas baterías y módulos solares.

1. Regulador BQ25570

El dispositivo BQ25570 fabricado por Texas Instruments representa una innovación en gestión eficiente de energía en sistemas autónomos. Las características claves de este dispositivo son: [37]

- **Arranque en frío de ultra bajo consumo:** el dispositivo puede iniciar su funcionamiento con un voltaje de entrada de tan solo desde 330mV.
- **Rango de voltaje de entrada:** admite un rango de voltaje de entrada que desde 100 mV hasta 5.1 V.
- **Corriente máxima de carga:** permite una corriente máxima de salida de hasta 110 mA.
- **Regulador DC – DC Boost:** ofrece una eficiencia máxima de un 93%.
- **Protección y carga de batería:** cuenta con protección contra subvoltaje mediante niveles internos y niveles de sobretensión programables por el usuario.
- **Seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT):** permite extraer la energía óptima de diversos recolectores de energía, como paneles solares, generadores térmicos y generadores piezoeléctricos.

2. Regulador SPV1050

La empresa STMicroelectronics presenta el SPV1050 cuyas características más relevantes son: [38]

- **Rango de voltaje de entrada:** abarca desde 75 mV hasta 18 V.
- **Corriente máxima de carga:** hasta 70mA
- **Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT):** maximiza la potencia de la fuente de energía en diversas condiciones ambientales.
- **Reguladores LDO independientes:** incluye salidas de 1.8 V y 3.3 V, que pueden habilitarse o deshabilitarse individualmente, haciendo al chip adecuado para alimentar sensores y transceptores RF.
- **Protección de batería:** ofrece características de gestión para evitar la sobrecarga y la descarga excesiva de la batería.

3. Regulador AEM10941

La solución de circuito integrado AEM10941 de E-peas es capaz de extraer energía en corriente continua de hasta 7 paneles solares y, almacenarla en un elemento recargable. Las características claves de este dispositivo son: [39]

- **Inicio en frío ultra baja potencia:** puede arrancar desde un voltaje de entrada de 380 mV y 3 μ W de potencia.
- **Amplio rango de voltaje de entrada:** el dispositivo opera con voltajes de entrada que van desde 50 mV hasta 5V.
- **Corriente máxima de carga:** de hasta 110mA
- **Regulador de aumento de ultra bajo consumo:** ofrece seguimiento del MPPT configurable y detección de voltaje en circuito abierto.
- **Reguladores LDO integrados:** proporcionan hasta 20 mA de corriente de carga (1,2/1,8 V) y hasta 80 mA con una caída de voltaje de 300 mV (1,8 V a 4,1 V).
- **Gestión flexible de almacenamiento de energía:** incluye protección seleccionable contra sobrecarga y sobre descarga, carga rápida de supercondensadores y advertencias de batería baja.

En la Tabla 9, se presenta un resumen que destaca las diferencias entre los diferentes reguladores anteriormente mencionadas.

Tabla 9. Comparativa reguladores de carga solar.

	BQ25570	SPV1050	AEM10941
Arranque en frío	330mV	550mV	380mV
Rango de Voltajes de Entrada	100mV – 5.1V	75mV - 18V	50 mV - 5 V
Corriente Máxima de Carga	110 mA	70mA	110mA
Rango de Voltaje de Salida	2V – 5.5V	2.2V – 5.3V	1.2 V to 4.5 V
Reguladores	<i>Buck</i>	<i>Buck-boost</i> 1.8 V, 3.3 V	LDO 1.2V-1.8 V LHO 1.8V-4.1 V
Protección de la Batería	SI	SI	SI
MPPT	SI	SI	SI

Descripción de la solución propuesta

Como se ha mencionado en el punto *Dimensionado del regulador*, para elegir el regulador adecuado para la gestión de carga de la batería es esencial conocer la corriente que produce el generador fotovoltaico. Del mismo modo, es crucial estimar la corriente máxima requerida por la carga del sensor. Para ello es necesario realizar una estimación de consumo en los diferentes modos de funcionamiento del Xbee3 dando como resultado los datos de la Tabla 10.

Tabla 10. Datos de consumo proporcionados por fabricante y experimentales.

MODOS DE FUNCIONAMIENTO	DATASHEET FABRICANTE	MEDICIONES LABORATORIO
MODO TRANSMITIENDO	40mA	13,415 mA
MODO RECEPCION	17mA	20,558mA
MODO SUSPENSION	2μA	935μA

Los datos derivan de las pruebas descritas en *A.1 Estimación del Consumo del Módulo Xbee3*. Al analizar los resultados, se destaca que la corriente más limitante proviene del fabricante. Considerando que la carga está compuesta únicamente por el consumo del Xbee3, dado que la corriente del multiplexor **ADG709BRUZ** es despreciable ($I_{DD} = 0,001\mu A$), $I_{salida} = I_{Xbee_{max}} = 40 mA$.

El regulador seleccionado es el **AEM10941** debido a la facilidad de configuración y tras analizar su compatibilidad tanto con el módulo XBee3 como con la batería seleccionada. Adicionalmente, es necesario determinar el número de módulos fotovoltaicos necesarios para el correcto funcionamiento del regulador. No obstante, esto se desarrolla en el apartado *4.2 Diseño de la PCB del Sensor de Radiación* con más detalle.

Comprobación compatibilidad regulador con Xbee

$$\begin{array}{ccc} \text{Xbee} & & \text{Regulador} \\ 2,1V \leq V_{in} \leq 3,6V & & 1,8V \leq V_{hv} \leq V_{bat} - 0.3 = 3,3V \\ & & \text{donde } V_{bat} = 3,6 V \\ I_{carga} = 40mA & \leq & I_{hv} = 80mA \end{array}$$

Comprobación compatibilidad regulador con batería.

$$V_{carga\ bateria} = 4.1V \qquad 2.2V \leq V_{bat} \leq 4.5 V$$

4.2. Diseño de la PCB del Sensor de Radiación

Este apartado detalla el diseño de la PCB del sensor de radiación, que, en el contexto de la red Zigbee, será identificado como el nodo final. En la sección *Planos* se incluye el esquemático completo de la PCB diseñada, ofreciendo una visión general de las conexiones y la disposición de los componentes.

Una PCB (*Printed Circuit Board* o Placa de Circuito Impreso) es una lámina delgada compuesta por trazas de material conductor laminado sobre una base no conductiva o material dieléctrico. La PCB facilita la conexión eficiente de circuitos electrónicos de manera compacta, al proporcionar una superficie dedicada para el montaje de componentes y conexiones fijas. Esta superficie permite una mayor inmunidad al ruido y reduce significativamente la probabilidad de fallas gracias a la disminución de cables.

En la actualidad, existen numerosas herramientas de software dedicadas al diseño de PCB, que abarcan desde la captura de esquemas, hasta el enrutamiento automático. Entre las opciones más conocidas se encuentran Cadence, Altium, Mentor Graphics, Eagle, Kicad, etc.

Para este proyecto, se emplea Eagle (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) que cuenta con una versión gratuita sujeta a ciertas limitaciones. Esta elección se respalda en su interfaz sencilla y en la amplia disponibilidad de biblioteca de componentes.

4.2.1. Creación de las Librerías de Componentes.

Antes de comenzar el diseño del esquemático, es importante verificar que cada componente cuente con su propia biblioteca. Generalmente, los fabricantes proporcionan las bibliotecas compatibles con los diferentes softwares disponibles en el mercado, sin embargo, en ocasiones, es necesario crearla manualmente desde cero.

La Figura 25 presenta la biblioteca del módulo fotovoltaico creada en Eagle. A la izquierda, se muestra el símbolo esquemático del componente, mientras que a la derecha se observa el *footprint*, que especifica las dimensiones y la disposición de los *pads*. Los *pads* son áreas conductoras en la superficie de la PCB diseñadas para la soldadura de los terminales de los componentes electrónicos. Al dimensionar los *pads* se recomienda agregar una tolerancia adicional de unos pocos milímetros para facilitar la soldadura.

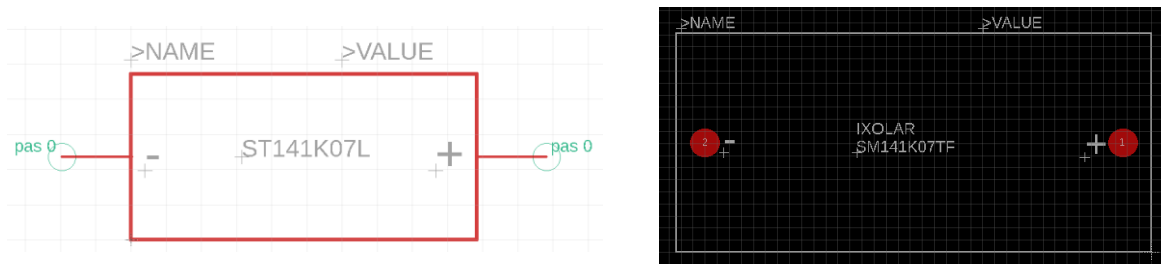


Figura 25. Símbolo esquemático y *footprint*.

4.2.2. Configuración Regulador AEM10941

El AEM10941 constituye un circuito integral y eficiente de gestión de energía. Este dispositivo posee la capacidad de cargar un elemento de almacenamiento desde una fuente de energía y suministrar a la carga diferentes niveles de voltaje mediante dos reguladores LDO (*Low Dropout Regulators* o Regulador de Baja Caída). La Figura 26 presenta un esquema general de este regulador.

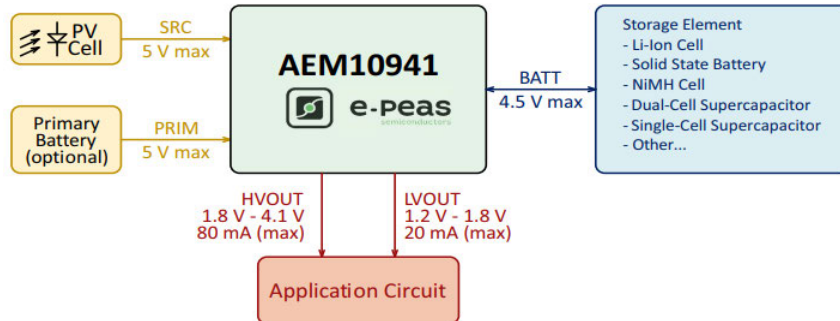


Figura 26. Esquema general de configuración del AEM10941.

Para realizar una buena configuración del regulador es necesario conocer los modos de funcionamiento mostrados en la Figura 27.

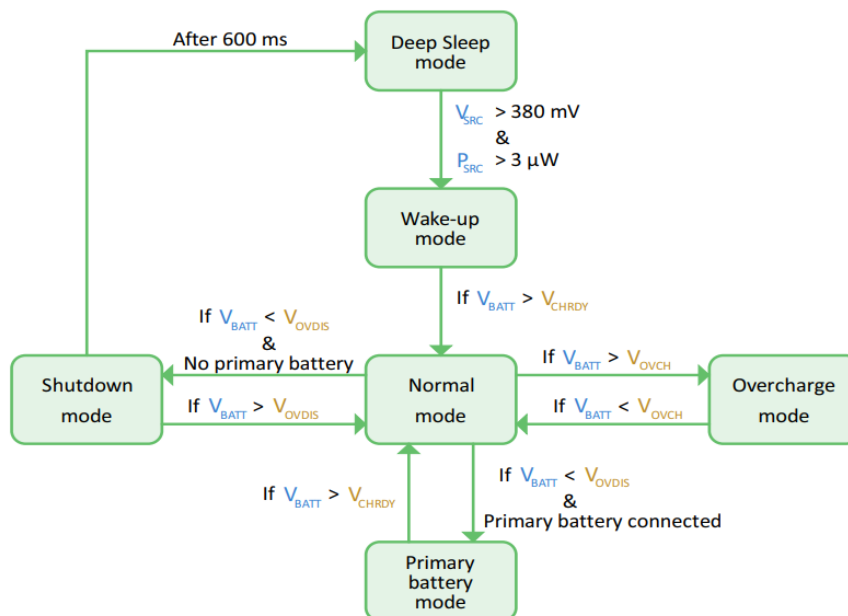


Figura 27. Modos funcionamiento AEM10941

En primer lugar, el AEM10941 se encuentra en el **modo sueño profundo** o *Deep Sleep*. En este estado, todos los pines están profundamente descargados y no hay suficiente energía disponible en los módulos fotovoltaicos para ser recolectada. Tan pronto como se alcanzan en el **pin SRC** el valor de **380mV** para el arranque en frío y la potencia requerida de **3 μW**, se pasa al **modo despertar** o *Wake-Up*.

Una vez en el modo despertar, los voltajes en V_{boost} y V_{buck} aumentan hasta alcanzar 2,2V. Luego, V_{boost} sigue subiendo hasta alcanzar V_{OVCH} configurada. Durante esta fase, ambos reguladores LDO están deshabilitados internamente. Cuando $V_{boost} = V_{OVCH}$ el regulador analiza la tensión existente en el pin BATT, donde está conectado el elemento de almacenamiento, en este caso la pila LIR2450, existiendo estas posibilidades:

- $V_{BATT} < V_{CHRDY}$: en este caso, será necesario cargar el elemento hasta alcanzar V_{CHRDY} , permitiendo un margen de seguridad para garantizar que el elemento de almacenamiento es capaz de proporcionar la potencia necesaria antes de habilitar los LDOs.
- $V_{BATT} > V_{CHRDY}$: en esta condición la batería está totalmente cargada, por lo que el circuito entra en modo normal.

Si se cumple la condición $V_{OVDIS} < V_{BATT} < V_{OVCH}$, el regulador seguirá operando en el modo normal proporcionando la potencia necesaria en los LDOs. En este modo cuando se está recolectando energía, el convertidor elevador entrega una corriente que se comparte entre la batería y los reguladores LDOs. Sin embargo, pasado un tiempo de funcionamiento pueden darse las siguientes situaciones:

- $V_{BATT} > V_{OVCH}$ porque la fuente proporciona más energía de la que consume la carga. Dada esta condición el regulador entra en **modo de sobrecarga**.
- $V_{BATT} < V_{OVDIS}$ debido a la falta de energía de la fuente o un exceso consumo de la carga. En este caso el regulador entra en **modo apagado**. También puede entrar en el modo de batería primaria, pero en el caso del sensor de radiación no se ha conectado un batería de respaldo por lo que no entrara nunca a este modo de funcionamiento.

Cuando el regulador se encuentra en el **modo de sobrecarga** es porque la carga de la batería está completa. En este modo el regulador mantiene V_{BATT} alrededor de V_{OVCH} , con una histéresis para prevenir daños al elemento de almacenamiento y al circuito interno. En esta configuración, el convertidor boost se activa periódicamente para mantener V_{BATT} y los LDOs se encuentran habilitados.

El regulador pasará al **modo apagado** en el momento que la tensión de batería cae por debajo de V_{VODIS} para prevenir una descarga profunda que podría dañar el elemento de almacenamiento y hacer que los LDO sean inestables. Ambos reguladores LDO permanecen habilitados durante $T_{CRIT} = 600\text{ ms}$. Si V_{BATT} se recupera a V_{OVDIS} dentro de este tiempo el regulador vuelve a modo normal. Pero si no es capaz de recuperarse, el circuito entra en modo de sueño profundo donde ambos LDO se deshabilitan y BATT se desconecta de BOOST para evitar dañar la batería debido a la sobredescarga.

Una vez identificados los diferentes modos de funcionamiento, se procede a analizar el funcionamiento interno del regulador mostrados en la Figura 28.

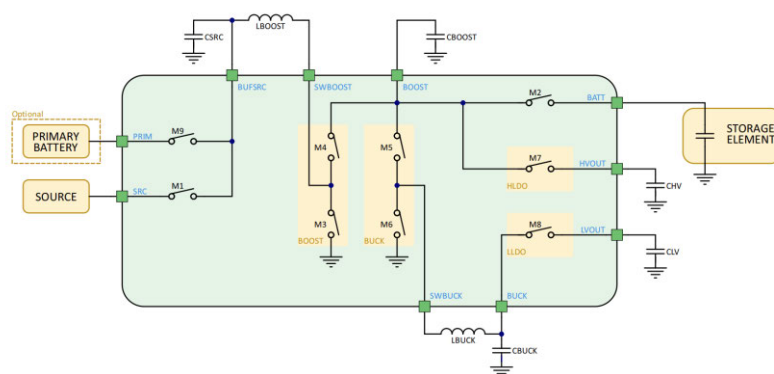


Figura 28. Esquema simplificado del AEM10941

El convertidor elevador, tiene la función de aumentar el voltaje disponible en el pin **BUFSRC** a un nivel adecuado para cargar el elemento de almacenamiento, en un rango de **2.2 V a 4.5 V**, según la configuración seleccionada de la Tabla 14. Este voltaje está disponible en el pin **BOOST** gracias a los transistores de conmutación M3 Y M4. En **modo normal**, el transistor M2 se cierra realizando la conexión entre el pin **BATT** (donde está conectado el elemento de almacenamiento) y pin **BOOST**. En

Descripción de la solución propuesta

este momento, los LDO están habilitados internamente y al mismo tiempo se entrega corriente a la batería. El M2 se abre para desconectar el elemento de almacenamiento cuando $V_{BATT} > V_{OVCH}$.

Existen dos reguladores LDO disponibles para suministrar diferentes voltajes de operación. El LDO de alto voltaje, alimentado por el voltaje BOOST a través del transistor M7, entrega un voltaje regulado y estable en el pin **HVOUT**. De manera similar, el LDO de bajo voltaje, alimentado por el voltaje VBUCK a través del transistor M8, proporciona un voltaje regulado en el pin **LVOUT**.

• Parámetros De Entrada Para El AEM10941.

En una fase inicial, se examinan detalladamente las especificaciones eléctricas de entrada del AEM10941, es decir, los requisitos que el módulo fotovoltaico debe cumplir para asegurar su compatibilidad con el dispositivo. Según la Tabla 11, el dispositivo AEM10941 es capaz de extraer energía de una fuente con un rango de voltaje de entrada comprendido entre **50mV** y **5V**. Además, cuenta con la capacidad de arranque en frío a un voltaje de **380mV** y una potencia extremadamente baja de **3μW**.

Tabla 11. Características Eléctricas Típicas a 25°C

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Input voltage and input power						
P_{SRC_CS}	Source power required to coldstart.	During cold start.	3			μW
V_{SRC}	Input voltage of the energy source (maximum given by the open-circuit voltage).	During cold start.	0.38		5	V
		After cold start.	0.05 ¹		5	
I_{SRC}	Harvested current from the energy source.	$L_{BOOST} = 10 \mu H$.			110	mA
		$L_{BOOST} = 22 \mu H$.			50	
V_{MPP}	Voltage level of the Maximum Power Point.	After cold start.	0.05		4.5	V

Una vez conocidos estos valores, se examinan las especificaciones del módulo fotovoltaico seleccionado para determinar la configuración más adecuada. Para este propósito, dirigimos la atención a la Tabla 12.

Tabla 12. Compatibilidad entre AEM10941 y módulo SolarMD

SM141K07L	AEM10941	Cumplimiento
ÚNICO PANEL FOTOVOLTAICO		
$V_{oc} = 4.8 V$	$0.05 V < V_{src} < 5V$	Sí
$I_{mpp} = 58,6mA$	$I_{mpp(max)} = 110mA$ con $L_{boost} = 10\mu H$	Sí
$V_{mpp} = 3.91V$	$0.05V < V_{mpp} < 4.5V$	Sí
2 PANELES CON CONFIGURACIÓN PARALELA		
$V_{oc} = 4.8 V$	$0.05 V < V_{src} < 5V$	Sí
$I_{mpp} = 117.2mA$	$I_{mpp(max)} = 110mA$ con $L_{boost} = 10\mu H$	Límite
$V_{mpp} = 3.91V$	$0.05V < V_{mpp} < 4.5V$	Sí

Tras analizar detenidamente ambos dispositivos, entre las configuraciones posibles existe la opción de conectar un único módulo fotovoltaico o conectar dos módulos fotovoltaicos en paralelo. Considerando la variabilidad en las condiciones de operación del módulo (irradiancia y temperatura), se elige la

segunda opción, que asegura una corriente de carga suficiente con menor irradiancia. Estos módulos están conectados al **pin SRC** del regulador.

Para maximizar la extracción de energía de los módulos y garantizar su operación en el MPPT, es necesario la configuración de los pines **SELMPP [1:0]** del AEM10941 a través de los *jumpers* **SELMPP1** y **SELMPP2** del sensor de radiación, que permite seleccionar la proporción MPPT en función de las características de la fuente de alimentación de entrada.

El MPPT funciona evaluando periódicamente el voltaje de circuito abierto V_{oc} de la fuente de energía, en este caso, los módulos fotovoltaicos. Para ello desconecta temporalmente la carga durante 82 ms cada 5.21 segundos. Esta medición permite que los módulos alcancen su voltaje máximo sin carga (V_{oc}), que es muy dependiente de la temperatura ambiente e irradiancia solar. Luego, el MPPT redefine el voltaje objetivo V_{MPP} como una fracción de este V_{oc} , es decir, que el voltaje al que realmente operará será un porcentaje del máximo valor medido. Existe la opción de elegir entre cuatro valores para la relación V_{MPP}/V_{oc} definidos en la Tabla 13.

Tabla 13. Pines para configurar MPPT

SELMPP[1]	SELMPP[0]	V_{MPP} / V_{OC}
0	0	70%
0	1	75%
1	0	85%
1	1	90%

La relación que obtenemos en este caso tras selecciona los módulos SM141K07L, es $V_{MPP}/V_{oc} = 3,91/4,8 = 0,81 = 81\%$. Dado este valor, se configuran el jumper para que la relación sea de 75%.

- **Configuración según elementos de almacenamiento.**

El dispositivo AEM10941 ofrece diferentes configuraciones en función del elemento de almacenamiento seleccionado, como se muestra en la Tabla 14. Se puede seleccionar el modo de operación ajustando el estado de los tres pines de configuración, designados como **CFG [2:0]**, según los requisitos específicos de la aplicación. Estos modos determinan los voltajes de salida de los reguladores LDO y establecen niveles de protección para la batería.

Tabla 14. Configuración de los modos de funcionamiento del AEM10941.

Configurations pins			Storage element threshold voltages			LDOs output voltages		Typical use	
CFG[2]	CFG[1]	CFG[0]	V_{OVCH}	V_{CHRDY}	V_{OVDIS}	V_{HV}	V_{LV}		
H	H	H	4.12 V	3.67 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Li-ion battery	
H	H	L	4.12 V	4.04 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Solid state battery	
H	L	H	4.12 V	3.67 V	3.01 V	2.5 V	1.8 V	Li-ion/NiMH battery	
H	L	L	2.70 V	2.30 V	2.20 V	1.8 V	1.2 V	Single-cell supercapacitor	
L	H	H	4.50 V	3.67 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V	Dual-cell supercapacitor	
L	H	L	4.50 V	3.92 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Dual-cell supercapacitor	
L	L	H	3.63 V	3.10 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V	LiFePO4 battery	
L	L	L	Custom mode - Programmable through R1 to R6.				1.8 V		

En el *datasheet* del fabricante se definen los siguientes tres niveles de umbral:

- V_{OVCH} : voltaje máximo aceptado en el elemento de almacenamiento antes de desactivar el convertidor elevador.
- V_{CHRDY} : voltaje mínimo requerido en el elemento de almacenamiento después de un arranque en frío antes de habilitar los LDO.

- V_{OVDIS} : voltaje mínimo aceptado en el elemento de almacenamiento antes de considerar que el elemento de almacenamiento esta descargado.

Además, en la Tabla 14 se ven reflejados los niveles de voltaje de los LDO, V_{HV} y V_{LC} para cada configuración, correspondiendo a los voltajes de salida alta y baja, respectivamente.

Dado los requisitos específicos de la batería de ion-litio seleccionada, LIR2450, y al consumo del Xbee3, se opta por utilizar la configuración predefinida correspondiente a la segunda fila de la Tabla 14. Esta elección implica que los pines **CFG [2:1]** se conecten a V_{BUCK} y **CFG [0]** a GND . También han de estar conectados los pines SET_OVDIS, SET_CHRDY Y SET_OVCH a dicha tensión ya que no se usa el modo customizado. Por último, es importante destacar que el pin FB_HV debe mantenerse sin conexión o flotando.

- **Configuración según la carga.**

En este apartado se estudia la configuración de los dos reguladores lineales de baja caída de voltaje que incorpora el chipset AEM10941.

El LDO de alto voltaje alimenta la carga a través del pin HVOUT. Conforme se detalla en la Tabla 14, mediante los modos de configuración integrados, es posible seleccionar un voltaje de salida, V_{HV} , de 1.8 V, 2.5 V o 3.3 V. Este regulador puede suministrar una **corriente máxima de 80 mA**. En el caso de optar por el modo de configuración personalizada, V_{HV} puede ajustarse entre 1.8 V y $V_{BATT} - 0.3$ V. La activación o desactivación dinámica de la salida de este LDO de alto voltaje se logra mediante el pin de control lógico **ENHV**.

En cuanto al LDO de bajo voltaje, este suministra energía a su carga a través del pin LVOUT, proporcionando un voltaje V_{LC} de 1.2 V o 1.8 V con una **corriente máxima de 20 mA** en LVOUT. La salida de bajo voltaje puede activarse o desactivarse dinámicamente mediante el pin de control lógico **ENLV**.

Dado la configuración seleccionada anteriormente, se establece que la tensión de salida $V_{LC} = 1.8V$, mientras que la tensión de salida $V_{HV} = 3.3V$. Conociendo estas tensiones y la corriente máxima proporcionada por cada LDO, es crucial verificar si el módulo de radiofrecuencia XBee3 recibirá una alimentación adecuada. En la Tabla 15 se puede concluir que el dispositivo estará correctamente alimentado asumiendo la conexión de este al LDO de alto voltaje.

Tabla 15. Cumplimiento alimentación Xbee3

AEM10941	XBEE3	Cumplimiento
$V_{HV} = 3.3V$	$2.1V < V_{supply} < 3.6V$	Sí
$I_{HV(m\acute{a}x)} = 80mA$	$I_{transmit} = 40mA$	Sí
$I_{HV(m\acute{a}x)} = 80mA$	$I_{receive} = 17mA$	Sí

Después de integrar los componentes pasivos de acuerdo con las pautas y requisitos especificados por el fabricante del AEM10941, y considerando los aspectos abordados en las secciones previas, el diagrama completo se presenta en la Figura 29.

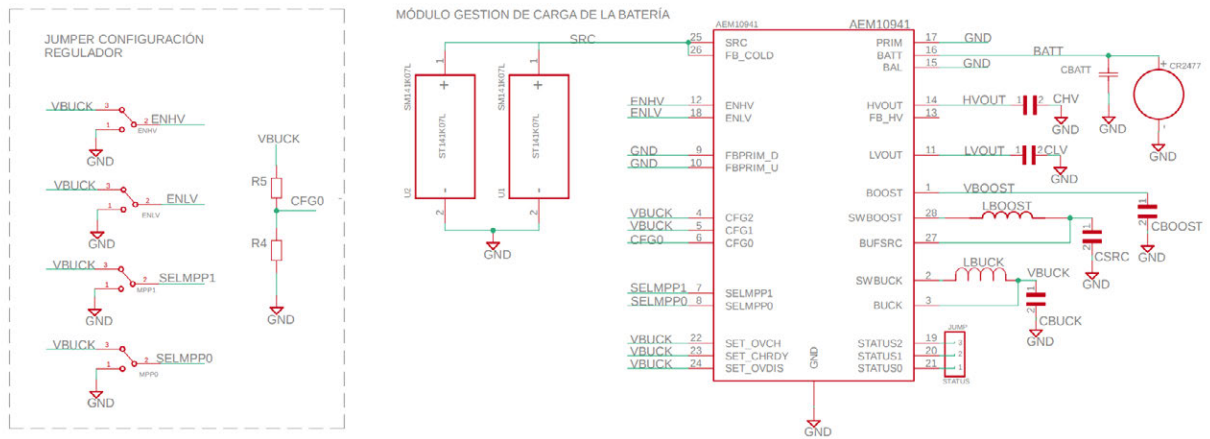


Figura 29. Esquema Detallado Conexión de Componentes AEM10941

Como se evidencia en el esquemático, para adaptar la relación MPPT según los requisitos específicos del módulo, se emplean los *jumpers* situados en la parte inferior izquierda, SELMPP0 y SELMPP1. Por otro lado, para establecer la habilitación de los LDO, se utilizan los *jumpers* ubicados en la parte superior izquierda, ENLV y ENHV. Aunque se ha establecido $CFG[0] = 0$ en un principio, se incorporan dos resistencias una de *pull-up* y *pull-down* para poder configurar dicho pin. Por último, se incorpora un jumper adicional para verificar el estado del componente, **STATUS [2:0]**.

- **STATUS[0]**: se activa cuando los LDO están operativos y pueden ser habilitados.
- **STATUS[1]**: se activa cuando la batería primaria está proporcionando energía. En el caso del sensor de radiación nunca se activará.
- **STATUS[2]**: se activa cuando se está realizando un cálculo del MPP.

4.2.3. Configuración del transceptor de radiofrecuencia Xbee.

- **Configuración fuente de alimentación.**

La alimentación del módulo XBee3 se origina mediante el regulador LDO de alto voltaje del *chipset* AEM10941, pin HVOUT. El regulador, configurado previamente, proporcionará una tensión de 3.3V. Esta tensión queda dentro del rango de alimentación especificado para el XBee, que abarca desde 2.1V hasta 3.6V.

Con el objetivo de asegurar un rendimiento eficiente, especialmente en situaciones donde la tensión de alimentación no se mantiene dentro de los límites de tolerancia o presenta niveles significativos de ruido, el fabricante recomienda la instalación de un condensador de 1.0uF y 8.2pF en el pin V_{CC} del módulo XBee3. También aconseja incorporar un condensador de desacoplo de 10uF. [40]

En la Figura 30, se representa el diseño según estas recomendaciones, garantizando que los condensadores de menor capacidad se ubiquen lo más cerca posible del módulo XBee3.

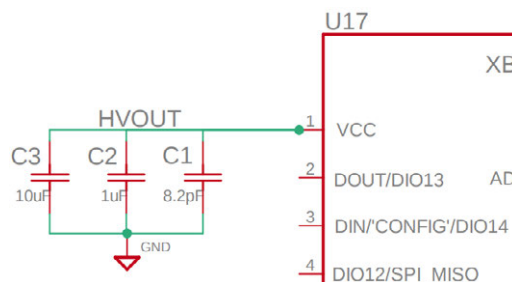


Figura 30. Diseño fuente de alimentación del Xbee3.

- **Convertidor analógico-digital incorporado en Xbee.**

El módulo XBee3 incorpora 4 ADC, cuyos pines se identifican como AD0, AD1, AD2 y AD3, posibilitando la lectura de la energía generada por los módulos fotovoltaicos. Estos pines se conectan a las salidas de los multiplexores para realizar la medición de energía generada por los módulos fotovoltaicos del sistema.

Un ADC constituye un componente esencial en la instrumentación electrónica al desempeñar el papel crucial de transformar señales analógicas, que varían de manera continua en el tiempo y pueden tomar infinitos valores dentro de un rango definido, en señales digitales discretas.

En la actualidad, existen diversas topologías para ADC, y las diferencias entre ellas, en función de la resolución y la frecuencia de muestreo, pueden observarse en la Figura 31.

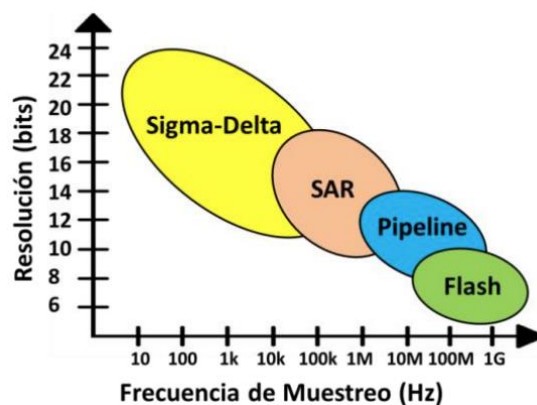


Figura 31. Topologías de ADC

En el ámbito de los sistemas de adquisición de datos, una de las soluciones comerciales más utilizadas son los microcontroladores con convertidor integrado. El ADC que generalmente incorporan sigue la topología **SAR** (*Successive Approximation Register* o Registro de Aproximación Sucesiva) debido a su menor consumo de energía, su circuitería más simple y menor costo.

En su mayoría, los microcontroladores con ADC integrado ofrecen la opción de múltiples canales de entrada. Sin embargo, estos canales se multiplexan hacia un único circuito de muestreo y retención (S/H, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 32.

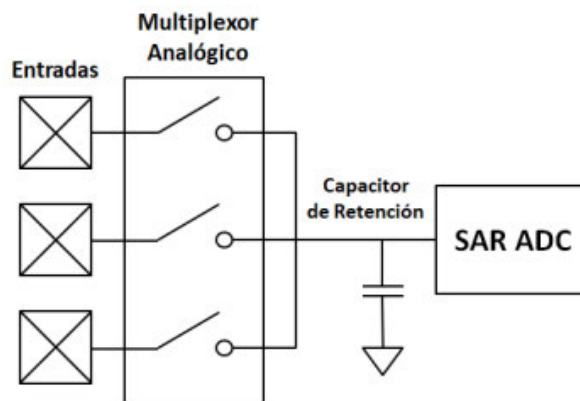


Figura 32. Multiplexación del ADC.

Esto ocurre con el chip de **Silicon Lab EFR32MG SoC**, presente en el módulo Xbee3. Este chip integra un ADC siguiendo la arquitectura SAR con una resolución de hasta 12 bits y opera a una velocidad de hasta 1 Msps (muestras por segundo). El ADC incluye referencias de voltaje integradas, así como un sensor de temperatura integrado lo que facilita la precisión y versatilidad en distintas aplicaciones. Mediante el multiplexor integrado en el chip, el módulo Xbee3 habilita la incorporación de 4 entradas ADC. [41]

Uno de los parámetros más importante es la resolución del ADC, que determina la capacidad para representar con precisión la señal analógica de entrada en términos digitales. La resolución establece el número de bits utilizados para representar la señal.

Cuando se habla de la resolución de un ADC, se menciona el LSB (*Least Significant Bit* o Bit Menos Significativo) que representa la mínima variación en la señal analógica que puede ser detectada por el ADC y se refiere al bit de menor peso en la representación digital de esa señal.

$$1LSB = \frac{V_{FSR}}{2^n} (V) \quad (14)$$

Siendo:

V_{FSR} : Voltaje de Rango Completo (V)

n : número de bits del ADC

El incremento en la resolución del ADC se traduce en una reducción en el valor del LSB, lo que permite al convertidor a detectar y representar de manera más precisa las variaciones más pequeñas en la señal analógica. Este factor crítico será examinado con mayor detalle en el apartado 5.6.5. *Resistencias De Shunt y Precisión ADC*.

- **Conexiones adicionales**

A continuación, se detallan las conexiones adicionales que se han realizado al módulo Xbee3 con el objetivo de potenciar las capacidades del sensor de radiación.

Botón de Reset.

La conexión de un botón de pulsación al pin de *Reset* (Pin 5 del XBee3) posibilita la ejecución de reinicios controlados del módulo XBee3 de manera manual.

Led Indicadores de Conexión

Con el propósito de visualizar el estado de conexión del módulo XBee3, se incorporan 3 indicadores LED como se muestra en la Figura 33.

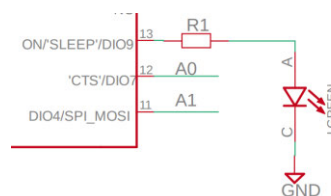


Figura 33. Conexión leds indicadores

Con el objetivo de regular la corriente que atraviesa el diodo LED, se incorpora una resistencia en serie R. Teniendo en cuenta la corriente necesaria para una luminosidad intermedia del diodo $I_{led} = 5 \text{ mA}$ y la tensión suministrada por los pines digitales de salida del Xbee3 $V_{pin} = V_{cc} \cdot 0,8 = 3,3 \text{ V} \cdot 0,8 = 2,64 \text{ V}$, siguiendo los principios de la Ley de Ohm se obtiene:

$$R = \frac{V_{pin} - V_{led}}{I_{led}} = \frac{2,64 \text{ V} - 2 \text{ V}}{6 \text{ mA}} = 106,67 \Omega$$

El código de colores de los LEDs del módulo es el siguiente:

- **Verde:** indica que el módulo está en estado de operación activa. En este estado, el módulo está despierto y listo para recibir comandos del coordinador, pero aún no ha iniciado ninguna medición.
- **Ámbar:** indica que el módulo ha recibido el comando correspondiente y está activamente recopilando datos de los módulos fotovoltaicos.
- **Rojo:** indica que el módulo está en el proceso de transmisión de datos. Esto significa que los datos recopilados durante el estado de medición están siendo enviados al coordinador.

Salidas Digitales para Gestión del Multiplexor.

Resulta necesario destinar tres salidas digitales, **DIO4, DIO6 y DIO7**, con el propósito de realizar la conmutación entre los diversos canales que componen los multiplexores.

4.2.4. Integración Multiplexor y Módulos Fotovoltaicos

El sensor se ha diseñado con el propósito de mejorar el análisis de la no uniformidad de la radiación de la cara trasera de la maqueta de módulos bifaciales del IES. Para ello se introducen módulos en diferentes puntos de la PCB posibilitando la configuración de diversas geometrías de medición, con la opción de no soldar todas las células.

Cabe destacar que las mediciones se llevarán a cabo utilizando el ADC del dispositivo Xbee3, el cuál dispone únicamente de 4 módulos ADC. Debido a la limitación del número de ADC y con el objetivo de maximizar la cantidad de medidas posibles, se incorpora un multiplexor entre los módulos y el Xbee3.

Este multiplexor evita la necesidad de desoldar y soldar constantemente los módulos para realizar mediciones con diferentes configuraciones. La selección del canal que vamos a medir se realiza mediante un código binario reflejado Tabla 16 proporcionado por los pines DIO4, DIO6 y DIO7 del Xbee3. A la hora de realizar la conmutación es necesario tener en cuenta en tiempo de transición entre canales, $t_{transition} = 18ns$.

Tabla 16. Código Binario para seleccionar Canales del Multiplexor

CANAL	CÓDIGO
S1	001
S2	011
S3	101
S4	111

Se ha llevado a cabo una verificación para asegurar la compatibilidad de los pines de salida digital del módulo Xbee3 con el ADG709, dando como resultado una compatibilidad correcta.

$$V_{OH} = 0.8 \cdot VCC = 2.64 V > V_{INH} = 2 V \quad (15)$$

$$V_{OL} = 0.2 \cdot VCC = 0.66V < V_{INL} = 0.8 V \quad (16)$$

En la Figura 34, se representa la conexión entre los módulos y las entradas del multiplexor. Este método de conexión se implementa con el propósito de prevenir la formación de bucles de masa.

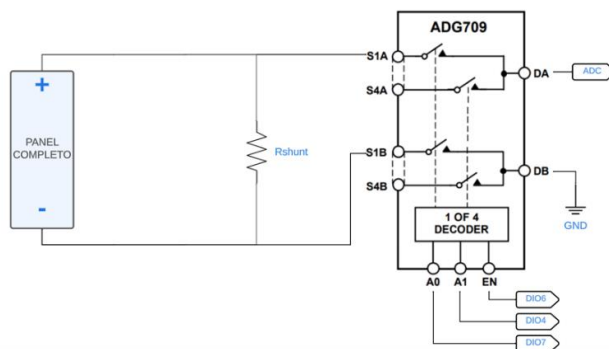


Figura 34. Integración módulos fotovoltaicos con multiplexores ADG709

El origen de los bucles de masa suele estar vinculado a diferencias de potencial o tensiones entre puntos de conexión en un sistema eléctrico. Si hay variaciones de potencial entre los puntos de conexión a tierra, la corriente puede fluir a través del plano de tierra, creando un bucle. Estos bucles pueden introducir ruido en las mediciones y afectar negativamente la precisión y estabilidad de los dispositivos electrónicos.

4.2.5. Resistencias De *Shunt* Y Precisión ADC.

Para evaluar la no uniformidad en los paneles fotovoltaicos es necesario conocer algunos datos importantes como la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto.

Dado que las mediciones se realizarán utilizando un ADC capaz solo de medir voltaje, es necesario incorporar una resistencia de *shunt* en paralelo al componente eléctrico cuya corriente se desea medir. Estas resistencias deben tener un coeficiente de temperatura pequeño para que su valor resistivo no se vea afectado por la temperatura proporcionando fiabilidad en las mediciones.

Para realizar el cálculo de la resistencia de *shunt*, se supone que todas las células que componen el sensor se comportan de manera ideal, lo que implica la ausencia de pérdidas debidas a corrientes de fugas y conducción, así una corriente de recombinación muy pequeña en la zona plana de la curva. Considerado estos aspectos, se observa que $I = I_{ph} = I_{SC}$, es decir, la máxima corriente generada por el módulo fotovoltaico.

Adicionalmente, para determinar el valor óptimo de la resistencia *shunt*, es fundamental establecer una tensión de caída máxima V_{bias} . Esta caída de voltaje depende de varios factores, como la sensibilidad requerida en la medición y la capacidad del sistema de medición para detectar y procesar señales de voltaje, en este caso, precisión del ADC.

En este caso, se busca mantener la resistencia de *shunt* en la región plana de la Curva I-V de la célula mostrada en la Figura 35 para obtener un sensor lineal con la irradiancia.

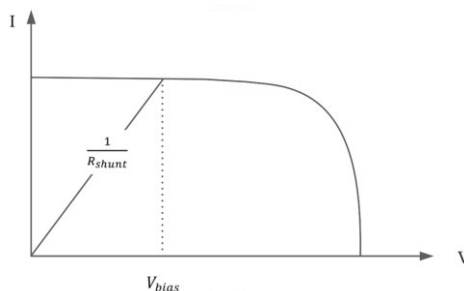


Figura 35. Curva I-V de una célula fotovoltaica

Descripción de la solución propuesta

Para asegurar que el sensor de radiación opere dentro de la región plana de la curva I-V, se selecciona $V_{bias} = 1 V$, lo que garantiza que el sensor se mantenga en la zona estable. Dado que el sensor de radiación fue diseñado inicialmente para ser compatible con dos módulos fotovoltaicos de diferentes tamaños se busca una resistencia de *shunt* compatible en ambos casos. Analizando los resultados de la **Tabla 17** se selecciona una resistencia comercial de $18 \Omega \pm 1\%$.

Tabla 17. Estimación de R_{shunt}

	I_{sc}	V_{bias}	R_{shunt}
KXOB121K04F	50.2 mA	1V	19,92 Ω
SM141K07L	58.6 mA	1V	17,06 Ω

El sensor de radiación cuenta con el módulo Xbee3 equipado con 4 ADC de 10 bits cada uno. Sin embargo, es importante tener en cuenta las indicaciones del fabricante, según las cuales, al utilizar MicroPython para el muestreo de los ADC se logra una resolución de 12 bits. [40].

Según el fabricante del módulo Xbee3, la fórmula utilizada para convertir los valores de las muestras analógicas en voltajes, ajustándola a una resolución de 12 bit, es la siguiente:

$$\text{Voltaje (mV)} = \frac{\text{Código}_{DECIMAL}}{4095} \cdot V_{ref} \quad (17)$$

siendo V_{ref} el voltaje de referencia analógico utilizado para el muestreo, el cual puede tomar los valores de 1.25V, 2.5V o VDD. Adicionalmente, el rango aceptable del código decimal ira de 0x000 a 0x0FFF.

Con una $V_{bias} = 1 V$, se establece $V_{ref} = 1.25 V$, que representa el fondo de escala óptimo para minimizar la pérdida de resolución del ADC y garantizar la precisión en las mediciones.

$$\text{Resolución Efectiva} = n + \log_2 \left(\frac{FSR_{sistema}}{FST_{ADC}} \right) = 12 + \frac{\log \left(\frac{1V}{1.25} \right)}{\log 2} = 11.67 \text{ bits} \quad (18)$$

4.3. Distribución de componentes en PCB

A la hora de iniciar el proceso de diseño y trazado de una PCB, es importante adherirse a estándares reconocidos como la norma IPC-2221. Esta normativa proporciona una guía que abarca todos los aspectos del diseño de PCB, desde la disposición de componentes hasta la gestión térmica y eléctrica, asegurando la integridad y fiabilidad del circuito final. Su aplicación no solo garantiza la conformidad con estándares de calidad rigurosos, sino que también optimiza todo el proceso de desarrollo y fabricación, reduciendo costos y tiempos de producción.

En esta sección, se llevará a cabo un análisis detallado de la distribución de todos los componentes en la PCB, así como del diseño del *layout*, considerando las especificaciones proporcionadas por el fabricante y siguiendo la norma IPC-2221.

4.3.1. Distribución de los Componentes.

La PCB ha sido diseñada con dimensiones específicas de 212 mm x 113 mm (alto x ancho), con el propósito de ajustarse perfectamente al tamaño requerido por la maqueta. Sin embargo, debido a la estructura mecánica que sostendrá las PCB, es necesario dejar un espacio de 3.5 mm de ancho sin pistas ni componentes en ambos extremos.

En un primer diseño, la distribución de los componentes de la cara trasera se ilustra a la izquierda de Figura 36. Cada fila contenía 6 módulos distintos, compuestos por 2 módulos ST141K07L y 4 módulos KXOB121K04F-TR. Debido a las dimensiones de la maqueta, se selecciona el sensor con los módulos completos, dando lugar a la distribución de izquierda de la Figura 36.

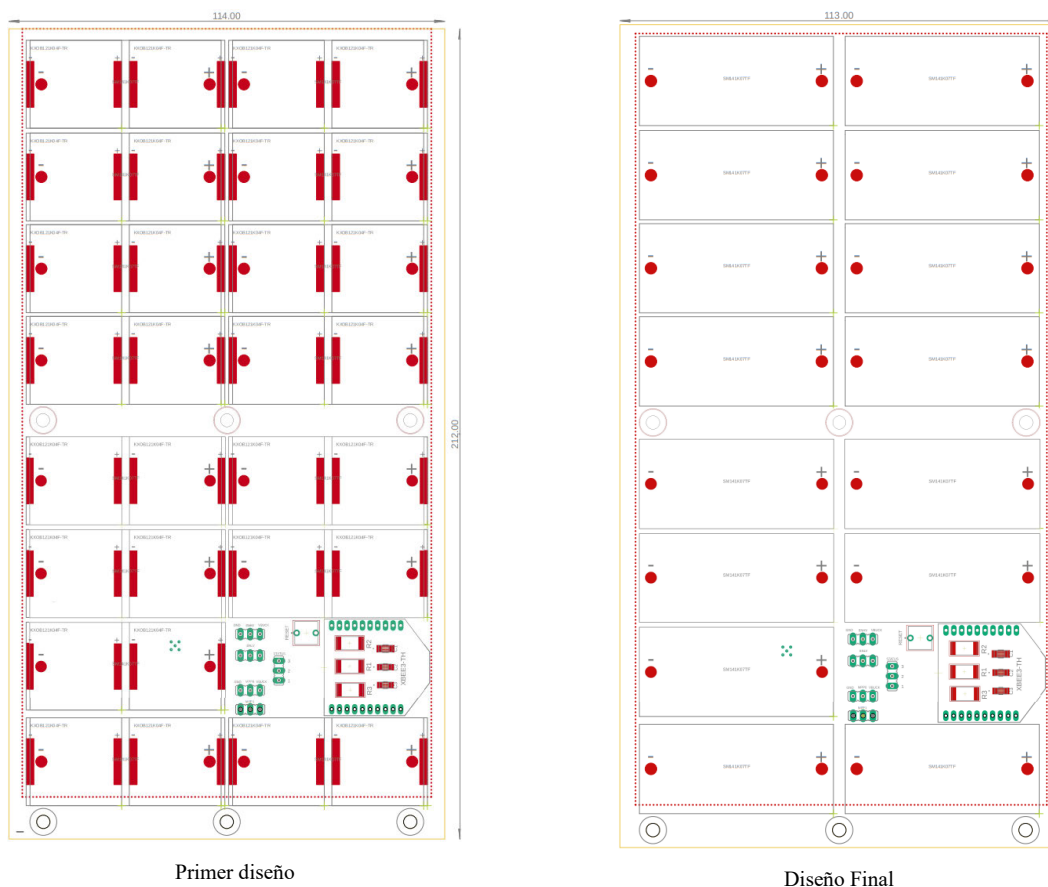


Figura 36. Distribución de Componentes en la PCB –Caras Mediación Albedo.

Es relevante señalar que, en la cara trasera, en la fila 6 y columna 2 no se instala ningún módulo fotovoltaico para permitir el montaje de componentes a través de orificios pasantes. En esta cara también se encuentran los *jumpers* de configuración, el botón de *reset* y el módulo Xbee3

La distribución de los componentes de la cara delantera se muestra en la Figura 37. En ambos sensores sigue la misma distribución. En esta cara se instalan 4 módulos ST141K07L, donde los dos módulos ubicados en la parte superior serán asignados para cargar la batería, ya que es el punto de mayor exposición a la radiación solar. Adicionalmente, se encuentran los multiplexores, las resistencias de *shunt*, LEDs indicadores, entre otros. Para una visualización con mayor resolución de la disposición de los componentes, se recomienda consultar en los Planos adjuntos al final del documento.

Dado que la cara delantera de la PCB estará expuesta a la radiación solar, es necesario proteger los componentes. Para ello, se han añadido seis agujeros M2.5 estratégicamente ubicados, que permiten instalar una placa metálica como barrera contra la exposición al Sol de los componentes.

Otra consideración importante es la colocación del módulo Xbee3. De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, se sugiere ubicar el dispositivo en el borde de la PCB en la que está montado para obtener un rendimiento óptimo en la transferencia de datos.

Todos los componentes seleccionados para el diseño del sensor de radiación se detallan en la Tabla 27 del apartado Presupuesto.

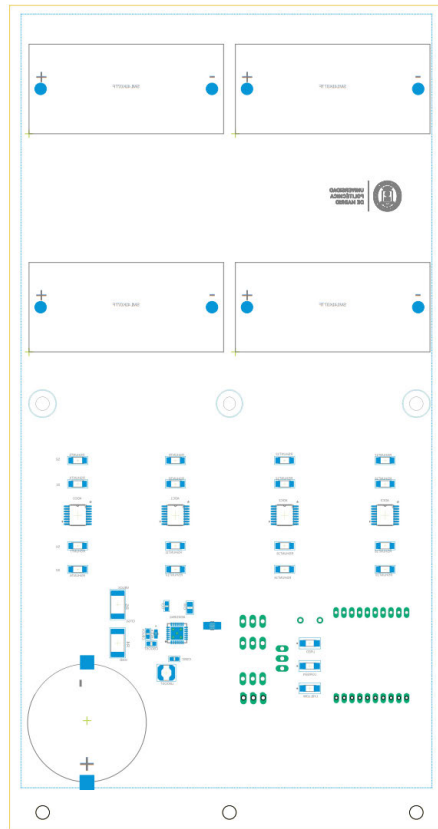


Figura 37. Distribución de Componentes en la PCB – Cara Orientada al Sol

4.3.2. Layout

En la fase de diseño de la PCB, es fundamental asegurar el dimensionamiento adecuado de las pistas para garantizar un rendimiento eléctrico óptimo y una disipación de calor eficiente. Para lograr esto, recurrimos a las fórmulas proporcionadas por la norma IPC-2221, que establece los parámetros para el cálculo del ancho de pista en función de la corriente máxima que transportará y la temperatura ambiente.

La fórmula básica para calcular el ancho de pista, según la IPC-2221, es la siguiente:

$$A \text{ (mils}^2\text{)} = \left(\frac{I \text{ (A)}}{k \cdot T_{rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (19)$$

siendo k, b, c parámetros constantes derivados del ajuste de curvas indicados por la norma cuyos valores son:

- **Capas internas:** k = 0.024, b = 0.44, c = 0.725
- **Capas externas:** k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725 Una vez conocida el área se procede al cálculo del ancho aplicando la fórmula:

$$W \text{ (mils)} = \frac{A \text{ (mils}^2\text{)}}{\text{Thickness}[\text{oz/ft}^2] \cdot 1.378[\text{mils/oz}]} \quad (20)$$

- **Pistas de Medida**

Es fundamental minimizar la caída de tensión en las pistas trazadas para la medición de V_{Rshunt} con el fin de obtener valores más precisos. El objetivo es garantizar que la pérdida de tensión en estas pistas sea insignificante en comparación con la tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico, $V_{oc} = 4,84 V$.

Para llevar a cabo el cálculo siguiendo las directrices establecidas en la norma IPC-2221, se utiliza una herramienta en línea especializada denominada *PCB Trace Width Calculator* [42]. Tras ingresar los parámetros esenciales, como la corriente esperada, la longitud de la pista más larga y la temperatura deseada para la misma, se obtienen las dimensiones recomendadas para la pista.

Con base a los resultados de la Figura 38, que establecen un tamaño mínimo de 5 mils para las pistas externas, se decide aumentar el tamaño de la pista 12 mils, aprovechando el espacio disponible en la PCB. Esta acción prioriza la reducción de la resistencia eléctrica y mejora la distribución del voltaje para evitar el sobrecalentamiento y asegurar un rendimiento eléctrico estable. Además, las pistas más anchas facilitan una mejor disipación de calor, manteniendo una temperatura óptima en la PCB.

Inputs:

Current	0.2	Amps
Thickness	1	oz/ft ² ▾

Optional Inputs:

Temperature Rise	1	Deg C ▾
Ambient Temperature	25	Deg C ▾
Trace Length	200	mm ▾

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	13.5	mil ▾
Resistance	0.284	Ohms
Voltage Drop	0.0568	Volts
Power Loss	0.0114	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	5.20	mil ▾
Resistance	0.739	Ohms
Voltage Drop	0.148	Volts
Power Loss	0.0296	Watts

Figura 38. Tamaño pista mediciones

- **Planos De Masa**

Un plano de masa constituye una superficie de cobre ininterrumpida que recubre ambas caras de una PCB, cumpliendo la función de establecer una referencia de voltaje estable para las señales y componentes del circuito. Este elemento conlleva una serie de beneficios significativos, como la reducción del ruido al minimizar las interferencias electromagnéticas, así como la mejora de la integridad de las señales mediante el mantenimiento de una impedancia constante, lo que evita reflexiones y distorsiones indeseadas. Además, su capacidad para actuar como disipador térmico contribuye a una adecuada gestión del calor generado por los componentes activos.

Al diseñar los planos de masa, se procede a trazar un polígono alrededor del área no utilizada de la PCB, configurando posteriormente el aislamiento para definir la distancia entre dicho polígono y las pistas adyacentes. En este sentido, se debe considerar la distancia de aislamiento óptima en función de las necesidades específicas del diseño. Por ejemplo, un aislamiento mayor puede resultar preferible en situaciones donde se requiere una separación eléctrica más amplia para prevenir cortocircuitos o interferencias entre pistas cercanas. Por el contrario, un aislamiento menor podría ser más adecuado cuando se busca minimizar el espacio entre el plano de masa y las pistas para reducir la impedancia o mejorar la integridad de las señales. [43]

Descripción de la solución propuesta

En vista de la necesidad de minimizar la impedancia de las pistas, se ha optado por un aislamiento de 16 mils, proporcionando así un equilibrio adecuado entre separación eléctrica y eficiencia en la gestión térmica.

- **Pistas HVOUT y GND**

En este caso particular, la fuente de energía para todos los equipos proviene del regulador, cuya función es distribuir eficientemente la energía a todos los componentes de la PCB. La corriente máxima que puede proporcionar es $I_{HV} = 80mA$. Por el mismo motivo comentado anteriormente, se aumenta el tamaño de pista a 20 mils.

Inputs:

Current	0.2	Amps
Thickness	1	oz/ft^2 ▾

Optional Inputs:

Temperature Rise	1	Deg C ▾
Ambient Temperature	25	Deg C ▾
Trace Length	200	mm ▾

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	13.5	mil ▾
Resistance	0.284	Ohms
Voltage Drop	0.0568	Volts
Power Loss	0.0114	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	5.20	mil ▾
Resistance	0.739	Ohms
Voltage Drop	0.148	Volts
Power Loss	0.0296	Watts

Figura 39. Tamaño pista HVOUT y GND

4.4. Fabricación de los módulos.

Debido a la complejidad de fabricación, se decide enviar la PCB a fabricar a una empresa profesional conocida como *Eurocircuit*. A la hora de diseñar la PCB es necesario seguir las pautas establecidas por el fabricante para reducir el costo de las placas y minimizar el riesgo de errores durante la fabricación. El fabricante, además de dar la opción de elegir el material base, el grosor de la placa y la capa de cobre exterior, entre otras especificaciones, ofrece la opción de seleccionar el color de la máscara de soldadura. Para la PCB del sensor de radiación se elige una máscara de soldadura **negro mate** debido a su bajo coeficiente de reflexión. Este acabado no solo proporciona una apariencia estética similar a los módulos fotovoltaicos, sino que también minimiza los errores asociados al albedo de la cara posterior de la placa evitando así reflexiones indeseadas.

En la primera fase del proyecto, se lleva a cabo la soldadura a mano del primer diseño que incluye tanto el módulo KXOB121K04F como el SM141K07L. Para los componentes SMD, se emplea soldadura manual mediante un sistema pick-and-place y un dispensador de pasta de soldadura, mostrados en la Figura 40, para colocar la pasta y los componentes con la mayor precisión posible.

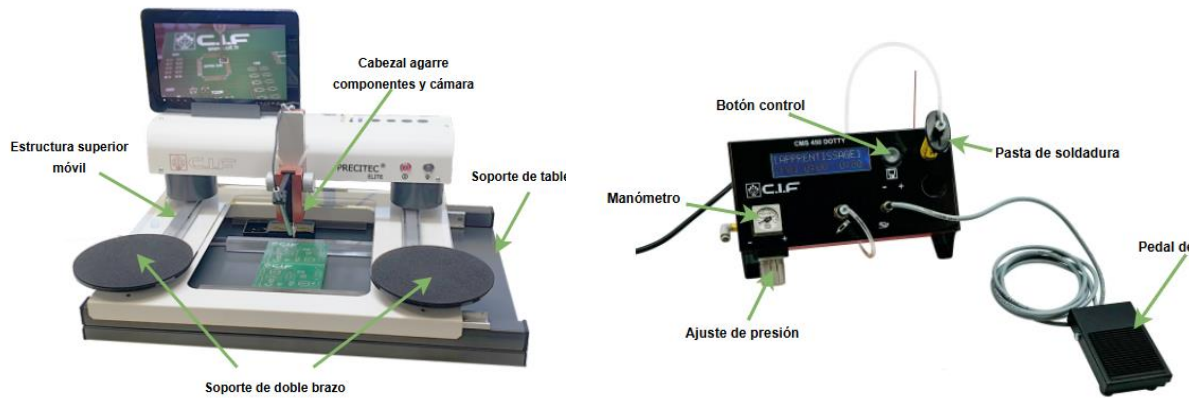


Figura 40. Izquierda Pick and Place y Derecha Dispensador de Pasta a presión.

Inicialmente, se coloca la pasta de soldadura en el cabezal de la máquina pick-and-place y se configura el dispensador en modo semiautomático para que dispense pasta cada 0.25 segundos durante 0,50 segundo para asegurar que haya la pasta justa en el *pad* de los componentes. Como ejemplo, la Figura 41 muestra la distribución de pasta de soldadura en los *pads* del chip AEM10941. Debido al reducido tamaño de los *pads*, se observa una distribución no uniforme de la pasta. Para garantizar una adecuada adherencia del componente y prevenir cortocircuitos, se aplica fundente. El fundente es un compuesto químico que, al fundirse durante el proceso de soldadura, elimina los óxidos superficiales de los metales favoreciendo la unión entre el componente y el *pads*, evitando la formación de cortocircuitos.

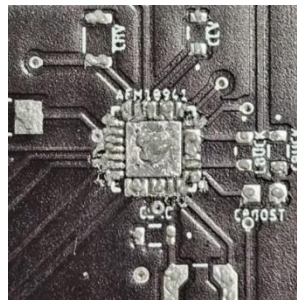


Figura 41. Pasta de Soldadura en *Pads* del chip AEM10941

Una vez todos los componentes han sido colocados en sus respectivas posiciones, la placa se envía al horno de reflujo, mostrado en la Figura 42.



Figura 42. Horno de reflujo

El proceso de soldadura se realiza en un horno con perfiles de temperatura diferentes ajustándose a las especificaciones de cada componente. En una primera etapa se sueldan los componentes como condensadores, resistencias y chip AEM10941. En una segunda etapa, se incorporan los módulos fotovoltaicos. Es necesario seguir este proceso en dos pasos debido a que los módulos fotovoltaicos de AnySolar son sensibles a la humedad y pueden sufrir delaminación o grietas si se exponen a altas temperaturas durante la soldadura. Para prevenir estos daños deben ser soldados a baja temperatura utilizando pasta de estaño-bismuto. Esto da lugar a los siguientes perfiles de temperatura para los diferentes componentes.

Perfil de Temperatura Pasta Estaño - Plata (Sn63Pb37)

En este caso, el proceso se divide en cuatro etapas: un **precalentamiento** inicial de 3 minutos, donde la temperatura aumenta a un máximo de 150°C. Luego, en la etapa de **remojo**, la temperatura sube hasta 183°C en un lapso de 30 segundos. Posteriormente se mantiene la **temperatura de reflujo** subiendo de 180°C a 235°C durante 60 segundos para asegurar la unión adecuada. Por último, se realiza el enfriamiento.

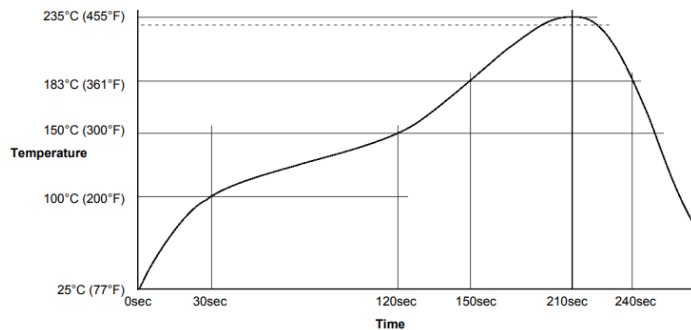


Figura 43. Perfil reflujo Pasta de Soldadura Sn63Pb37

Perfil de Temperatura a Baja Temperatura (Pasta Sn42Bi57.6Ag0.4):

La pasta de bismuto reduce la temperatura de fusión a 165° y mejora la humectabilidad reduciendo el riesgo de dañar los módulos fotovoltaicos en el proceso de soldadura. El perfil que sigue se muestra en la Figura 44. El proceso se divide en cuatro etapas: un **precalentamiento** inicial donde la temperatura aumenta hasta los 90°C desde la temperatura ambiente. Luego, se entra en la **zona de remojo** alcanzando 130°C en 90 segundos para distribuir uniformemente el calor. A continuación, la temperatura se eleva rápidamente hasta el **punto de fusión** de 165°C en un lapso de 60 segundos para asegurar una unión adecuada. Finalmente, se realiza un **enfriamiento** durante 3 minutos para solidificar la soldadura sin generar tensiones térmicas.

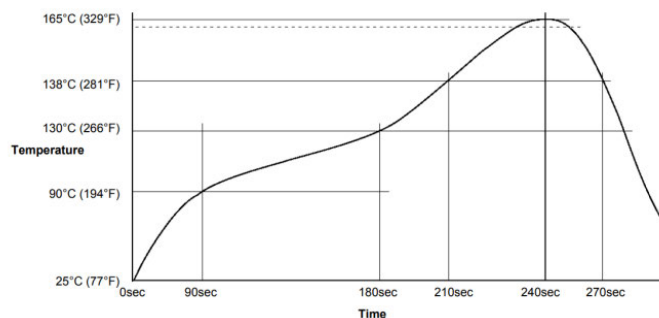


Figura 44. Perfil de Reflujo de Soldadura de Pasta Sn42Bi57.6Ag0.4

Debido a las dificultades encontradas al soldar los componentes SMD por su pequeño tamaño, se ha decidido fabricar una segunda serie de PCBs. Esta nueva serie incluirá únicamente los módulos SM141K07L y las correcciones de diseño necesarias. Además, se ha solicitado que las placas sean entregadas con los componentes de tamaño reducido ya soldados, lo que resultará en la versión final de la PCB mostrada en la Figura 45.

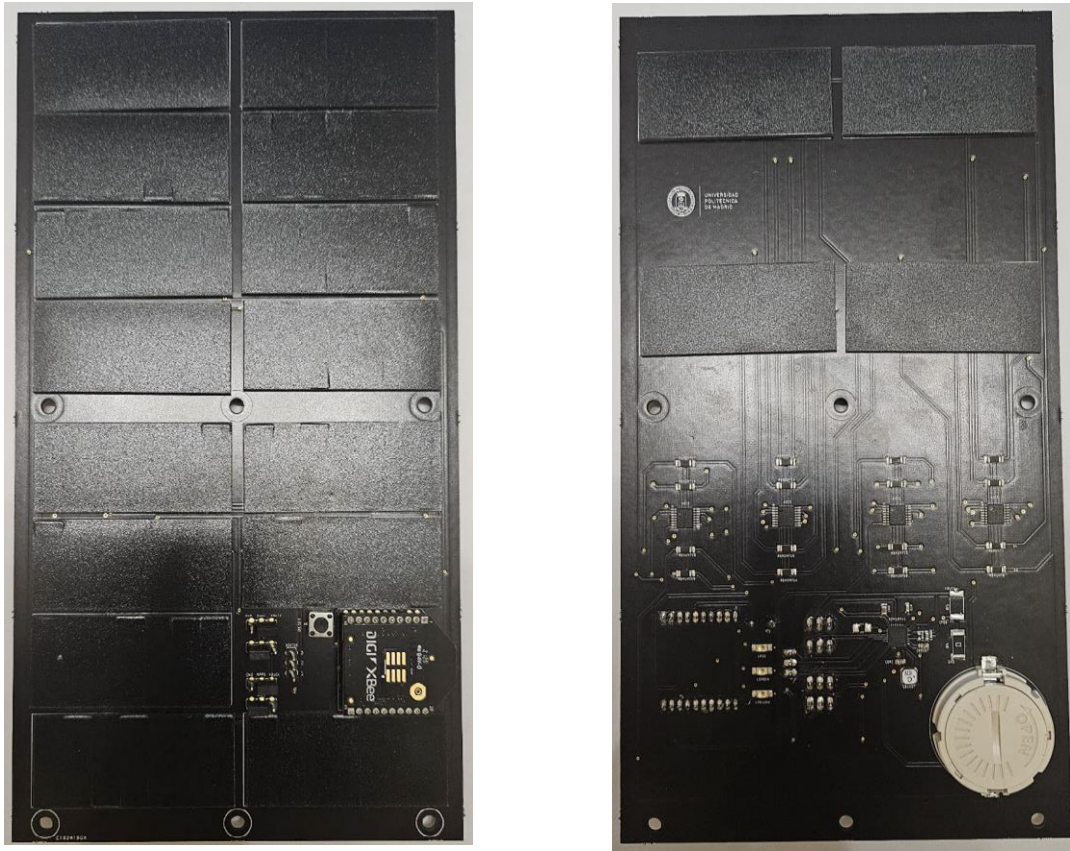


Figura 45. Resultado final del sensor de radiación. Izq. Cara Trasera Dcha. Cara Frontal.

4.5. Desarrollo Software del Sistema.

En este apartado se abordará el desarrollo software implementado en la red de sensores encargada de la medición del albedo. Se detallará la configuración inicial de los dispositivos XBee, las principales funcionalidades de la GUI (*Graphical User Interface* o Interfaz Gráfica de Usuario) desarrollada, y el software específico implementado en los diferentes dispositivos que conforman la red Zigbee, destacando sus funcionalidades y modos de operación.

Para la realización de pruebas y validación del software desarrollado en este contexto se utilizan tres módulos Xbee3. Uno de estos módulos actúa como el nodo coordinador, mientras que los restantes funcionan como dispositivos finales, siguiendo la **topología en estrella** mostrada en la Figura 46.

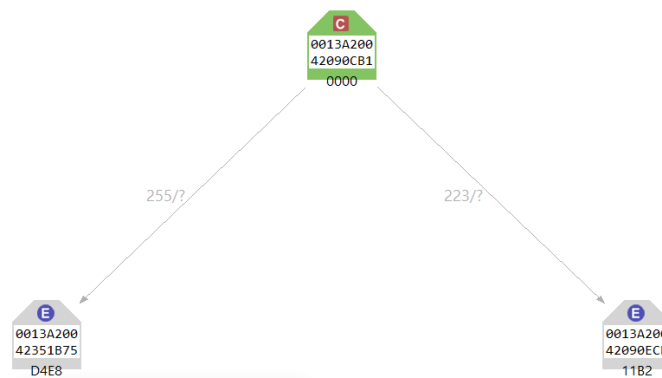


Figura 46. Red Zigbee

Debido a la reducida área de despliegue de los sensores, se elimina la necesidad de utilizar *routers* para la retransmisión de mensajes entre el coordinador y los dispositivos finales. Esto permite una comunicación directa entre ellos, lo cual minimiza la latencia en la red. En A.2 se detalla la latencia específica en las transmisiones de datos dentro de una red Zigbee establecida.

Con el objetivo de optimizar la comunicación entre el usuario y el coordinador de la red Zigbee, se desarrolla una GUI intuitiva. Esta GUI permite iniciar y detener la recolección de datos, así como visualizar los niveles de radiación obtenidos por los sensores. Además, ofrece opciones para exportar los datos recopilados en un fichero Excel para su posterior análisis.

Se realizan las pruebas pertinentes para verificar la eficacia de la aplicación, evaluando su capacidad de comunicación con los componentes de la red en diversos entornos y condiciones. Los resultados obtenidos confirman no solo la viabilidad técnica del sistema desarrollado, sino también las ventajas del uso de Zigbee en términos de flexibilidad, escalabilidad y eficiencia energética.

4.5.1. Programa Interfaz GUI

Para implementar la aplicación, se elige el lenguaje de programación Python debido a su amplia variedad de bibliotecas, incluyendo Tkinter para la creación de interfaces gráficas, la biblioteca Serial para la comunicación serie y Openpyxl para el manejo de archivos Excel.

Al iniciar la aplicación, se presenta una pantalla de inicio con un menú vertical que incluye las opciones 'Principal', 'Excel' e 'Información', facilitando la navegación entre las diferentes pantallas de la aplicación, como se ilustra en la Figura 47.



Figura 47. Pantalla Principal de la GUI de radiación

En el panel principal, el usuario puede seleccionar el puerto de comunicación y la tasa de baudios desde un menú desplegable, estableciendo así la conexión serie con el dispositivo coordinador de la red para el intercambio de datos. Este dispositivo es responsable de comandar a los dispositivos finales para realizar las mediciones en dos modos de experimento:

- **Modo Barrido.** La maqueta tiene un modo de funcionamiento en el que realiza barridos periódicos (típicamente cada 5 minutos) de 1 minuto de duración, en el que recorre todo el rango de seguimiento. Los datos se capturan durante el barrido y se transmiten al finalizar, idealmente en el tiempo de parada entre barridos.
- **Larga Duración.** Este modo está orientado a mediciones de larga duración. Para evitar la saturación de la memoria se transmite los datos en cada intervalo de muestreo. Debido a que el periodo de muestreo es más extenso, se especifica el número de mediciones a promediar para obtener resultados más precisos.

Para el control del multiplexor, que consta de varios canales, se utilizan los botones S1, S2, S3 y S4. El multiplexor selecciona un canal específico en función de las señales de entrada EN, A0, A1 y A2 como se pudo ver en el apartado 4.2.4. Cada botón (S1, S2, S3, S4) está configurado para activar una combinación específica de estas señales, permitiendo al usuario seleccionar el canal o canales deseado del multiplexor que se desea medir, es decir, la tensión que cae en la resistencia R_{shunt} correspondiente a ese modulo.

Descripción de la solución propuesta

Complementario a los modos de recolección de datos, se incluyen funcionalidades adicionales como '**Resetear Coordinador**', '**Descubrir Red**' y '**Dormir Nodos Finales**' proporcionando un control integral sobre el nodo final. En el caso de la función '**Dormir Nodos Finales**', el usuario debe indicar en **segundos** el tiempo que desea que los dispositivos finales permanezcan inactivos.

En la parte inferior del panel principal, un área de texto titulada '**Datos Recibidos**' muestra las lecturas de radiación recibidas en tiempo real, permitiendo al usuario monitorear la transmisión de los datos.

En la opción '**Excel**', se listan los archivos .xlsx generados, como se muestra en la Figura 48. Estos archivos Excel se guardan con el nombre '**RecoleccionDatos_Fecha_Hora**', donde '**Fecha_Hora**' corresponde al momento en que se inició el experimento.



Figura 48. Pestaña Excel

Al acceder al archivo Excel, se desplegará una hoja de cálculo con el formato especificado en la Figura 49. En esta hoja, la columna '**Sensor**' enumera las direcciones MAC de los dispositivos de la red que están activos y realizando mediciones. Las columnas '**ADC**' muestran los valores de tensión en voltios, obtenidos de la caída de tensión en la resistencia *shunt* de 18 Ω. Asimismo, se indica el canal del multiplexor asociado a cada medición y la hora exacta en que se llevó a cabo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Fecha	Hora Recepcion Trama	Sensor	ADC0	ADC1	ADC2	ADC3	Hora Medicion	Canal
1									
2	04-09-2024	00:25:44.978	0013A2004243D058	2.49524	2.24067	1.84505	2.23408	00:25:22.468	1
3	04-09-2024	00:25:45.272	0013A2004243D058	1.24518	1.53175	1.69061	2.14409	00:25:33.043	1
4	04-09-2024	00:25:45.576	0013A2004243D058	1.65422	1.74811	1.71502	2.00026	00:25:22.894	2
5	04-09-2024	00:25:45.785	0013A2004243D058	1.37278	1.51062	1.65910	2.07059	00:25:33.423	2
6	04-09-2024	00:25:45.976	0013A2004243D058	0.99023	1.35019	1.60257	1.98366	00:25:23.289	3
7	04-09-2024	00:25:46.264	0013A2004243D058	0.89645	1.22064	1.53676	1.92064	00:25:33.843	3
8	04-09-2024	00:25:46.458	0013A2004243D058	1.15042	1.35361	1.58779	1.91417	00:25:23.715	4
9	04-09-2024	00:25:46.662	0013A2004243D058	1.00378	1.22674	1.50586	1.85570	00:25:34.279	4
10	04-09-2024	00:26:26.718	0013A2004243D058	1.32357	1.48694	1.57620	1.95141	00:25:54.363	1
11	04-09-2024	00:26:26.925	0013A2004243D058	0.93675	1.29768	1.57107	1.95129	00:26:04.803	1
12	04-09-2024	00:26:27.117	0013A2004243D058	0.96300	1.30879	1.57424	1.97413	00:26:15.240	1
13	04-09-2024	00:26:27.325	0013A2004243D058	1.08206	1.30562	1.51881	1.86497	00:25:54.727	2
14	04-09-2024	00:26:27.532	0013A2004243D058	1.10952	1.31832	1.54517	1.83505	00:26:05.183	2
15	04-09-2024	00:26:27.725	0013A2004243D058	1.11392	1.32662	1.54763	1.84152	00:26:15.635	2
16	04-09-2024	00:26:27.933	0013A2004243D058	0.87094	1.20098	1.51943	1.86801	00:25:55.122	3

Figura 49. Formato Excel de Mediciones

Finalmente, la pestaña '**Información**' de la aplicación, tal como se muestra en la Figura 50, proporciona una descripción general del funcionamiento de la interfaz de usuario y muestra de manera visual la disposición física de los componentes del sensor de radiación.



Figura 50. Ventana Información de la Aplicación de Radiación.

4.5.2. Programación Nodo Coordinador

El software del nodo coordinador, que se puede encontrar en el **A.3 Software Nodo Coordinador** se diseña para administrar la comunicación y el intercambio de datos entre los diferentes nodos que integran la red Zigbee.

Al iniciar el programa se configura el sistema para recibir mensajes y realiza un descubrimiento inicial de la red para detectar los dispositivos conectados a la misma, obteniendo la dirección EUI64 y el identificador de cada nodo.

Dentro del software se encuentra la función **'procesar_comandos'** que permite la interacción en tiempo real entre el coordinador y el usuario a través de comandos enviados por la interfaz gráfica. Para que el coordinador pueda capturar los datos se emplea el método:

sys.stdin.buffer.read()

Los comandos definidos son:

- **Comando 'D': Descubrimiento Dispositivo.** Tras recibir este comando el coordinador ejecuta la función **'descubrir_dispositivos'**, que escanea la red en busca de otros dispositivos Xbee conectados y mostrándolos por pantalla en la interfaz de usuario.
- **Comando 'R': Reiniciar Dispositivo.** Está diseñado para reiniciar el dispositivo mediante **'machine.reset()'**
- **Comando 'C': Inicio Larga Duración.** Tras recibir el comando se activa el experimento de larga duración y se formatean un mensaje que se transmite a todos los dispositivos de la red Zigbee donde se indican los parámetros correspondientes. Adicionalmente el coordinador pasa al modo continuo donde se encuentra en una ejecución continua esperando recibir los mensajes de los dispositivos finales. Cuando estos se reciben, se muestra el contenido del mensaje por pantalla a través de la interfaz de usuario.
- **Comando 'O': Inicio Modo Barrido.** El programa inicia el modo de adquisición de datos a intervalos regulares tras validar los parámetros proporcionados por el usuario. Estos parámetros, como la duración del experimento, el periodo de muestreo, intervalo de transmisión, número de

datos promediados, y canales multiplexor, entre otros, se transmiten a los dispositivos de la red para comenzar la toma de medida. Si los datos ingresados son incorrectos, se genera una excepción '*ValueError*'. En este modo, al igual que en el modo larga duración, el coordinador sigue recibiendo, procesando y mostrando los datos en pantalla continuamente hasta que el experimento finalice.

- **Comando 'S': Dormir Dispositivos Finales.** Indica a los dispositivos finales que deben entrar en modo de bajo consumo. El programa solicita un valor adicional, que es el tiempo que los nodos finales deben permanecer dormidos en segundo.

4.5.3. Programación Nodo Dispositivos Finales

Una vez conocida la interfaz gráfica que controla los sensores de la red y el software del coordinador, este apartado se centra en el software de los dispositivos finales. El programa desarrollado tiene como objetivo realizar mediciones utilizando los cuatro canales ADC y transmitir los datos al coordinador de manera eficiente y precisa, operando en dos: el **modo barrido** y el **modo larga duración**.

Inicialmente, se considera la posibilidad de utilizar programación basada en hilos, ya que permite ejecutar múltiples tareas de manera concurrente, lo que facilita la gestión de diversas operaciones. Sin embargo, al revisar el foro *Problema de Hilos en Xbee3* [44] se determina que el uso de hilos no es viable en el entorno del módulo Xbee3. Como resultado, se opta por implementar una programación secuencial, también conocida como programación monohilo.

La programación secuencial presenta ciertas limitaciones, como el riesgo de interrupciones o demoras en el ciclo de ejecución. Al realizarse todas las operaciones en un único flujo de control, si una tarea toma demasiado tiempo, como la transmisión de varias tramas, el resto del programa se ve obligado a esperar, lo que puede causar demoras significativas. Para solventar este problema se ajusta dinámicamente el tiempo de espera entre ciclos de muestreo para mantener un periodo de muestreo constante. Como se muestra en las siguientes líneas de código, primero se calcula cuánto tiempo toma realizar las operaciones (como medir los canales) y luego se ajusta la pausa (`utime.sleep_us()`) para compensar ese tiempo, evitando que las operaciones alteren la duración total del ciclo de muestreo.

```
while condiciones:
    tiempoEjecucion = utime.ticks_diff(utime.ticks_us(), tms_inicioModoBarrido)
    utime.sleep_us(int(PERIODO_MUESTREO) * 1000 - tiempoEjecucion)
    tms_inicioModoBarrido = utime.ticks_us()
    #Resto funciones programa.
    medirCanalesPorSecuencia()
    memoria_libre, memoria_total = imprimirMemoria()
    porcentajeMemoriaLibre = (memoria_libre / memoria_total) * 100
```

Otro aspecto importante es la elección de la memoria en la que se almacenan los datos. La elección de la memoria RAM se debe a la necesidad de alta velocidad en las operaciones de escritura y lectura de datos. La memoria RAM del dispositivo XBee3 tiene una capacidad limitada de 32 KB, suficiente para almacenar temporalmente los datos antes de ser transmitidos al coordinador. Aunque la memoria Flash ofrece un almacenamiento persistente que conserva los datos incluso después de un reinicio o apagado, su velocidad de acceso es inferior, lo que la hace menos adecuada para este caso de uso.

Finalmente, es esencial gestionar de manera eficiente la transmisión de datos de cada nodo. En una red Zigbee, todos los nodos comparten el mismo canal de comunicación, lo que significa que, si dos o más nodos intentan transmitir al mismo tiempo, se pueden producir colisiones, resultando en la pérdida de datos y la necesidad de retransmisiones. Para evitar este problema, Zigbee emplea técnicas como **CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que es un protocolo de acceso al medio que ayuda a los nodos a "escuchar" el canal antes de transmitir, y si detectan que está ocupado

está ocupado, esperan un tiempo aleatorio antes de reintentar transmitir de nuevo, lo que reduce la probabilidad de colisiones.

Todos los modos de funcionamiento del módulo Xbee emplean la función **‘enviarDatosPorSecuencia()’**. Esta función se encarga de gestionar la transmisión de datos de los canales activos hacia un coordinador Zigbee. Para cada canal activo, la función itera sobre una lista de *timestamps* y envía los datos recogidos por los cuatro convertidores ADC (almacenados en las variables *medidas_adc0*, *medidas_adc1*, *medidas_adc2* y *medidas_adc3*), junto con el *timestamp* correspondiente y el identificador del canal. Estos datos se agrupan en un mensaje formateado y se envían al coordinador utilizando el método **xbee.transmit()**.

mensaje = "ADC0: %f, ADC1: %f, ADC2: %f, ADC3: %f, Tiempo: %d, Canal: %d"

Dependiendo del modo de operación, que puede ser barrido (**modo_barrido**) o continuo (**modo_continuo**), la función controla el proceso de transmisión. En el modo barrido, simplemente se intenta enviar los datos, y si la transmisión tiene éxito, el índice avanza al siguiente dato. Si ocurre un error en la transmisión, se atrapa la excepción y el programa intenta transmitir de nuevo. En el modo continuo, además de intentar retransmitir en caso de error, se toman nuevas mediciones si ocurre una falla.

Conociendo todas las limitaciones al programar el módulo XBee, se procede a definir los modos de funcionamiento implementados.

Modo Barrido

En el modo barrido de operación del dispositivo XBee3, se establece la captura de mediciones según los canales del multiplexor seleccionados durante el tiempo que dura el experimento. Cada canal ADC (ADC0 a ADC3) convierte señales analógicas en valores digitales utilizando la siguiente fórmula:

$$V_V = \frac{(lectura\ ADC \cdot V_{ref_V})}{4095} \quad (21)$$

Donde V_{ref_V} es la referencia de voltaje de 1.25V

Es importante mencionar que los módulos XBee3 usan la función **‘read()’** para obtener muestras del ADC en un rango de 12 bits (0 a 4096), lo cual es estándar en implementaciones de MicroPython.

Después de cada conversión, los valores resultantes se almacenan temporalmente en variables de la memoria RAM del XBee3. Estos datos se organizan y formatean en un mensaje que contiene los valores de cada ADC y el tiempo transcurrido desde el inicio de la medición. Este mensaje formateado se transmite al coordinador XBee utilizando la función **‘xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, message)’**.

En este modo, los datos se envían cuando finaliza la duración del experimento o cuando se ha completado la memoria del Xbee3. El programa ocupa un 29% de la memoria, por lo que solo disponemos del 71% restante para almacenar datos. como se muestra en la Figura 51.

```
+-----+
|           Programa del Dispositivo Final           |
+-----+
Memoria Total: 32000 bytes
Memoria Usada: 9440 bytes
Memoria Libre: 22560 bytes
```

Figura 51. Información memoria nodo final

En este modo de experimento, la transmisión de datos tarda mucho tiempo debido a la gran cantidad de tramas que se debe enviar. Por ejemplo, en un experimento que toma mediciones de los 4 canales del multiplexor durante 1 minuto, con un intervalo de 500 ms, se estima que la transmisión de 1549 tramas llevaría aproximadamente 5 minutos, es decir, 387 tramas por sensor. En el A.2. Latencia Envío de Datos en una red Zigbee se estima un tiempo de 142 ms en el envío de una trama.

Modo Continuo

A diferencia del modo barrido, el modo continuo está diseñado para recopilar, promediar, almacenar, y transmitir datos de los sensores ADC durante un periodo de tiempo específico ('**DURACION_EXPERIMENTO**').

Al activar el modo continuo, el sistema inicializa los canales del multiplexor, configura los temporizadores para controlar los intervalos de muestreo y transmisión, y calcula el número de lecturas por intervalo en función del número de muestra a promediar.

En cada intervalo de muestreo ('**INTERVALO_MUESTREO**') el sistema toma múltiples lecturas de los canales ADC. La cantidad de lecturas depende del número medidas determinado por el usuario ('**NUMERO_MEDIDAS**'). El valor promedio de estas lecturas, junto con la hora exacta en que se obtienen, se almacenan antes de ser transmitidas al coordinador XBee. Los valores promediados y la hora se almacenan temporalmente en *array* (*medidas_adc0*, *medidas_adc1*, *timestamp*, etc.) en la **memoria RAM** del XBee 3.

Al final de cada intervalo de muestreo, el sistema verifica si ha transcurrido el tiempo suficiente desde la última transmisión de datos, según el valor establecido en intervalo de muestreo ('**INTERVALO_TRANSMISION**'). Si se cumple esta condición, se comprime y formatea un mensaje con los datos acumulados y se transmite al coordinador Xbee3.

Al igual que en el modo barrido se hace un monitoreo continuo de la memoria durante la duración del experimento, enviando los datos en el momento que descienda por debajo del umbral establecido.

Cuando el tiempo del experimento llega a su fin, el bucle se detiene, y el sistema se asegura de enviar cualquier dato restante al coordinador para que no se pierda información. Finalmente, el modo continuo se desactiva, y se envía una señal al coordinador XBee indicando que el experimento ha concluido y que el sistema está listo para regresar a su estado de reposo.

El modo intervalo se centra en la eficiencia energética para maximizar la duración de la batería. Al realizar mediciones en intervalos predefinidos en lugar de operar continuamente, se reduce significativamente el consumo de energía. Para reducir aún más el consumo, se pone la radio en un estado de inactividad, activándola solo cuando es necesario. En las siguientes líneas de código se representa la implementación.

```
xbec.idle_radio(False)
```

```

enviarDatosPorSecuencia()
xbee.idle_radio(True)
    
```

Cuando es necesario liberar la memoria o es el momento de transmitir las mediciones se activa la radio (`xbee.idle_radio(False)`) y luego se vuelve a desactivar (`xbee.idle_radio(True)`).

4.5.4. Intercambio de mensajes entre los diferentes elementos de la red

Modo Continuo

La Figura 52 ilustra el flujo de comunicación entre la interfaz gráfica y los dispositivos de la red Zigbee. El proceso comienza con la conexión serial entre la interfaz gráfica y el coordinador. Una vez establecida la conexión, el usuario puede iniciar el descubrimiento de la red, lo que hace que el coordinador envíe un comando para identificar los dispositivos finales operativos. Estos responden, y la información se muestra en la pantalla principal de la aplicación indicando la MAC de cada uno de ellos y el nombre del dispositivo asignado.

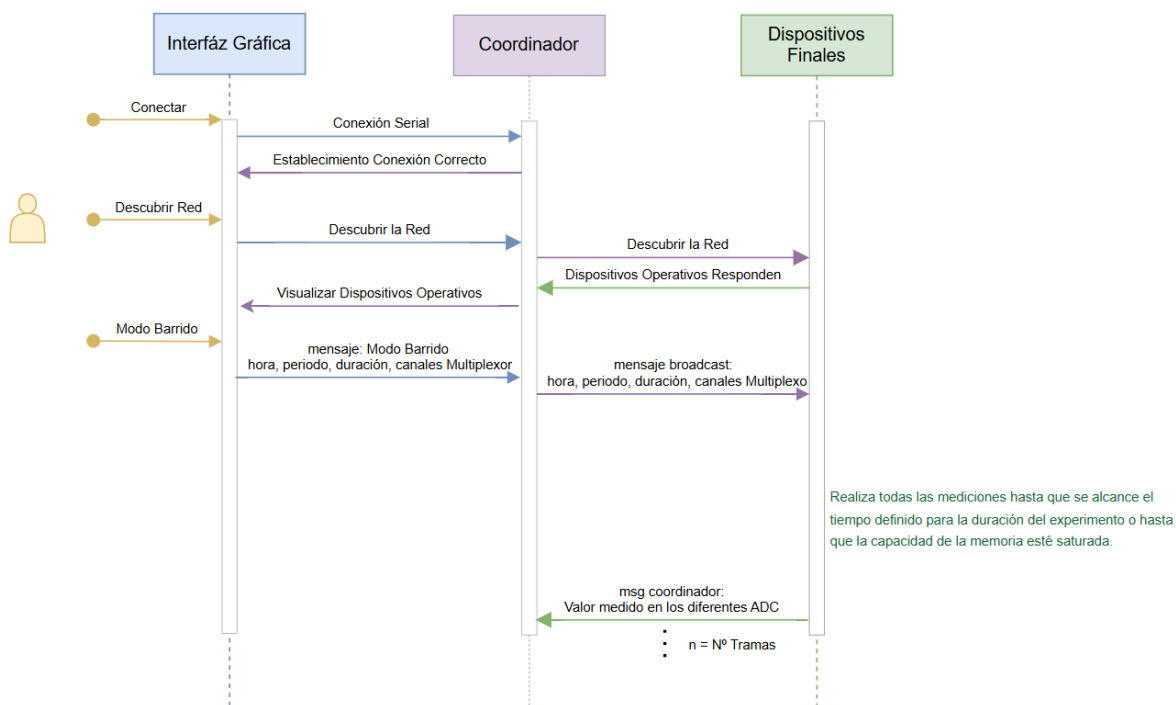


Figura 52. Intercambio de mensajes en modo continuo.

Al activar el **modo continuo**, el usuario envía una solicitud al coordinador de la red Zigbee. El coordinador difunde esta solicitud como una orden de inicio de medición, especificando los canales del multiplexor, periodo de muestreo, la duración del experimento y la hora de comienzo. A partir de ese momento, los sensores comienzan a recolectar datos de radiación utilizando los ADC hasta que se alcance el tiempo límite del experimento o la memoria se sature. Los datos recopilados se presentan en la aplicación y se almacenan en un archivo Excel.

Modo Barrido

La Figura 53 muestra el flujo de mensajes en el **modo barrido**. Este modo tiene como objetivo optimizar el consumo de energía del nodo final. Este modo opera adquiriendo muestras de los sensores y realizando un promedio para su posterior transmisión de manera periódica. Al reducir la frecuencia de transmisión, se minimiza el consumo de energía asociado a la comunicación inalámbrica.

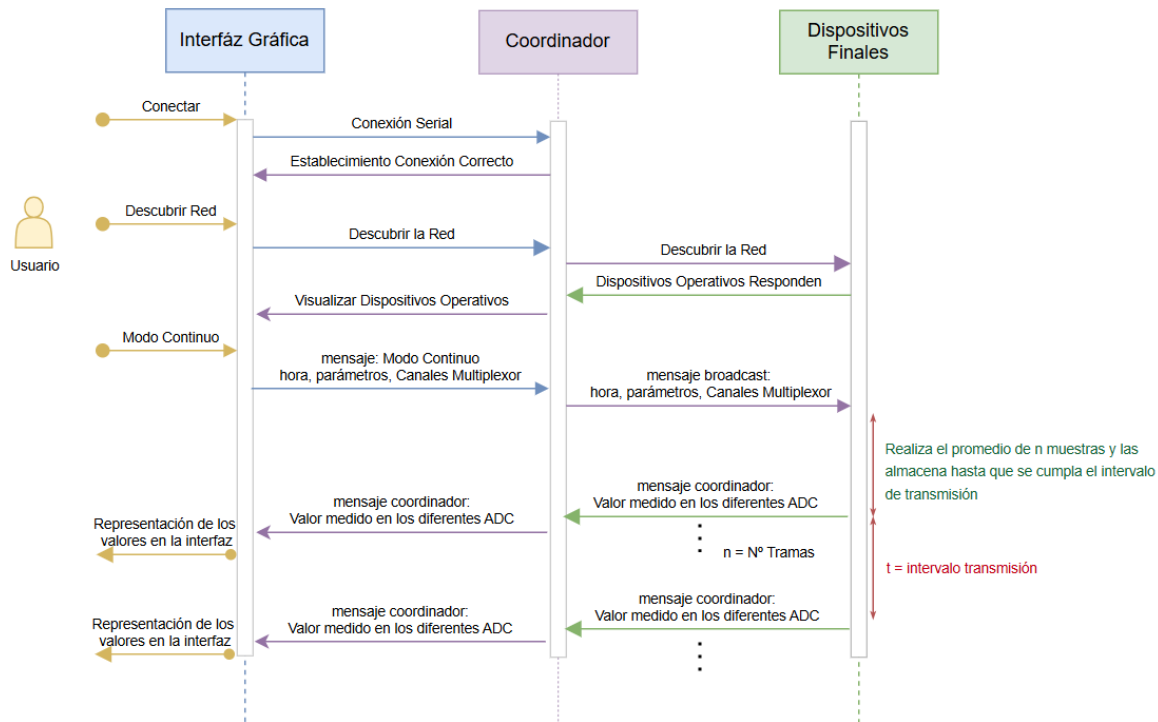


Figura 53. Intercambio de mensajes en modo barrido.

Similar al modo continuo, el proceso comienza estableciendo la conexión serial e iniciando el descubrimiento de la red mediante el pulsado de los botones correspondientes por parte del usuario. Sin embargo, en el modo barrido, es necesario enviar un mensaje con parámetros específicos adicionales a la hora y el canal del multiplexor, los cuales son:

- PERIODO DE MUESTREO: Intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas.
- NUMERO DE MUESTRAS: cantidad de muestras que se promedian.
- DURACIÓN EXPERIMENTO: Tiempo total de ejecución del experimento expresado en minutos.
- INTERVALO TRANSMISION: Tiempo entre cada envío de datos al coordinador expresado en segundos.

Una vez iniciado por parte del usuario el modo barrido se transmiten todos estos parámetros del coordinador a los dispositivos finales. Los dispositivos finales realizan el promedio de un número determinado de muestras en los distintos ADC, almacenándolos en un *array* hasta poder enviarlos al coordinador cada intervalo de transmisión. Este ciclo se repite el tiempo que dure el experimento.

Dormir Dispositivo

La Figura 54 muestra el flujo de mensajes cuando el usuario solicita que los dispositivos finales entren en **estado de reposo** para minimizar el consumo de batería una vez concluida la adquisición de datos de

radiación. En esta ocasión, la comunicación entre el coordinador y el dispositivo final especifica la duración del tiempo durante el cual los dispositivos finales deben permanecer en reposo.

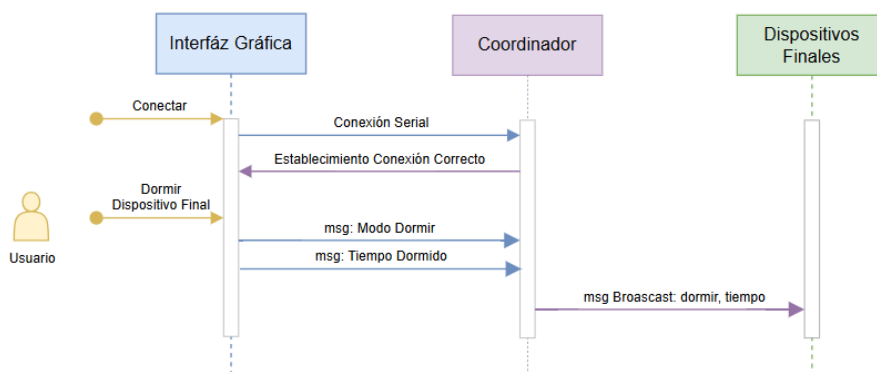


Figura 54. Intercambio mensaje para dormir dispositivo final

Reseteo Coordinador

En ocasiones, el dispositivo coordinador puede quedar bloqueado. Por esta razón, se ha añadido la funcionalidad de reiniciar mediante la interfaz gráfica, dando lugar al flujo de mensajes descrito en la Figura 55. Adicionalmente, se puede reiniciar el módulo Coordinador pulsando el botón *reset* de la placa evaluación (76000979) usada para alimentar y programar el coordinador.

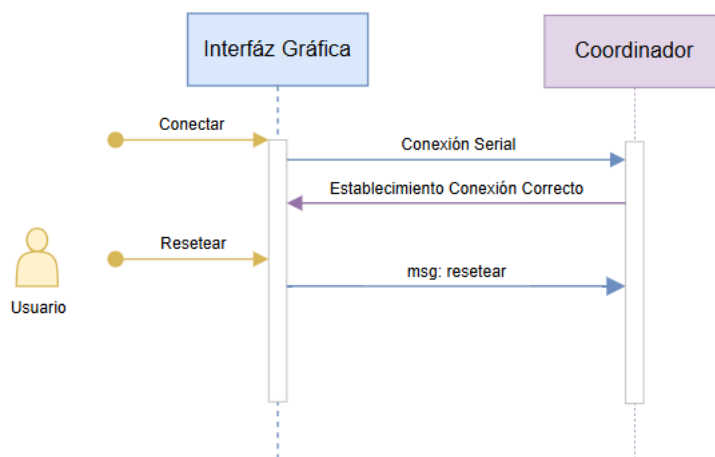


Figura 55. Intercambio de mensajes al resetear coordinador

5. Resultados

En este apartado se detallan las pruebas realizadas para validar el correcto funcionamiento del sensor de radiación, desde su funcionalidad hardware hasta la integración con el software y la evaluación del sistema completo.

5.1. Pruebas Software

Previo a la integración de los módulos XBee3 en las PCB de los sensores de radiación, se realizan pruebas funcionales para asegurar la adecuada operación de la aplicación y la comunicación entre los dispositivos. Estas pruebas involucran 4 dispositivos Xbee3, uno de los cuales actúa como coordinador de la red Zigbee y los otros como nodos finales.

5.1.1. Conexión y Configuración.

La evaluación comienza comprobando si la aplicación puede detectar y establecer una conexión exitosa con el módulo coordinador. En la Figura 56, dentro del bloque de ‘Datos Recibidos’, se muestra un escaneo de la red Zigbee para identificar los dispositivos finales operativos. Se verifica la detección de tres dispositivos finales asociados al coordinador, identificados por su dirección MAC y el nombre.



Figura 56. Escaneo de la red Zigbee a través de GUI

5.1.2. Verificación Experimento Modo Barrido.

La verificación del modo barrido evalúa la comunicación entre el nodo coordinador y los nodos finales. La Figura 57 representa los mensajes intercambiados; el coordinador envía un mensaje indicando la activación del modo barrido con los datos correspondientes y los canales del multiplexor que se desea medir, en este caso los 4 canales. Los nodos finales responden con sus valores medidos, y el coordinador recibe y visualiza los datos en la interfaz gráfica de usuario.



Figura 57. Verificación funcionalidad en modo continuo.

En la Tabla 18 se muestra el Excel resultante del modo barrido, mostrando las mediciones obtenidas de los diferentes nodos, aunque estas son irrelevantes ya que el sensor no se encuentra en la maqueta.

Tabla 18. Resultado mediciones modo barrido

Fecha	Hora Recepcion Trama	Sensor	ADC0	ADC1	ADC2	ADC3	Hora Medicion	Canal
10-09-2024	18:01:03.214	0013A2004243CEAF	0.642857	1.238095	1.913309	2.269841	17:58:26.491	1
10-09-2024	18:01:27.620	0013A2004243CEAF	0.333944	0.811966	1.628205	2.021368	17:58:26.497	2
10-09-2024	18:01:53.614	0013A2004243CEAF	0.502442	0.981074	1.736264	2.040293	17:58:26.508	3
10-09-2024	18:03:59.209	0013A2004243CEAF	0.372405	0.798535	1.603785	1.90232	17:58:26.519	4
10-09-2024	17:59:27.034	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00122	0.00122	17:58:26.496	1
10-09-2024	17:59:51.432	0013A2004243D058	0.00000	0.00061	0.00122	0.00183	17:58:26.502	2
10-09-2024	18:00:15.914	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00122	0.00366	17:58:26.514	3
10-09-2024	18:00:40.317	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00061	0.00061	17:58:26.520	4
10-09-2024	18:02:04.058	0013A200423EE703	0.00000	0.00000	0.00061	0.00000	17:58:26.500	1
10-09-2024	18:02:28.451	0013A200423EE703	0.00000	0.00061	0.00061	0.00061	17:58:26.506	2
10-09-2024	18:02:52.937	0013A200423EE703	0.00122	0.00061	0.00061	0.00000	17:58:26.517	3
10-09-2024	18:03:17.322	0013A200423EE703	0.00000	0.00061	0.00061	0.00061	17:58:26.524	4
10-09-2024	18:01:03.425	0013A2004243CEAF	0.429792	1.010989	1.7558	2.126984	17:58:26.995	1
10-09-2024	18:01:27.816	0013A2004243CEAF	0.31685	0.699023	1.546398	2.04884	17:58:27.007	2
10-09-2024	18:01:53.805	0013A2004243CEAF	0.180708	0.634921	1.504274	1.826007	17:58:27.019	3
10-09-2024	18:03:59.391	0013A2004243CEAF	0.370574	0.716728	1.529914	1.801587	17:58:27.025	4
10-09-2024	17:59:27.229	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00122	0.00061	17:58:26.996	1
10-09-2024	17:59:51.623	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00000	0.00122	17:58:27.002	2
10-09-2024	18:00:16.122	0013A2004243D058	0.00061	0.00000	0.00122	0.00305	17:58:27.013	3
10-09-2024	18:00:40.504	0013A2004243D058	0.00000	0.00000	0.00061	0.00061	17:58:27.019	4
10-09-2024	18:02:04.249	0013A200423EE703	0.00000	0.00000	0.00061	0.00000	17:58:27.000	1
10-09-2024	18:02:28.640	0013A200423EE703	0.00000	0.00000	0.00061	0.00000	17:58:27.006	2
10-09-2024	18:02:53.128	0013A200423EE703	0.00000	0.00000	0.00000	0.00061	17:58:27.018	3
10-09-2024	18:03:17.531	0013A200423EE703	0.00000	0.00061	0.00000	0.00061	17:58:27.024	4

Tras procesar los datos, se confirma que se cumple con la frecuencia de muestreo establecida, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Periodo de Muestro Sensores.

	FRECUENCIA MUESTREO		
	0013A200423EE703	0013A2004243CEAF	0013A2004243D058
Canal 1	0:00:00.500	0:00:00.504	0:00:00.500
Canal 2	0:00:00.500	0:00:00.510	0:00:00.500
Canal 3	0:00:00.501	0:00:00.511	0:00:00.499
Canal 4	0:00:00.500	0:00:00.506	0:00:00.499

Otro aspecto importante es el desfase entre los diferentes nodos, que oscila entre **1 ms** y los **9 ms** según lo mostrado en la Tabla 20. En una red Zigbee, el coordinador envía un mensaje de difusión a todos los nodos en la red para indicar que deben comenzar el modo barrido. El tiempo que cada nodo tarda en recibir este mensaje y llevar a cabo la medición está influenciado por varios factores. Entre estos, se encuentran el tiempo de propagación del mensaje, que depende de la distancia entre el nodo y el coordinador, así como de la presencia de obstáculos y las características del entorno. Además, el tiempo necesario para procesar el comando puede variar según el estado del software y hardware del nodo haciendo que este desfase aumente.

Tabla 20. Desfase entre los canales de los diferentes sensores

	DEFASE ENTRE SENSORES			
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
Sensor 1 y 2	0:00:00.005	0:00:00.005	0:00:00.006	0:00:00.001
Sensor 2 y 3	0:00:00.004	0:00:00.004	0:00:00.003	0:00:00.004
Sensor 1 y 3	0:00:00.009	0:00:00.009	0:00:00.009	0:00:00.005

Por último, también se ha identificado un desfase entre los diferentes canales del sensor, es decir, entre S1, S2, S3 y S4, el cual se cuantifica en la Tabla 21. En las columnas 1 a 3 se puede observar que el tiempo que tarda en conmutar de un canal a otro oscila entre **6 ms** y **11 ms**. Adicionalmente, en la última columna se muestra el tiempo total que tarda en medir los cuatro canales.

	DEFASE ENTRE CANALES			
	Canal 1-2	Canal 2-3	Canal 3-4	Canal 1-4
0013A200423EE703	0:00:00.006	0:00:00.011	0:00:00.007	0:00:00.024
0013A2004243CEAF	0:00:00.006	0:00:00.011	0:00:00.011	0:00:00.028
0013A2004243D058	0:00:00.006	0:00:00.012	0:00:00.006	0:00:00.024

Tabla 21. Desfase entre canal del sensor.

5.1.3. Verificación Experimento Larga Duración.

En este modo de funcionamiento, al igual que en el experimento en modo barrido, se especifican el periodo de muestreo, los canales a medir y la hora. Sin embargo, se incorporan dos parámetros adicionales: **número de datos promediados**, que corresponde a la cantidad de muestras tomadas por el ADC, las cuales se promedian para obtener una medida más precisa, y el **intervalo de transmisión**. Este último parámetro se ajusta para evitar que la memoria se sature y que el tiempo de transmisión sea excesivo.

Resultados

La Figura 58 muestra los valores configurados y el mensaje enviado desde el coordinador a los nodos finales. La prueba tiene una duración de 1 hora, durante la cual los nodos finales esperan un intervalo de 60 segundos entre cada envío de tramas. Las mediciones se realizan con un periodo de muestreo de 30 segundos y se obtienen promediando 5 muestras.



Figura 58. Verificación funcionalidad en modo intervalo.

En la Tabla 22 se muestra el Excel resultante del modo larga duración. Como se puede observar, la primera trama registra una hora de medición de **20:49:10.977** y la última trama **21:49:12.439** del identificado con el color naranja, lo que confirma que la duración del experimento ha sido de 1 hora. Esto se cumple para los 3 sensores.

Tabla 22. Resultado mediciones experimento larga duración.

Fecha	Hora Recepción Trama	Sensor	ADCO	ADC1	ADC2	ADC3	Hora Medicion	Canal
06-09-2024	20:50:18.044	0013A2004243D058	0.000122	0	0.00061	0.000855	20:49:10.977	1#
06-09-2024	20:50:14.734	0013A200423EE703	0.00061	0.00049	0.00037	0.00024	20:49:11.000	1#
06-09-2024	20:50:18.250	0013A2004243D058	0.000244	0.000122	0.000977	0.000732	20:49:30.984	1#
06-09-2024	20:50:11.533	0013A2004243CEAF	0.899512	1.251522	1.867903	2.350561	20:49:10.977	1#
06-09-2024	20:50:12.317	0013A2004243CEAF	0.825261	1.025025	1.619905	1.894156	20:49:10.985	2#
06-09-2024	20:50:19.066	0013A2004243D058	0.000000	0.000000	0.000855	0.000977	20:49:10.985	2#
06-09-2024	20:50:15.533	0013A200423EE703	0.00061	0.00061	0.00037	0.00049	20:49:10.990	2#
06-09-2024	20:50:11.709	0013A2004243CEAF	0.813062	1.194865	1.746899	2.321378	20:49:30.989	1#
...
06-09-2024	21:49:15.108	0013A200423EE703	0.00073	0.00024	0.00037	0.00012	21:49:12.328	1#
06-09-2024	21:49:15.522	0013A200423EE703	0.00049	0.00037	0.00037	0.00024	21:49:12.341	2#
06-09-2024	21:49:15.963	0013A200423EE703	0.00012	0.00061	0.00000	0.00110	21:49:12.355	3#
06-09-2024	21:49:16.467	0013A200423EE703	0.00024	0.00024	0.00024	0.00049	21:49:12.368	4#
06-09-2024	21:49:17.013	0013A2004243D058	0.000000	0.000122	0.000732	0.001099	21:49:12.401	1#
06-09-2024	21:49:17.520	0013A2004243D058	0.000122	0.000000	0.000855	0.001221	21:49:12.414	2#
06-09-2024	21:49:19.058	0013A2004243CEAF	0.897673	1.217945	1.740307	2.362158	21:49:12.427	1#
06-09-2024	21:49:18.012	0013A2004243D058	0.000122	0.000122	0.000977	0.000977	21:49:12.427	3#
06-09-2024	21:49:19.493	0013A2004243CEAF	0.79279	1.001099	1.563378	1.873755	21:49:12.435	2#
06-09-2024	21:49:18.559	0013A2004243D058	0.000122	0.000000	0.000732	0.001221	21:49:12.439	4#
06-09-2024	21:49:19.911	0013A2004243CEAF	0.604379	0.799626	1.335775	1.553361	21:49:12.453	3#
06-09-2024	21:49:20.352	0013A2004243CEAF	0.588518	0.732464	1.173259	1.332975	21:49:12.461	4#

Aunque en la mayoría de las tramas se respeta el periodo de muestreo dado que la transmisión no afecta al mismo, hay casos en los que no se cumple, como se muestra en la Tabla 23. Esto sucede cuando el canal de comunicación entre el nodo final y el coordinador de la red Zigbee está ocupado, impidiendo que alguno de los sensores pueda transmitir. En esta situación el sensor toma medidas hasta que el canal quede libre.

Tabla 23. Variaciones en el periodo de muestreo

Fecha	Hora Recepcion Trama	Sensor	ADC0	ADC1	ADC2	ADC3	Hora Medicion	Canal	Periodo Muestreo
06-09-2024	21:30:21.873	0013A2004243D058	0.000000	0.000122	0.000732	0.000855	21:30:11.991	4	0:00:20.002
06-09-2024	21:31:46.709	0013A2004243D058	0.000000	0.000122	0.000855	0.000610	21:30:31.993	4	0:00:20.013
06-09-2024	21:31:47.061	0013A2004243D058	0.000000	0.000000	0.001099	0.000977	21:30:52.006	4	0:00:20.009
06-09-2024	21:31:47.429	0013A2004243D058	0.000000	0.000244	0.000732	0.000855	21:31:12.015	4	0:00:20.007
06-09-2024	21:31:47.714	0013A2004243D058	0.000000	0.000122	0.001099	0.000855	21:31:32.022	4	0:00:04.911
06-09-2024	21:31:48.131	0013A2004243D058	0.000122	0.000122	0.000488	0.000977	21:31:36.933	4	0:00:15.098
06-09-2024	21:33:09.145	0013A2004243D058	0.000244	0.000000	0.000855	0.000977	21:31:52.031	4	0:00:20.013
06-09-2024	21:33:09.491	0013A2004243D058	0.000000	0.000122	0.001221	0.000855	21:32:12.044	4	0:00:20.004

5.2. Validación fuente de alimentación del sensor.

La fuente de alimentación del sensor de radiación está compuesta por dos elementos: el regulador de carga solar y la batería. Dado que estos son componentes críticos se realizan las siguientes pruebas específicas para verificar su correcto funcionamiento.

5.2.1. Funcionamiento normal.

El sensor la mayor parte del tiempo debe encontrarse en el modo funcionamiento normal, en el cual se debe cumplir la condición, $V_{OVDIS} = 3.60 V < V_{BATT} < V_{OVCH} = 4.12 V$. Para verificar este modo, se selecciona una batería cargada que se encuentre dentro de este umbral.

Una vez conectada la batería al sistema y comprobado que el regulador está en modo de sueño profundo, con todos los pines deshabilitados, se procede a exponer el sensor a la luz solar directa. Bajo estas condiciones, es necesario verificar que la entrada del regulador reciba al menos **380 mV** y una potencia mínima de **3 μ W**, tal como se muestra en la Figura 59, para que el sensor salga del estado de sueño profundo.

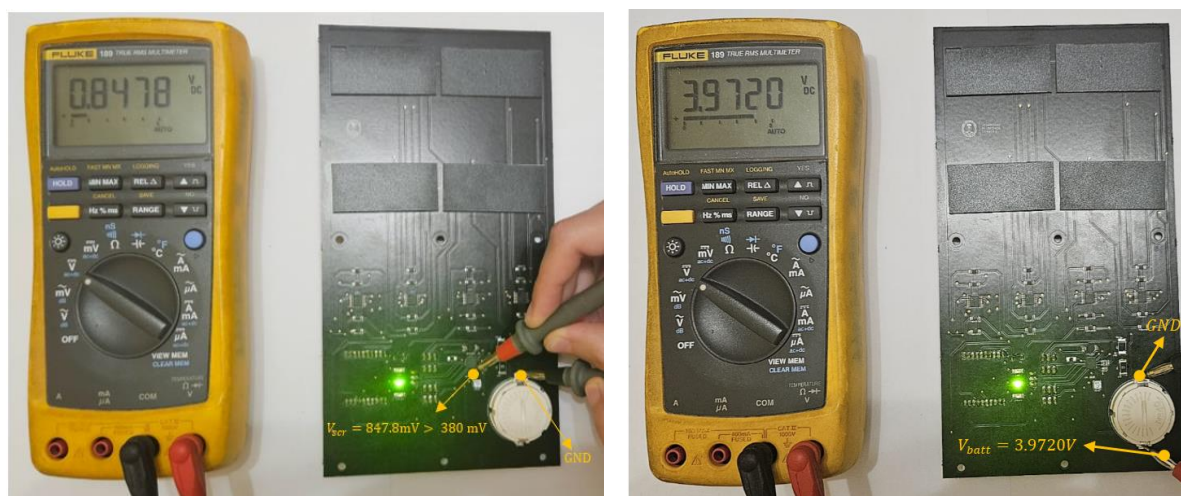


Figura 59. Medida de V_{scr} y V_{batt}

Una vez en el modo de despertar, se verifica que los voltajes sean aproximadamente $V_{boost} = V_{OVCH} = 4.12 V$ y $V_{buck} = 2.2 V$. Como $V_{BATT} > V_{CHRDY}$ se confirma que la batería está completamente cargada, permitiendo que el circuito pase al modo de funcionamiento normal.



Figura 60. Medidas V_{boost} y V_{buck}

Por último, se comprueba que la tensión del LDO es la configurada, es decir, $V_{HVOUT} = 3.3 V$

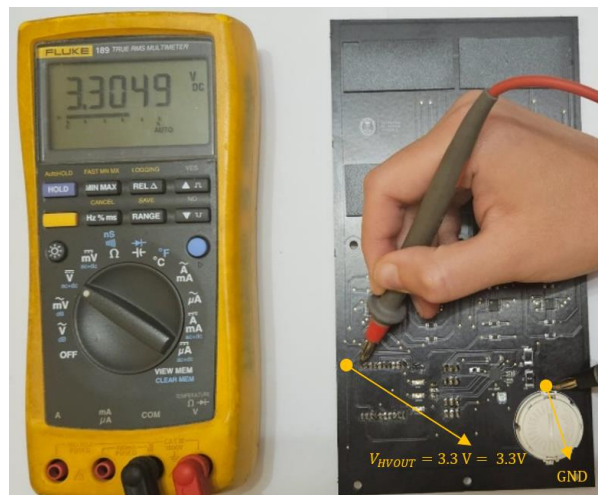


Figura 61. Medida V_{HVOUT}

En este modo, cuando se recolecta energía, el convertidor elevador suministra corriente tanto a la batería como a los reguladores LDO. Sin embargo, con el tiempo, pueden ocurrir situaciones donde la batería se descarga porque el consumo de la carga supera la energía suministrada por los módulos fotovoltaicos. Esto provoca que $V_{BATT} < V_{OVDIS} = 3.6 V$ haciendo que el regulador entre al modo de apagado.

5.2.2. Carga de Batería.

Para verificar que el regulador de carga está funcionando adecuadamente, se procede a analizar la variación en la descarga de la batería durante el proceso de calibración de las células, con el módulo colocado en dos orientaciones diferentes. En primer lugar, se colocan las células fotovoltaicas orientadas hacia la radiación solar directa como se muestra en la Figura 62 (izquierda) y, en segundo lugar, se posicionan captando la radiación reflejada en Figura 62 (derecha).

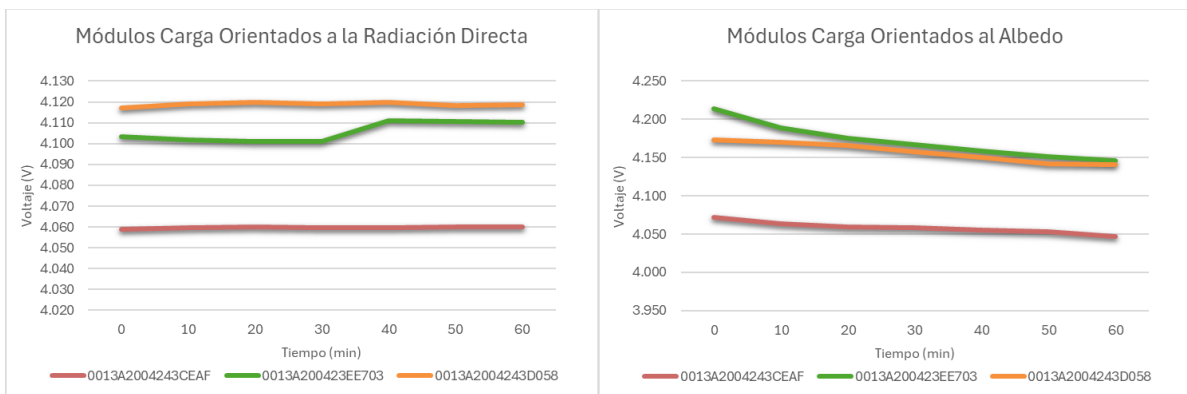


Figura 62. Colocación células en seguidor de doble eje.

Para este análisis, se toman mediciones durante un periodo de una hora, registrando los datos cada 10 minutos. Los resultados se muestran en la Gráfica 1.

En la gráfica de la izquierda, donde las células están orientadas hacia la radiación directa, se observa que la tensión de la batería se mantiene constante. Sin embargo, en la gráfica de la derecha, cuando las células están orientadas hacia la captación del albedo, se aprecia una descarga gradual de la batería. Esta descarga se debe a que la cantidad de radiación reflejada por el suelo es considerablemente menor que la radiación directa, lo que afecta la eficiencia de la generación de energía.

A pesar de esta diferencia, se observa que la variación en la descarga es relativamente pequeña. Esto se explica porque la base del seguidor de dos ejes posee un alto grado de reflexión. Gracias a esto, las células fotovoltaicas aún reciben una cantidad significativa de radiación.



Gráfica 1. Comparación de Carga. Orientación al Albedo vs. Radiación Directa

5.3. Calibración de las Células

Previo a los ensayos con la maqueta del seguidor, es fundamental llevar a cabo una calibración de las células. Este proceso asegura que las células estén funcionando correctamente, entregando resultados consistentes a lo largo del tiempo. El experimento práctico se realiza durante el mes de septiembre en Madrid, en la azotea IES. Para ello, no solo se emplean los datos recogidos por las células de los sensores, sino también información proporcionada por la estación meteorológica, como las mediciones de radiación captadas por el piranómetro de medida de GNI (*Global Normal Irradiance*), uno de los sensores disponibles en la estación meteorológica del IES mostrada en la Figura 63.



Figura 63. Piranómetro del IES

El piranómetro de GNI incluye un sensor de silicio, por lo que tiene una respuesta espectral similar a las células que se calibran. El sensor está orientado permanentemente hacia el disco solar, captando tanto la radiación solar directa del disco solar como la difusa del cielo. Además, es sensible a la radiación reflejada de objetos cercanos, que puede variar respecto a la que reciben las células, por lo que hay que prestar cuidado a esta condición, procurando evitar momentos del día en la que ciertos objetos, como la plataforma sobre la que está instalada la estación, producen más reflejos.

El calibrado de las células solares se lleva a cabo durante 1 hora, aprovechando las horas centrales del día, cuando el sol se encuentra en su punto más alto en el horizonte, es decir, en el **cenit**. Los sensores se instalan en un seguidor de dos ejes denominado *Tip-Tilt*, el cual permite tanto el movimiento en azimut como la inclinación vertical del panel, siguiendo la trayectoria del sol a lo largo del día mostrado en la Figura 62 del apartado anterior.

Para realizar las medidas, conectamos el módulo coordinador de la red Zigbee y los diferentes sensores. El modo de funcionamiento empleado para este experimento es el modo de larga duración ya que nos permite realizar medidas durante varias horas. El experimento se realiza para ambas caras del sensor y se establece la siguiente configuración:

- PERIODO DE MUESTREO: 20 s
- NÚMERO DE MUESTRAS: 5
- DURACIÓN EXPERIMENTO: 60 min
- INTERVALO TRANSMISIÓN: 60 s
- CANALES: S1, S2, S3 y S4

El rango dinámico definido en el ADC es de 0 a 1.25V. Considerando que las células se comportan de manera ideal, la corriente máxima generada es igual a la corriente de cortocircuito, $I = I_{ph} = I_{SC} = 58.6 \text{ mA}$. Aplicando la Ley de Ohm y sabiendo $R_{shunt} = 18 \Omega$ el máximo valor de tensión que se va a medir es:

$$V = I \cdot R = 18 \Omega \cdot 58.6 \text{ mA} = 1.0548 \text{ V} \quad (22)$$

Una vez finalizado el experimento, es necesario realizar un posprocesado de los datos para establecer una relación entre la tensión medida por el ADC y la radiación directa registrada por el piranómetro mostrada en la Ecuación 26. Dado que los datos de la estación meteorológica se almacenan a intervalos de un minuto, es imprescindible calcular el promedio de las medidas tomadas por el sensor de radiación.

$$V_{shunt} = k \cdot GNI \quad (23)$$

Siendo:

V_{shunt} : Tensión de las células del sensor de radiación (V)

k : Constante de proporcionalidad

GNI : Radiación normal directa (W/m^2)

Para calcular la constante de proporcionalidad k , se utilizan la recta de regresión proporcionada por las gráficas de Excel. Los valores resultantes se reflejan en las Tabla 27, Tabla 28, Tabla 29. Al comparar las células, los valores de k son similares, lo que confirma una correcta medición. En la Figura 64 se muestra la disposición de las células y el nombre asignado a la misma.

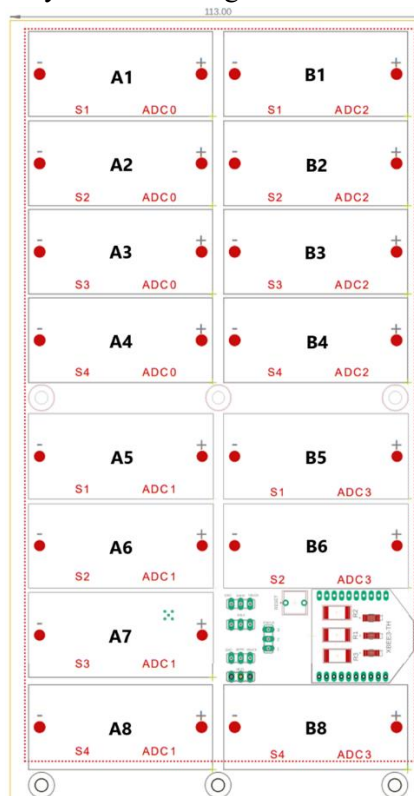


Figura 64. Disposición de las células

5.3.1. Sensor 0013A2004243CEAF

Tabla 24. Relación $\frac{V_{shunt}}{GNI}$ de los módulos albedo del sensor 0013A2004243CEAF

SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$	SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$
A1	0.9604	B1	0.978
A2	0.978	B2	0.9798
A3	0.9749	B3	0.9794
A4	0.9727	B4	0.9712
A5	0.9828	B5	0.9759
A6	0.9787	B6	0.9749
A7	0.9737	-	-
A8	0.9752	B8	0.9712

5.3.2. Sensor 0013A200423EE703

Tabla 25. Relación $\frac{V_{shunt}}{GNI}$ de los módulos albedo del sensor 0013A200423EE703

SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$	SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$
A1	0.9784	B1	0.9796
A2	0.9847	B2	0.9842
A3	0.9815	B3	0.985
A4	0.9829	B4	0.9872
A5	0.9776	B5	0.9836
A6	0.983	B6	0.988
A7	0.9783	-	-
A8	0.9815	B8	0.9722

5.3.3. Sensor 0013A2004243D058

Tabla 26. Relación $\frac{V_{shunt}}{GNI}$ de los módulos albedo del sensor 0013A2004243D058

SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$	SENSOR	$k \left(\frac{mV}{W/m^2} \right)$
A1	0.9701	B1	0.9634
A2	0.9787	B2	0.98
A3	0.9638	B3	0.9691
A4	0.9476	B4	0.9664
A5	0.9758	B5	0.9815
A6	0.9768	B6	0.9692
A7	0.9677	-	-
A8	0.9832	B8	0.9727

5.4. Ensayos en la maqueta del Instituto Solar de Energía.

La maqueta del IES consiste en un seguidor solar horizontal de un solo eje, controlado por un motor paso a paso que se encarga de realizar el seguimiento del Sol. El sistema está compuesto principalmente por una estructura fija de apoyo, sobre la cual se encuentra el eje central que rota para desplazar las células solares a la posición deseada.

La maqueta cuenta con tres bloques de módulos cada uno compuesto por dos filas como se muestra en la Figura 65. El estudio de la ganancia se enfoca en el módulo central, donde se colocan tres sensores de radiación en diferentes zonas para medir la contribución del albedo. Este enfoque permite evaluar el impacto de las sombras proyectadas por los demás módulos, haciendo que las mediciones sean más realistas.

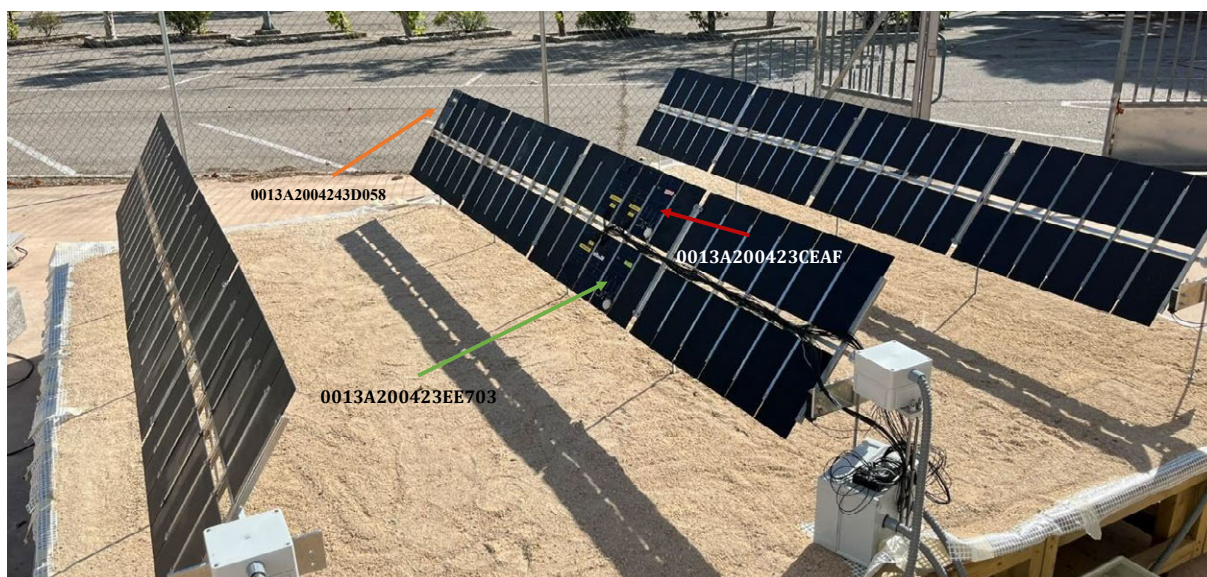


Figura 65. Maqueta de un seguidor de módulos bifaciales del IES

Para este experimento, se llevan a cabo múltiples barridos en diferentes momentos de la tarde, con el fin de capturar la variación de radiación a lo largo del día. La maqueta se configura para realizar un barrido cada cinco minutos, y cada uno de estos tiene una duración aproximada de un minuto.

El módulo de comunicación Xbee3 tiene una capacidad de memoria limitada, pero es suficiente para almacenar los datos generados durante un ciclo de barrido si el periodo de muestreo se establece en 500 ms. En caso de disminuirlo, al saturarse la memoria, el módulo Xbee3 no es capaz de capturar los datos de un barrido completo.

Los sensores de radiación se colocan en diferentes ángulos con respecto al suelo, con el objetivo de observar cómo varía la influencia del albedo en función de la inclinación de cada sensor. Dado que el suelo bajo los sensores es de arena clara, el albedo se incrementa, reflejando una mayor cantidad de radiación.

La Figura 66 refleja las distintas etapas del barrido, desde la posición inicial hasta la posición final, con cambios graduales en el ángulo de los sensores y la orientación de la maqueta. A continuación, se analizan los datos obtenidos en cada barrido del experimento.

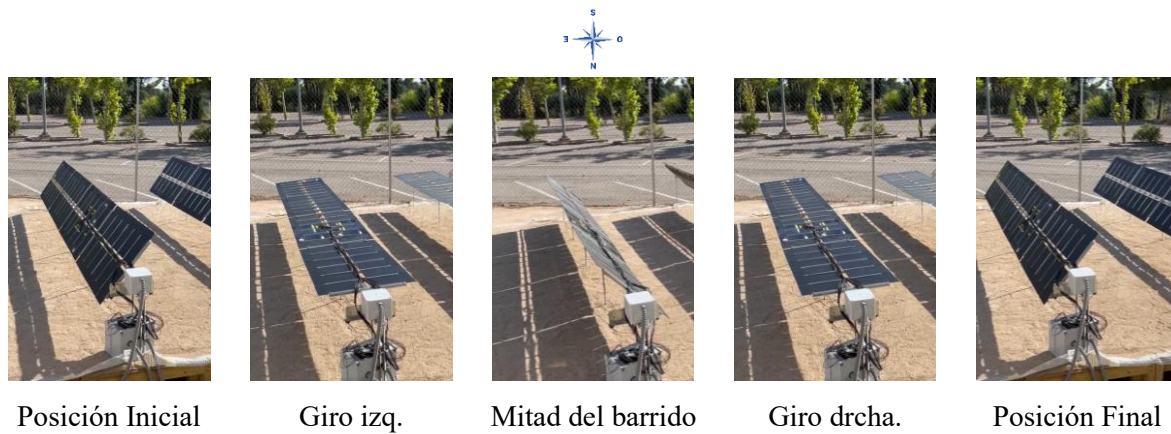


Figura 66. Posiciones de la maqueta modo barrido.

1. Experimento 17:28:45

Tanto en las Gráfica 2, Gráfica 3 y Gráfica 4 se observa el mismo comportamiento en todos los sensores. Al inicio del barrido, los sensores reciben una cantidad significativa de radiación. Esto se debe a que, a las 17:28:45, el Sol se encuentra en el suroeste, lo que permite que en la posición inicial los sensores capturen tanto radiación directa, difusa y reflejada. A medida que los sensores comienzan a moverse hacia la izquierda, se produce una caída brusca en la tensión, ya que reciben solo el albedo.

En la mitad del barrido, las gráficas muestran valores bajos, lo que sugiere que los módulos han alcanzado una inclinación en la que los sensores solo reciben una cantidad limitada de radiación difusa o reflejada.

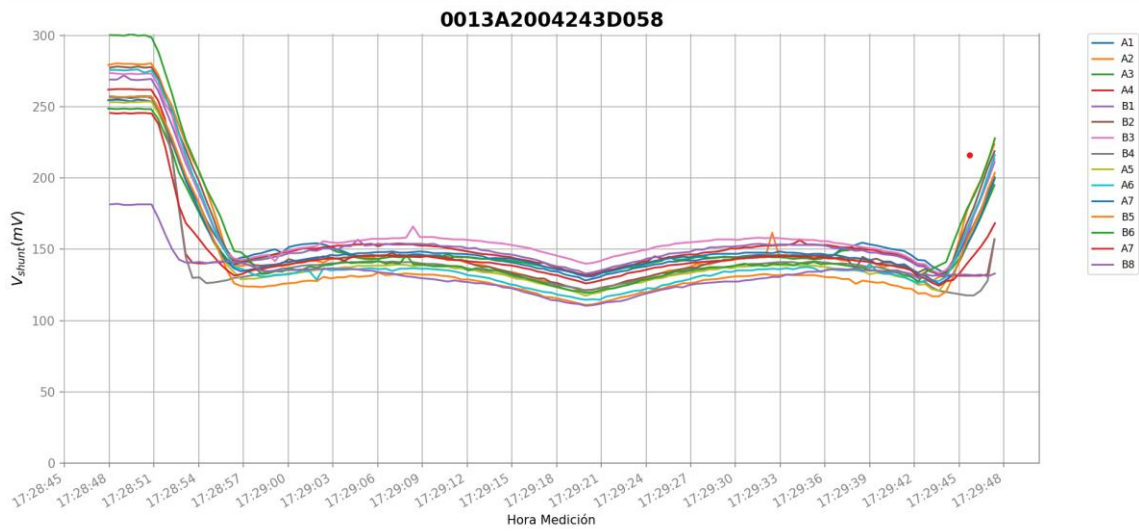
Finalmente, cuando los sensores giran hacia la derecha y se aproximan a la posición final, los valores de radiación vuelven a aumentar. Esto se debe a que los sensores adoptan una orientación que permite recibir nuevamente una mayor cantidad de radiación directa y reflejada.

La variación en los valores de tensión según la posición de los módulos está influenciada por la distribución de la radiación y la geometría de la maqueta. En los extremos, la tensión es mayor, alrededor de 150 mV, debido a que los sensores en estas posiciones reciben más radiación, tanto directa, difusa y reflejada por el suelo.

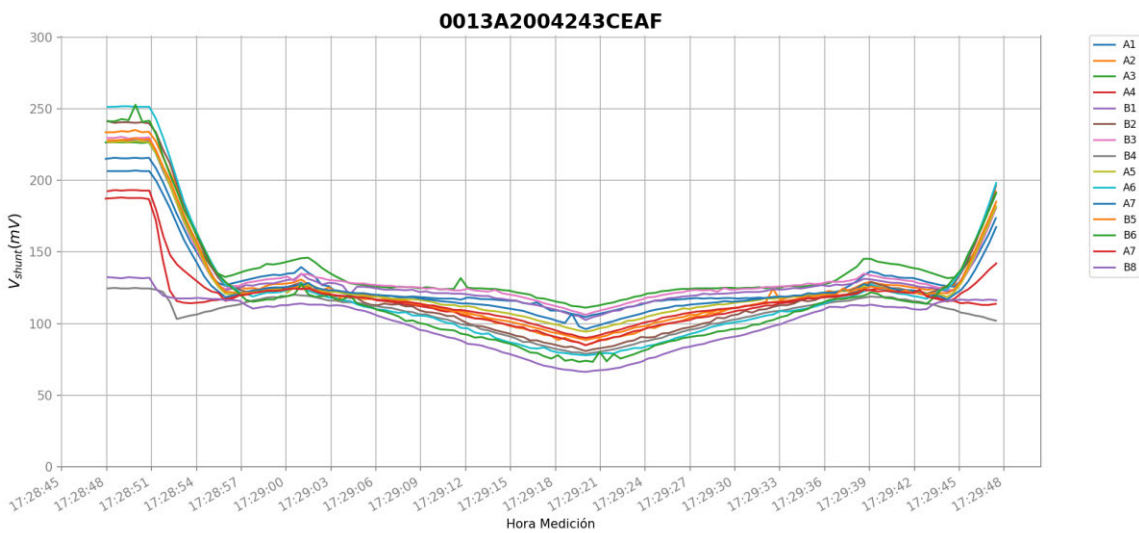
En cambio, cuando los módulos están más cerca del centro de la maqueta, la tensión desciende a unos 75 mV. Esto se debe a que, en esta zona, los módulos proyectan más sombra sobre los sensores, reduciendo la cantidad de radiación reflejada que reciben. Como resultado, la radiación disponible para los sensores es menor, lo que explica la caída en los valores de tensión.

Adicionalmente, resulta interesante analizar la diferencia de comportamiento entre los módulos dentro de un sensor. En particular, nos centraremos en la Gráfica 3. Al comparar el módulo B1, correspondientes a la fila superior del sensor de radiación, con el módulo B8, ubicado en la fila más baja, se observa que los sensores más cercanos al suelo reciben menos radiación debido al sombreado.

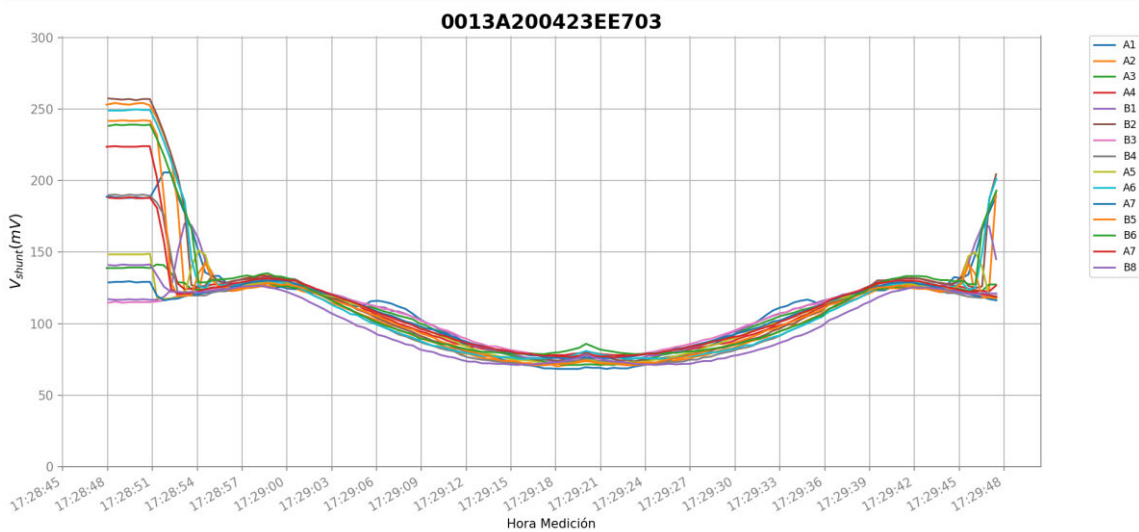
Esto permite concluir que no solo existe una variación en el comportamiento en función de la posición del módulo dentro de la maqueta, sino que la altura del seguidor también influye en la cantidad de radiación captada, afectando la ganancia obtenida.



Gráfica 2. Experimento 17:28. Sensor posicionado en el extremo de la maqueta



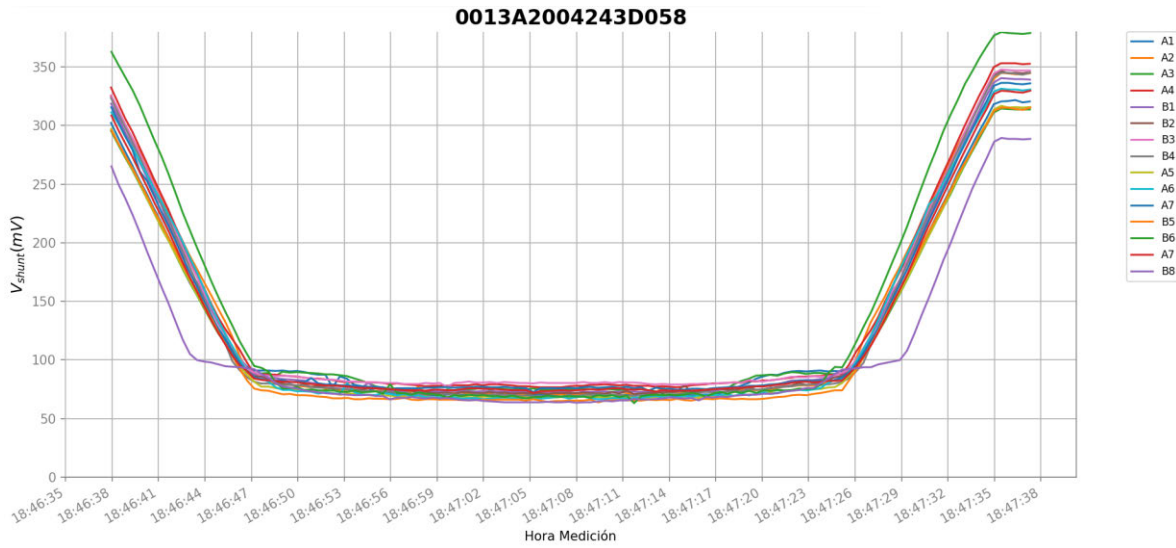
Gráfica 3. Experimento 17:28. Sensor posicionado en medio – arriba de la maqueta



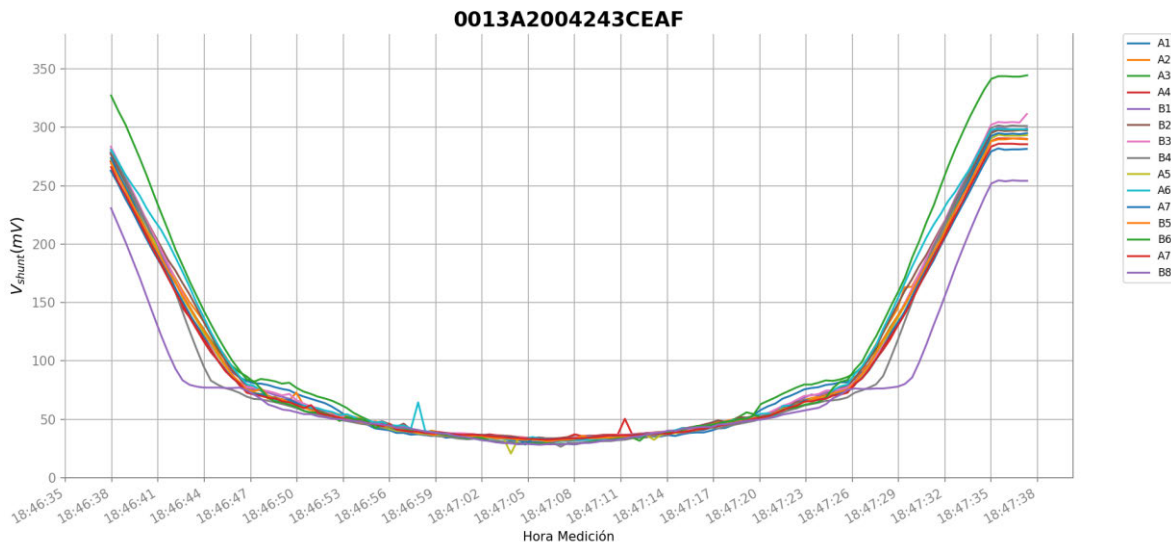
Gráfica 4. Experimento 17:28. Sensor posicionado en medio – abajo maqueta

2. Experimento 18:46:35

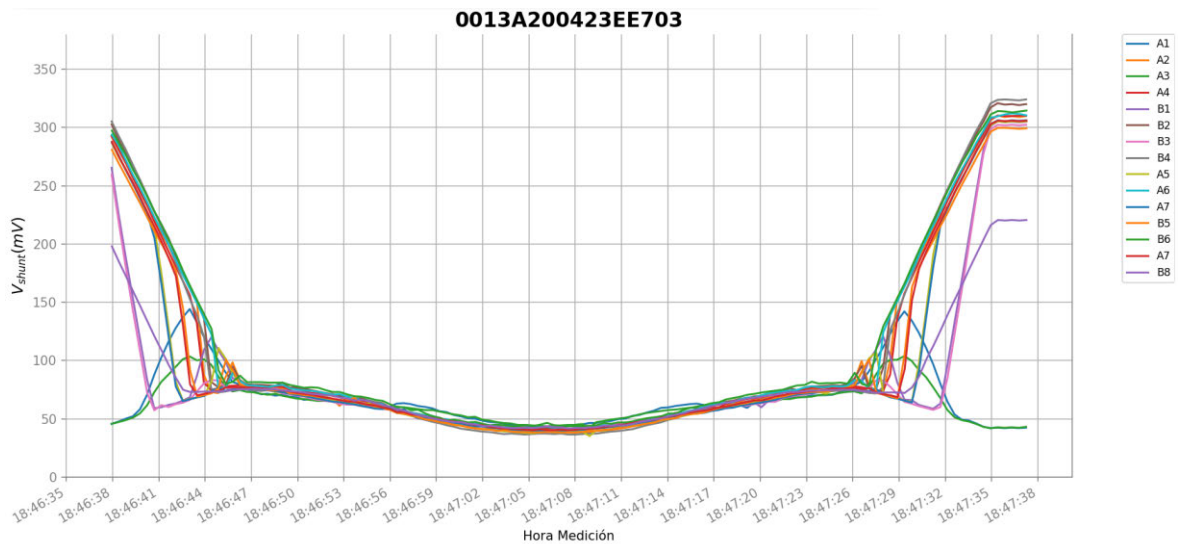
En este momento del experimento, las mediciones de tensión muestran patrones similares al experimento anterior como se observa en la Gráfica 5, Gráfica 7 y Gráfica 6. Lo importante aquí es ver cómo las variaciones en la tensión están influenciadas por la posición del Sol. A las 18:46:35, el Sol está muy cerca del Oeste, lo que significa que la radiación solar es muy baja. Como consecuencia, la tensión medida también disminuye, cayendo por debajo de los 50 mV.



Gráfica 5. Experimento 18:46. Sensor posicionado en el extremo de la maqueta

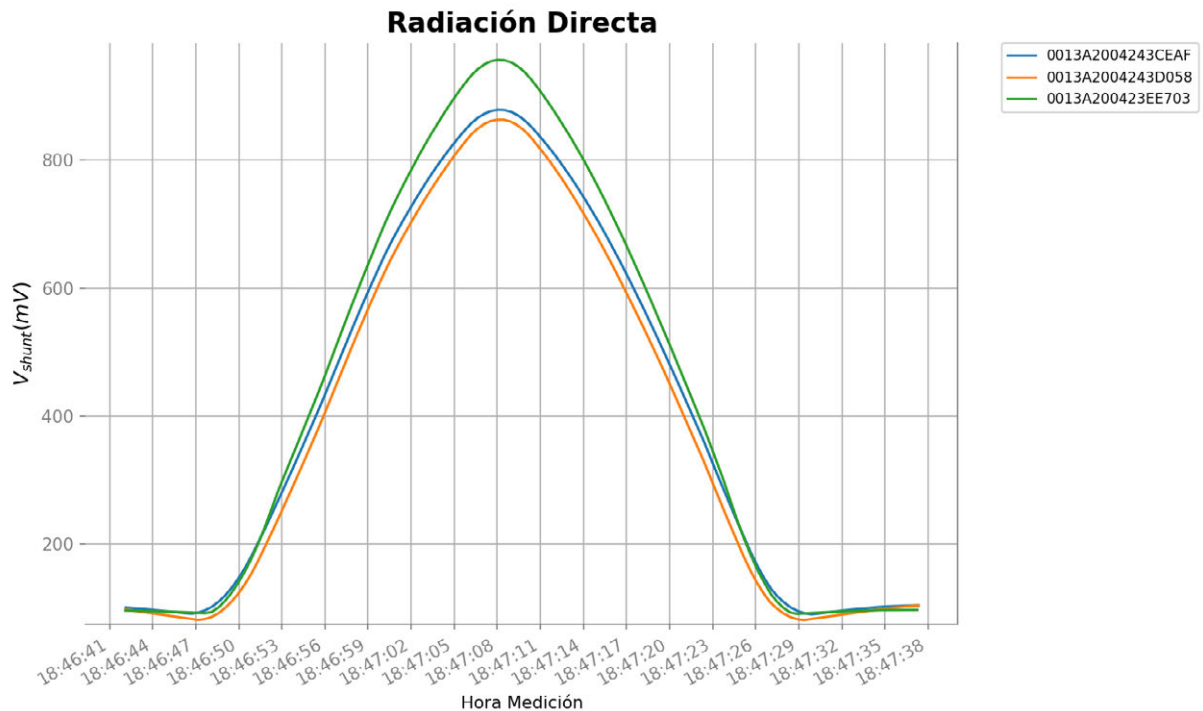


Gráfica 6. Experimento 18.46. Sensor posicionado en medio – arriba de la maqueta



Gráfica 7. Experimento 18:46. Sensor posicionado en medio – arriba maqueta

La Gráfica 8 muestran la radiación captada por los módulos orientados hacia la radiación directa de los tres sensores, permitiendo analizar la diferencia de producción entre la cara delantera y la trasera de los módulos bifaciales. Aunque la cara delantera cuenta con dos células en paralelo, lo que incrementa la generación de energía, se observa que, incluso suponiendo una contribución equitativa de los módulos (1000 mV/2), la tensión generada por la cara delantera es significativamente mayor (alrededor de 450 mV) en comparación con la de la cara trasera, que depende del albedo y produce solo 50 mV.



Gráfica 8. Medida Radiación Directa de los 3 sensores.

6. Presupuesto

En este apartado se desglosan los costes asociados al desarrollo del proyecto. Se incluyen los gastos en materiales, equipos, softwares asociados a la fabricación del sensor de radiación. Adicionalmente se incluyen el precio de mano de obra y validación.

6.1. Lista de Materiales para Sensor de Radiación.

En la Tabla 27 se muestran los costes asociados a la **BOM** (*Bill of Materials* o Lista de Materiales) para llevar a cabo la fabricación de una unidad del sensor de radiación. Se relacionan con su nombre en el esquemático adjunto en la sección Planos

Tabla 27. Presupuestos materiales para unidad del sensor de radiación.

Esquemático	P/N Fabricante	Cantidad	Descripción	Precio
Sheet 1				
AEM10941	AEM10941-QFN	1	Chip de Recolección de Energía Solar	5.21 €
R4	RMCF2512ZTOR00	1	Resistencia 0 OHM Jumper 1% 1/10W 2512 (Métrica 6432)	0.09 €
R5	RMCF2512ZTOR00	1	Resistencia 0 OHM Jumper 1% 1/10W 2512 (Métrica 6432)	0.09 €
-	LIR2450	1	Pila de botón recargable LIR2450, 3.7V, 120mAh, litio	4.37 €
CR2450	BH-128A-5	1	Soporte para pila de botón LIR2450	1.14 €
CHV	C2012X751E106K125AE	1	10 µF ±10% 25 V Capacitor cerámico X75 0805 (Métrica 2012)	1.23 €
CLV				
CBUCK	GPC0603106-10	3	10µF ±10% 10V Ceramic Capacitor X5R 0603 (Métrica 1608)	
CSRC				2.25 €
CBOOST	GRM188R61A226ME15D	1	22 µF ±20% 10V Capacitores cerámicos X5R 0603 (Métrica 1608)	0.11 €
LBOOST	LPS4012-103MRC	1	Inductor de 10uH -0,75A 0603 (Métrica 1608)	1.13 €
LBUCK	MLZ1608M100WT000	1	Inductor 10 µH - 0,25 A - 0603 (Métrica 1608)	0.13 €
U1	ST141K07L	2	Fotoceldas Monocristalino 215 mW 4.84 V	12.42 €
U2				
STATUS				
ENHV				
ENLV	61300311121	5	Cabezal de conector Orificio pasante 3 posiciones 0.100" (2.54mm)	
SELMPP1				
SELMPP0				0.60 €
-	AKSCT/Z	5	2 (1 x 2) Conector de derivación de posiciones Negro Parte superior abierta 0.100" (2.54mm) O	0.45 €
Sheet 2				
U17	XB3-24Z8PT	1	802.15.4 Zigbee® Módulos de tranceptor RF 2.4GHz Integrado, rastreo Orificio pasante	33.24 €
	831-87-010-10-001101	2	Conector 10 posiciones de 2mm. Orificio pasante Xbee3	1.56 €
C1	CC1206DRNPO9BN8R2	1	8.2 pF ±0.5pF 50V Capacitor Cerámico COG, NPO 1206 (Métrica 3216)	0.09 €
C2	GPC1206105-16	1	1µF ±10% 16V Capacitor Cerámico X7R 1206 (Métrica 3216)	0.09 €
C3	GPC1206106-25	1	10µF ±10% 25V Capacitor Cerámico X5R 1206 (Métrica 3216)	0.09 €
RESET	FSM4JRT	1	Interruptor táctil tipo Botón, Negro, contactos SPST, Montaje superficial	0.17 €
LRED	KPTD-3216SURC	1	Led Rojo 628 nm Indicación led: discreta 1.9V 1206 (Métrica 3216)	0.24 €
LYELLOW	KPTD-3216SYC	1	Led Amarillo 588 nm Indicación led: discreta 2V 1206 (Métrica 3216)	0.24 €
LGREEN	KPTD-3216CGCK	1	Led Verde 570 nm Indicación led: discreta 2V 1206 (Métrica 3216)	0.24 €
R1	RMCF2512FT100R	1	Resistencia 100 OHM 1% 1/10W 2512 (Métrica 6432)	0.09 €
R2	RMCF2512FT100R	1	Resistencia 100 OHM 1% 1/10W 2512 (Métrica 6432)	0.09 €
R3	RMCF2512FT100R	1	Resistencia 100 OHM 1% 1/10W 2512 (Métrica 6432)	0.09 €
Sheet 3, Sheet 4 y Sheet 5				
ST141K07L	SM141K07L	19	Fotoceldas Monocristalino 215 mW 4.84 V	117.99 €
RSHUNT	CRCW120618ROFKEA	16	Resistencia de Shunt, 18 Ohms ±1% 0.25W 1206 (3216 métrico) Detección de corriente	1.44 €
MUX1				
MUX2	ADG709BRUZ	4	2 Interruptor de CI de circuito 4:1 4.50Ohm 16-TSSOP	
MUX3				
MUX4				17.52 €
Plano mecánico protección componentes				
	HTSN-M3-8-3-ND	6	Separador Hexagonal M3 Nylon 8mm	4.20 €
	2326936	12	Tuerca Hexagonal M3 de Nylon	2.40 €
	Placa Aluminio	1	Placa de lámina de aluminio espesor de 0,5mm	5.20 €
Pasta De Soldadura				
	SMDLTLFP10T5	1	Pasta de soldadura SMDLTLFP10T5 SMD Jeringa de 35g Libre de Plomo	35.65 €
	SMD4300AX10	1	Pasta de soldadura SMD4300AX10 Jeringa de 35g	24.76 €
Placa de circuito impreso				
	PCB	1	PCB Fabricada por Eurocircuit con mascara de soldadura negro mate	51.55 €
Presupuesto total Sensor de Radiación				326.16 €

Para llevar a cabo la programación de los módulos XBee, son necesarios el material mostrado en Tabla 28. Asimismo, resulta necesario contar con un coordinador en la red Zigbee, aunque no forme parte del sensor de radiación.

Tabla 28. Presupuesto material auxiliar para programación módulos Xbee.

Material Auxiliar	Cantidad	Descripción	Precio
XB3-24Z8PS-J	1	Xbee3 - Módulo de radiofrecuencia con microprocesador Zigbee - Modulo Coordinador	54,00 €
76000956	1	XBee® Módulos XBee® Tranceptor Placa de evaluación - Módulo Through Hole	22,00 €
76000979	1	Módulos XBee® Tranceptor Placa de evaluación - Módulo SMD	27,00 €
Presupuesto Total Equipos Auxiliares			103,00 €

6.2. Equipos para Fabricación

Para la fabricación del sensor de radiación, son necesario los equipos mostrados en la Tabla 29. Aunque en el diseño final la mayoría de los componentes se reciben ya soldados, se utilizan máquinas de pick and place y hornos de reflujo para la soldadura del resto de los componentes. Además, es imprescindible contar con un ordenador para el diseño de la PCB, así como para el desarrollo del software.

Tabla 29. Presupuesto equipos para soldadura y testeo Sensor de Radiación

Equipos	Cantidad	Descripción	Precio
Estación de Soldadura	1	Chip de Recolección de Energía Solar	161,76 €
Precitec Elite	1	Bastidor de Trabajo para PCB CIF V900018	6.023,33 €
CM5 405 Dotty	1	Dispensador de pasta a presión	1.787,17 €
CIF FT03	1	Horno de reflujo	3.107,00 €
Ordenador	1	Ordenador para ejecutar aplicación exigentes	1.107,00 €
Multímetro	1	Instrumento de medición eléctrica básico	841,00 €
Fuente de alimentación	1	Fuente de alimentación continua para laboratorio Especificaciones max.: 30 V 10 A 300 W	200,00 €
Presupuesto Total Equipos			13.227,26 €

6.3. Licencias de Software Utilizadas

La Tabla 30 define los programas utilizados en el proyecto. Algunas de las licencias de estos softwares están proporcionadas por la UPM.

Tabla 30. Presupuesto de los programas empleados en el proyecto.

Programa	Cantidad	Descripción	Precio
Eagle	1	Software para diseño electrónico de esquemáticos y circuitos impresos	Licencia UPM
Pycharm	1	Entorno IDE para programación en Python	Gratis
TinkerCAD	1	Plataforma de diseño 3D en línea	Gratis
Presupuesto Total Software			- €

6.4. Presupuesto total

En Tabla 31 se muestra el resumen total del presupuesto, incluyendo las horas y el precio medio del coste de un ingeniero para el desarrollo completo del proyecto.

Tabla 31. Presupuesto total.

Presupuesto	Cantidad	Descripción	Precio
Sensor de Radiación	3	Número de sensores desplegados en la maqueta	978,48 €
Material Auxiliar	1	Coordinador + Placas de Evaluación sensores Xbee	103,00 €
Equipos	1	Equipos para diseño del sensor	13.227,00 €
Licencia de Software	1	Número de sensores desplegados en la maqueta	- €
Salario Ingeniero	500h	Trabajo de un año completo de un ingeniero	6.000,00 €
Presupuesto Total			20.308,48 €

7. Impacto del proyecto

El desarrollo de WSN y la energía fotovoltaica pertenecen a dos sectores aparentemente diferentes. El primero se enfoca principalmente en el sector de las telecomunicaciones y tecnologías de la información, mientras que el segundo se centra en el sector de las energías renovables. Sin embargo, en el ámbito organizativo y estratégico las empresas enfocadas a las energías renovables pueden beneficiarse significativamente de la integración de tecnología IoT ya que permiten la monitorización y gestión eficiente de los paneles solares, proporcionando datos en tiempo real sobre el rendimiento, las condiciones ambientales y posibles fallos, optimizando así la producción de energía y el mantenimiento de las instalaciones.

Contexto Socioeconómico, Geográfico y Cultural

La energía fotovoltaica está fuertemente influenciada por las condiciones climáticas de los países. Factores como la latitud, el relieve y el clima determinan el mapa del potencial de energía solar, que varía significativamente de un país a otro. Además, las políticas gubernamentales y la aceptación cultural de las energías renovables juegan un papel crucial en la adopción y expansión de estas tecnologías. Países con políticas favorables, incentivos fiscales y subsidios para la instalación de energía solar tienden a tener una mayor implementación de estas tecnologías.

Grupos de Interés Relacionados con el Proyecto

- **Fabricantes de Módulos Fotovoltaicos y Proveedores de Energía Solar:** Estas empresas tienen un interés directo en la evolución a nuevos módulos fotovoltaicos. Gracias a la implementación de la IoT en el sector de las energías renovables se mejora la gestión de los sistemas solares optimizando el rendimiento, reduciendo costos operativos y aumentando la vida útil de los paneles solares, lo que a su vez puede aumentar sus beneficios y competitividad en el mercado.
- **Reguladores y Gobiernos:** Los organismos encargados de establecer políticas y regulaciones tienen la responsabilidad de fomentar el uso de energías renovables y garantizar la seguridad y eficiencia de las nuevas tecnologías. Políticas gubernamentales favorables, como incentivos fiscales, subsidios y regulaciones que promuevan la adopción de tecnologías IoT en el sector fotovoltaico, pueden acelerar la transición hacia una economía más sostenible.
- **Sectores Industriales y Empresariales:** Diversos sectores industriales y empresariales, incluyendo manufactura, transporte y agricultura, pueden beneficiarse de un suministro de energía más eficiente y sostenible. La adopción de sistemas fotovoltaicos mejorados con tecnología IoT permite a estas industrias reducir su huella de carbono, disminuir costos energéticos y mejorar su reputación corporativa en términos de sostenibilidad.

7.1. Aspectos Éticos.

Alteración de Hábitats Naturales: La instalación de sistemas fotovoltaicos, especialmente a gran escala, puede conllevar una significativa alteración o destrucción de hábitats naturales afectando a la flora y fauna local. Un grupo afectado es la fauna avícola, pueden confundir los paneles solares con cuerpos de agua o con el cielo, los paneles solares pueden ser una fuente de colisión para las aves. [45]

Impacto en la Agricultura: La competencia por el uso del suelo entre la agricultura y la energía solar fotovoltaica es un desafío creciente. La sombra proyectada por los paneles solares puede reducir la producción agrícola, dependiendo de la especie cultivada y de la orientación de los paneles. Además, la alteración del microclima local puede afectar los patrones de crecimiento y la calidad de los cultivos.

7.2. Aspectos ambientales.

Eficiencia Energética y Huella de Carbono: Si bien la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía limpia, su ciclo de vida completo implica una huella de carbono. La producción de paneles solares requiere grandes cantidades de energía, principalmente de origen fósil, y genera emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, estudios recientes demuestran que la energía solar fotovoltaica puede alcanzar una EROI (*Energy Return on Investment* o Tasa de Retorno Energético) superior a 10% [46], lo que significa que produce más energía de la que consume en su ciclo de vida.

Desechos y Reciclaje: Al final de su vida útil, que generalmente oscila entre 25 y 30 años, los paneles solares se convierten en un residuo electrónico. Estos residuos contienen materiales valiosos como silicio, cobre y plata, pero también sustancias peligrosas como plomo y cadmio. La gestión inadecuada de estos residuos puede contaminar el suelo y el agua. Afortunadamente, la industria fotovoltaica está desarrollando tecnologías de reciclaje más eficientes para recuperar estos materiales y minimizar el impacto ambiental.

Consumo de Recursos: La producción de paneles solares demanda una cantidad significativa de recursos naturales, como agua, silicio y metales raros. La extracción de estos materiales puede generar impactos ambientales locales, como la contaminación del agua y la deforestación.

7.3. Aspectos sociales.

Acceso y Equidad: La transición hacia un sistema energético basado en fuentes renovables, como la energía solar, puede generar desigualdades sociales si no se implementa de manera equitativa. Las comunidades rurales y de bajos ingresos pueden enfrentar barreras para acceder a la energía solar, debido a los altos costos iniciales de inversión y a la falta de información. Es fundamental diseñar políticas públicas que promuevan el acceso universal a la energía limpia y asequible.

Desplazamiento de Comunidades: Los grandes proyectos fotovoltaicos pueden implicar el desplazamiento de comunidades locales, especialmente en áreas de gran valor ecológico. Es crucial llevar a cabo procesos de consulta y participación ciudadana para mitigar los impactos sociales de estos proyectos y garantizar que las personas afectadas reciban una compensación justa y sean reubicadas en condiciones dignas.

8. Conclusiones

A lo largo del proyecto se ha diseñado un sensor de radiación inalámbrico con el fin de poder validar el comportamiento de los sensores en diversas configuraciones y bajo diferentes condiciones de radiación y albedo.

Una de las conclusiones principales del proyecto es que la red de sensores inalámbricos desarrollada ofrece una alta eficiencia energética, lo cual es clave para su funcionamiento autónomo mediante baterías solares recargables. El uso de Zigbee no solo ha permitido un bajo consumo energético, sino que también ha facilitado la escalabilidad de la red mediante su topología de malla, que permite agregar nuevos sensores sin necesidad de modificar la maqueta. Además, la implementación de una interfaz gráfica permite la gestión de la red, desde la visualización de los datos hasta la integración de nuevos sensores, optimizando tanto el control como el análisis posterior de la información.

En cuanto a los ensayos realizados en la maqueta, se ha comprobado que la altura de los pilares tiene una influencia notable en la ganancia obtenida cuando se emplean módulos bifaciales. Se ha encontrado que la radiación captada por las células en la parte trasera de los módulos difiere en función de la altura a la que se encuentran.

También se han realizado pruebas para evaluar el comportamiento del sistema en diferentes modos de funcionamiento, como el modo barrido y el modo continuo. En el modo barrido, los nodos finales responden al coordinador enviando sus mediciones a intervalos definidos, lo que ha permitido verificar la correcta transmisión de datos. En el modo continuo, el sistema ha sido capaz de promediar y transmitir datos de los sensores a lo largo del tiempo, gestionando eficientemente el almacenamiento de los datos en la memoria del dispositivo, lo cual resulta esencial para la integridad de los ensayos a largo plazo.

Un aspecto técnico destacado es el uso de multiplexores que permiten alternar entre diferentes configuraciones de los sensores para medir la influencia del albedo sobre las células solares. Gracias a esta configuración, se han obtenido mediciones precisas que permiten analizar cómo el albedo varía en función de la posición horizontal y vertical de los sensores.

En términos de implementación práctica, el proyecto cumple con la mayoría de los objetivos planteados, como el desarrollo de software para la gestión de los sensores como el diseño de un sensor inalámbrico alimentado por baterías recargables. No obstante, una limitación que se destaca es la imposibilidad de variar la altura de los pilares en la maqueta, lo cual hubiera permitido un análisis más exhaustivo del impacto de la altura sobre la radiación captada. A pesar de esta limitación, los ensayos realizados han permitido comparar diferentes distancias al eje central, arrojando datos valiosos para la optimización de la disposición de los módulos en sistemas fotovoltaicos.

8.1. Trabajos futuros

En los trabajos futuros, una de las mejoras clave sería en el software de control del sistema, incorporando la capacidad de tener en cuenta la posición exacta de la maqueta en cada momento. Esto podría lograrse mediante el uso de sensores adicionales o sistemas de geoposicionamiento, que permitirían un seguimiento en tiempo real del ángulo y la orientación de la maqueta. De este modo, el software podría ajustar de manera más precisa las mediciones de los sensores, correlacionando los datos de radiación y albedo con la posición exacta de los módulos solares.

Otro trabajo futuro sería monitorizar otras variables ambientales que influyen en la eficiencia energética de los módulos solares. Variables como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento tienen un

Conclusiones

impacto significativo en la generación de energía, y su incorporación al sistema permitiría un análisis más completo del entorno.

Por último, se podría mejorar la capacidad de almacenamiento o la velocidad de transmisión de los datos mediante una mejor gestión de la comunicación en la red o empleando otras tecnologías existentes como sustitutos de la red ZigBee. Tecnologías como LoRa o Wi-Fi ofrecen mayores velocidades de transmisión y almacenamiento, así como una mayor eficiencia en redes de sensores a gran escala.

9. Bibliografía

- [1] R. Electrica, «Las Energías Renovables en España,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/12/la-eolica-y-fotovoltaica-baten-record-de-generacion-electrica-en-espana-en-2022>.
- [2] J. V. Casillas Lamar y Y. Morales Tamayo, «Revisión del estado del arte, oportunidades y desafíos en la utilización de paneles solares bifaciales,» *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, pp. 77-92, Enero 2024.
- [3] RAE, «Diccionario prehispánico del español jurídico,» [En línea]. Available: <https://dpej.rae.es/lema/internet-de-las-cosas>.
- [4] G. Wang, «Current issues in IoT networking,» Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse570-21/ftp/iot.pdf>.
- [5] A. L. S. Aransay, «<https://www.albertolsa.com>,» Mayo 2009. [En línea]. Available: <https://www.albertolsa.com/wp-content/uploads/2010/04/rsi-aplicacion-de-las-redes-de-sensores-en-el-entorno-vehicular-alberto-los-santos.pdf>. [Último acceso: Enero 2024].
- [6] A. L. S. Aransay, «Aplicación de las Redes de Sensores en el entorno vehicular,» Mayo 2009. [En línea]. Available: <https://www.albertolsa.com/wp-content/uploads/2010/04/rsi-aplicacion-de-las-redes-de-sensores-en-el-entorno-vehicular-alberto-los-santos.pdf>.
- [7] J.-S. Lee, Y.-W. Su y C.-C. Shen, «A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,» de *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taiwan, 2007.
- [8] D.-W. Tseng, *Key Advantages of Wi-Fi 7: Performance, MRU & MLO*, Mediatek, 2022.
- [9] B. Mitchell, «How Many Devices Can Connect to One Wireless Router?,» LifeWire, 10 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.lifewire.com/how-many-devices-can-share-a-wifi-network-818298>. [Último acceso: 2 Enero 2024].
- [10] P. Bhagwat, «Bluetooth: technology for short-range wireless apps,» *IEEE Internet Computing*, vol. 5, n° 3, pp. 96-103, 2001.
- [11] J.-Y. Cheng, M.-H. Hung y J.-W. Chang, «A ZigBee-Based Power Monitoring System with Direct Load Control Capabilities,» de *2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, London, UK, 2007.
- [12] A. Koubâa, M. Alves y E. Tovar, «IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Networks: A Technical Overview,» de *Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP)*, Oporto, Portugal, 2005.
- [13] P. Dhillon y D. H. Sadawarti, «A Review Paper on Zigbee (IEEE 802.15.4),» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, n° 4, 2014.

-
- [14] «Gran Enciclopedia de la Astronáutica (161): Telstar,» NCYT, 17 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://noticiasdelaciencia.com/art/8245/gran-enciclopedia-de-la-astronautica-161-telstar>. [Último acceso: 8 Julio 2024].
- [15] L.M.Fraas, *Low-Cost Solar Electric Power*, Switzerland: Springer International, 2014.
- [16] C. D. C. Nadal, «Fundamentos de la Tecnología Fotovoltaica,» de *Sistemas de Energía*.
- [17] A. Dolara, S. Leva, D. Mazzeo y E. Ogliari, «Characterization of Bifacial Photovoltaic Modules Based on I-V Curves Outdoor Measurement,» de *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Madrid, Spain, 2023.
- [18] F. Gutiérrez, «Antonio Luque, investigador en energía solar y fundador de Isofotón, honoris causa por la UMA,» *Diario Sur*, 6 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.diariosur.es/universidad/201610/06/antonio-luque-investigador-energia-20161006145120.html>. [Último acceso: 25 06 2024].
- [19] X. Sun, M. Ryyan Khan, C. Deline y M. Ashraful Alam, «Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective,» *Applied Energy*, vol. Volume 212, 2018.
- [20] E. Turrillas, «Estudio Comparativo de la Eficiencia Energética en Seguidores Solares,» Universidad Publica de Navarra, Navarra, España, 2014.
- [21] S. Venkateshwarlu, V. S. Pranav, C. S. Anirudh y K. S. Reddy, «A Comparative Evaluation of Various Solar Trackers to Harness Maximum Energy - A Brief Review,» de *International Conference on Smart and Sustainable Technologies in Energy and Power Sectors (SSTEPS)*, Mahendragarh, India, 2022.
- [22] N. D. Weimar, «HSAT Trackers,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/hsat-trackers/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [23] N. D. Weimar, «VSAT Trackers,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/vsat-trackers/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [24] N. D. Weimar, «Tilted Single Axis Tracker,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/tilted-single-axis-tracker/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [25] N. D. Weimar, «Tilted Single Axis Tracker,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/tilted-single-axis-tracker/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [26] D. D. Rooij, «Alt-azimuth Dual Axis Tracker,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/alt-azimuth-dual-axis-tracker/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [27] N. D. Weimar, «Dual Axis Trackers,» Sinovoltaics Group, [En línea]. Available: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/dual-axis-trackers/>. [Último acceso: Marzo 2024].

- [28] O. Style, *Energía Solar Autónoma. Planificación, Dimensionado e Instalación de un Sistema Fotovoltaico Autónomo.*, Itaca Appropriate Technology, 2012.
- [29] E. Lorenzo, *ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA (Vol. 3): Ingeniería Fotovoltaica*, PROGENSA, 2014.
- [30] S. Kwok, «Plomo-ácido versus iones de litio: decidir cuál es la mejor opción para proyectos solares,» 21 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://solarbuy.com/es/solar-101/lead-acid-vs-lithium-ion-battery-for-solar-projects/>. [Último acceso: 32 Julio 2024].
- [31] S. Ures, «Control y monitorización de un seguidor solar de un eje para el estudio de la ganancia energética de módulos fotovoltaicos bifaciales,» UPM, Madrid, 2022.
- [32] Anysolar, «SM141K07L. IXOLARTM High Efficiency SolarMD.,» Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://waf-e.dubudisk.com/anysolar.dubuplus.com/techsupport@anysolar.biz/O18AoJK/DubuDisk/www/Gen3/SM141K07L%20DATA%20SHEET%20202007.pdf>. [Último acceso: Julio 2024].
- [33] Anysolar, «KXOB121K04F. IXOLARTM High Efficiency SolarBIT.,» Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://waf-e.dubudisk.com/anysolar.dubuplus.com/techsupport@anysolar.biz/O18AzS1/DubuDisk/www/Gen3/KXOB121K04F%20DATA%20SHEET%2020210127.pdf>. [Último acceso: Julio 2024].
- [34] R. Faludi, «Guía de compra de XBee,» Digi, 30 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://es.digi.com/blog/post/xbee-buying-guide>. [Último acceso: 1 Febrero 2024].
- [35] R. Componentes, «RS Pro Lithium-ion button battery,» [En línea]. Available: <https://docs.rs-online.com/2a3b/0900766b8170b06f.pdf>.
- [36] R. P. A. y. J. M. L. G. Pere J. Riu i Costa, «Multiplexores Analógicos,» *Revista Técnica Iberoamerica*.
- [37] T. Instruments, «bq25570 nano power boost charger and buck converter,» Marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf?ts=1686674347701&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25570%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dapp-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-ww%2526utm_content%253D. [Último acceso: Enero 2023].
- [38] STMicroelectronics, «Ultralow power energy harvester and battery charger,» 27 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf>. [Último acceso: Enero 2023].
- [39] E-peas, «Highly Efficient, Regulated Dual-Output, Ambient Energy Manager for Up To 7-cell Solar Panels with Optional Primary Battery,» Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://e-peas.com/wp-content/uploads/2023/07/e-peas-AEM10941-datasheet-solar-energy-harvesting.pdf>. [Último acceso: Enero 2023].

-
- [40] D. International, «Digi XBee® 3 ZigBee® RF Module,» September 2020. [En línea]. Available: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001539.pdf>. [Último acceso: Enero 2024].
- [41] Silicon Laboratories Inc.®, «EFR32MG21 Mighty Gecko Multiprotocol Wireless SoC Family Data Sheet,» [En línea]. Available: https://eu.mouser.com/datasheet/2/368/efr32mg21_datasheet-1627395.pdf. [Último acceso: 12 05 2024].
- [42] «PCB Trace Width Calculator,» Enero 2006. [En línea]. Available: <https://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/>. [Último acceso: 31 Enero 2024].
- [43] Altium, «Entender los planos de tierra en su PCB de dos capas,» 14 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/understanding-ground-planes-your-two-layer-pcb>. [Último acceso: 12 Mayo 2024].
- [44] Anonimo, «Foro de Micropython,» Inventea & Nextgen, 27 11 2020. [En línea]. Available: <https://forum.micropython.org/viewtopic.php?t=9364>. [Último acceso: 2024].
- [45] R. Delgado, «Interacción entre instalaciones fotovoltaicas y aves: problemática y soluciones,» Inesem Business School, 10 04 2023. [En línea]. Available: <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/instalaciones-fotovoltaicas-y-aves-problemas-y-soluciones/>.
- [46] K. P. C. J. M. E. R. J. & A. D. S. Bhandari, «Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 47, pp. 133-141, 2015.
- [47] J. M. Ousmane Diallo, «Real-time data management on wireless sensor networks: A survey,» *Journal of Network and Computer Applications*, 2011.
- [48] Ó. Ortiz, A. B. Garcia, R. Capilla, J. Bosch y M. Hinchey, *Runtime Variability for Dynamic Reconfiguration in Wireless Sensor Network Product Lines*.
- [49] Oracle Corporation, «SunSpotWorld,» [En línea]. Available: <http://www.sunspotworld.com/docs/Yellow/SunSPOT-Programmers-Manual.pdf>.
- [50] Ubuntu, «<http://ubuntu-manual.org/>,» [En línea].
- [51] E. C. -. I. S. a. M. DG, «Internet of Things. Strategic Research Roadmap,» 2009.
- [52] «Mono Documentation,» [En línea]. Available: <http://docs.go-mono.com/>.
- [53] IEEE, «IEEE 802.15.4g™-2012,» [En línea]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4g-2012.pdf>.
- [54] R. M. Castejón, «Interconexión de redes de sensores inalámbricos 802.15.4 en localizaciones remotas,» *PFC*, pp. 8,9,10, 2011.

-
- [55] F. B. J. S. A. C. Diego Martínez, «Redes de Sensores y Actuadores Inalámbricas: Una Caracterización y Caso de Estudio para Aplicaciones Médicas en Espacios Cerrados,» *Universidad Autónoma de Occidente, Universidad Politécnica de Valencia*.
- [56] E. International, «ECMAScript Language Specification. Standar 262,» [En línea]. Available: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/Ecma-262.pdf>.
- [57] Apache.org, «Manual Apache Ant,» [En línea]. Available: <http://ant.apache.org/manual/intro.html>.
- [58] I. F. Akyildiz y . M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*, United Kingdom: Wiley, 2010.
- [59] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj y R. Prabakaran, «Study on ZigBee technology,» de *3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, Kanyakumari, India, 2011.
- [60] S. C. Ergen, «ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary,» 10 Septiembre 2004. [En línea]. Available: <https://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/707/papers/zigbee.pdf>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [61] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Oxford, United Kingdong: Newnes, 2008.
- [62] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata y E. Maruyama, «Development status of high-efficiency HIT solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, n° 1, pp. 18-21, 2011.
- [63] «NREL Transforming Energy,» National Renewable Energy Laboratory, [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [Último acceso: 7 Mayo 2024].
- [64] D. Alcubierre, «Tipos de Paneles Solares – Monocristalinos, Policristalinos y Amorfos,» Cemaer, 5 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.cemaer.org/tipos-de-paneles-solares/>. [Último acceso: 8 Mayo 2024].



Anexo

A.1 Estimación del Consumo del Módulo Xbee3

En este anexo se aborda el análisis detallado del consumo de energía del módulo XBee3 en diversos modos de funcionamiento. El objetivo de este procedimiento es evaluar su eficiencia energética y determinar los requisitos de diseño del sistema de alimentación y dimensionar adecuadamente el regulador de carga solar utilizado en el sensor de irradiancia.

Para llevar a cabo la estimación del consumo, se establece el set-up mostrado en la Figura 67, donde la fuente de energía se configura en modo independiente con una tensión de 3,3V y una limitación de corriente de 1A. Para medir la corriente consumida por el módulo Xbee3, se incorpora un multímetro digital en serie con la línea de alimentación. Este multímetro mide con precisión la corriente que fluye hacia el módulo Xbee3, permitiendo registrar el consumo de corriente en tiempo real.

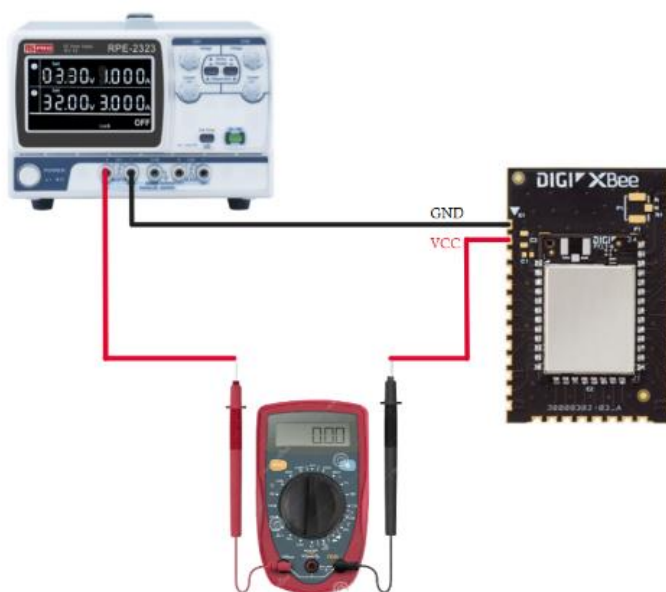



Figura 67. Conexión para estimar consumo de corriente del Xbee3

El módulo Xbee3 es programado para operar en diversos modos de funcionamiento, tales como modo activo, modo de sueño y modo de bajo consumo. Cada uno de estos modos presenta diferentes demandas de energía, lo que permite adaptar el consumo del dispositivo según las necesidades específicas de cada aplicación. Los resultados obtenidos de las mediciones de corriente en cada modo de funcionamiento se resumen en la Tabla 32, donde se puede observar cómo varía el consumo energético del módulo en función de su estado operativo.

Tabla 32. Medidas de consumo módulo Xbee3

MODO BAJO CONSUMO	MODO TRANSMISIÓN DATOS	MODO RECEPCIÓN DATOS
935 μ A	13.415 mA	20.558mA
		

A.2 Latencia Envío de Datos en una red Zigbee.

La latencia en el envío de datos es un parámetro crítico en las redes de comunicación, particularmente en las WSN, donde el tiempo de respuesta puede influir significativamente en el rendimiento y la eficacia de la red. Este apartado se centra en la latencia observada en la comunicación entre el coordinador y los dispositivos finales en una red ZigBee.

La latencia se define como el tiempo transcurrido desde que se envía un paquete de datos desde el coordinador hasta que es recibido por el dispositivo final, y viceversa.

Para el estudio de latencia en la red ZigBee, se ha implementado una configuración con un coordinador central y dos dispositivos finales, como se visualiza en la Figura 68.

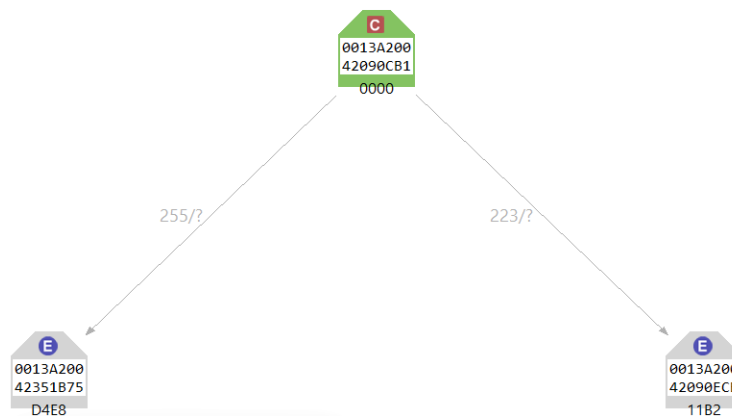


Figura 68. Red Zigbee

Para la evaluación precisa de la latencia, se emplea la herramienta de monitoreo XCTU. Todos los dispositivos han sido configurados en modo API con ATAP=2 (*API Mode with Escapes*). Esta configuración es fundamental para gestionar de manera estructurada el intercambio de datos entre los dispositivos. Gracias a la consola serie que integra el XCTU se puede observar el intercambio de mensajes ente los dispositivos que conforman la red.

En la Figura 69 se presenta un ejemplo de prueba realizada: un dispositivo final envió una trama de datos tipo **0x10 Transmite Request** a las **10:57:37.660**. En la imagen adjunta, se observa que el coordinador recibió la trama a las **10:57:37.802**, resultando en una latencia de **142 ms**. Este resultado se da en un entorno donde las distancias entre dispositivos son mínimas, lo que establece un tiempo de latencia mínimo. En el entorno real, este valor puede aumentar debido a contar con mayores distancias o con obstáculos que puedan influir en la calidad de la señal.

Dispositivo Final				Coordinador			
ID	Time	Length	Frame	ID	Time	Length	Frame
69	10:57:24.859	47	Transmit Request	11	10:57:35.896	22	Explicit Addressing Command Frame
70	10:57:24.923	7	Transmit Status	12	10:57:35.911	7	Transmit Status
71	10:57:24.984	7	Transmit Status	13	10:57:36.084	98	Explicit RX Indicator
72	10:57:25.096	47	Transmit Request	14	10:57:36.084	22	Explicit Addressing Command Frame
73	10:57:25.296	7	Transmit Status	15	10:57:36.088	7	Transmit Status
74	10:57:37.660	47	Transmit Request	16	10:57:36.251	48	Explicit RX Indicator
75	10:57:37.833	7	Transmit Status	17	10:57:36.251	7	Transmit Status
76	11:01:50.273	47	Transmit Request	18	10:57:36.302	22	Explicit Addressing Command Frame
77	11:01:50.425	7	Transmit Status	19	10:57:36.436	67	Explicit RX Indicator
78	11:01:51.283	47	Transmit Request	20	10:57:36.458	7	Transmit Status
79	11:01:51.420	7	Transmit Status	21	10:57:37.802	51	Explicit RX Indicator

Figura 69. Resultado transmisión mensajes entre dispositivos cercanos.

A.3 Software Nodo Coordinador

```

import xbee
import sys
import machine

modo_continuo = False
modo_barrido = False

def rx_callback(data):
    global modo_barrido, modo_continuo
    if not data:
        return

    payload = data['payload'].decode()

    if modo_continuo:
        print("Data received from %s >> %s" % (
            ''.join('{:02x}'.format(x).upper() for x in data['sender_eui64']), payload))
    elif modo_barrido:
        if payload == b"terminado":
            modo_barrido = False
        else:
            print("Data received from %s >> %s" % (
                ''.join('{:02x}'.format(x).upper() for x in data['sender_eui64']),
payload))

def descubrir_dispositivos():
    devices = xbee.discover()
    print("Discovered devices:")
    for device in devices:
        print(" - Dirección EUI64: %s" % ''.join('{:02x}'.format(x).upper() for x in
device['sender_eui64']))
        print(" - Nombre identificador: %s" % device['node_id'])

def medida_continua():
    while True:
        continuous_msg = xbee.receive()
        if continuous_msg:
            sender = continuous_msg['sender_eui64']
            payload = continuous_msg['payload']
            print("Data received from %s >> %s" % (''.join('{:02x}'.format(x).upper() for x
in sender),
                                                    payload.decode()))

def medida_por_tiempo(duracion, periodo, hora_ms, canales):
    mensaje = "BARRIDO Duracion: %d, Periodo: %d, Hora: %d, Canales: %s" \
        % (duracion, periodo, hora_ms, canales)
    print(mensaje)
    xbee.transmit(xbee.ADDR_BROADCAST, mensaje)

COMANDO_CONTINUO = "l"
COMANDO_RESET = "r"
COMANDO_DESCUBRIR = "d"
COMANDO_DORMIR = "s"
COMANDO_BARRIDO = "o"

```

```
def procesar_comandos():
    try:
        data = sys.stdin.buffer.read()
        if data:
            uart_command = data.decode().strip()
            if uart_command == COMANDO_DORMIR:
                procesar_comando_dormir()
            elif uart_command == COMANDO_RESET:
                procesar_comando_reset()
            elif uart_command == COMANDO_DESCUBRIR:
                procesar_comando_descubrir()
            elif uart_command == COMANDO_CONTINUO:
                procesar_comando_continuo()
            elif uart_command == COMANDO_BARRIDO:
                procesar_comando_barrido()
            else:
                print("Comando no reconocido")
    except Exception as e:
        print(e)

def leer_datos_comando():
    try:
        datos_str = sys.stdin.readline().strip()
        datos = list(map(int, datos_str.split(",")))
        return datos
    except ValueError:
        print("Error: Formato de comando incorrecto.")
        return None

def procesar_comando_barrido():
    print("Iniciando Modo Tramas")
    global modo_barrido
    datos = leer_datos_comando()
    if datos:
        duracion_experimento, periodo, hora_ms, canales = datos
        canales_binario = str(canales)
        while len(canales_binario) < 4:
            canales_binario = '0' + canales_binario
        medida_por_tiempo(duracion_experimento, periodo, hora_ms, canales_binario)
        enviar_confirmacion()
        modo_barrido = True

def procesar_comando_dormir():
    print("Dormir Dispositivo Finales")
    try:
        tiempo_dormir = int(sys.stdin.readline().strip())
        mensajeDormir = "dormir, %d " % tiempo_dormir
        xbee.transmit(xbee.ADDR_BROADCAST, mensajeDormir)
        enviar_confirmacion()
    except ValueError:
        print("Error: Formato de comando incorrecto DORMIR")

def procesar_comando_descubrir():
    descubrir_dispositivos()
    enviar_confirmacion()

def procesar_comando_reset():
    machine.reset()
    enviar_confirmacion()
```

```
def procesar_comando_continuo():
    global modo_continuo
    print("Iniciando Modo Continuo\n")
    datos = leer_datos_comando()
    print(datos)
    if datos:
        duracion_experimento, periodo_muestreo, hora_ms, canales, intervalo_transmision,
numero_medidas = datos
        print(numero_medidas)
        mensaje = "CONTINUO. Duracion: %d, Periodo: %d, Hora: %d, Canales: %d, IT: %d,
N:%d" % (duracion_experimento, periodo_muestreo, hora_ms, canales, intervalo_transmision,
numero_medidas)
        xbee.transmit(xbee.ADDR_BROADCAST, mensaje)
        print(mensaje)
        enviar_confirmacion()
        modo_continuo = True

def enviar_confirmacion():
    print("Enviando confirmación")
    sys.stdout.write("ACK\n")
    data = sys.stdin.buffer.read()

print(" +-----+")
print(" |           Programa del Coordinador           |")
print(" +-----+\n")

xb = xbee.XBee()

descubrir_dispositivos()

while True:
    xbee.receive_callback(rx_callback)
    procesar_comandos()
```


A.4 Software Nodo Final

```

import xbee
import gc
import utime
from array import array

from machine import ADC, Pin

UMBRAL_MEMORIA_LIBRE = 29
AV_REFERENCE = 1.25

HORA_INICIO = 0
INTERVALO_TRANSMISION = 0
DURACION_EXPERIMENTO = 0
PERIODO_MUESTREO = 0
NUMERO_MEDIDAS = 0
CANAL_MUX = 0

ADC0 = ADC('D0')
ADC1 = ADC('D1')
ADC2 = ADC('D2')
ADC3 = ADC('D3')

A1 = Pin('D4', Pin.OUT)
A0 = Pin('D7', Pin.OUT)
EN = Pin('D6', Pin.OUT)

ASSOCIATE = Pin('D5', Pin.OUT)
ON_SLEEP = Pin('D9', Pin.OUT)
RSSI = Pin('D10', Pin.OUT)

A1.value(0)
A0.value(0)
EN.value(1)

tiempoInicio = 0
tms_finIntervalo = 0
tiempoPromedio = 0
SECUENCIA = '0000'
canales_activos = array('I')

medidas_adc0 = [array('f') for _ in range(4)] # 'f' indica flotantes de 32 bits
medidas_adc1 = [array('f') for _ in range(4)]
medidas_adc2 = [array('f') for _ in range(4)]
medidas_adc3 = [array('f') for _ in range(4)]
timestamps = [array('Q') for _ in range(4)]

configuracionesMultiplexor = [
    None,
    (0, 0, 1), # Canal 1: A1=0, A0=0, EN=1
    (0, 1, 1), # Canal 2: A1=0, A0=1, EN=1
    (1, 0, 1), # Canal 3: A1=1, A0=0, EN=1
    (1, 1, 1) # Canal 4: A1=1, A0=1, EN=1
]

```

```
def conmutacionCanalMux(canal_mux):
    config = configuracionesMultiplexor[canal_mux]
    A1.value(config[0])
    A0.value(config[1])
    EN.value(config[2])
    return canal_mux

def imprimirMemoria():
    gc.collect()
    memoria_libre = gc.mem_free()
    memoria_usada = gc.mem_alloc()
    memoria_total = memoria_libre + memoria_usada
    return memoria_libre, memoria_total

def rx_callback(data):
    if not data:
        return
    payload = data['payload'].decode()
    handlePayload(payload)

def tomarMedidas():
    global NUMERO_MEDIDAS
    numero = 0
    sum_adc0 = [0] * len(canales_activos)
    sum_adc1 = [0] * len(canales_activos)
    sum_adc2 = [0] * len(canales_activos)
    sum_adc3 = [0] * len(canales_activos)

    for i in range(len(canales_activos)):
        canal = canales_activos[i]
        conmutacionCanalMux(canal)
        for _ in range(NUMERO_MEDIDAS):
            sum_adc0[i] += ADC0.read_u16()
            sum_adc1[i] += ADC1.read_u16()
            sum_adc2[i] += ADC2.read_u16()
            sum_adc3[i] += ADC3.read_u16()
            numero += 1

        tiempo_promedio = utime.ticks_diff(utime.ticks_ms(), tiempoInicio)
        hora_real = HORA_INICIO + tiempo_promedio
        timestamps[canal - 1].append(hora_real)
    gc.collect()
    return sum_adc0, sum_adc1, sum_adc2, sum_adc3

def calculoPromedios(sum_adc0, sum_adc1, sum_adc2, sum_adc3):
    global NUMERO_MEDIDAS
    for i in range(len(canales_activos)):
        canal = canales_activos[i]
        promedio_adc0 = (sum_adc0[i] / NUMERO_MEDIDAS) * AV_REFERENCE / 65535
        promedio_adc1 = (sum_adc1[i] / NUMERO_MEDIDAS) * AV_REFERENCE / 65535
        promedio_adc2 = (sum_adc2[i] / NUMERO_MEDIDAS) * AV_REFERENCE / 65535
        promedio_adc3 = (sum_adc3[i] / NUMERO_MEDIDAS) * AV_REFERENCE / 65535

        medidas_adc0[canal - 1].append(promedio_adc0)
        medidas_adc1[canal - 1].append(promedio_adc1)
        medidas_adc2[canal - 1].append(promedio_adc2)
        medidas_adc3[canal - 1].append(promedio_adc3)
```

```

def handlePayload(payload):
    global medidas_adc0, medidas_adc1, medidas_adc2, medidas_adc3, modo_continuo,
    timestamps, tiempoInicio, canal_mux
    global HORA_INICIO, modo_barrido, CANAL_MUX, DURACION_EXPERIMENTO, PERIODO_MUESTREO,\
    INTERVALO_TRANSMISION, HORA_INICIO, SECUENCIA, canales_activos, NUMERO_MEDIDAS
    if "CONTINUO" in payload:
        try:
            (DURACION_EXPERIMENTO, PERIODO_MUESTREO, hora_inicio, canal_mux,
            INTERVALO_TRANSMISION, NUMERO_MEDIDAS) = payload.split(", ")
            DURACION_EXPERIMENTO = int(DURACION_EXPERIMENTO.split(":")[1])
            PERIODO_MUESTREO = int(PERIODO_MUESTREO.split(":")[1])
            HORA_INICIO = int(hora_inicio.split(":")[1])
            CANAL_MUX = canal_mux.split(": ")[1]
            INTERVALO_TRANSMISION = int(INTERVALO_TRANSMISION.split(":")[1])
            NUMERO_MEDIDAS = int(NUMERO_MEDIDAS.split(":")[1])
            SECUENCIA = CANAL_MUX

            if len(SECUENCIA) != 4 or SECUENCIA == "0000":
                xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, "Seleccione los canales a medir")
                modo_continuo = False
            else:
                canales_activos = array('I')
                for i in range(len(SECUENCIA)):
                    if SECUENCIA[i] == '1':
                        canales_activos.append(i + 1)
                modo_continuo = True
            tiempoInicio = utime.ticks_ms()
        except ValueError:
            print("Error al entrar en MODO CONTINUO")

    elif "dormir" in payload:
        try:
            comando, tiempo_dormido_recibido = payload.split(", ")
            dormir = int(tiempo_dormido_recibido) * 1000
            xb.sleep_now(dormir)
        except ValueError:
            print("Error al DORMIR dispositivos finales")

    elif "BARRIDO" in payload:
        try:
            (DURACION_EXPERIMENTO, PERIODO_MUESTREO, hora_inicio, canal_mux) =
            payload.split(", ")
            DURACION_EXPERIMENTO = int(DURACION_EXPERIMENTO.split(":")[1])
            PERIODO_MUESTREO = int(PERIODO_MUESTREO.split(":")[1])
            HORA_INICIO = int(hora_inicio.split(":")[1])
            CANAL_MUX = canal_mux.split(": ")[1]
            SECUENCIA = CANAL_MUX
            if len(SECUENCIA) != 4 or SECUENCIA == "0000":
                xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, " Seleccione los canales a medir ")
                modo_barrido = False
            else:
                canales_activos = array('I')
                for i in range(len(SECUENCIA)):
                    if SECUENCIA[i] == '1':
                        canales_activos.append(i + 1)
                modo_barrido = True
            tiempoInicio = utime.ticks_ms()
        except ValueError:
            print("Error al recibir comando en MODO INTERVALO")

```

```
def enviarDatosPorSecuencia():
    global medidas_adc0, medidas_adc1, medidas_adc2, medidas_adc3, timestamps,
    INTERVALO_TRANSMISION, SECUENCIA

    ASSOCIATE.value(0)
    ON_SLEEP.value(0)
    A1.value(0)
    A0.value(0)
    EN.value(0)
    i = 0

    for canal in canales_activos:
        i = 0
        while i < len(timestamps[canal - 1]):
            RSSI.value(0)
            mensaje = (
                "ADC0: %f, ADC1: %f, ADC2: %f, ADC3: %f, Tiempo: %d, Canal: %d"
                % (
                    medidas_adc0[canal - 1][i],
                    medidas_adc1[canal - 1][i],
                    medidas_adc2[canal - 1][i],
                    medidas_adc3[canal - 1][i],
                    timestamps[canal - 1][i],
                    canal
                )
            )

            if modo_barrido:
                try:
                    xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, mensaje)
                    RSSI.value(1)
                    i += 1
                except Exception as e:
                    RSSI.value(0)

            elif modo_continuo:
                try:
                    xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, mensaje)
                    RSSI.value(1)
                    i += 1
                except Exception as e:
                    RSSI.value(0)
                    ASSOCIATE.value(1)
                    medida1, medida2, medida3, medida4 = tomarMedidas()
                    calculoPromedios(medida1, medida2, medida3, medida4)
                    ASSOCIATE.value(0)

    medidas_adc0 = [array('f') for _ in range(4)]
    medidas_adc1 = [array('f') for _ in range(4)]
    medidas_adc2 = [array('f') for _ in range(4)]
    medidas_adc3 = [array('f') for _ in range(4)]
    timestamps = [array('Q') for _ in range(4)]
    RSSI.value(0)
```

```

def medirCanalesPorSecuencia():
    global SECUENCIA, medidas_adc0, modo_barrido, medidas_adc1, medidas_adc2, medidas_adc3,
    timestamps, PERIODO_MUESTREO, canales_activos, HORA_INICIO

    ON_SLEEP.value(0)
    RSSI.value(0)
    for canal in canales_activos:
        conmutacionCanalMux(canal)
        medidas_adc0[canal - 1].append((ADC0.read() * AV_REFERENCE) / 4095)
        medidas_adc1[canal - 1].append((ADC1.read() * AV_REFERENCE) / 4095)
        medidas_adc2[canal - 1].append((ADC2.read() * AV_REFERENCE) / 4095)
        medidas_adc3[canal - 1].append((ADC3.read() * AV_REFERENCE) / 4095)
        tiempo_promedio = utime.ticks_diff(utime.ticks_ms(), tiempoInicio)
        hora_real = HORA_INICIO + tiempo_promedio
        timestamps[canal - 1].append(hora_real)

    ASSOCIATE.value(not ASSOCIATE.value())

def handle_modobarrido():
    global tms_finIntervalo, HORA_INICIO, modo_barrido, CANAL_MUX, DURACION_EXPERIMENTO, \
    PERIODO_MUESTREO, tiempoPromedio

    tms_finIntervalo = utime.ticks_ms()
    memoria_libre, memoria_total = imprimirMemoria()
    porcentajeMemoriaLibre = (memoria_libre / memoria_total) * 100

    tms_inicioModoBarrido = utime.ticks_ms()
    medirCanalesPorSecuencia()

    while porcentajeMemoriaLibre > UMBRAL_MEMORIA_LIBRE and
    utime.ticks_diff(utime.ticks_ms(), tiempoInicio) < DURACION_EXPERIMENTO * 60 * 1000:
        tiempoEjecucion = utime.ticks_diff(utime.ticks_us(), tms_inicioModoBarrido)
        utime.sleep_us(int(PERIODO_MUESTREO) * 1000 - tiempoEjecucion)
        tms_inicioModoBarrido = utime.ticks_us()
        medirCanalesPorSecuencia()
        memoria_libre, memoria_total = imprimirMemoria()
        porcentajeMemoriaLibre = (memoria_libre / memoria_total) * 100

    xbee.idle_radio(False)
    enviarDatosPorSecuencia()
    xbee.idle_radio(True)

    modo_barrido = False
    xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, "terminado")
    xbee.idle_radio(False)
    gc.collect()

```

```
def handle_modoo_continuo():
    global medidas_adc0, medidas_adc1, medidas_adc2, medidas_adc3, modo_continuo,
    timestamps, tiempoInicio, canal_mux
    global HORA_INICIO, modo_barrido, CANAL_MUX, DURACION_EXPERIMENTO, PERIODO_MUESTREO
    global INTERVALO_TRANSMISION, SECUENCIA, canales_activos, NUMERO_MEDIDAS

    tiempoInicioCiclo = utime.ticks_us()
    tms_finTransmision = utime.ticks_ms()

    ASSOCIATE.value(0)
    ON_SLEEP.value(0)
    RSSI.value(1)
    medida1, medida2, medida3, medida4 = tomarMedidas()
    calculoPromedios(medida1, medida2, medida3, medida4)
    RSSI.value(0)

    while utime.ticks_diff(utime.ticks_ms(), tiempoInicio) < DURACION_EXPERIMENTO * 60 *
1000:
        tiempoTranscurrido = utime.ticks_diff(utime.ticks_us(), tiempoInicioCiclo)
        utime.sleep_us(int(PERIODO_MUESTREO) * 1000000 - tiempoTranscurrido)
        ASSOCIATE.value(1)
        tiempoInicioCiclo = utime.ticks_us()
        medida1, medida2, medida3, medida4 = tomarMedidas()
        calculoPromedios(medida1, medida2, medida3, medida4)
        memoria_libre, memoria_total = imprimirMemoria()
        porcentajeMemoriaLibre = (memoria_libre / memoria_total) * 100
        ASSOCIATE.value(0)
        if porcentajeMemoriaLibre > UMBRAL_MEMORIA_LIBRE and
utime.ticks_diff(utime.ticks_ms(), tms_finTransmision) >= INTERVALO_TRANSMISION * 1000:
            xbee.idle_radio(False)
            enviarDatosPorSecuencia()
            xbee.idle_radio(True)
            tms_finTransmision = utime.ticks_ms()

        xbee.idle_radio(False)
        enviarDatosPorSecuencia()
        xbee.idle_radio(True)

    modo_continuo = False
    xbee.transmit(xbee.ADDR_COORDINATOR, "terminado")
    xbee.idle_radio(False)
    gc.collect()
```

```
print("+-----+")
print("|          Programa del Dispositivo Final          |")
print("+-----+\n")

modo_continuo = False
modo_barrido = False

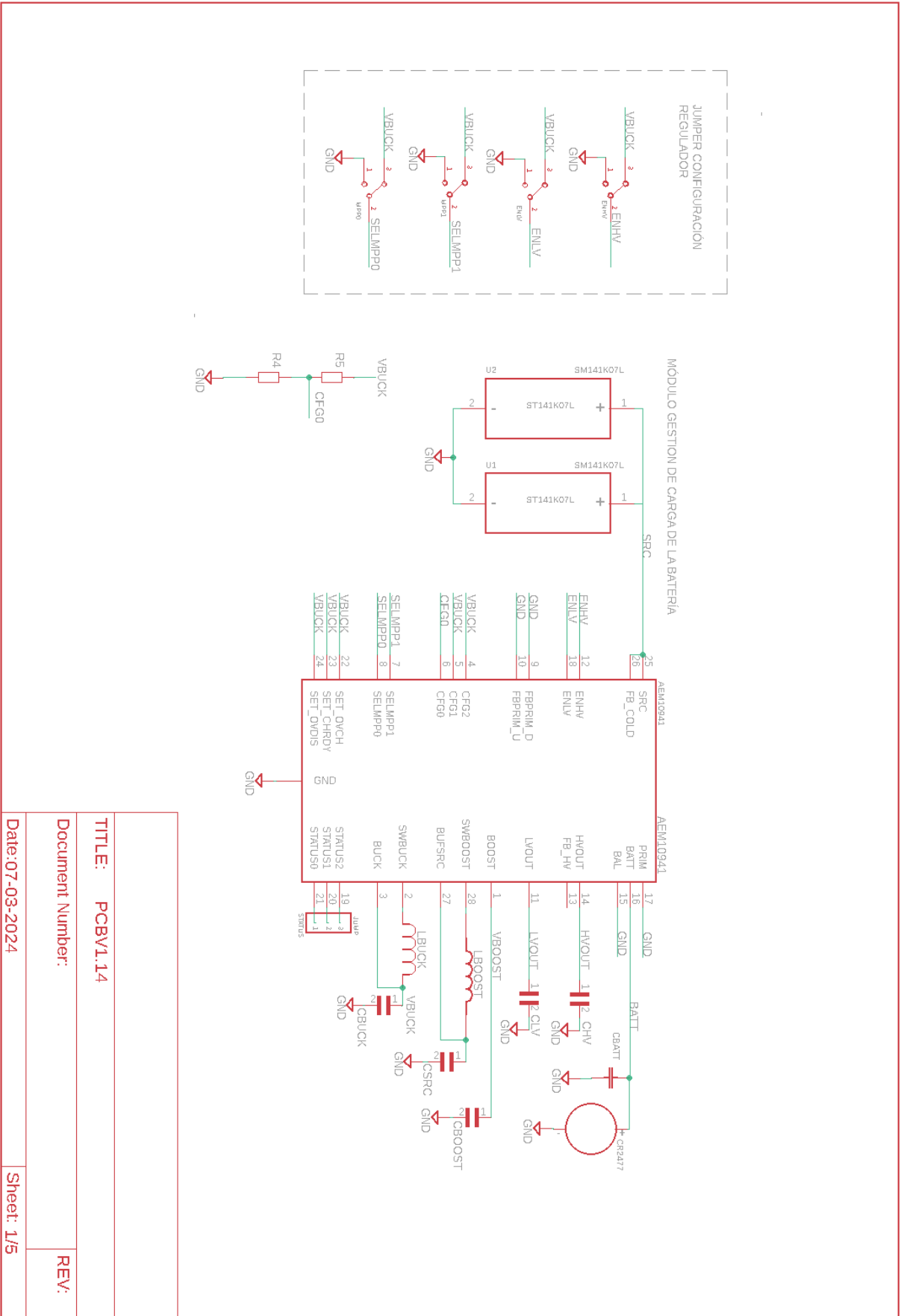
xb = xbee.XBee()

xbee.receive_callback(rx_callback)

imprimirMemoria()

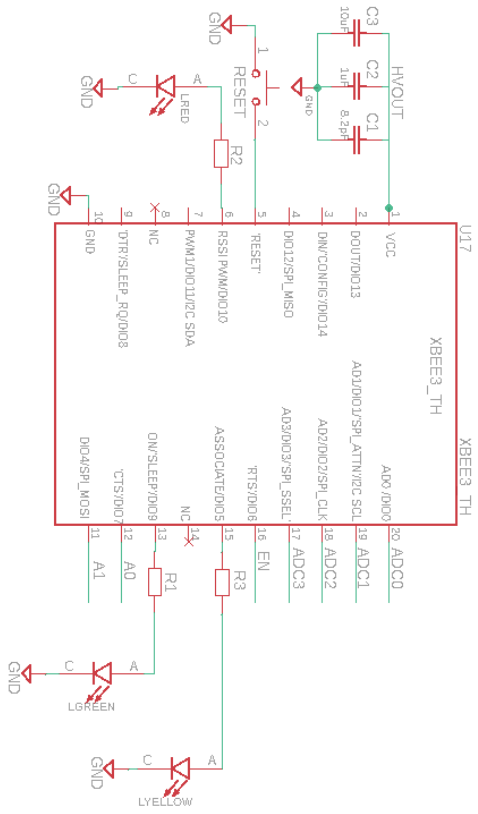
while True:
    if modo_continuo:
        handle_modo_continuo()
    elif modo_barrido:
        handle_modo_barrido()
    else:
        ASSOCIATE.value(0)
        ON_SLEEP.value(not ON_SLEEP.value())
        RSSI.value(0)
        xb.sleep_now(50, True)
        xbee.poll_now()
```


Planos



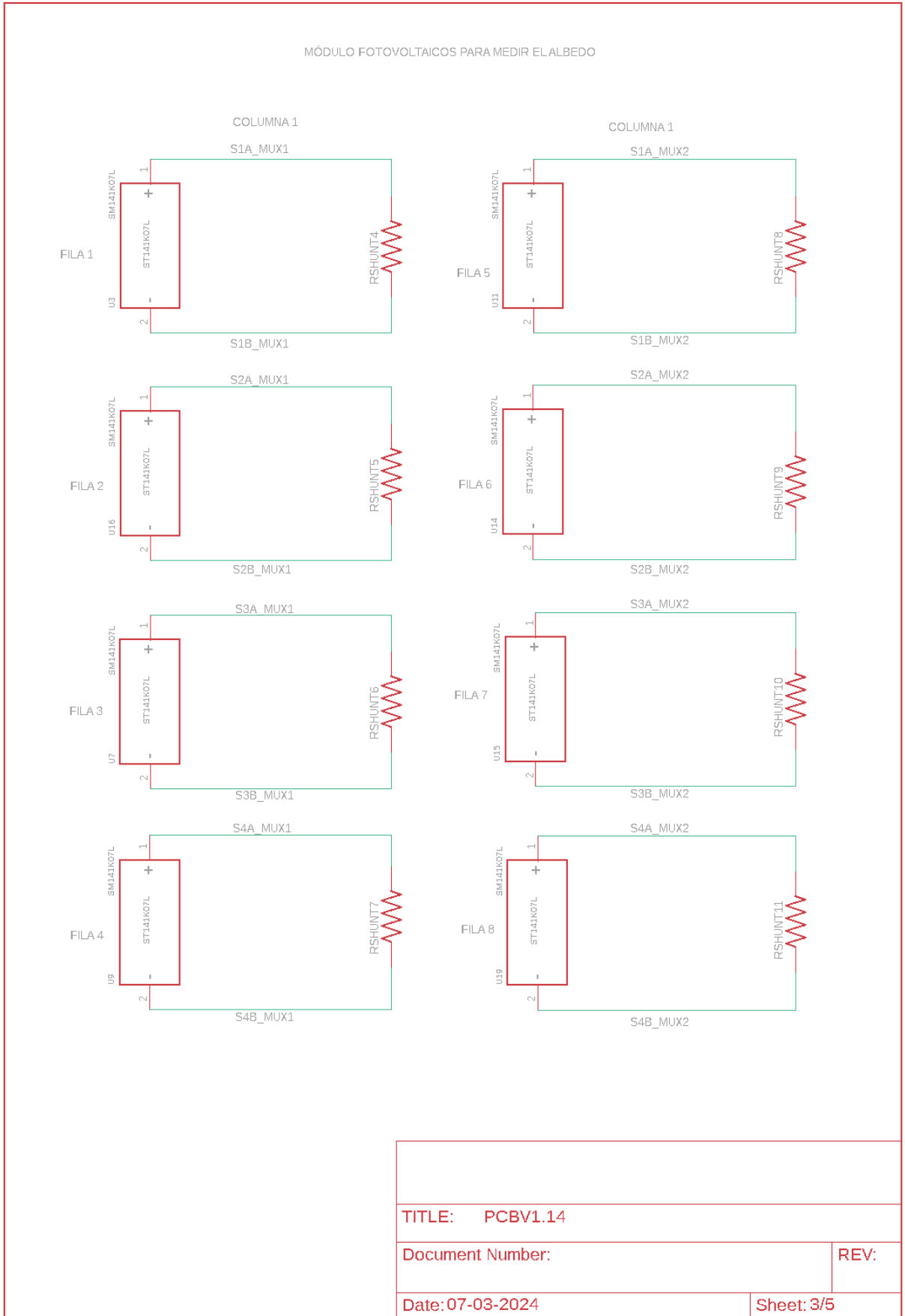
TITLE:	PCBV1.14
Document Number:	
REV:	
Date: 07-03-2024	
Sheet: 1/5	

MICROCONTROLADOR XBEE3 THROUGH HOLE



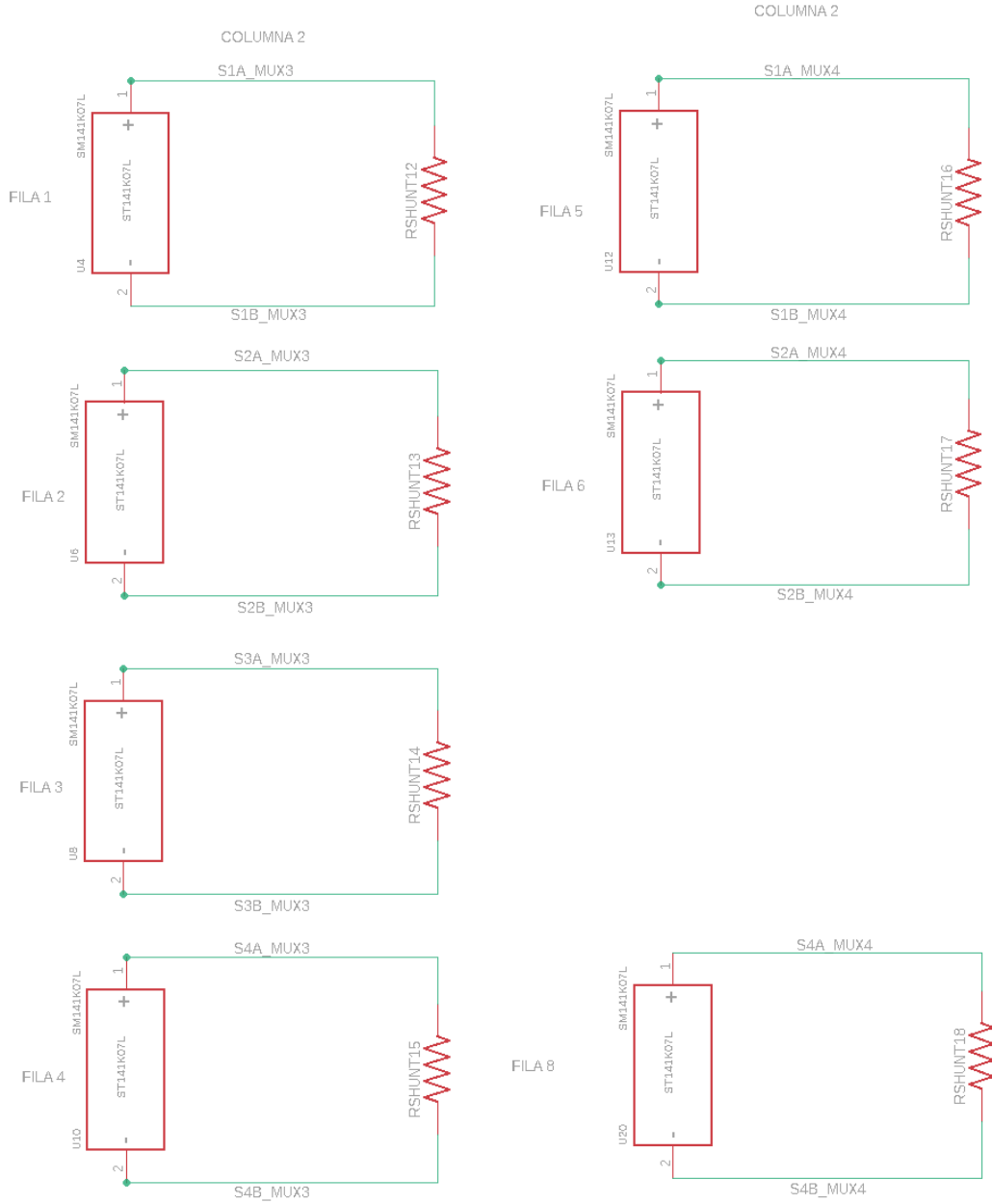
TITLE: PCBV1.14	
Document Number:	
Date: 07-03-2024	REV:
Sheet: 2/5	

MÓDULO FOTOVOLTAICOS PARA MEDIR EL ALBEDO



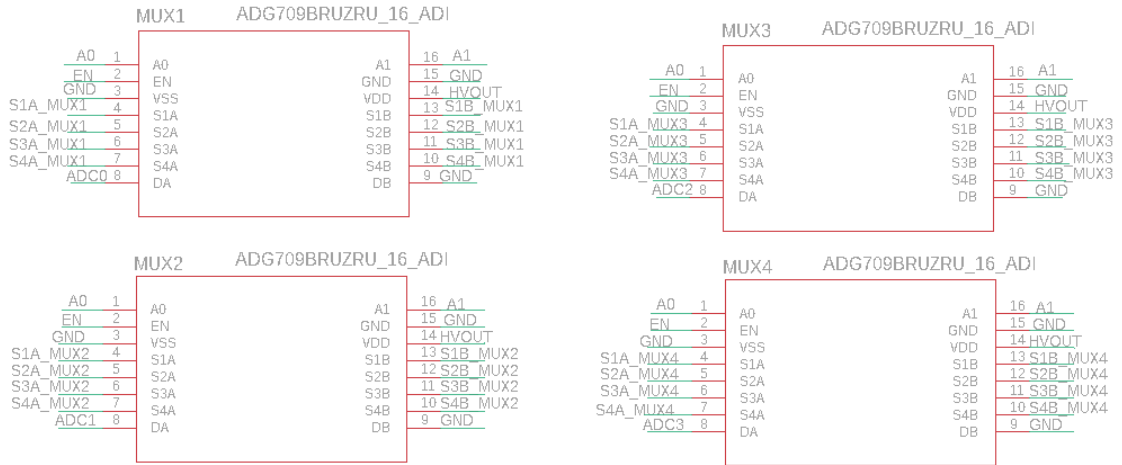
TITLE: PCBV1.14	
Document Number:	REV:
Date: 07-03-2024	Sheet: 3/5

MÓDULO FOTOVOLTAICOS PARA MEDIR EL ALBEDO

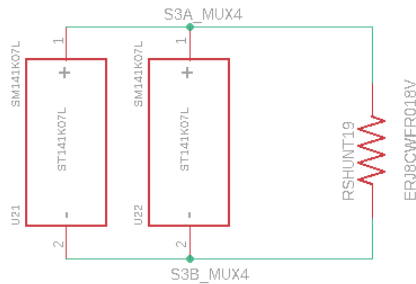


TITLE: PCBV1.14	
Document Number:	REV:
Date: 07-03-2024	Sheet: 4/5

MULTIPLEXORES



MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA MEDIR IRRADIANCIA DEL SOL



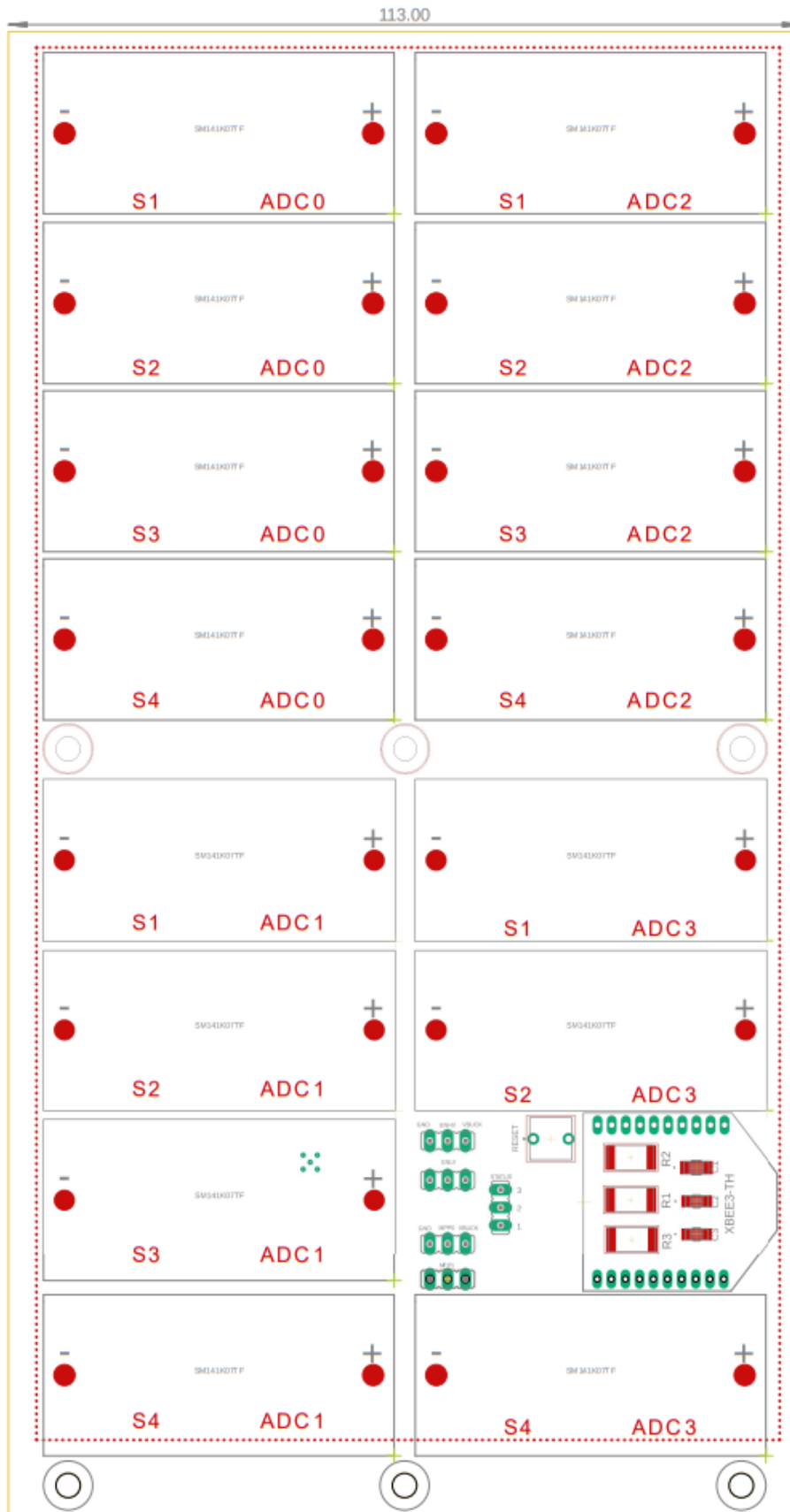
TITLE: PCBV1.14

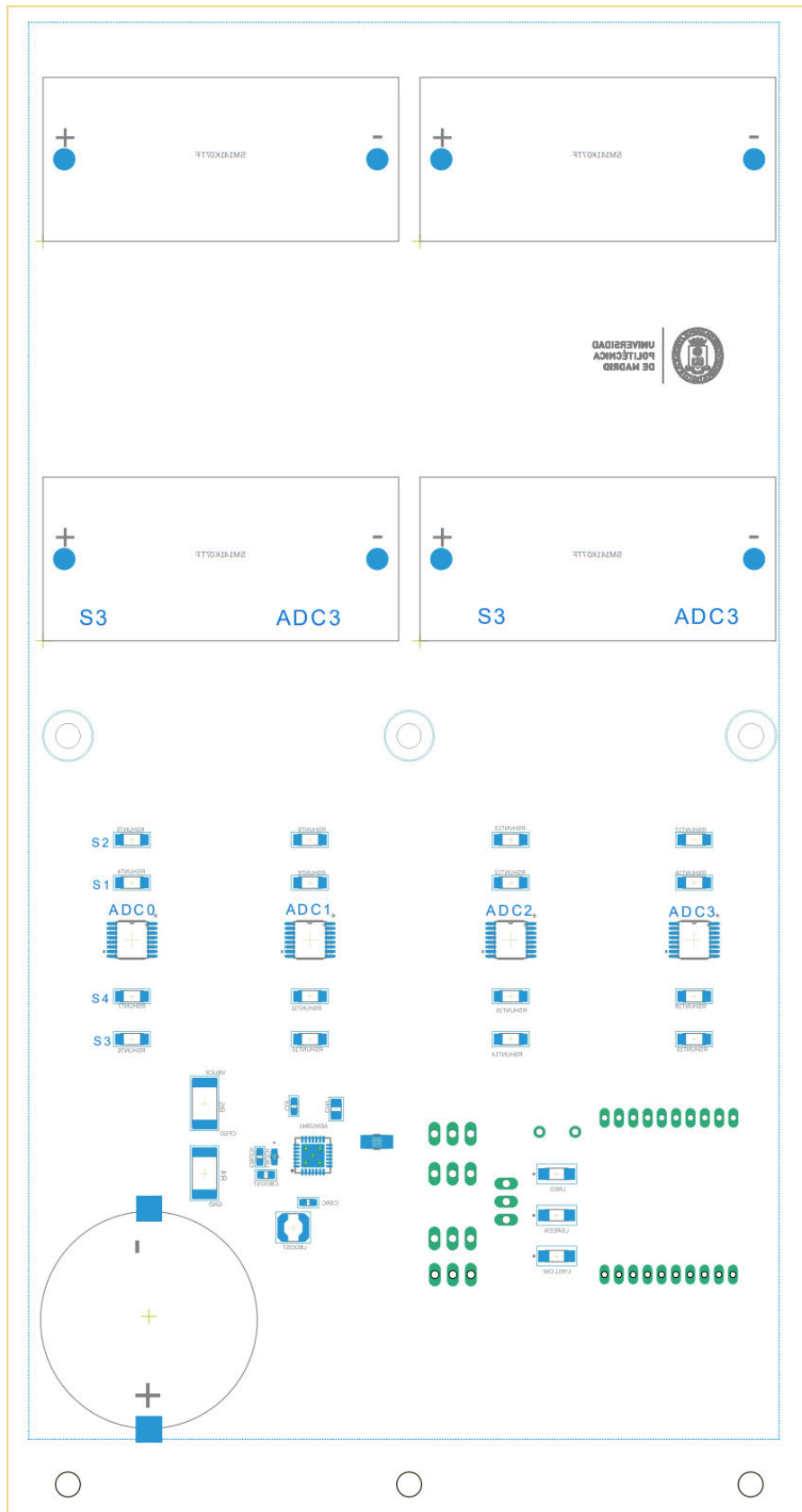
Document Number:

REV:

Date: 07-03-2024

Sheet: 5/5





Manual de usuario

El objetivo de este manual de usuario es proporcionar las instrucciones necesarias para la configuración y carga de software en los módulos Xbee3, especialmente en el caso de integrar nuevos sensores de radiación en la maqueta. A lo largo del documento, se detallará la configuración inicial de los módulos Xbee, el proceso de carga del programa en los módulos y así como los requisitos de software necesarios para llevar a cabo estas acciones.

1. Equipos necesarios.

	P/N Dispositivo	P/N Placa Evaluación	Firmware versión
Coordinador	XB3-24Z8PS-J	76000979	1010
Dispositivos Finales	XB3-24Z8PT	76000956	1010
2 x Cable micro USB - USB			
Ordenador Se puede utilizar cualquier sistema operativo, aunque este manual está realizado en Windows.			

2. Software Necesario.

Antes de comenzar con la configuración de los módulos Xbee3, es imprescindible tener instalados en el ordenador los siguientes programas:

2.1. Digi XCTU

Digi XCTU es el software oficial proporcionado por Digi para la configuración, actualización y gestión de los módulos Xbee permitiendo realizar las siguientes tareas:

- Configurar los parámetros de red de los módulos XBee3, como el nombre del dispositivo, funcionalidad de las entradas/salidas digitales y analógicas y otros parámetros esenciales.
- Actualización del firmware de los módulos XBee a la última versión, garantizando un óptimo rendimiento y seguridad.
- Monitoreo de la red visualizando el estado en tiempo real de los módulos operativo, permitiendo el analizar la calidad de la señal, la tasa de datos, entre otros.
- Desarrollar scripts de Micropython y personalizar el comportamiento de los módulos XBee3 para aplicaciones avanzadas.

El programa se encuentra en la página oficial de Digi en el enlace siguiente: [XCTU Support Resources \(digi.com\)](https://www.digi.com/xctu-support-resources)

2.2. Pycharm

Para programar los módulos Xbee3 de Digi usando MicroPython, es necesario instalar PyCharm. El software se obtiene de la página oficial <https://www.jetbrains.com/pycharm/>. En este caso descargamos la versión gratuita compatible con el sistema operativo del ordenador empleado.

3. Configuración Xbee3 con XCTU

El primer paso es configurar los módulos Xbee3 utilizando el software XCTU mostrado en la Figura X

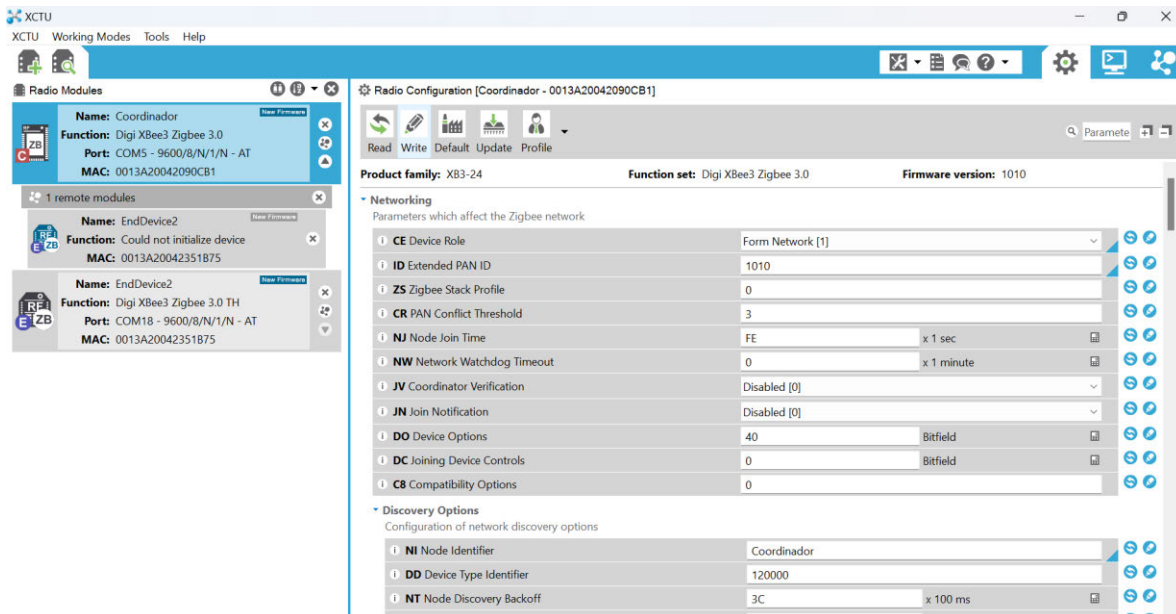



Figura 70. Software XCTU

Previo a la configuración de los módulos es necesario establecer la comunicación serie entre los módulos XBee3 y el ordenador mediante un adaptador USB-serial. Para ello se emplearán las placas de evaluación correspondiente a los diferentes módulos indicados en el apartado anterior Equipos Necesarios.

Una vez conectado el módulo XBee, en XCTU hacemos clic en el icono  y especificamos los parámetros de comunicación serie adecuados: velocidad de 9600 baudios, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de stop y control de flujo deshabilitado como se muestra en Figura 71.

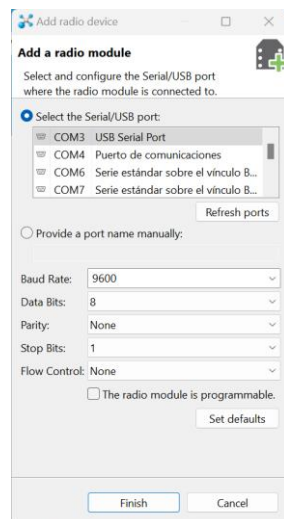


Figura 71. Configuración Serial Xbee3.

Antes de proceder con cualquier configuración, se recomienda verificar la versión del firmware. Si el dispositivo viene de fábrica, es posible que sea necesario actualizar al firmware más reciente. Para actualizar el dispositivo, se utiliza el ícono **Update** que se muestra en la Figura 72. Además, se pueden

observar otros íconos: **Read** para leer los valores configurados del Xbee, **Write** para escribirlos, y **Default** para restablecer los valores de fábrica.

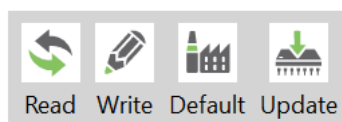


Figura 72. Iconos programa XCTU.

XBee cuenta con varios parámetros clave que deben definirse para asegurar el correcto funcionamiento de la red Zigbee. A continuación, se listan los más importantes:

- **CE** (*Device Role* o Rol del Dispositivo): define la función que desempeña el dispositivo en la red: *Join Network* [0] o *From Network* [1].
- **ID** (*Extended PAN* o identificador de PAN): define un identificador de PAN específico. Si el valor se establece en 0, el coordinador selecciona un PAN ID aleatorio, mientras que los *routers* o dispositivos finales se unen a cualquier red.
- **JV** (*Coordinator Verification* o verificación del coordinador): garantiza que los dispositivos operen en un canal válido con un coordinador presente. Si se establece **JV = 1**, el dispositivo escaneará el canal actual en busca de un coordinador y, si no lo encuentra, se moverá a otro canal con coordinador. Si se establece **JV = 0**, el dispositivo continuará operando en el canal actual, incluso si no hay coordinador, lo que puede ser útil en algunas aplicaciones específicas como la de este proyecto.
- **NI** (*Node Identifier* o identificador de nodo): Una cadena de 20 caracteres ASCII que identifican fácilmente a los módulos. Este valor se devuelve en una consulta de ND (*Network Discovery* o Descubridor de Red).
- **NT** (*Network Discovery Backoff* o Retroceso de Descubrimiento de Red): ayuda a prevenir colisiones de datos al establecer un retardo aleatorio para las respuestas de descubrimiento de red. Esto se logra introduciendo un periodo de espera entre las respuestas **ND** y **DN** (*Device Notification* o notificación de dispositivo), evitando que todos los dispositivos intenten transmitir simultáneamente. El retardo aleatorio se establece entre **0** y **NT*100 milisegundos**
- **CH** (*Operating Channel* o canal de operación): Muestra el canal que será utilizado para transmitir y recibir datos de los dispositivos. Si el valor es 0, significa que el dispositivo no se ha unido a ninguna red.
- **SH** (*Serial Number High* o Número de Serie Alto): representa los 32 bits superiores de la dirección exclusiva asignada al módulo.
- **SL** (*Serial Number Low* o Número de Serie Bajo): representa los 32 bits inferiores de la dirección ampliada exclusiva asignada al módulo. La combinación de SH + SL genera una dirección de 64 bits siguiendo el estándar IEEE.
- **SM** (*Sleep Mode* o modo sueño): controla el comportamiento del dispositivo cuando no está activo. En el caso del coordinador o router será No Sleep [0] para garantizar la disponibilidad continuada en la red. Para dispositivos finales, existen otras opciones:
 - *Cyclic Sleep* [4]: Despierta al expirar un temporizador.
 - *Cyclic Sleep Pin-Wake* [5]: Despierta al expirar el temporizador o por una señal en el pin 9 del módulo.
 - *Micropython Sleep* [6]: permitiendo gestionar los períodos de inactividad del módulo mediante software. Este es el modo empleado en los nodos finales.
- **PS** (*Micropython Auto Start* o Inicio Automático de Micropython): Permite que el módulo ejecute automáticamente código Micropython compilado almacenado en la memoria Flash.

- **AP** (*Enable API* o *Habilitar API*): Permite que los paquetes RF recibidos se estructuren en tramas API para ser enviados por el puerto serie. A la hora de integrarlo con el sensor de radiación, debe estar configurado como Micropython REPL [4].

La **Tabla 33** se presentan a modo resumen los valores configurados para cada dispositivo en la red ZigBee.

Tabla 33. Valores asignados a cada dispositivo.

Parámetro	Coordinador	Dispositivos finales		
CE	From Network[1]	Join Network [0]	Join Network [0]	Join Network [0]
NI	Coordinador	Dispositivo Final 1	Dispositivo Final 2	Dispositivo Final 4
PAN ID	1010	1010	1010	1010
JV	0	0	0	0
NT	3C	3C	3C	3C
CH	19	19	19	19
SM	No Sleep [0]	Micropython Sleep [6]	Micropython Sleep [6]	Micropython Sleep [6]
PS	Enable[1]	Enable[1]	Enable[1]	Enable[1]
AP	Micropython REPL[4]	Micropython REPL[4]	Micropython REPL[4]	Micropython REPL[4]
MAC	0013A20004229C48B	0013A2004243D058	0013A200423EE703	0013A2004243CEAF

Durante la fase de configuración inicial, es crucial asegurarse de que los módulos designados como dispositivos finales tengan sus entradas y salidas correctamente configuradas. La **Tabla 34** detalla la configuración específica para cada dispositivo final. Además, es importante configurar los parámetros relacionados con el ADC.

- **IO *Sampling Rate* IR**: determina la frecuencia con la que se muestrean las entradas analógicas y digitales habilitadas. Si se establece > 0 , todas las E/S digitales y entradas analógicas habilitadas serán muestreadas y transmitidas cada IR milisegundos. En el caso de este proyecto la frecuencia de muestreo se establece en el programa Micropython que lleva integrado el dispositivo final.
- **AV**: define la tensión de referencia utilizada para el muestreo ADC. Las opciones posibles son: 1.25 V [0], 2.5 V [1] y Vcc [2]. Se elige 1.25 V como referencia.

Tabla 34. Configuración E/S de los nodos finales

Descripción	Parámetro	Dispositivos Finales
AD0	D0	ADC [2]
AD1	D1	ADC [2]
AD2	D2	ADC [2]
AD3	D3	ADC [2]
DIO4	D4	Digital Out, Low [4]
DIO6	D6	Digital Out, Low [4]
DIO7	D7	Digital Out, Low [4]
AV	AV	1.25V <i>reference</i> [1]


Una vez que se han configurado todos los parámetros, verificamos si los dispositivos finales son detectados por el coordinador. Para realizar esta comprobación, hacemos clic en  del coordinador. El resultado, como se muestra en la **Figura 73**, indica que hay 3 nodos finales activos y funcionando correctamente en la red.



Figura 73. Descubrimiento de los dispositivos en XCTU

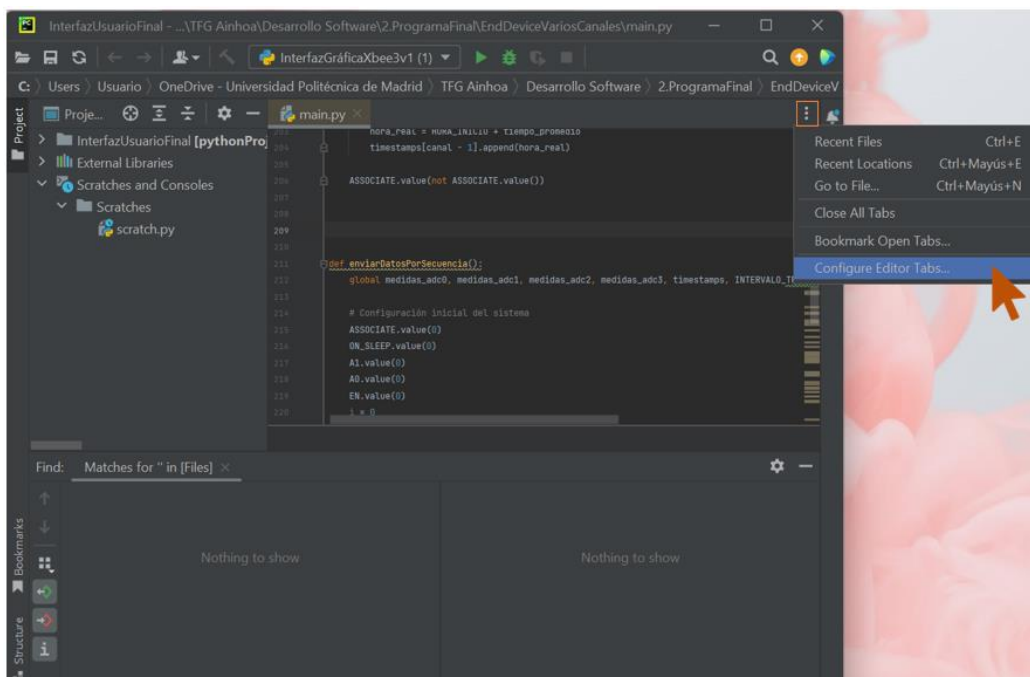
4. Configuración Entorno Pycharm

Tanto para ejecutar la interfaz de usuario como para cargar el software en los módulos Xbee3 utilizando PyCharm, es esencial asegurarse de que todos los *plugins* necesarios y el entorno estén correctamente configurados. A continuación, se describe el proceso de instalación.

4.1. Configuración Pycharm e instalación de plugins para los Xbee3

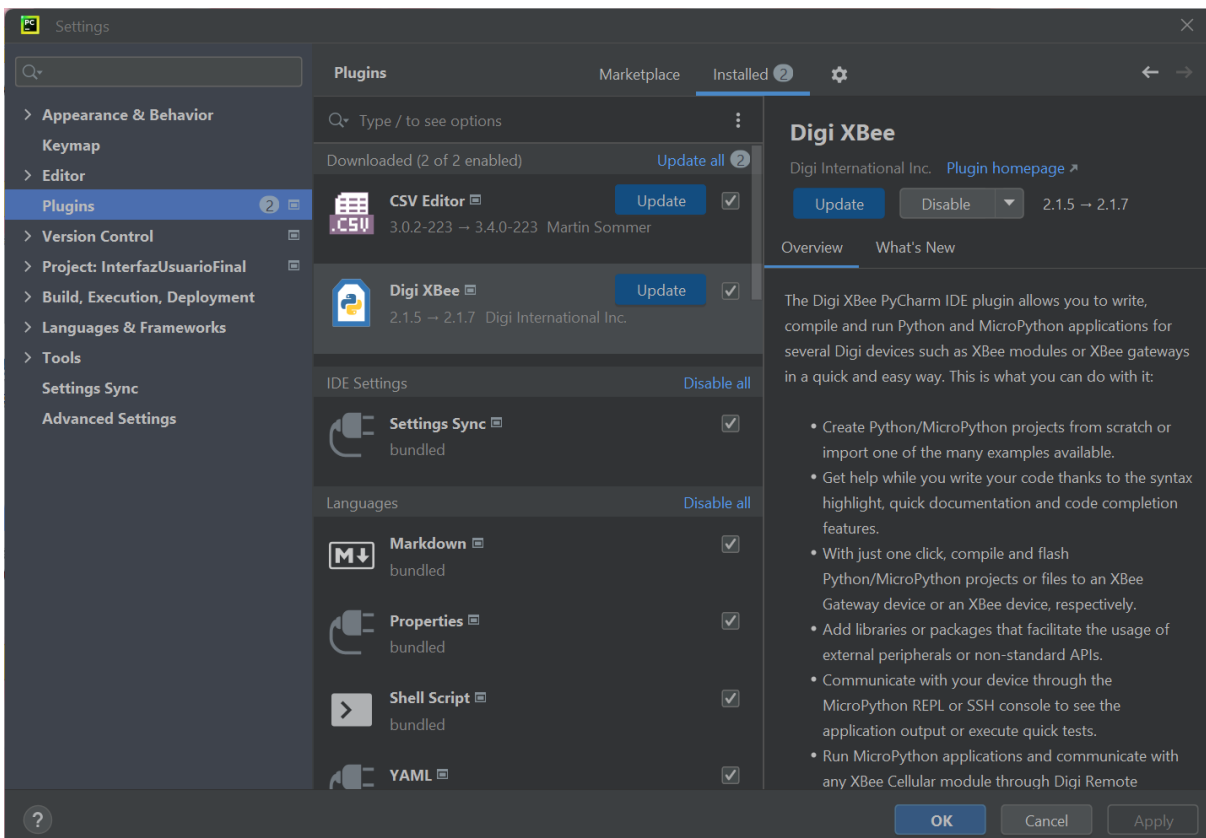
Para poder compilar y cargar el proyecto en los módulos Xbee3, es fundamental tener instalado el *plugin Digi XBee* en PyCharm. Este *plugin* permite la integración necesaria para trabajar con los dispositivos Xbee3 y es imprescindible para gestionar los proyectos y ejecutar el código en estos módulos.

1. Accedemos a la ventana de *Settings*



2. Instalación del *plugin Digi XBee*.

Dentro de la ventana de *Settings*, hacemos clic en la pestaña *Plugins* del panel izquierdo. En la barra de búsqueda de la sección de plugins, escribimos "Digi XBee". Cuando aparezca el *plugin*, se selecciona la opción *Install* para instalarlo en PyCharm. Es necesario asegurarse de que la versión del *plugin* está actualizada.



3. Confirmar la instalación.

Una vez completada la instalación del *plugin*, es recomendable reiniciar PyCharm para asegurarnos de que todos los componentes se hayan instalado correctamente.

A partir de aquí se procede a cargar el software en los módulos Xbee3.

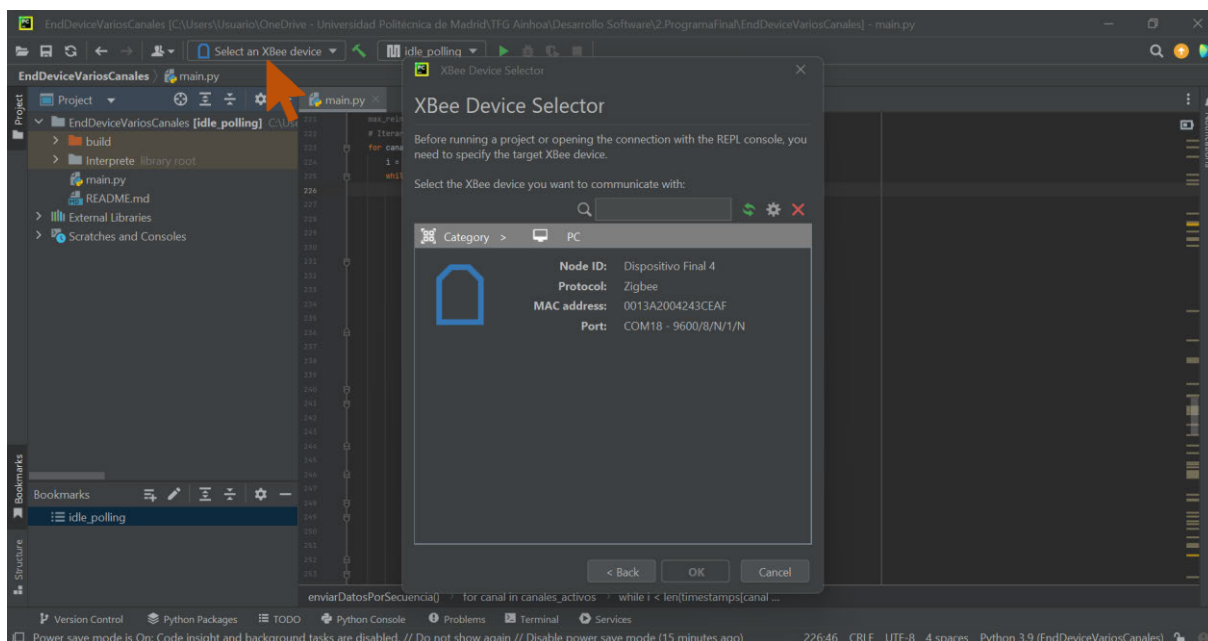
4.2. Métodos para cargar el software en los módulos Xbee3

Existen varios métodos disponibles para cargar el software en los módulos Xbee3, dependiendo del estado de los archivos y de si se requiere realizar cambios en el código o simplemente cargar el software compilado. A continuación, se describen las dos opciones principales:

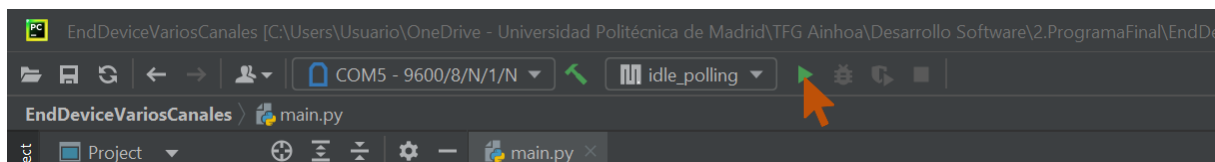
Opción 1: Carga y modificación del software utilizando PyCharm

Si es necesario realizar alguna modificación en los archivos de código fuente antes de cargarlos en los módulos Xbee3, se emplea la herramienta **PyCharm**.

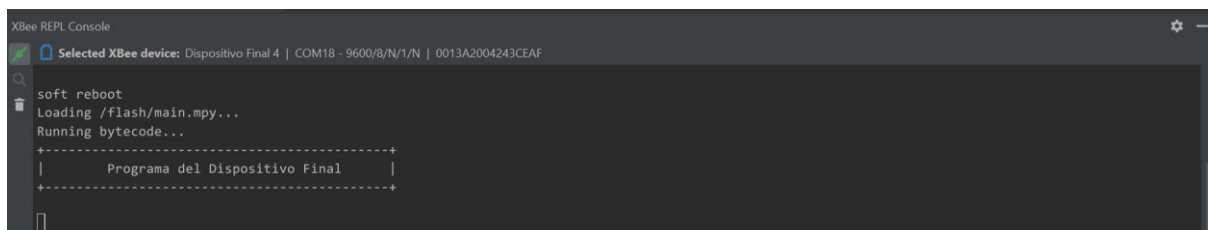
1. Abrimos el proyecto en PyCharm y aseguramos de que todos los **plugins** estén instalados y configurados.
2. Realizamos los cambios o ajustes necesarios en el código fuente.
3. Una vez modificados, seleccionamos el dispositivo donde queremos cargar el software.



- Una vez detectado el dispositivo, seleccionamos *Run* para compilar y cargar el software.




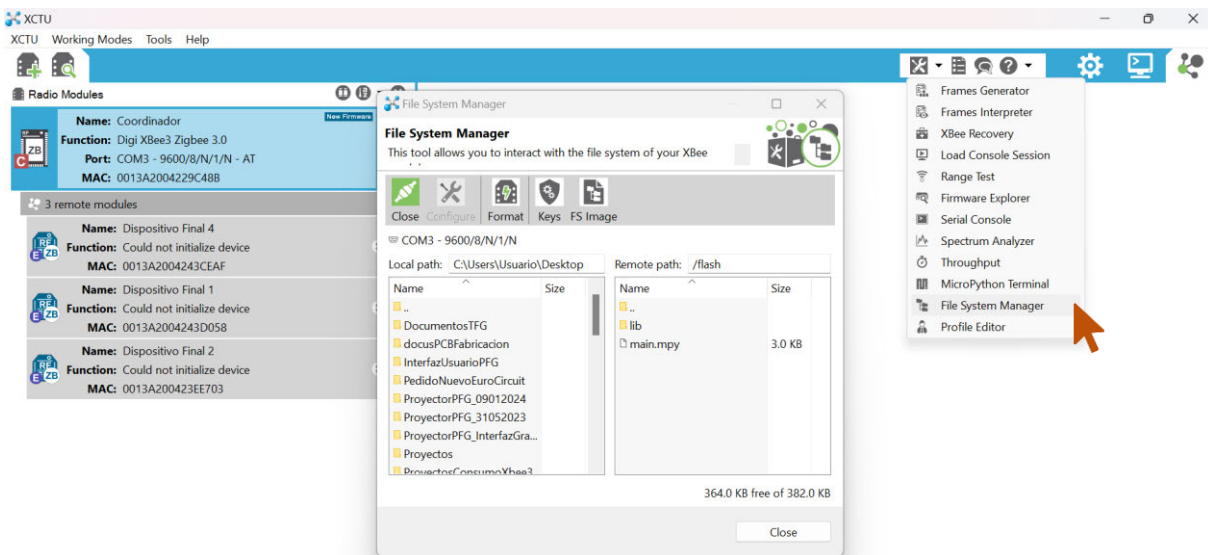
- Comprobamos en la consola que el software se está ejecutando.



Opción 2: Carga del software compilado utilizando XCTU

Si ya disponemos de los archivos compilados y no es necesario realizar modificaciones adicionales en el código, podemos optar por usar la herramienta **XCTU**. Esta opción es útil cuando el software ya está preparado para ser desplegado directamente en los módulos Xbee3.

- Abrimos **XCTU**.
- Conectamos el módulo Xbee3 al ordenador mediante el puerto serie.
- Hacemos clic en **Tools**  donde se abrirá un desplegable.
- Seleccionamos *File System Manager* que abrirá la siguiente ventana.

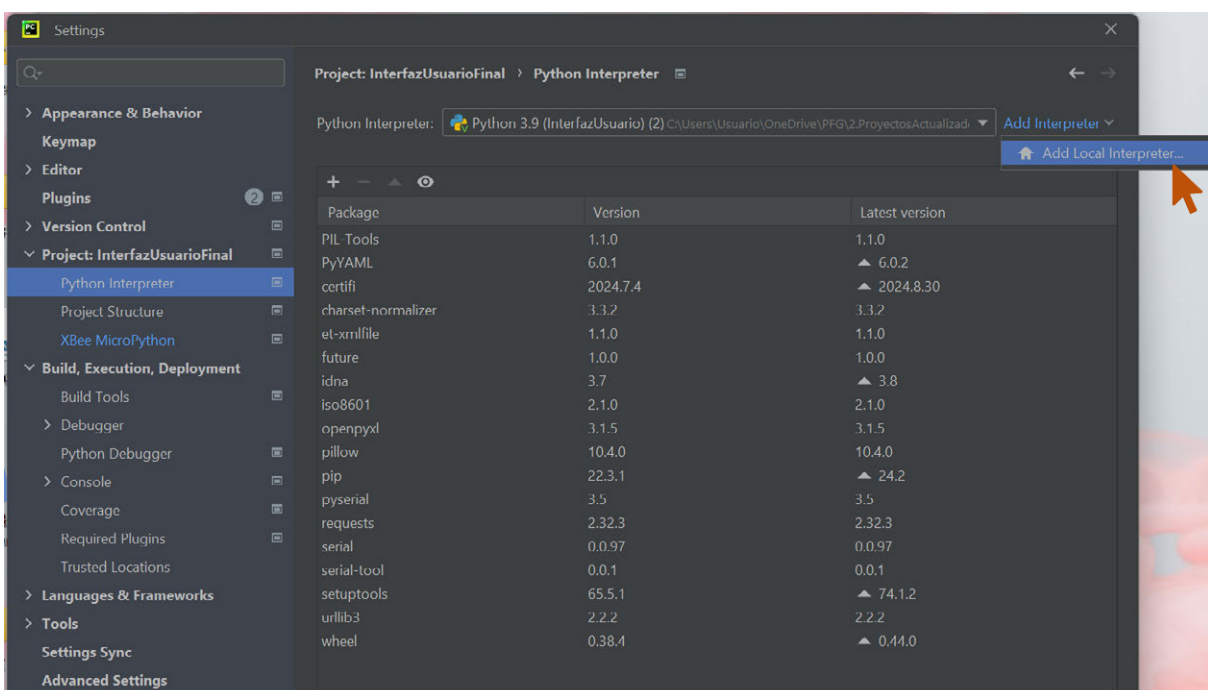


5. Le damos a *Open* abriendo el sistema de archivos del módulo Xbee3.
6. Una vez dentro, arrastramos el archivo compilado **main.mpy**. Este archivo se encuentra en la carpeta **/build/** de cada proyecto, en particular dentro del proyecto **EndDeviceVariosCanales** para el dispositivo final, y en **SoftwareCoordinador** para el coordinador.
7. Con estos pasos ya estaría listo nuestro módulo para ser incorporado en el sensor de radiación.

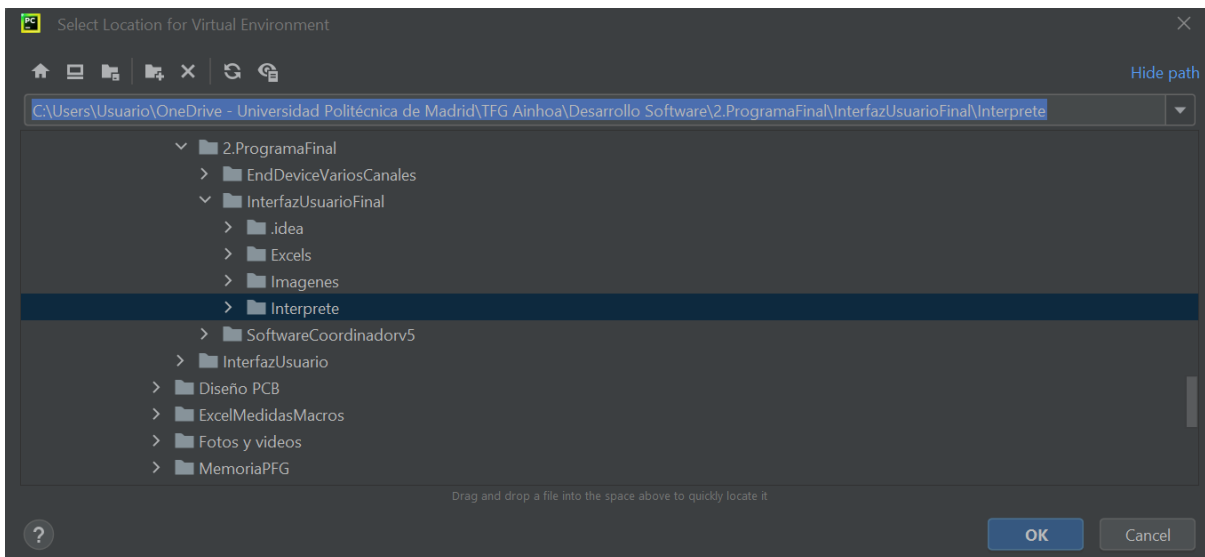
4.3. Configuración Pycharm para ejecución Interfaz de Usuario.

Para la interfaz de usuario se incluye un archivo **.exe**, eliminando la necesidad de configurar PyCharm. Sin embargo, si es necesario modificar el código, será necesario usar PyCharm. Para que la interfaz funcione correctamente desde PyCharm, se ha integrado un intérprete configurado en el proyecto, evitando configuraciones adicionales. A continuación, se detallan los pasos para su configuración.

1. Abrir la ventana *Settings* de Pycharm.
2. Navegar hasta la pestaña *Interpreter* y seleccionar *Add Interpreter Local* → *Add Local Interpreter...*



3. Al abrirse la ventana **Add Python Interpreter**, seleccionamos la opción de utilizar un entorno existente. Luego, añadimos el intérprete que se encuentra en la ruta del proyecto: **ruta/InterfazUsuarioFinal/Interprete/Scripts/python.exe**



4. Los paquetes que han de estar instalados se muestran en la siguiente imagen.

Package	Version	Latest version
PIL-Tools	1.1.0	1.1.0
PyYAML	6.0.1	▲ 6.0.2
certifi	2024.7.4	▲ 2024.8.30
charset-normalizer	3.3.2	3.3.2
et-xmlfile	1.1.0	1.1.0
future	1.0.0	1.0.0
idna	3.7	▲ 3.8
iso8601	2.1.0	2.1.0
openpyxl	3.1.5	3.1.5
pillow	10.4.0	10.4.0
pip	22.3.1	▲ 24.2
pyserial	3.5	3.5
requests	2.32.3	2.32.3
serial	0.0.97	0.0.97
serial-tool	0.0.1	0.0.1
setuptools	65.5.1	▲ 74.1.2
urllib3	2.2.2	2.2.2
wheel	0.38.4	▲ 0.44.0