

DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE RECOLECCIÓN,
ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA NODOS
IOT (INTERNET DE LAS COSAS) DE BAJA POTENCIA.

VALENTINA LUNA OLAVE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
FEBRERO DE 2024

DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE RECOLECCIÓN,
ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA NODOS
IOT (INTERNET DE LAS COSAS) DE BAJA POTENCIA.



VALENTINA LUNA OLAVE
CÓDIGO: 100615020659

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DIRECTOR: ING. ANDRÉS FERNANDO ORDÓÑEZ HURTADO
CODIRECTOR: ING. MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
FEBRERO DE 2024

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios por permitirme llegar tan lejos, y a mis papás que no descansaron ni un solo segundo desde hace 25 años con el objetivo de que yo pudiera alcanzar esta gran meta, este trabajo se los dedico a ellos que estuvieron conmigo apoyándome en cada paso de la carrera, dándome fuerzas en cada tropezón y ánimo para seguir, pero sobre todo la fuerza para luchar soñando con poder darles el mundo entero.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	3
2. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE UN NODO IoT	5
2.1. INTERNET DE LAS COSAS	5
2.1.1. Tecnologías de Comunicación en Sistemas IoT	7
2.2. RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	10
2.2.1. Métodos de recolección de energía convencionales	10
2.2.2. Métodos de recolección de energía no convencionales	11
2.2.3. Dispositivos electrónicos de gestión de energía	17
2.3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	22
2.3.1. Baterías de litio	22
2.3.2. Supercapacitores	23
2.4. MICROCONTROLADORES DE BAJO CONSUMO DE ENERGÍA	23
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NODO IoT	26
3.1. Planeación	26
3.1.1. Propósito del nodo IoT	27
3.1.2. Estructura del nodo IoT	27
3.2. Estimación energética	29
3.3. Prueba de concepto	29
3.4. Elaboración de dispositivo	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. Caracterización de paneles solares	34
4.2. Caracterización del sistema de gestión de energía	35

4.3.	Validación de la etapa de gestión del sistema (microcontrolador)	41
4.4.	Validación de la etapa de datos	42
4.5.	Evaluación del desempeño del sistema	43
5.	DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE NODO IoT	45
5.1.1.	Herramienta Altium	45
5.1.2.	Diagrama esquemático del sistema	45
5.1.3.	Diseño PCB	46
5.1.4.	Elaboración del diseño PCB	47
5.2.	Elaboración del prototipo	48
5.2.1.	Elaboración de la placa	48
5.2.2.	Costos de los materiales	49
5.2.3.	Montaje del circuito y verificación de funcionamiento	50
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	53
6.1.	Conclusiones	53
6.2.	Trabajos futuros	54
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Número de dispositivos conectados a través de IoT anualmente	7
Figura 2. Estructuras de red de BLE	8
Figura 3. Arquitectura de SigFox	9
Figura 4. Efecto Piezoeléctrico	12
Figura 5. Acoplamiento magnético en RFID	13
Figura 6. Diagrama de una Rectenna	14
Figura 7. Sistema de efecto Seebeck	15
Figura 8. Efecto Fotovoltaico	16
Figura 9. Circuito multiplicador de voltaje	18
Figura 10. Convertidor reductor	19
Figura 11. Convertidor elevador	19
Figura 12. Curvas de potencia de una celda solar	20
Figura 13. e-peas AEM10941	21
Figura 14. LTC3331	22
Figura 15. Funcionamiento de una batería de litio	23
Figura 16. Microcontrolador RP2040	24
Figura 17. Microcontrolador 1284P	24
Figura 18. ESP32	25
Figura 19. Procesos del desarrollo del prototipo del nodo IoT	26

Figura 20. Diagrama del Sistema	27
Figura 21. Modulo LiOn	30
Figura 22. Medida de carga de la batería en proceso de carga de datos	30
Figura 23. Datos recolectados con el sistema	31
Figura 24. Placa elaborada para el dispositivo	32
Figura 25. Dispositivo elaborado	32
Figura 26. Dispositivo elaborado cerrado	33
Figura 27. Voltaje de salida del panel (Condición de baja luminosidad)	36
Figura 28. Voltaje de salida del panel (Aumento de luminosidad)	37
Figura 29. Comportamiento del AEM10941	38
Figura 30. Comportamiento del AEM10941 (Incremento de luminosidad)	38
Figura 31. Condición de carga completa de la batería	39
Figura 32. Medida de corriente de carga a la batería en condición de alta luminosidad	40
Figura 33. Voltaje de entrada del panel e índice de radiación UV, respecto a la hora	41
Figura 34. Interfaz para visualizar los datos tomados con el dispositivo	42
Figura 35. Base de datos	43
Figura 36. Diseño PCB cara frontal	47
Figura 37. Cara posterior del circuito	48
Figura 38. Placas elaboradas	49
Figura 39. Placas montadas	50

Figura 40. Diagrama de bloques funcional del AEM10941	51
Figura 41. Adaptación del circuito	52
Figura A.1. Búsqueda del dispositivo	61
Figura A.2.Descarga de recursos	61
Figura A.3. Importador de librerías	62
Figura A.4. Selección del archivo	62
Figura A.5. Importación del dispositivos	63
Figura A.6. Estado de la importación	63
Figura A 7. Uso del esquemático	64

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estimación energética de cada elemento del sistema	29
Tabla 2. Caracterización de paneles solares	34
Tabla 3. Relación de componentes del circuito	49

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Importación de librerías a la herramienta Altium	67
Anexo B. Diagramas esquemáticos del sistema	71
Anexo C. Código de Arduino de la Placa ESP32	74

GLOSARIO

BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> , Bluetooth de baja energía
CC	Corriente Continua
CMOS	Corriente Continua <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> , Metal Oxido Semiconductor Complementario
DC-DC	<i>Direct Current-Direct Current</i> , Corriente Directa-Corriente Directa
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industrial, Científico y Médico
IPC	<i>Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit</i> , Instituto de Interconexión y Empaquetado de Circuitos Electrónicos
LoRa	<i>Long Range</i> , Rango Grande
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> , Redes de Telecomunicaciones destinadas al envío de pequeños paquetes de datos, a un bajo consumo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> , Trabajo en el Punto de Máxima Potencia
NB-IoT	<i>Narrow Band Internet of Things</i> , Internet de las cosas de banda estrecha
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , Modulación por Ancho de Pulso
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> , Identificación por Radio Frecuencia
VLSI	<i>Very Large Scale of Integration</i> , Muy Alta Escala de Integración

1. INTRODUCCIÓN

Junto con el crecimiento de la tecnología, cada día se hace más necesario el uso de dispositivos que faciliten la monitorización de diversas variables ambientales para poder llevar un control correcto en diferentes escenarios, como lo son cultivos, ecosistemas específicos o lugares en lo que se desea conocer la temperatura ambiente, la humedad, u otras variables con fines de análisis de datos para predicción de variables. Por ello se establece la necesidad específica de un dispositivo autónomo que recolecte información sobre dichas variables ambientales y que tenga la capacidad de enviar estos datos a través de la tecnología de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) para su posterior tratamiento. En sistemas IoT autónomos, los dispositivos obtienen su alimentación a partir de la energía fotovoltaica, de tal manera que esta sea gestionada de acuerdo con las condiciones del ambiente donde se encuentra el dispositivo y pueda brindar el mejor desempeño posible. Al realizar el envío de datos recolectados a través de internet, el dispositivo se clasifica como un nodo IoT, tecnología que lo enlaza a la red, pudiendo recolectarse información de dispositivos similares o del mismo tipo.

En esta monografía se realizará el análisis correspondiente para el diseño de un dispositivo definido como nodo IoT de bajo consumo de potencia, buscando realizar el diseño del sistema electrónico correspondiente, que realice la recolección, el almacenamiento y la gestión de energía fotovoltaica necesaria para su operación.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento exponencial que traen consigo los avances de la tecnología IoT [1] y el impacto ambiental que genera el pilar de cualquier avance tecnológico representan en la actualidad un reto de desarrollo. Por ello, se abre paso a la necesidad de implementar dispositivos cuyo suministro de potencia provenga de fuentes sustentables y renovables de energía, con el fin de reducir la huella de carbono y las múltiples afectaciones negativas que puedan llegar a causar al medio ambiente [2]. A partir de esta problemática, desde inicios de los años 2000, se han estudiado diversas fuentes de alimentación para dispositivos de dimensiones cada vez más pequeñas y de bajo consumo de potencia, en los cuales es posible aprovechar la transformación de algún tipo de energía del ambiente en energía eléctrica; ejemplo de ellos son: la energía humana producto del movimiento cotidiano, el gradiente de temperatura entre el cuerpo humano y el ambiente, la energía mecánica generada por las vibraciones en diferentes contextos y la energía fotovoltaica obtenida de la radiación solar. Sin embargo, con el fin de optimizar los procesos de recolección, almacenamiento y utilización de la energía en un dispositivo de este tipo, se ha establecido que la energía fotovoltaica es una de las

opciones más viables en la implementación de dispositivos que requieren bajos niveles de potencia, ya que a través de este tipo de energía se obtienen ventajas como altos voltajes de salida, menores costos y mayor precisión en la predicción de su comportamiento [3].

Contando con la disminución gradual de dimensiones en el desarrollo de dispositivos IoT, se hace necesario considerar que dichos sistemas de almacenamiento deben ser tan pequeños como sea posible [4]. Este tipo de sistemas conocidos en la literatura como sistemas de *energy harvesting*, se enfocan principalmente en la recolección, el almacenamiento y la gestión de energía para la ejecución adecuada de los procesos del dispositivo. Para este caso el desarrollo del sistema electrónico supone la solución a problemas presentados en otras investigaciones, como las bajas capacidades de almacenamiento [5], la mala administración de la energía obtenida, y las dimensiones poco adecuadas para el entorno [3], mejorando el rendimiento a través del diseño que busque un mejor funcionamiento de cada una de las etapas. Inicialmente la selección del tipo de celdas solares que permitan la mayor absorción de energía [3], manteniendo dimensiones pequeñas debido a que la implementación de estos sistemas será en ambientes abiertos, seguido de esto, se pretende establecer el sistema de almacenamiento que mejore el rendimiento del dispositivo, haciendo que este sea autónomo y capaz de administrar la energía almacenada según los requerimientos de la carga.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el desarrollo de este trabajo de grado permitirá dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la arquitectura apropiada de un sistema electrónico de recolección, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica para nodos IoT de bajo consumo de potencia?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de un nodo IoT enfocado al monitoreo de variables ambientales, radica en el auge de la implementación de sistemas de control de este tipo, con el fin de obtener información útil del ambiente en estudio, analizar los datos obtenidos y predecir el comportamiento futuro que se puede presentar en dichas variables, esto sumado al crecimiento de tecnologías IoT, con el propósito de interconectar de manera global la mayor cantidad de sensores posibles, y la gran relevancia del cuidado ambiental, realizando dispositivos amigables con el planeta, que a su vez aumenten el desarrollo de la sociedad, llevan a la necesidad de un análisis exhaustivo, que permita establecer las condiciones que conlleven el mayor desempeño posible y el menor impacto ambiental, siendo la alternativa más viable el uso de energías sostenibles y renovables, principalmente la energía fotovoltaica obtenida de la radiación solar, que está presente en la mayor porción de la superficie del planeta, lo que la hace completamente sostenible a lo largo de la vida útil del dispositivo que se busca diseñar.

Por otra parte en un país como Colombia en el que la agricultura es fundamental en la economía nacional, los campesinos son los principales actores de esta actividad y muchas veces por la falta de control en sus plantaciones se ven sometidos a la pérdida de estas por exceso o falta de riego, por ello se plantea que un nodo IoT con enfoque ambiental, que cuente con un sensor de humedad podría ser una solución de gran impacto en la prevención y el cuidado de cultivos monitoreados, además de contar con bajo costo por las condiciones sociales y económicas de esta parte de la población.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema electrónico de recolección, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica que permita el suministro de energía a nodos IoT de bajo consumo de potencia.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los requerimientos energéticos de un nodo IoT de bajo consumo de potencia.
- Diseñar un prototipo electrónico de recolección de energía fotovoltaica para nodos IoT.
- Determinar el desempeño del sistema electrónico de recolección de energía fotovoltaica propuesto.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento está dividido en 5 capítulos, organizados de la siguiente manera:

En el Capítulo 1, se presenta una introducción general a la tecnología estudiada, a manera de contextualización del desarrollo realizado en el documento, la cual contiene el planteamiento del problema, y los objetivos buscados en el proyecto.

En el Capítulo 2, se realiza la introducción teórica y conceptual a las tecnologías utilizadas, de tal manera que se puntualice el contexto de la investigación, tratando la importancia de las energías renovables, el auge de estas, la importancia de IoT, y las diferencias técnicas de recolección de energía que podrían ser utilizadas para el dispositivo en mención.

En el Capítulo 3 se presenta paso a paso el proceso llevado a cabo, donde se busca establecer los parámetros necesarios para el diseño e implementación del nodo IoT.

En el Capítulo 4 se realizan las mediciones necesarias, planteando los resultados obtenidos a manera de comparación, con el fin de validar el correcto funcionamiento del sistema y la discusión de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, para evaluar los resultados.

En el Capítulo 5 se presenta el diseño completo de un nodo IoT con las respectivas herramientas de diseño electrónico utilizadas, y los elementos utilizados a detalle.

Finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo de grado y los trabajos futuros sugeridos que puedan resultar del mismo.

2. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE UN NODO IoT

El auge de los avances tecnológicos del momento acelera el crecimiento de la industria de la tecnología, lo que conlleva algunos retos sociales, económicos y ambientales debido a que la huella de carbono o el impacto que cada objeto, dispositivo o persona genera al ambiente, es un factor que representa la diferencia en el futuro del planeta, y por lo tanto impacta la calidad de vida de los seres humanos [6]. Uno de estos retos es la recolección de energía a través de métodos no convencionales (algunos de ellos innovadores), que contrarresten la necesidad de utilizar combustibles fósiles para la generación de energía de tal forma que sean sostenibles y renovables, favoreciendo el ambiente y disminuyendo la contaminación generada por los métodos de recolección de energía convencionales. Como consecuencia de estos nuevos métodos se hace necesario el uso de dispositivos de almacenamiento de energía aptos para estos tipos de recolección, debido a la alta contaminación que generan los dispositivos tradicionales, como lo son baterías desechables o recargables de corta vida, las cuales pueden generar sustancias tóxicas y en muchos casos gases de efecto invernadero.

Adicionalmente, la interconexión global ha crecido cada vez más debido a las necesidades de comunicación, y muchos de estos procesos, tanto en ambientes cotidianos como industriales se han podido automatizar en gran medida a través de desarrollos como IoT, que permiten conectar una gran cantidad de dispositivos (muchos de ellos autónomos) de manera inalámbrica a través de internet.

2.1. INTERNET DE LAS COSAS

El concepto de IoT nació desde el año de 1999 cuando Kevin Ashton, pionero en esta tecnología hizo referencia a los sistemas de Identificación por Radio Frecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*) y el planteamiento de una red global de sensores que permitiera a cualquier objeto, individuo, animal o cosa, estar conectada a través de internet por medio de sensores [7]. Esta tecnología ha crecido significativamente durante la última década gracias a la necesidad existente de conexión en toda clase de dispositivos, objetos o personas. La base de este tipo de sistemas son los sensores, ya que a través de estos se recolectan los datos que serán almacenados en la red.

Existen diferentes conceptos de esta tecnología, sin embargo por el contexto en el que es utilizado en el presente documento, se utilizará la definición otorgada en el diccionario de la Universidad de Oxford (*Oxford Dictionaries*): “Internet de las Cosas (sustantivo): Interconexión a través de Internet de dispositivos de computación integrados en objetos cotidianos, que les permite enviar y recibir datos”.

Los beneficios obtenidos mediante la implementación del IoT alcanzan múltiples áreas de la cotidianidad, entre los cuales se destacan entretenimiento, salud, agricultura, transporte, incluso en ámbitos industriales. Entre algunas de las tendencias actuales impulsadas por los sistemas IoT se encuentran:

- **Miniaturización:** El desarrollo de sensores cada vez más pequeños ha sido impulsado por la necesidad de su portabilidad, lo cual se ha materializado gracias a las ventajas de la Muy Alta Escala de Integración (VLSI, *Very Large Scale of Integration*) de los dispositivos fabricados con base en la tecnología de Transistores Metal Oxido Semiconductor Complementario (CMOS, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*).
- **Computación en la nube:** La recolección de grandes volúmenes de datos abre paso a la necesidad de gran capacidad de almacenamiento. Sin embargo el proceso de almacenamiento de estos datos de manera local en cada dispositivo implicaría incrementos en los costos, pudiendo dificultar el proceso de comunicación. Es por ello por lo que los datos recolectados en dispositivos IoT son enviados directamente a internet desde donde pueden ser accedidos a través de otros equipos como computadores, celulares, tabletas, entre otros, mejorando el rendimiento del sistema al no saturar innecesariamente el almacenamiento de los dispositivos.
- **Análisis de datos:** Generalmente estos datos provienen de diversos sectores como la economía, la agricultura, y en general de cualquier persona como pueden ser horarios de actividad, temperatura corporal, horarios de uso frecuente de electrodomésticos, entre otros, los cuales pueden ser utilizados para procesos de Analítica de Datos (*Data Analytics*), con el fin de modelar el comportamiento de hábitos y tendencias, permitiendo a fabricantes o diversos interesados mejorar la producción de elementos, de acuerdo a los patrones de consumo identificados.

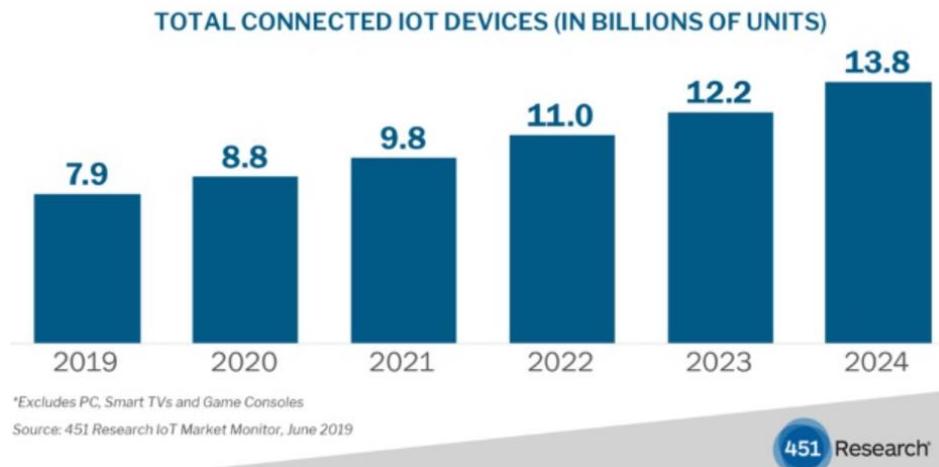
Adicionalmente los entornos o contextos en los que se puede poner en práctica el concepto de IoT son muy amplios, entre los cuales se destacan:

- **Salud:** Monitoreo de signos vitales y variables corporales.
- **Comercio:** Monitoreo de ventas, logística, localización de objetos.
- **Hogar:** Manipulación de electrodomésticos, domótica.
- **Industria:** Monitoreo de líneas de producción, monitoreo de procesos industriales.
- **Vehicular:** Monitoreo del estado general del vehículo.
- **Agropecuario:** Monitoreo de cultivos a través de variables ambientales.
- **Entretenimiento:** Monitoreo de horas en pantalla, monitoreo de intereses de visualización en diversas plataformas.

Empresas como 451 Research han realizados estudios de predicción sobre el crecimiento de la tecnología IoT. Según sus estudios, en la Figura 1 se muestra que

para el año 2024 existirían alrededor de trece mil ochocientos millones de dispositivos conectados alrededor de todo el mundo, lo que representa un crecimiento de aproximadamente el 12% anual desde el 2019 [8].

Figura 1. Número de dispositivos conectados a través de IoT anualmente



Fuente: [8]

El sector tecnológico correspondiente a IoT abarca una gran cantidad de aspectos de la cotidianidad y la industria, en los que destaca el sector agrícola, donde se pueden fortalecer las condiciones de animales y plantas a través del monitoreo del comportamiento de estos con sensores conectados a internet; en la industria automotriz se puede supervisar el estado del vehículos, sus componentes, y cada una de las variables de su funcionamiento; adicionalmente, los sistemas de transporte público pueden ser supervisado respecto a su ocupación o ubicación con fines de comunicación a la ciudadanía; la electrónica de consumo por su parte apunta a la ubicación de productos en cadenas de producción y detección rápida de fallos. El futuro de cada uno de estos sectores respecto a IoT se dirige a un mismo punto, la predicción de comportamiento y la seguridad, debido a que actualmente se cuenta con monitoreo hasta en tiempo real para la posterior toma de decisiones, sin embargo se busca alcanzar el punto de toma de decisiones previas que permitan la corrección de fallas rápidamente o incluso las evite [9].

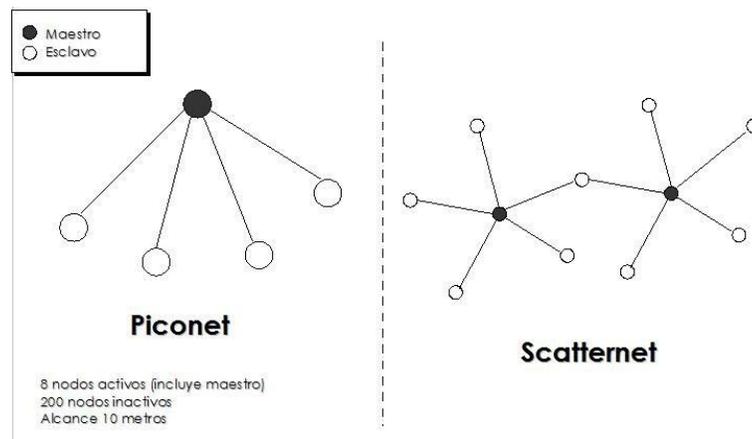
2.1.1. Tecnologías de Comunicación en Sistemas IoT

Con el avance de esta tecnología se han desarrollado diferentes mecanismos de comunicación inalámbrica, los cuales operan sobre redes de telecomunicaciones destinadas al envío de pequeños paquetes de datos, como es el caso de las Redes de Área Extensa de Baja Potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Network*). A su

vez estas tecnologías se pueden clasificar según su rango de alcance. Algunos ejemplos de ellas son:

- **ZigBee:** Se trata de un conjunto de protocolos de comunicación inalámbricas, cuyo principal propósito es fortalecer los sistemas domóticos que cuentan con IoT. Esta tecnología se basa en la norma IEEE 802.15.4, en donde se plantean los requisitos fundamentales como baja latencia, ancho de banda medio (mayor a algunas tecnologías IoT) y el uso de bandas de radiofrecuencia industriales, científicas y médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*), lo que logra que se ocupe poco el espectro de frecuencias sobre el que se establecen las comunicaciones [10].
- **BLE (*Bluetooth Low Energy*):** Esta tecnología representa una ventaja y es que al encontrarse amparada bajo el protocolo ya existente de Bluetooth la cual está ya estandarizada para su implementación en grandes plataformas, adicionalmente mejora el consumo de energía y hace uso de las pilas de protocolos del modelo OSI de una forma diferente, a pesar de esta diferencia, la arquitectura de red de estos sistemas es idéntica a la de un sistema Bluetooth convencional, pudiendo implementarse de dos maneras bajo la forma de maestro-esclavo, donde un dispositivo funciona como enlace principal con los dispositivos esclavos a su alrededor, estas arquitecturas de red se pueden evidenciar en la Figura 2 [11].

Figura 2. Estructuras de red de BLE

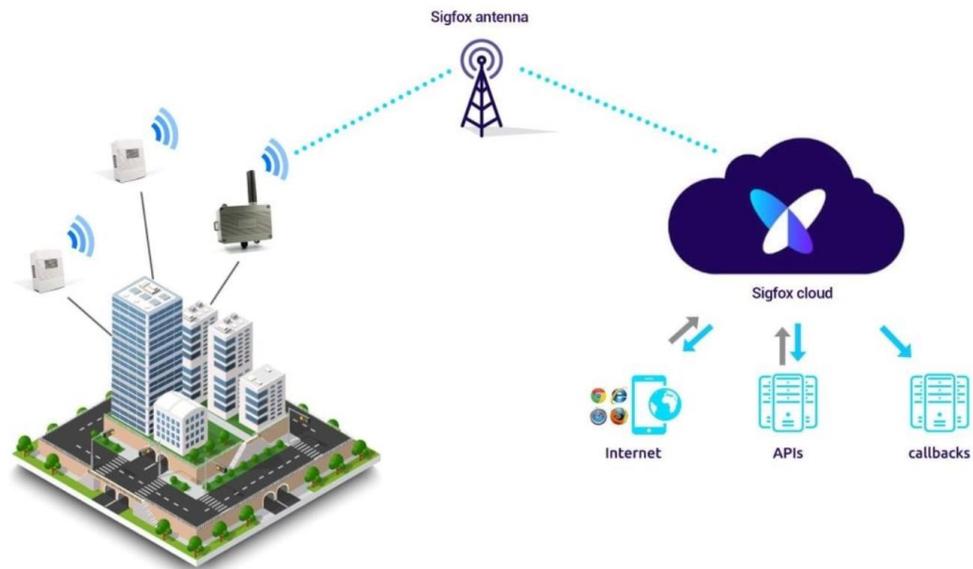


Fuente: [12]

- **SigFox:** Toma el nombre de la empresa que la desarrolló, se enfoca en soluciones de tipo extremo a extremo. Sus principales aplicaciones son agricultura, transporte, salud y hogar. Dentro de este tipo de tecnologías *SigFox* cuenta con el mayor rango de cobertura, además de contar con la mayor eficiencia de costos y una larga duración de la batería de los dispositivos [13].

La arquitectura de la red *SigFox*, se muestra en la Figura 3, donde se observa que la información recopilada en los dispositivos o sensores es enviada a través de una antena a una nube propia de *SigFox* de manera que los datos podrán ser consultados a través de internet por los usuarios.

Figura 3. Arquitectura de *SigFox*



Fuente: [14]

- **Internet de las Cosas de Banda Estrecha (NB-IoT, *Narrow Band Internet of Things*):** Es una tecnología que utiliza una banda de frecuencia de aproximadamente 200kHz, la cual se caracteriza por tener un buen desempeño en interiores y subterráneos, y sus aplicaciones se plantean especialmente para ciudades inteligentes, agricultura y monitoreo de servicios públicos [13].
- **LoRa (*Long Range*):** Tecnología de capa física desarrollada en Francia en 2009. Se basa en un esquema de modulación de espectro expandido, lo que permite enviar una señal de banda estrecha sobre un ancho de banda de canal más amplio, logrando así tolerar niveles de ruido [13].

De esta manera y siendo estas tres tecnologías las principales de LPWAN, se puede estimar que la tecnología de LoRa se utiliza comúnmente en casos en que el ambiente en que se implemente cuenta con la capacidad de tener su propia red de comunicaciones, mientras que NB-IoT y SigFox se pueden implementar en ambientes donde la infraestructura de red sea proporcionada por un proveedor, por lo que en su plan de desarrollo se deben incluir los costos de instalación y mantenimiento de dicho proveedor [13].

2.2. RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

Generalmente en los sistemas y dispositivos electrónicos se hace uso de energía proveniente de empresas prestadoras de servicio eléctrico o baterías. Sin embargo, debido a que en su mayoría la obtención de estos tipos de energía implica un nivel significativo de contaminación, actualmente se ha hecho frecuente la recolección de energías sostenibles, sustentables y no convencionales, con el fin de suministrar energía a diferentes sistemas electrónicos, reduciendo la afectación al planeta.

La recolección o cosecha de energía (*energy harvesting*) hace referencia al “proceso por el cual la energía residual presente en el ambiente se aprovecha para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo” [15]. Es a través de este proceso que se logra la recolección de la energía no convencional para su posterior almacenamiento, gestión y uso, logrando así un mayor aprovechamiento de la energía en el ambiente y por ende ampliando las opciones de fuentes energéticas para afrontar posibles futuros problemas ambientales causados por los actuales sistemas generadores de electricidad.

2.2.1. Métodos de recolección de energía convencionales

Los tipos de energías no renovables hacen referencia a energías obtenidas de fuentes agotables, como los combustibles fósiles o petróleo. Estos tipos de energía causan un daño irreparable al planeta, ya que generan una gran cantidad de gases de efecto invernadero, y al ser obtenidas de recursos limitados conllevan problemas civiles y sociales puesto que se generan conflictos internacionales por la obtención de dichos recursos.

2.2.1.1. Energía hidráulica

La energía hidráulica utilizada para la generación de energía a gran escala es también llamada energía hidroeléctrica. Se considera convencional pues es una de las mayormente utilizadas, aunque representa un tipo de energía sostenible, por utilizar la corriente del agua sin contaminarla,

Este tipo de energía se obtiene a partir de la transformación de la energía cinética generada por el movimiento del agua. Para este tipo de generación se requiere la construcción de grandes represas, que afectan directamente los cauces naturales de las fuentes hídricas, lo cual puede representar riesgos para poblaciones cercanas y afectaciones a los ecosistemas de las fuentes hídricas. Este tipo de plantas de generación se utilizan aproximadamente desde el siglo XIX, y se basan en la rotación del eje de una turbina ocasionada por el flujo de grandes cantidades de agua; la turbina a su vez está conectada a un generador en donde la energía cinética que genera la rotación se convierte en energía eléctrica. La cantidad de energía obtenida por ello dependerá del cauce y la fuerza con la que el agua llegue

a la planta. Después de este proceso el agua es liberada a su cauce, sin contaminarla significativamente [16].

2.2.1.2. Energía por quema de combustibles fósiles

Este tipo de energía es obtenida a partir del vapor que se genera al quemar combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, o el gas natural, que surgió con el descubrimiento de las máquinas a vapor, lo que llevó consigo la revolución industrial. Sin embargo esta es una de las principales causas de la mayor generación de gases de efecto invernadero a la atmósfera del planeta, puesto que es este tipo de energía la que se utiliza mayormente en la actualidad en fábricas, para el funcionamiento de vehículos, entre otras funcionalidades cotidianas.

La manera en la que funcionan los sistemas basados en este tipo de energía consiste en que el vapor a alta presión generado mediante la combustión pone en marcha un conjunto de turbinas (energía mecánica), las cuales a su vez por la rotación de su eje activan sistemas alternadores generadores de energía eléctrica. Inicialmente se utilizaban este tipo de sistemas en medios de transporte como barcos o carros, pero con el tiempo se expandió su uso para la generación de energía eléctrica [17].

2.2.2. Métodos de recolección de energía no convencionales

Las fuentes de energía no convencionales representan un gran avance para la tecnología y la sociedad actual debido a que las fuentes de energía mayormente utilizadas en la actualidad son no renovables, lo que quiere decir que en algún momento se agotarán dichas fuentes [18]. Estos tipos de energía también son conocidos como sostenibles o renovables, ya que se obtienen de fuentes naturales, las cuales son abundantes a nivel global. La importancia de este tipo de energías radica según Naciones Unidas en que “La generación de energías renovables produce muchas menos emisiones que la quema de combustibles fósiles, lo cual resulta fundamental para abordar la crisis producida por el cambio climático” [19], además de que traen beneficios económicos en muchos países y generan más empleos que los combustibles fósiles.

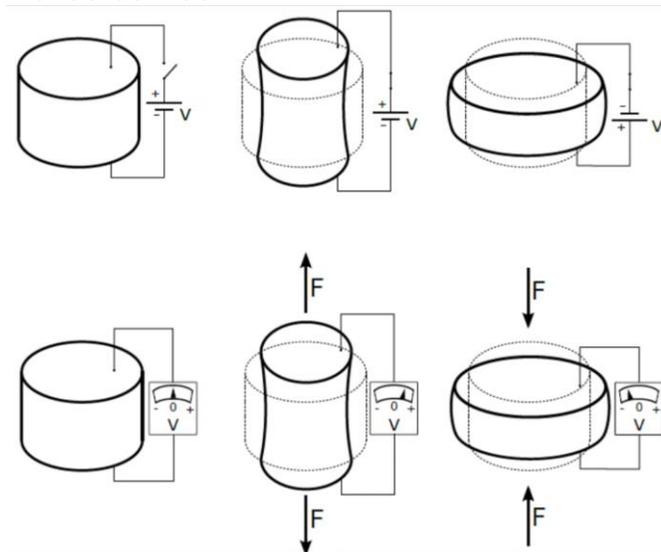
2.2.2.1. Energía piezoeléctrica

La energía piezoeléctrica es generada a partir de ciertos materiales que cuentan con la propiedad de generar una diferencia de potencial en su superficie cuando son sometidos a presión mecánica. Este es un fenómeno físico teorizado por René Just Haüy y Antoine César Becquerel y demostrado por los hermanos Pierre y Jacques Curie, un siglo después al observar la carga eléctrica producto de ejercer presión mecánica sobre cristales de cuarzo y cerámicas. De manera análoga, cuando se aplica una cierta cantidad de carga al material, este puede contraerse o estirarse,

logrando generar vibraciones que son utilizadas en la actualidad en aplicaciones como relojes, y en medicina para transductores ultrasónicos [20].

Como se observa en la Figura 4, el efecto se puede generar de dos maneras: inicialmente en la parte superior se muestra que al modificar la forma del material con presión mecánica se genera una diferencia de potencial, mientras en la parte inferior de la imagen se muestra como aplicando una diferencia de potencial al material mediante una fuente, según su polarización el material va a deformarse por causa de la energía eléctrica aplicada en él.

Figura 4. Efecto Piezoeléctrico



Fuente: [21]

Entre las aplicaciones más relevantes en el campo de *energy harvesting* en el contexto de IoT se destacan:

- Recolectores de energía mecánica en sistemas de alta vibración: En algunos países se utilizan materiales piezoeléctricos en las carreteras y puentes para almacenar energía mecánica generada por el flujo vehicular a lo largo del día, la cual es usada en la noche para activar sistemas de [21]. En algunas zonas de Israel ya se han implementado este tipo de carreteras logrando hasta 120 KW/h con el flujo de veinte trenes de diez vagones [22].
- Aprovechamiento de energía mecánica humana: Algunos sistemas han sido diseñados para aprovechar la energía generada por el desplazamiento humano o por la presión del zapato por el pie, con el fin de alimentar sensores que permitan monitorear variables corporales. Algunas aplicaciones prácticas de este tipo de sistemas se encuentran en el área deportiva como plantillas en el calzado que generan hasta 27,89 voltios a 11 mA [21], [23].

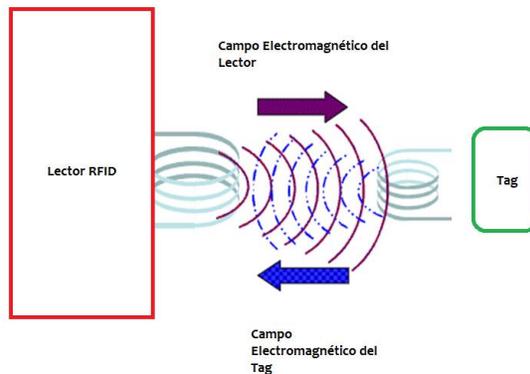
2.2.2.2. Energía electromagnética

La energía electromagnética se transporta a través de campos eléctricos y magnéticos auto soportados a través del espacio y aproximadamente a la velocidad de la luz. La fuente por defecto de este tipo de energía es el sol, sin embargo existen fuentes artificiales como electrodomésticos o fuentes lumínicas, que generan campos de diferentes intensidades.

Este tipo de recolección de energía también es asociada a energía por Radio Frecuencia (RF), siendo esta una de las fuentes más viables en dispositivos de bajo consumo de potencia, debido a la presencia continua de este tipo de energía. Los campos electromagnéticos electrónicamente se producen a partir de inductores y capacitores, que de acuerdo con sus parámetros aumentarán o disminuirán la intensidad de los campos. Este fenómeno físico se puede dividir en:

- **Baja frecuencia:** Cuando un dispositivo inductivo trabaja a baja frecuencia, genera un efecto en el que al conducir corriente eléctrica a través de él, se crea una diferencia de potencial en sus extremos, la corriente eléctrica sería inducida de manera externa mediante otra bobina u otro elemento o dispositivo, de tal forma que a través de dicho acoplamiento se genere una diferencia de potencial. Este fenómeno físico es utilizado en diversas aplicaciones pero principalmente en sistemas RFID, donde se transfiere información de lectores a etiquetas a través del acoplamiento, como se evidencia en la Figura 5.

Figura 5. Acoplamiento magnético en RFID

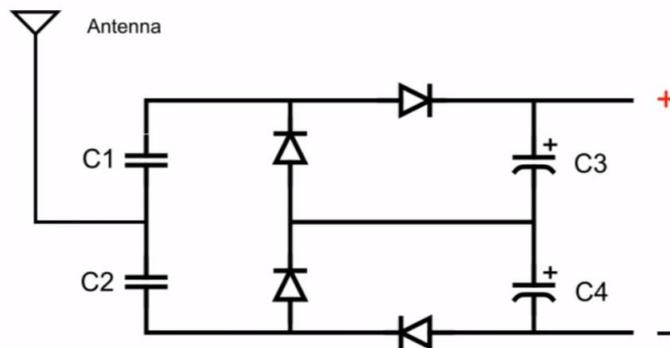


Fuente: [24]

- **Alta frecuencia:** La presencia de una gran cantidad de sistemas de comunicación inalámbrica en la actualidad implica la propagación de ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias, por lo que la utilización de estas como fuente de energía es una alternativa viable, especialmente para el caso de sensores de baja potencia y autónomos. Los sistemas de recepción de

energía a partir de señales de alta frecuencia constan de antenas receptoras y conversores de señales de radiofrecuencia a energía en forma de corriente directa, proceso que se lleva a cabo por medio de redes de acoplamiento y conversión de radiofrecuencia mediante sistemas rectificadores basados en diodos semiconductores [25]. En la Figura 6 se puede apreciar un sistema de recolección de energía de alta frecuencia en donde se muestra la antena y un circuito rectificador basado en diodos que permite el filtrado de las frecuencias deseadas e indeseadas, además del almacenamiento de energía. Dichos sistemas también son conocidos como *Rectennas*.

Figura 6. Diagrama de una Rectenna



Fuente: [26]

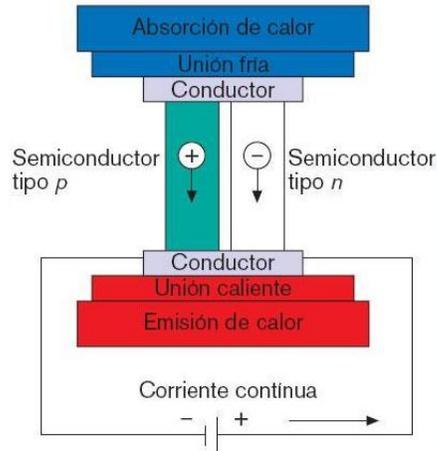
En el contexto de IoT, la principal aplicación de este tipo de sistemas se encuentra en las etiquetas de RFID, las cuales pueden ser dispositivos pasivos (sin baterías) de pequeñas dimensiones que contienen información sensible, la cual puede ser transferida en sistemas de baja frecuencia a través de lectores mediante el fenómeno de acoplamiento magnético y en sistemas de alta frecuencia a través de un mecanismo conocido como *backscattering* (retrodispersión) que consiste en la modulación y reflexión de la señal al receptor para lograr la comunicación desde el o los emisores [27]. En ambas situaciones se genera una pequeña cantidad de energía en la etiqueta, permitiendo que haga que se activen sus dispositivos electrónicos con el fin de intercambiar información. Las principales aplicaciones de estos sistemas son los controles de acceso, rastreo de movimiento en pequeñas superficies, control de inventario, cobro de peaje automático, medición de tiempo en competiciones deportivas, entre otras.

2.2.2.3. Energía termoeléctrica

El efecto termoeléctrico (también conocido como efecto Seebeck) es aquel a través del cual a partir de una gradiente de temperatura es posible generar energía eléctrica en forma de una diferencia de potencial. Para ello se requiere de dos metales diferentes, dos semiconductores o un metal y un semiconductor, los cuales

deben estar en contacto directo y cada uno de ellos sometido a una temperatura diferente. Este efecto fue descubierto por el físico alemán Thomas J. Seebeck en el año de 1820. En la Figura 7 se muestra la estructura de un dispositivo de recolección de energía termoeléctrica.

Figura 7. Sistema de efecto Seebeck



Fuente: [28]

En la Figura 7 se puede observar un sistema Seebeck en unión PN, lo que conlleva que las cargas positivas o negativas fluyan entre dos conductores conectados a cada uno de los materiales, tanto tipo P como tipo N, este flujo es posible por la diferencia de temperatura entre dos materiales a los cuales están unido cada uno de los conductores, es así como las diferencias de temperatura se ven reflejados en diferentes lujos de corriente, los cuales son utilizados en IoT para alimentar dispositivos a partir de cambios de temperatura. [9]

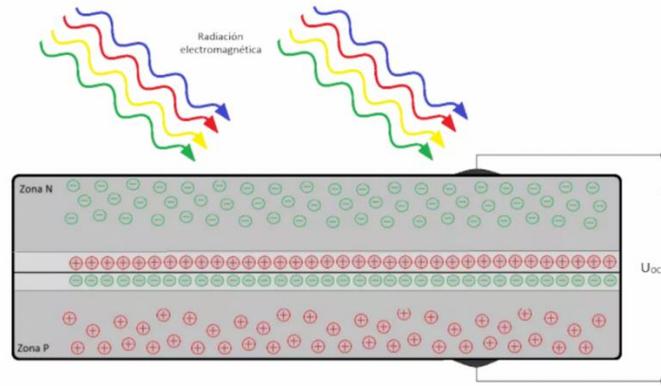
2.2.2.4. Energía fotovoltaica

Este tipo de recolección de energía se basa en el efecto fotovoltaico, en donde a partir de una fuente de luz (solar o artificial) se puede obtener energía eléctrica. Se trata de una de las formas más comunes de energía no convencional en la actualidad, y una de las más fáciles de obtener debido a su abundancia a lo largo de la superficie terrestre. En los sistemas fotovoltaicos se aprovecha la energía presente en los rayos de luz en forma de fotones, que permiten romper enlaces covalentes en las fotoceldas las cuales están basadas en dispositivos semiconductores, generando electrones libres para la circulación de corriente eléctrica [3].

Como se indica en la Figura 8, la incidencia de la luz genera un movimiento de cargas dentro del material, provocando una diferencia de potencial entre los extremos de este. Sin embargo no es posible obtener en su totalidad la energía proveniente de la luz debido a los niveles de energía cuantizados de los fotones, necesarios para liberar los electrones de las partículas de silicio, estos niveles de

energía obtenidos adicionalmente dependerán del grado de incidencia de los fotones sobre la capa de silicio, y del tipo de silicio utilizado [29].

Figura 8. Efecto Fotovoltaico



Fuente: [30]

Bajo este principio funcionan las celdas solares, a través de las cuales se obtiene energía de la luz solar, en esta se encuentran mezclados materiales tipo P y tipo N, que al ser impactados por los fotones de la luz, generan una división entre electrones y protones generando un flujo de corriente por la liberación de los electrones.

A partir de lo anteriormente mencionado, existen dos tipos de celdas solares:

- **Celdas solares fotovoltaicas:** Este tipo de celdas se dividen tres subcategorías, de acuerdo con el tipo de silicio utilizado para su fabricación, lo que afecta su costo y eficiencia:
 - **Monocristalinas:** Fabricadas con silicio de alta pureza, suelen ser más oscuras, y con bordes redondeados, no resisten el aumento de temperatura por exposición continua al sol. El término monocristalino hace referencia a que toda la estructura de la celda está formada por cristales orientados en la misma dirección. La principal ventaja de este tipo de celda es la mayor proporción de absorción de energía, ya que por su pureza y homogeneidad logran un ángulo de incidencia mucho mejor.
 - **Policristalinas:** Fabricadas con silicio metalúrgico o policristalino, que consiste en grupos de cristales organizado con direcciones aleatorias, lo que reduce la eficiencia de estas celdas y también su costo. Su funcionamiento respecto a la temperatura se ve afectado al igual que las celdas monocristalinas. La principal ventaja de este tipo de celda es que es mucho más económica que la anterior, proporcionando un nivel suficiente de energía por un costo menor.

- **Amorfos:** En estas se deposita el silicio de tal manera que no existe ningún orden entre las células, haciendo que se reduzca hasta 50 veces el espesor de la celda respecto a las anteriormente mencionadas. Este tipo de celda representa un mayor soporte en casos de máximas temperaturas, debido que no absorbe tanta energía logrando soportar calor y brindando calidad en condiciones extremas.
- **Celdas solares térmicas:** Este tipo de celdas están enfocadas a recolectar le calor producto de la radiación solar, clasificando en colectores de baja temperatura, de media temperatura, y de alta temperatura, consiguiendo 50°C, 90°C y 150°C respectivamente. Pudiendo generar energía eléctrica a través de vapor de agua obtenido por las altas temperaturas que muevan turbinas y activen generadores [31].

Comercialmente pueden encontrarse diversos tipos de celdas y paneles que las agrupan, con variedad de características incluidas las descritas anteriormente y también rangos de potencia, dimensiones, espesor de la celda, material de las barras recolectoras, potencia máxima, tensión en el punto de máxima potencia, factor de llenado, características térmicas, entre otras sin embargo una de las características más relevantes es la capacidad con la que cuenta para convertir la energía solar en la energía eléctrica y este fenómeno en la celda puede depender de diferentes factores por ejemplo la disipación térmica por la energía residual que se transforma en calor, las fugas al interior del material, o la energía que se desperdicia porque no todos los fotones inciden en la superficie de la celda, lo que se traduce en que la eficiencia de la mayoría de las celdas sea de aproximadamente 20 a 25 por ciento, por lo que en cualquier implementación que se alimente por medio de este tipo de transformación energética se busca amplificar la cantidad de energía recolectada.

2.2.3. Dispositivos electrónicos de gestión de energía

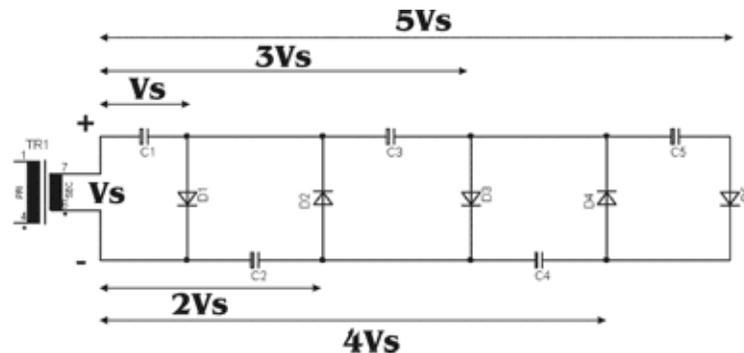
El proceso de recolección de energía mencionado anteriormente trae consigo la necesidad de gestionar apropiadamente la energía recolectada, debido a que este tipo de energía no será obtenida de manera constante en el dominio del tiempo, puesto que las condiciones climáticas del ambiente donde se ubique el dispositivo recolector de energía pueden variar. Para esto se debe llevar a cabo un proceso que permita administrar adecuadamente los recursos eléctricos con el fin de prolongar la operación de los elementos que hagan parte de un sistema IoT.

2.2.3.1. Rectificadores y Multiplicadores de Voltaje

Este tipo específico de circuitos cuenta con un conjunto de diodos y capacitores que permiten generar voltajes de corriente directa a partir de entrada de corriente alterna, en cada semiciclo de la señal de entrada (positivo o negativo) se carga una de las líneas del circuito, dependiendo su nivel de multiplicación, cargando el

capacitor respectivo, y logrando a la salida un valor doble, triple o múltiplo del nivel de voltaje entrada [32]. En la Figura 9 se muestra el diagrama de un circuito multiplicador de voltaje de 5 etapas, en donde el voltaje de salida es aproximadamente 5 veces la amplitud del voltaje de salida. Para reducir las pérdidas de conducción en cada semiciclo, se suelen utilizar diodos Schottky, los cuales poseen una caída de voltaje baja (entre 0.1 V y 0.3 V), además de poseer una transición rápida entre su estado de conducción y de bloqueo.

Figura 9. Circuito multiplicador de voltaje



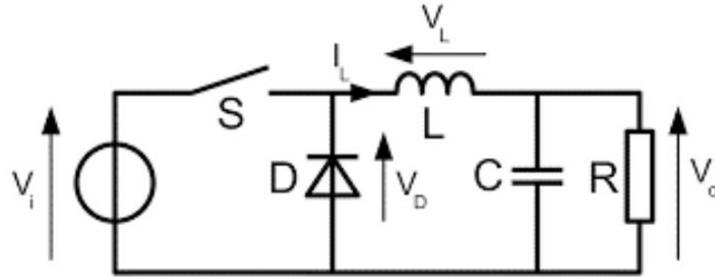
Fuente: [33]

2.2.3.2. Conversores DC-DC

Los Conversores DC-DC hacen referencia a circuitos electrónicos de alta eficiencia que transforman un nivel de tensión de entrada DC a otro nivel de tensión de salida igualmente DC el cual puede ser mayor o menor que el de entrada. Dicha conversión se realiza a través de arreglos de diodos, capacitores (dispositivos de campo eléctrico) y bobinas (dispositivos de campo magnético) que almacenan la energía de entrada de forma temporal para luego reflejarla en salida a una diferencia de potencial distinta. En el caso de sistemas de energías no convencionales se hace necesario el uso de este tipo de convertidores debido a que los niveles de voltaje son insuficientes [34]. Este tipo de dispositivos se clasifican según su relación entrada-salida, en:

- **Reductor (*Buck*):** Es el tipo de convertidor cuyo nivel de voltaje de salida es menor que el nivel de entrada. Este convertidor de voltaje se comporta como una fuente conmutada, y está compuesto por un interruptor (típicamente un transistor MOSFET), un diodo y un inductor como se muestra en la Figura 10. El funcionamiento de este tipo de circuitos se basa en reducir en nivel de voltaje que llega a la carga por medio del control del periodo de conducción del interruptor. Para ello se almacena energía en la bobina en forma de campo magnético para posteriormente entregarla hacia el capacitor y la carga conectada en la salida.

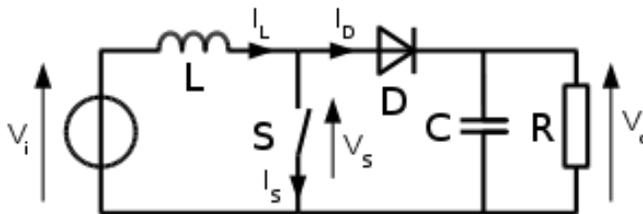
Figura 10. Convertidor reductor



Fuente: [35]

- **Elevador (Boost):** Este circuito también se comporta como una fuente conmutada, y como se muestra en la Figura 11 contiene los mismos elementos del circuito reductor, pero en diferente posición, de tal forma que en esta situación el nivel de voltaje de salida es mayor al nivel de voltaje de entrada. El funcionamiento de este circuito también se basa en la transferencia de energía del inductor al condensador controlando el periodo de conducción del interruptor, la cual se realiza por medio de un circuito de Modulación de Ancho de Pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*).

Figura 11. Convertidor elevador



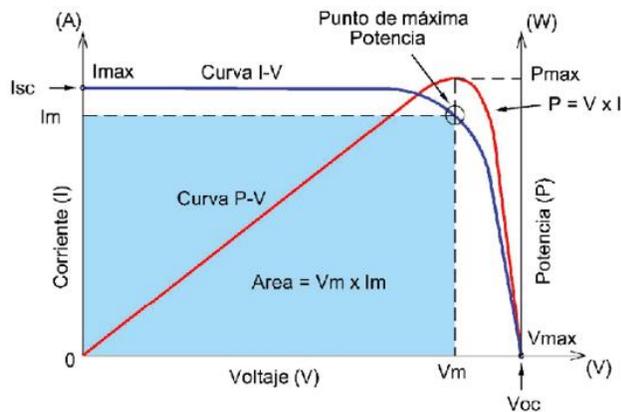
Fuente: [36]

2.2.3.3. Rastreo de Punto Máximo de Potencia

Los circuitos Controladores de Rastreo de Punto de Máxima Potencia (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) son utilizados para regular la cantidad de energía que se suministra a una batería. En el caso de energía recolectada a partir de celdas solares, se busca maximizar la potencia obtenida desde el panel o celda solar, y aprovechar su máximo nivel o punto de potencia. Como se observa en la Figura 12, la curva azul representa la dependencia de la corriente de salida del panel en función del voltaje que el panel es capaz de entregar en sus terminales. Para valores bajos de voltaje de salida, el panel es capaz de mantener la corriente de salida, sin embargo, si el voltaje de salida aumenta, el panel no puede mantener el mismo nivel

de corriente máximo, y su valor decrece. Por otra parte, la curva roja representa la dependencia de la potencia del panel (calculada en términos de la corriente y el voltaje de salida) en función del voltaje de salida. Se observa que la curva roja posee un valor máximo, indicando que si el panel mantiene ambas condiciones de voltaje y corriente en este punto, el panel es capaz de transferir su máxima potencia hacia la carga.

Figura 12. Curvas de potencia de una celda solar



Fuente: [37]

El regulador MPPT busca que el panel esté ubicado siempre en el punto de potencia máxima durante todo el proceso en el que la batería alcanza su máximo voltaje. El propósito de este regulador es relevante puesto que al utilizarse en dispositivos pequeños, puesto que a pesar de que las celdas solares generen bajos niveles de voltaje, es posible maximizar la potencia extraída del panel. El rastreo del nivel de potencia máxima se realiza mediante la técnica de comparación, esto entre la curva de corriente y voltaje y la carga a la cual será entregada la potencia, esto con el fin de que el sistema se pueda adaptar según la corriente y voltaje que reciba, independientemente de la carga que tendrá que ser alimentada [38]. Por otra parte, este regulador también brinda un nivel de protección sobre la batería, puesto que cuando esta alcanza su nivel de carga completo, el MPPT no permite más flujo de energía hacia ella desde el panel solar [39].

2.2.3.4. Circuitos integrados de gestión de energía

En el mercado existen distintos tipos de dispositivos electrónicos a través de los cuales puede hacerse la gestión adecuada de energía. Estos son fabricados con tecnología que da un alto rendimiento a la recolección de energía, derivando, almacenando y optimizando el uso de la energía para lograr la autonomía de un dispositivo de recolección de energía. Algunos de estos dispositivos son:

- **AEM10941:** Fabricado por la industria e-peas, es un circuito integrado elaborado con el propósito de administrar energía de corriente continua (CC) desde el panel solar con el fin de dirigir dicha energía al elemento de carga o batería y suministrar dos voltajes regulados para el resto del sistema, gracias a esto extiende la vida útil de la batería y brinda al sistema la posibilidad de funcionamiento en diversos contextos como monitoreo industrial, geolocalización, nodos IoT, monitoreo de salud, entre otros. Algunas de las ventajas que conlleva el uso de este dispositivo son su tamaño miniaturizado, el hecho de que cuenta con dos niveles de voltaje de salida simultáneamente, y al ser desarrollado para circuitos especializados en tecnologías de *energy harvesting*, también cuenta con bajo consumo de potencia y necesidad de pocos elementos externos para su funcionamiento. Este circuito tiene una dimensión de 5 mm x 5 mm x 1mm correspondiente a un empaquetado QFN-28, y un valor comercial de aproximadamente siete dólares, puede alimentarse en un rango de 50mV a 5V, con una potencia que puede ir desde 3 μ W hasta 550mW, posicionándose como un circuito de ultra bajo consumo. [40]

Figura 13. e-peas AEM10941

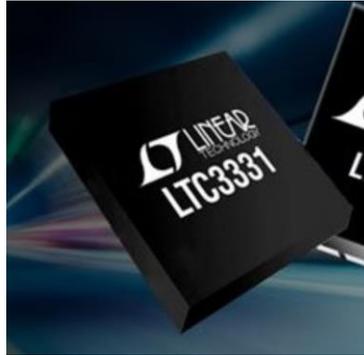


Fuente: [40]

- **LTC3331:** Es un circuito integrado que cuenta con una fuente de alimentación de recolección de energía de alto voltaje además de un reductor y/o elevador de corriente continua a corriente continua, que son alimentados desde una batería recargable con el fin de brindar una salida para aplicaciones de energía alternativa. Adicionalmente se pueden ajustar las corrientes y voltajes de entradas y salidas, mediante entradas lógicas. Este dispositivo fue desarrollado para el uso en aplicaciones principalmente proveniente de energía piezoeléctrica, térmica o fotovoltaica, razón por lo que para este tipo de circuitos funciona alimentándose hasta de dos fuentes, y maximizar la energía recolectada. Se alimenta en un rango de 3 a 19 V, consumiendo ultra baja potencia en reposo de 950 nA, y 10 mA en estado activo, el empaquetado de este circuito integrado es el QFN-32 con

dimensiones de 5 mm x 5 mm x 1,2 mm. El valor comercial de este dispositivo es de trece dólares. [41]

Figura 14. LTC3331



Fuente: [41]

2.3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

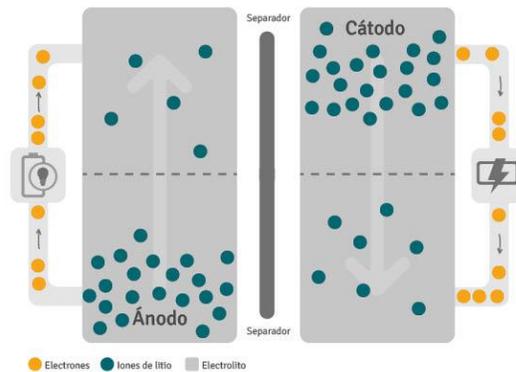
Tras la recolección de energía, la etapa de almacenamiento es fundamental para lograr un buen aprovechamiento de la energía obtenida. A continuación se presentan los tipos de almacenamiento más viables en el uso de dispositivos de *energy harvesting* en el contexto de sistemas IoT.

2.3.1. Baterías de litio

Tal como se muestra en la Figura 15, este tipo de baterías funcionan ya que los iones de litio se mueven desde el ánodo hasta el cátodo a través de un electrolito, de esta manera surge una diferencia de potencial que produce la corriente. Al completarse la carga de la batería, los iones de litio vuelven al ánodo [42] Este tipo de batería también se pueden componer de una o varias celdas en su interior, las cuales constan de láminas de distintos elementos que son enrolladas hasta formar cilindros, o se utilizan polímeros de iones de litio apilados en el caso de las baterías planas. Requieren supervisión y continuo monitoreo, ya que en condiciones húmedas pueden reaccionar causando explosiones.

Las baterías de litio pueden ser de diferentes tipos, dependiendo su fabricación, específicamente los materiales que son utilizadas en ella, en el caso de las baterías de Li-Po el electrolito que separa los electrodos no es líquido, como lo es en el caso de las baterías Li-Ion. Estas últimas tienen como ventaja que almacenan mayor densidad de potencia, tienen menores costos y no tienen efecto de memoria, por otra parte las baterías de Li-Po son más flexibles, más pequeñas y representan menores riesgos de explotar o derramarse, sin embargo son más costosas. [43]

Figura 15. Funcionamiento de una batería de litio



Fuente: [44]

Este tipo de batería es propio para el almacenamiento de energía fotovoltaica proveniente la luz solar ya que esta al ser intermitente, no genera una corriente de carga continua, y las baterías de litio tienen como ventaja su facilidad para los ciclos de carga que logran tener efectos negativos en ellas solo a muy largo plazo.

2.3.2. Supercapacitores

Los supercapacitores aprovechan las funcionalidades de los condensadores tradicionales y las baterías recargables, ofreciendo valores de capacitancia hasta diez mil veces mayores a los capacitores tradicionales. Los supercapacitores o también mencionados en la literatura como SuperCap, cuentan con los mismos tipos de arquitectura que las baterías de Li-ion, cilíndricos y planos, y ofrecen la ventaja de vida muy larga sin degradación del rendimiento. La estructura de un supercapacitor está basada en tecnología de carbono es por ello por lo que pueden recrear áreas de superficie muy grandes, esto aunque se cuente con una distancia de separación muy pequeña. Por otra parte el dieléctrico que hace parte del dispositivo es muy delgado, y gracias a la unión de estas propiedades, es que se logra una altísima capacitancia en los supercapacitores, si se toma como referencia esta misma característica en los capacitores convencionales [45].

Este tipo de capacitores pueden utilizarse de manera conjunta con baterías de litio, protegiendo la batería de picos de energía, mejorando la vida útil de esta, la seguridad, y reduciendo la necesidad de mantenimiento [46].

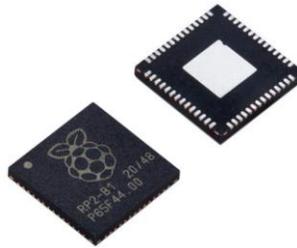
2.4. MICROCONTROLADORES DE BAJO CONSUMO DE ENERGÍA

Debido a que en el nodo IoT se busca poseer la capacidad de obtener y almacenar energía proveniente de fuentes no convencionales (las cuales tienden a ser

inestables en relación con el tiempo) con el fin de censar variables físicas, procesarlas y transmitirlos de manera inalámbrica, se hace necesario un sistema que brinde autonomía al nodo que pueda operar a niveles bajos de energía, que sea capaz de manipular y procesar variables analógicas y digitales. Existen en el mercado una serie de microcontroladores que cumplen con estos parámetros de fabricantes como Atmel, Microchip, o Texas Instruments, como los que se describen a continuación.

- **RP2040:** Fabricado y producido por Raspberry Pi, este microcontrolador cuenta con procesador de 32 bits de doble núcleo, 30 puertos programables, interfaces de circuito Inter integrado, y ocho máquinas de estado, es programable con lenguaje MicroPython y actualmente ha tenido una acogida muy grande en sistemas de IoT, Inteligencia Artificial, domótica, control, entre otras. Su voltaje de entrada puede estar entre 1.8 V y 5.5 V, es un microcontrolador de muy bajo costo y está incorporado en las tarjetas Raspberry Pi RP2040 Zero y RP2040 Pico [47].

Figura 16. Microcontrolador RP2040



Fuente: [47]

- **ATmega1284P:** Fabricado por Microchip, la particularidad de este dispositivo es su bajo consumo de potencia, ya que en el modo de descanso cuenta con seis diferentes modos, y trabaja con voltajes desde 1.8 V hasta 5.5 V. Este microcontrolador cuenta con una cantidad considerable de puertos analógicos y digitales, los cuales pueden ser usados para lecturas de diferentes sensores.

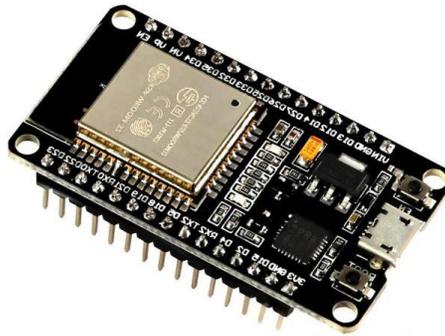
Figura 17. Microcontrolador 1284P



Fuente: [48]

- **ESP32:** Agrupa una familia de chips fabricados y desarrollados por Espressif Systems con el propósito de unir funcionalidades como WiFi y Bluetooth en un solo módulo. Este grupo de chips cuenta con características específicas como ultra bajo consumo de energía, alcanzando hasta $10\mu\text{A}$ en modo de hibernación, generalmente viene integrado en placas con su mismo nombre, programables a través de Arduino IDE, haciendo de ella una placa muy útil para diversas aplicaciones desde educativas hasta industriales [49]. Una de ellas es la placa ESP32 presentada en la Figura 18, la cual cuenta con un puerto USB, un regulador de voltaje de 3.3 V y una interfaz de comunicación inalámbrica en la banda de 2.4 GHz.

Figura 18. ESP32



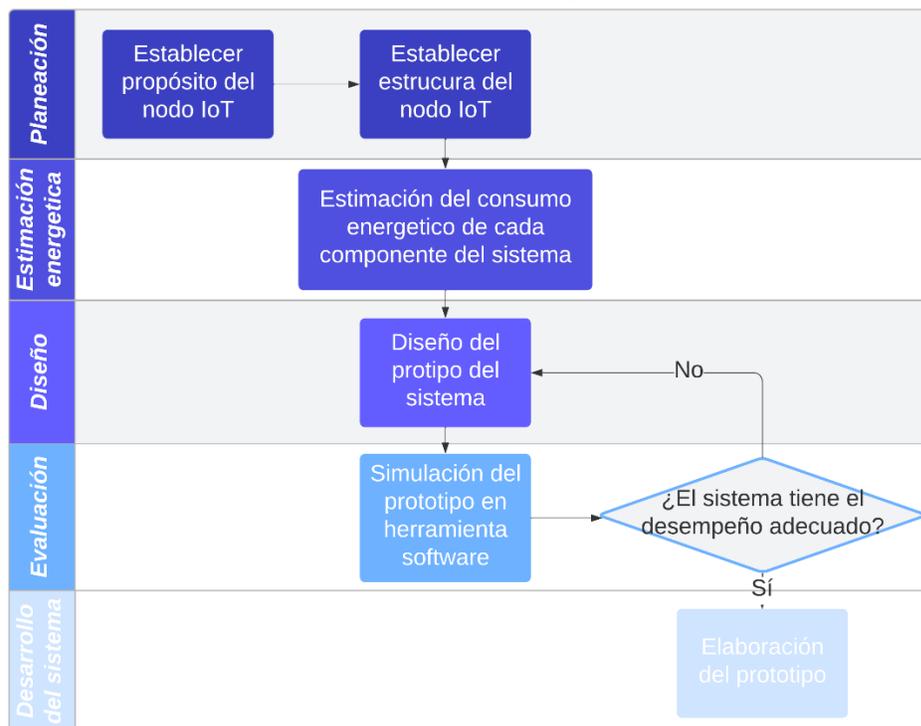
Fuente: [47]

- **STM32F:** Es un grupo de microcontroladores de ARM Cortex-M, de muy alto rendimiento, procesamiento digital de señales y operación en baja potencia, sin embargo esta gama de microcontroladores no agrupa sus ventajas en un mismo chip, sino que cuenta con un grupo de microcontroladores para alto rendimiento, otro grupo para ultra bajo consumo de potencia y otro grupo para conectividad. Son programables a partir de diferentes lenguajes.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NODO IoT

Debido a que este proyecto fue de tipo investigativo, en el que se buscó mejorar el desempeño de un sistema IoT con avances existentes, se utilizó una metodología que permitió el desarrollo y evaluación del desempeño del dispositivo en cuestión, por lo que se planteó una metodología cíclica cuyas fases y procesos son descritos de acuerdo con la Figura 19.

Figura 19. Procesos del desarrollo del prototipo del nodo IoT



Fuente: [elaboración propia]

3.1. Planeación

En esta etapa del desarrollo del diseño de un sistema electrónico de recolección, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica para nodos IoT de bajo consumo de potencia y de tamaño reducido, se abarcó la parte de planeación correspondiente al sistema y a las etapas de la investigación de este.

Inicialmente se especificó el propósito de este tipo de sistema y sus respectivas funciones a cumplir, posteriormente se estableció la arquitectura, basada en las necesidades que contienen sus funciones, de tal manera que se abarque a totalidad cada uno de los objetivos de dicho sistema.

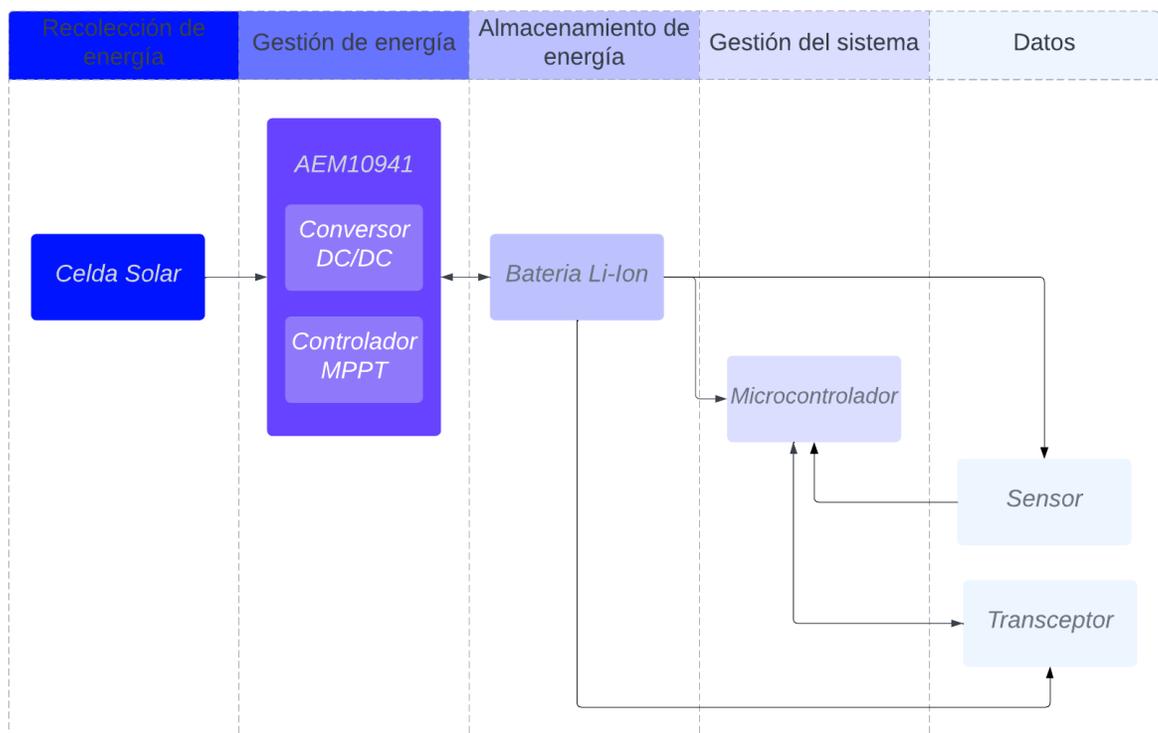
3.1.1. Propósito del nodo IoT

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 1, se planteó que el propósito principal del nodo IoT será brindar soporte en el proceso de monitoreo de cultivos, específicamente respecto a la variable humedad ya que esta juega un papel fundamental en el crecimiento de cualquier tipo de planta, por lo que el dispositivo cumplirá con los parámetros de bajo costo, bajo consumo de potencia, tamaño reducido, autonomía energética, alimentación por energía solar y monitoreo de humedad. Sin embargo este enfoque no imposibilita la aplicación del nodo en otros contextos y la supervisión de otro tipo de variables, debido a que el prototipo permite la conexión de otros sensores.

3.1.2. Estructura del nodo IoT

Para cumplir con las funciones mencionadas en la Sección 3.1.1 se planteó un modelo por etapas de la estructura del sistema presentado en la Figura 20 y posteriormente los elementos que contendrán dichas etapas, con la justificación de la elección de cada uno.

Figura 20. Diagrama del Sistema



Fuente: [elaboración propia]

3.1.2.1. Recolección de energía:

- **Celda solar:** Se eligió la utilización de una celda de tipo policristalina, considerando su uso comercial y fácil acceso, adicionalmente por su rango de funcionamiento frente a los cambios de temperatura, lo que permite que se obtenga energía fotovoltaica a pesar de que el ambiente en el que se encuentre el módulo este expuesto a largos periodos de sol, y por ende aumente su temperatura; las dimensiones de la celda son del orden de 60 mm x 60 mm, correspondiente al tamaño establecido para el nodo IoT.

3.1.2.2. Gestión de energía

- **Unidad de control de energía:** El dispositivo elegido para la gestión de energía es el microcontrolador de la marca e-peas correspondiente a la referencia AEM10941, este dispositivo se activa con un voltaje bajo de aproximadamente 380 mV, además monitorea cada 5 s como circuito abierto para lograr un comportamiento MPPT. Adicionalmente su rango de operación en la entrada va desde 50 mV hasta 5 V, brindando a la salida una corriente a carga 20 mA en una de sus salidas (LVOut) y hasta 80 mA en otra (HVOut), y un control de voltaje de salida, cuenta con protección de sobrecarga, funciona con cualquier tipo de batería recargable o con supercondensadores, e informa a la carga el estado de la batería y solo requiere la conexión de 7 dispositivos pasivos externos [40].

3.1.2.3. Almacenamiento de energía

- **Batería Li-Ion:** Se empleó una batería con capacidad de 3.7 V y una capacidad de 200 mAh para que almacene energía suficiente en el caso de los periodos en el que el dispositivo no cuente con energía fotovoltaica, y se pueda mantener al máximo, además la batería debe contar con protección de la humedad por las condiciones ambientales en las que se encontrará el dispositivo.

3.1.2.4. Gestión del sistema

- **Microcontrolador:** El microcontrolador seleccionado para realizar el procesamiento de las señales ambientales es ESP32, debido a su bajo consumo de energía y la capacidad de operación a un voltaje de 3.3 V.

3.1.2.5. Datos

- **Transceptor RF:** El módulo de envío y recepción de datos a utilizar es el incluido en el módulo ESP32 correspondiente a la tecnología WiFi, el cual

permita la transmisión de información en un rango cercano a los 100 m y que requiera un bajo consumo de potencia.

- **Sensor:** Teniendo en cuenta la tecnología a utilizar para la transmisión de datos, el sensor que será implementado será el DHT11 para la medición de temperatura y humedad del ambiente. Este es un sensor de bajo costo, el cual necesita una alimentación de aproximadamente 3.3 V para su correcto funcionamiento, que será conectado al dispositivo de manera externa a través de puertos que faciliten su reemplazo.

3.2. Estimación energética

Para establecer el gasto energético del sistema, en la Tabla 1 se muestra el estimado de cada uno de los elementos mencionados en la Sección 3.1.

Tabla 1. Estimación energética de cada elemento del sistema

Etap	Elemento	Voltaje	Corriente
Alimentación	Celda Solar	3V - 5 V	28-35 mA
Gestión de Energía	AEM10941	Entrada: 50 mV – 5 V Salida: 1.8 V / 3.3 V	Entrada: corriente salida del panel Salida: 11.6 – 33 mA
Almacenamiento	Batería de Litio	3.7 V	200 mAh
Gestión del sistema	Microcontrolador	3.3 V	9 – 156 mA
Datos	Sensor	3.3 V	2.5 mA en medición

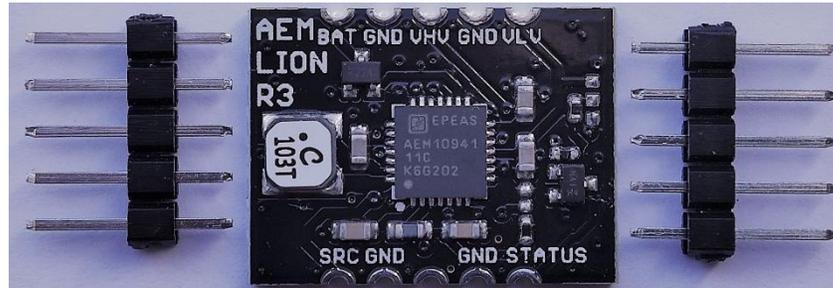
El gasto energético no es permanente, debido a que en nodos IoT se realizan procedimiento de censado y transmisión periódicos, mediciones y transmisión de información de corta duración, realizadas de forma periódica. La estimación realizada se tiene en cuenta para establecer un rango de energía necesaria para la elección de los dispositivos adicionales del circuito.

3.3. Prueba de concepto

Con el fin de validar el funcionamiento del dispositivo de recolección de energía, el microcontrolador y el sensor, se realizó un montaje para determinar que el elemento de gestión de energía es capaz de realizar los procesos de recolección, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica. Para ello se adquirió el módulo AEMLION el cual incorpora el circuito integrado AEM10941 el cual se escogió por sus capacidades de gestión de energía proveniente de un panel solar de tamaño

reducido. En la Figura 21 se muestra el módulo el cual se adquirió del desarrollador Jasper Sikker [50].

Figura 21. Modulo LiOn

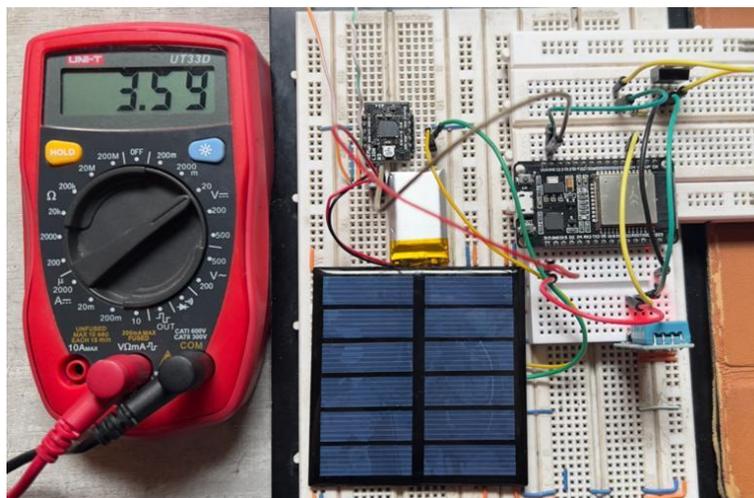


Fuente: [elaboración propia]

Este módulo dispone de un conjunto de pines que permiten conectar la mínima cantidad de componentes externos, y permitió validar el desempeño del circuito integrado en cuanto a la eficiencia de carga de una batería de litio bajo diferentes condiciones de luminosidad.

Dado que este módulo cuenta con una regleta de pines de acceso para conectar, en una protoboard se implementó un sistema sencillo conformado por el panel solar, el módulo AEMLION y la ESP32 para extraer energía solar del panel y alimentar el microcontrolador, con el fin de demostrar el funcionamiento de este módulo y su capacidad de alimentar a un dispositivo electrónico de bajo consumo de potencia. En la Figura 22 se muestra el sistema completo implementado en la protoboard en donde se muestra el voltaje de salida de la batería, la cual fue cargada por el panel solar.

Figura 22. Medida de carga de la batería en proceso de carga de datos

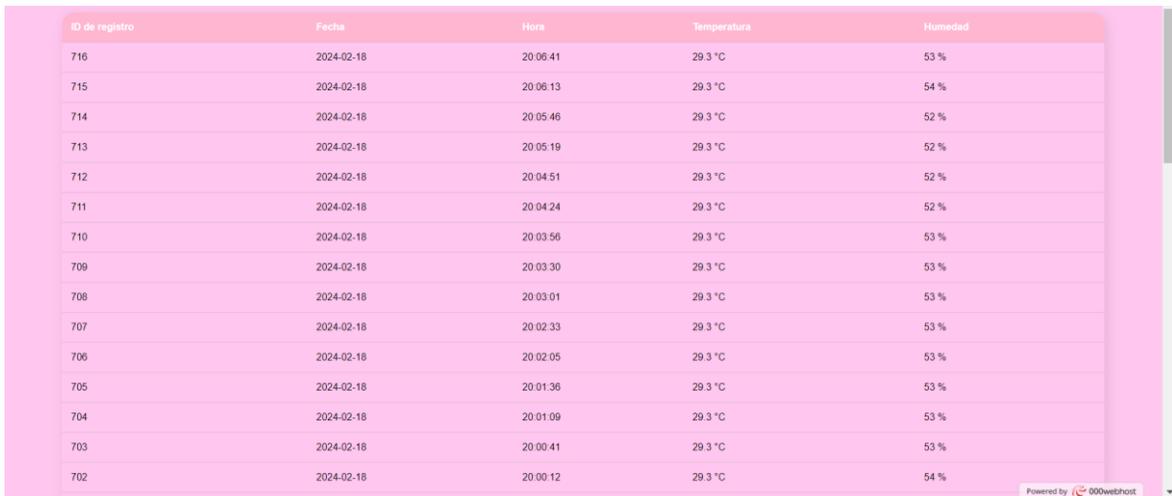


Fuente: [elaboración propia]

Por otra parte, se verificó que el sistema de recolección y gestión de la energía sea capaz de alimentar el dispositivo en estado de censado y transmisión de la información. Para ello se adicionó al sistema el sensor DHT11 y se desarrolló un *sketch* en Arduino para que el microcontrolador se encargue transmitir la información censada a una base de datos local de manera inalámbrica. En la Figura 22 se muestra el sistema que incorpora el microcontrolador, el panel solar, el módulo AEMLION y el sensor. Con ayuda de un multímetro se pudo evidenciar que el proceso de carga de la batería se efectuó satisfactoriamente, dado que al mantener el sistema bajo condiciones de elevada luminosidad solar, la batería consiguió llegar hasta su máximo voltaje de 3.9 V.

Adicionalmente las variables censadas que fueron enviadas por el microcontrolador y recibidas en una base de datos almacenada en un host en internet, cuya dirección web es <https://sistemarecoleccion.000webhostapp.com/>, donde los datos se muestran en una interfaz representada en la Figura 23. Con el fin de mantener bajo el consumo de potencia del sistema, el envío de datos se desarrolló de manera periódica cada 45 minutos, dado que este tipo de variables son de transición lenta, además de evitar saturar la base de datos con información redundante.

Figura 23. Datos recolectados con el sistema



ID de registro	Fecha	Hora	Temperatura	Humedad
716	2024-02-18	20 06:41	29.3 °C	53 %
715	2024-02-18	20 06:13	29.3 °C	54 %
714	2024-02-18	20 05:46	29.3 °C	52 %
713	2024-02-18	20 05:19	29.3 °C	52 %
712	2024-02-18	20 04:51	29.3 °C	52 %
711	2024-02-18	20 04:24	29.3 °C	52 %
710	2024-02-18	20 03:56	29.3 °C	53 %
709	2024-02-18	20 03:30	29.3 °C	53 %
708	2024-02-18	20 03:01	29.3 °C	53 %
707	2024-02-18	20 02:33	29.3 °C	53 %
706	2024-02-18	20 02:05	29.3 °C	53 %
705	2024-02-18	20 01:36	29.3 °C	53 %
704	2024-02-18	20 01:09	29.3 °C	53 %
703	2024-02-18	20 00:41	29.3 °C	53 %
702	2024-02-18	20 00:12	29.3 °C	54 %

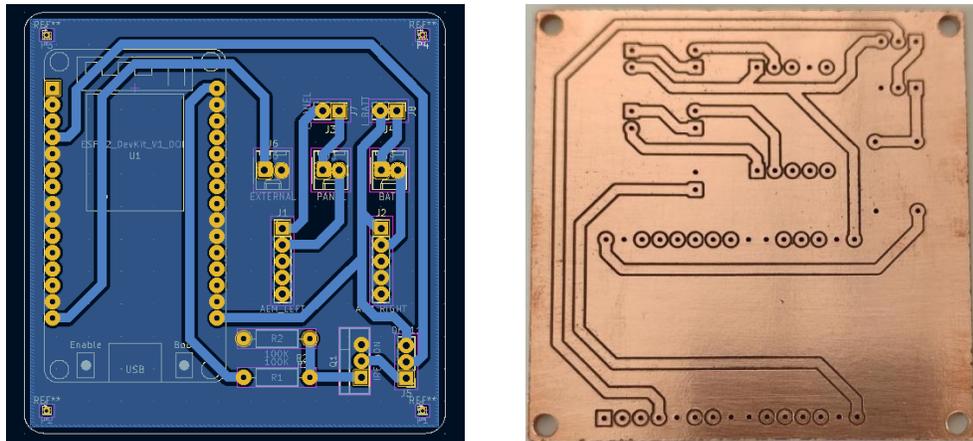
Fuente: [elaboración propia]

3.4. Elaboración de dispositivo

Tras la validación de la prueba de concepto se fabricó una PCB de una sola capa haciendo uso de la máquina de control numérico computarizado (CNC) del Laboratorio de Fabricación Digital (FabLab) del Departamento de Electrónica,

Instrumentación y Control (DEIC) de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET). El resultado final de esta placa se puede observar en la Figura 24, junto con su respectivo diseño virtual elaborado en el software de diseño Kicad.

Figura 24. Placa elaborada para el dispositivo



Fuente: [elaboración propia]

Con esta placa lista se fabricó una estructura externa realizada en una de las impresoras 3D del FabLab y se realizó el montaje del dispositivo con los elementos utilizados en la prueba de concepto. Este diseño se planeó previendo proteger los componentes de condiciones de exteriores como la humedad, tal como se muestra en la Figura 25 y Figura 26.

Figura 25. Dispositivo elaborado



Fuente: [elaboración propia]

Figura 26. Dispositivo elaborado cerrado



Fuente: [elaboración propia]

Con la elaboración de este dispositivo se buscó validar el comportamiento previamente visto, asegurando que sea apto para escenarios reales, en el que el dispositivo se pueda exponer a condiciones climáticas en escenarios exteriores. Los resultados de estas pruebas al igual que los de la prueba de concepto serán expuestos en la siguiente sección.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez se ha demostrado que el panel solar es capaz de alimentar el sistema electrónico conformado por el microcontrolador y el sensor, se procede a realizar las pruebas pertinentes para la evaluación del desempeño del circuito, este proceso se realiza según las etapas previamente planteadas.

4.1. Caracterización de paneles solares

Se realizó el proceso de caracterización de tres paneles solares de diferentes especificaciones, en donde se midieron los voltajes entregados en espacios abiertos y cerrados, tanto de día como de noche con el propósito de obtener un patrón de comportamiento obteniendo los resultados presentados en la Tabla 3, los valores presentados en la columna "Voltaje de salida del panel" hacen referencia al promedio de 15 medidas tomadas en diferentes días en el mismo rango de hora.

Tabla 2. Caracterización de paneles solares

Panel	Ambiente	Rango de hora	Voltaje de salida del panel
Pequeño : 20mmx23mm 0.6 V	Abierto diurno	9:50 a.m. – 10:05 a.m.	0.56 V
		11:45 a.m. – 12:00 m	0.58 V
		3:10 p.m. – 3:20 p.m.	0.54 V
		5:20 p.m. – 5:35 p.m.	0.52 V
	Abierto nocturno	7:10 p.m. – 7:15 p.m.	0.13 V
		4:50 a.m. – 5:00 a.m.	0.12 V
	Cerrado diurno (luz artificial directa)	3:25 p.m. – 3:35 p.m.	0.18 V
	Cerrado diurno (sombra)	3:40 p.m. – 3:50 p.m.	0.10 V
Mediano: 58mmx58mm 3 V	Abierto diurno	9:50 a.m. – 10:05 a.m.	2.42 V
		11:45 a.m. – 12:00 m	3.14 V
		3:10 p.m. – 3:20 p.m.	2.78 V
		5:20 p.m. – 5:35 p.m.	2.61 V

Continuación Tabla 2. Caracterización de paneles solares

Mediano: 58mmx58mm 3 V	Abierto nocturno	7:10 p.m. – 7:15 p.m.	1.5 V
		4:50 a.m. – 5:00 a.m.	1.1 V
	Cerrado diurno (luz artificial directa)	3:25 p.m. – 3:35 p.m.	0.2 V
		Cerrado diurno (sombra)	3:40 p.m. – 3:50 p.m.
Grande: 110mmx90mm 12 V	Abierto diurno	9:50 a.m. – 10:05 a.m.	13.74 V
		11:45 a.m. – 12:00 m	13.09 V
		3:10 p.m. – 3:20 p.m.	13.45 V
		5:20 p.m. – 5:35 p.m.	13.33 V
	Abierto nocturno	7:10 p.m. – 7:15 p.m.	5.5 V
		4:50 a.m. – 5:00 a.m.	4.2 V
	Cerrado diurno (luz artificial directa)	3:25 p.m. – 3:35 p.m.	1.37 V
		Cerrado diurno (sombra)	3:40 p.m. – 3:50 p.m.

Considerando los resultados obtenidos en esta caracterización se toma el panel solar “Mediano: 58mmx58mm (3 V)” como fuente fotovoltaica para el circuito, ya que el circuito integrado AEM10941 soporta un valor de voltaje máximo de 5 V [40].

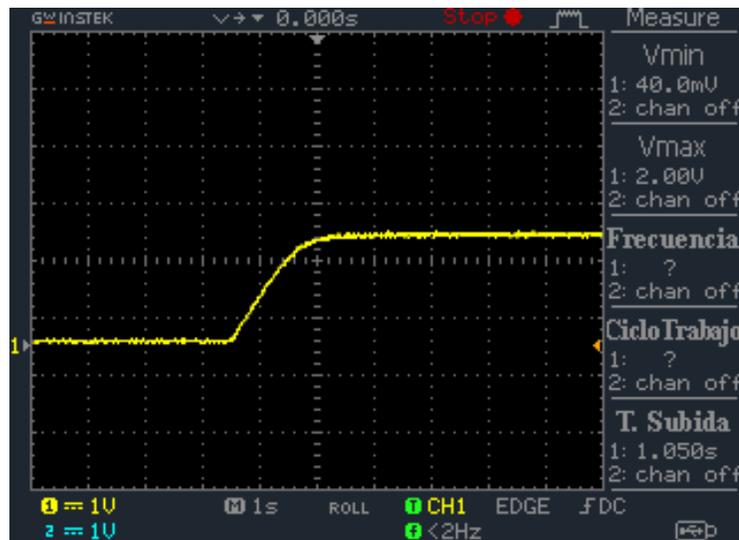
4.2. Caracterización del sistema de gestión de energía

Inicialmente, se procede a validar el comportamiento del circuito por etapas, las cuales son descritas inicialmente en la Figura 24. La primera de estas etapas es la de administración de la energía, la cual se hace a través del módulo AEM10941, este proceso de validación se llevó a cabo como se indica a continuación:

- a. Medida de capacidad de carga de un capacitor, se realizó la conexión de una serie de capacitores de distintos valores al puerto de carga de la batería del circuito, para evaluar si este iniciaba su proceso de carga de manera dirigida por el circuito.

Para ello, se dispuso de un panel solar con capacidad de generar un voltaje de salida máximo de 3 V y una corriente máxima de 200 mA. Se realizaron mediciones en el laboratorio con ayuda del osciloscopio para verificar las características de salida de este panel solar. En la Figura 27 se muestra el voltaje de salida de 2 V de este panel sometido a unas condiciones de baja luminosidad en las cuales se encontraba el laboratorio en horas de la tarde.

Figura 27. Voltaje de salida del panel (Condición de baja luminosidad)



Fuente: [elaboración propia]

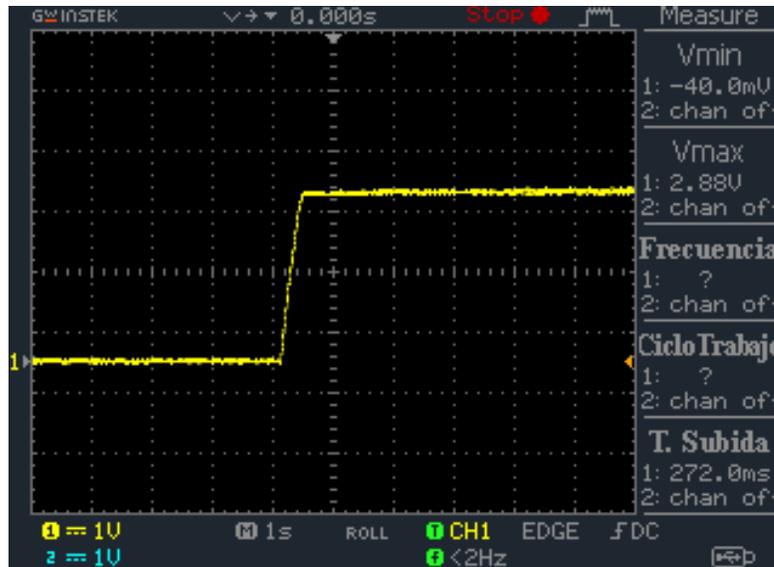
Aumentando el nivel de luminosidad artificial del laboratorio, se observa en la Figura 28 que la salida del panel aumenta su valor de una forma más rápida hasta llegar a 2.88 V con la salida en circuito abierto.

El funcionamiento del dispositivo AEM10941 está descrito por la siguiente secuencia:

- Inicialmente, el módulo recibe un voltaje no regulado del panel solar de bajo valor, el cual es suficiente para iniciar un bloque de inicio (*startup*), encargado de encender el convertidor elevador (*boost*), que genera a la salida un voltaje de 3.6.
- Una vez que el convertidor *boost* ha iniciado, el voltaje de salida de la batería (**BAT**) empieza a aumentar, permitiendo que la batería empiece su proceso de carga.
- En el momento en que la batería ha superado un valor lo suficientemente alto, las salidas reguladas **VLV** (1.8 V) y **VHV** (3.3 V) son habilitadas para poder energizar un microcontrolador de baja potencia y un transceptor de radio, respectivamente.

- Una vez se habilitan las dos salidas reguladas, el convertor *boost* se deshabilita y el sistema únicamente es alimentado por la batería. En el caso en que la batería haya disminuido su voltaje por debajo del umbral, las dos salidas reguladas se deshabilitan, y el sistema queda a la espera de iniciar el proceso de carga nuevamente.

Figura 28. Voltaje de salida del panel (Aumento de luminosidad)

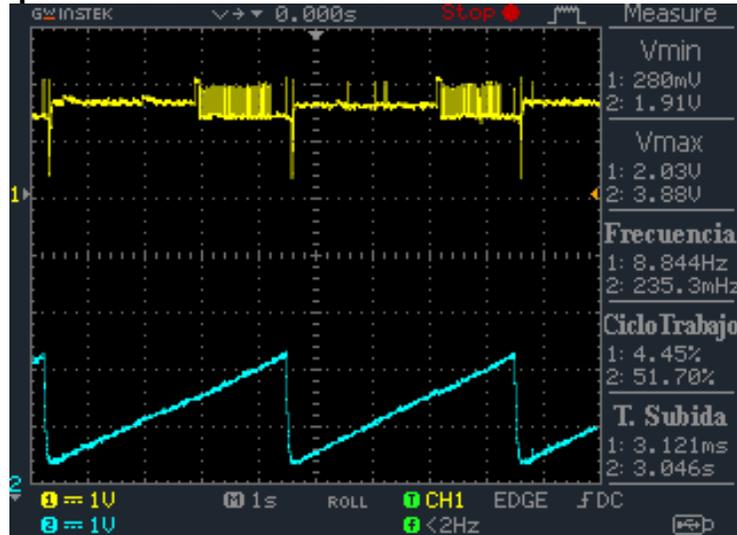


Fuente: [elaboración propia]

El comportamiento de esta secuencia se validó en el laboratorio con ayuda del osciloscopio, conectando un panel solar de 3 V en la entrada del módulo en dos escenarios: primero con un condensador electrolítico en la salida y segundo con una batería de litio de capacidad 3.7 V. En el primer escenario se aprecia que el condensador se carga hasta el valor de umbral máximo (el valor máximo de la curva azul se encuentra en 3.88 V), y justo en ese momento se activa la salida alta, entregándole energía almacenada a la carga que esté conectada (en este caso un LED de baja luminosidad). Dado que el capacitor no cuenta con la capacidad suficiente para mantener la carga, su voltaje decae rápidamente hasta 2.88 V, e iniciando nuevamente el proceso de carga, como se aprecia en la Figura 29.

En el caso en que se incrementa la luminosidad en el panel solar, el proceso de carga del condensador es más rápido como se observa en la Figura 30, sin embargo el voltaje máximo que se alcanza en el condensador es el mismo que en la situación anterior (el valor máximo de la curva azul se encuentra en 3.83 V), dado que esto se define por componentes externos que están conectados en la placa de circuito impreso.

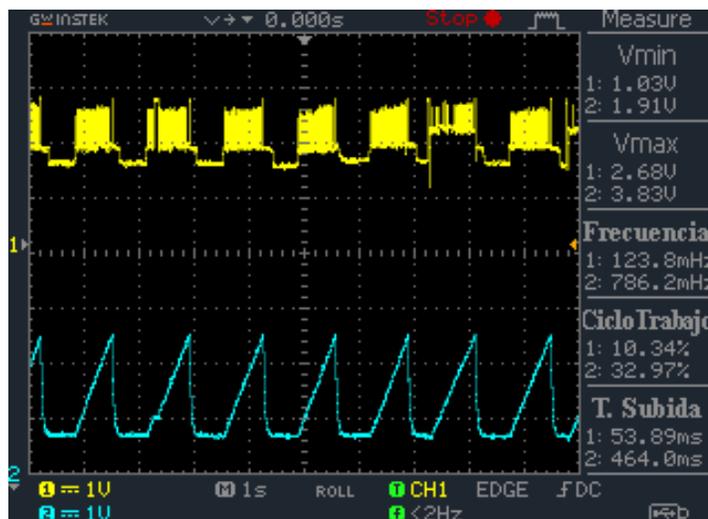
Figura 29. Comportamiento del AEM10941



Fuente: [elaboración propia]

Es necesario resaltar que tanto en la Figura 29 como en la Figura 30 el voltaje de salida del panel solar (curvas amarillas en ambas figuras) presenta un notorio rizado. Esto se debe a que el circuito integrado AEM10941 ejecuta el proceso de MPPT, el cual consiste en garantizar que el panel solar se mantenga ubicado en el punto de máxima transferencia de potencia. Para ello, el circuito efectúa un proceso de conmutación controlada de la carga del panel, modificando el voltaje y la corriente extraída del mismo, permitiendo la estabilización del punto de operación en una determinada región, tal como se explicó en la Sección 3.

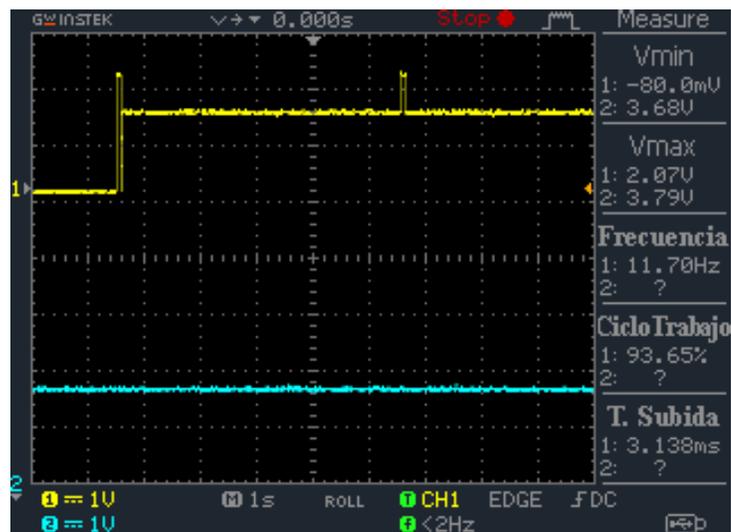
Figura 30. Comportamiento del AEM10941 (Incremento de luminosidad)



Fuente: [elaboración propia]

La verificación del funcionamiento del dispositivo AEM10941 con el condensador en la salida permitió verificar que se realiza de manera apropiada la extracción de energía del panel solar con niveles de voltaje apropiados para energizar un circuito electrónico de baja potencia. Sin embargo, como un condensador electrolítico no es capaz de mantener la carga por un periodo de tiempo elevado, se requiere conectar en la salida un elemento de almacenamiento de energía más eficiente. Este es el caso de una batería de litio de una celda, la cual puede cargarse hasta un valor típico de 3.7 V, el cual corresponde al segundo escenario en el cual se realizaron las pruebas de funcionamiento. En la Figura 18 se muestran los niveles de voltaje del panel solar (canal 1 en color amarillo) y de la batería (canal 2 en color azul), en donde se aprecia la evidente reducción en el voltaje de rizado del panel solar y la capacidad de la batería de retener la carga.

Figura 31. Condición de carga completa de la batería



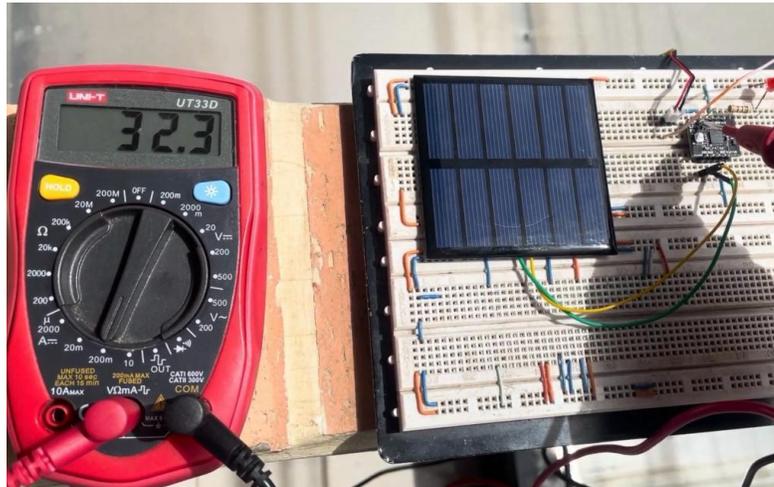
Fuente: [elaboración propia]

Una vez el voltaje de la batería ha superado el valor de 4 V, los reguladores de voltaje son activados, generando en cada una de sus salidas los voltajes de 1.8 V y 3.3 V. Adicionalmente, la batería suspende el proceso de carga, quedando esta como el único elemento encargado de suministrar energía al circuito.

En condiciones de intensidad luminosa alta, en el exterior en horas de la mañana, la corriente de entrada al circuito desde la celda está en un promedio entre 64 mA y 69 mA, y el voltaje oscila entre 2.5 V y 2.9 V, mientras la corriente de salida del circuito a la batería osciló entre 30 mA y 33 mA, y voltaje es 6.2 V estas pruebas se realizaron colocando un LED con resistencia a la salida del circuito como carga, el cual consume 13 mA y 2.0 V, esto equivale a una potencia aproximada de 198

mW en la entrada y de 182 mW a la salida, lo que representa una pérdida o consumo mínimo de energía por parte del circuito.

Figura 32. Medida de corriente de carga a la batería en condición de alta luminosidad



Fuente: [elaboración propia]

Realizando las medidas en un ambiente interior en horas de la tarde con baja luminosidad se obtuvo, un voltaje del panel de 1.8 V y corriente de 1.36 mA, equivalente a potencia de 2.448 mW, mientras a la salida se refleja 3.6 V y 0.67 mA que reflejan 2.412 mW, lo cual confirma el poco consumo del circuito, relacionando la entrada y salida del circuito.

Adicionalmente se mide el tiempo aproximado de carga de la batería en diferentes condiciones, en condiciones de alta luminosidad el voltaje de la batería aumenta de 3.5 V un valor de 3.62 V, el cual es el valor máximo que alcanzan las baterías con las que se hicieron las pruebas, para el caso de la batería de Li-Ion en 15 minutos, y para el caso de la batería Li-Po en aproximadamente una hora.

En condiciones de extrema oscuridad, el panel entrega aproximadamente 0.4 V, y el circuito entrega a la batería una corriente de carga de 11.6 mA.

En cuanto a la autonomía del circuito, en condición de baja luminosidad, se mantuvo el LED encendido durante una hora, considerando que la entrada desde el panel al circuito era de aproximadamente 1.9 V.

Una vez se ha comprobado el correcto funcionamiento del módulo de recolección de energía, es necesario verificar que la capacidad del sistema de recolección cumple con los requisitos estipulados para entregar suficiente energía al nodo IoT (tanto al microcontrolador como al transceptor de radiofrecuencia).

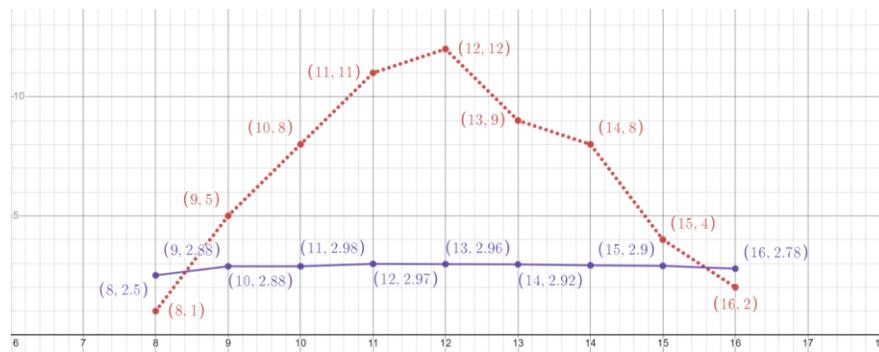
En primer lugar, se validó que el sistema contara con una autonomía suficiente para energizar solamente al dispositivo de control (microcontrolador). Para ello se dispuso de una estructura simple, en donde se alimentó al microcontrolador encargado de monitorear una variable ambiental de manera periódica durante un periodo prolongado de tiempo (en este caso una duración de 1 día).

4.3. Validación de la etapa de gestión del sistema (microcontrolador)

Para la gestión del sistema se implementará a través de la placa ESP32, ya que esta cuenta con un modo de hibernación o sueño profundo en el que el consumo de corriente es extremadamente bajo, de esta forma se programó a través del IDE de Arduino con el código mostrado en el Anexo C, en el que se establece un periodo de hibernación de ciertos minutos y tras eso, el circuito se enciende, se conecta a la red a través de WiFi, envía un dato y vuelve al estado de hibernación, bajo este comportamiento se valida que el consumo del circuito es de entre 34 mA y 39 mA cuando se encuentra activo, y la corriente consumida por el circuito en estado de hibernación es tan pequeña que ni siquiera es perceptible por el multímetro ni siquiera en la escala más pequeña.

Validando el consumo de corriente del módulo, se programa la ESP para transmitir cada cuarenta y cinco minutos datos a la red, con el fin de establecer la autonomía del circuito, para ello, se midió el voltaje entregado por el panel respecto al índice de radiación UV (obtenido de *The Weather Channel*, canal de clima de IBM), tal como se muestra en la Figura 33, el comportamiento de entrega de energía del panel es directamente proporcional al índice de radiación percibido.

Figura 33. Voltaje de entrada del panel e índice de radiación UV, respecto a la hora



Fuente: [elaboración propia]

De esta manera se comprobó que el sistema es alimentado por el panel de manera suficiente para mantener la batería cargada, y transmitir datos en el tiempo programado, brindándole al nodo una autonomía de 24 horas para días completamente soleados, mientras que para días nublados, esta autonomía se reduce a 15 horas bajo el mismo funcionamiento.

Durante estas pruebas se validó el consumo energético de la ESP32, el cual varía según el momento del proceso en el que se encuentre, siendo este de 54 mA en estado de censado, 162 mA en un lapso muy corto mientras que se establece la conexión de la ESP32 con el servidor a través de WiFi y finalmente un consumo de 9 mA durante el periodo de sueño profundo de 45 minutos de la tarjeta. Fue posible identificar que estos 9 mA fueron consumidos por el regulador de voltaje que posee la placa ESP32, los cuales no están siendo utilizados para los procesos de censado ni transmisión de la información. Se considera que este consumo no ha sido aprovechado eficientemente por el sistema.

4.4. Validación de la etapa de datos

Los datos resultantes de este proceso fueron cargados en el host con dirección <https://sistemarecoleccion.000webhostapp.com/>. Estos datos se pueden visualizar en la interfaz que se presenta en la Figura 34, los cuales son almacenados en la base de datos de la Figura 35. Allí se presenta el nivel de humedad detectado por el sensor DHT11 y la fecha y hora exacta en que fueron realizadas dichas mediciones. En particular se presentan las mediciones correspondientes a los días 18 y 19 de diciembre de 2023 en el transcurso del día y de la noche en que la batería consiguió mantener el suministro de energía.

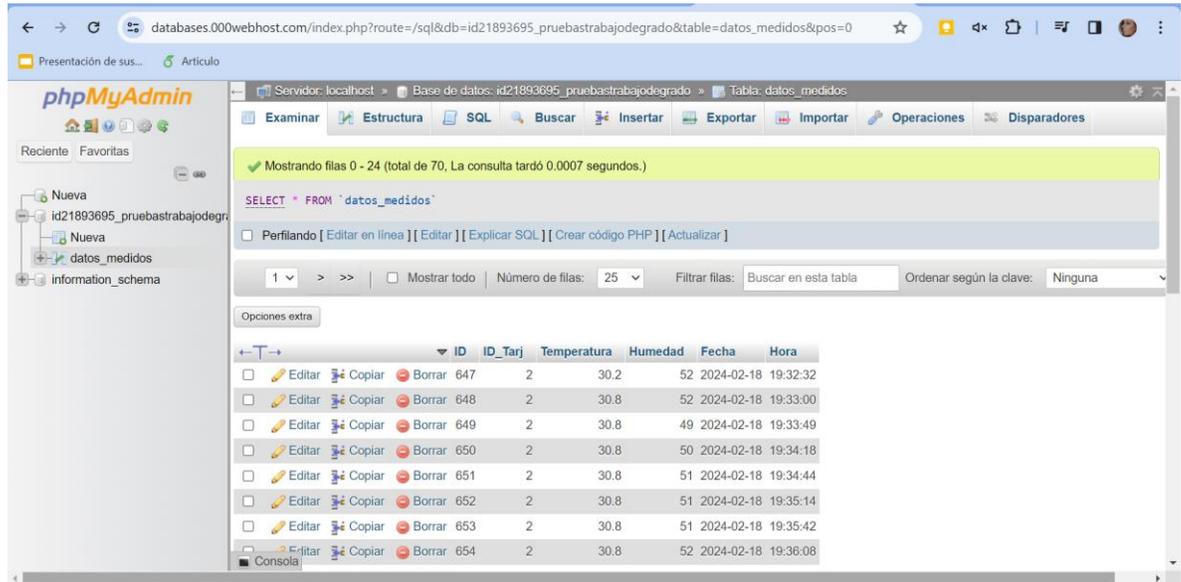
Figura 34. Interfaz para visualizar los datos tomados con el dispositivo



ID de registro	Fecha	Hora	Temperatura	Humedad
716	2024-02-18	20:06:41	29.3 °C	53 %
715	2024-02-18	20:06:13	29.3 °C	54 %
714	2024-02-18	20:05:46	29.3 °C	52 %
713	2024-02-18	20:05:19	29.3 °C	52 %
712	2024-02-18	20:04:51	29.3 °C	52 %
711	2024-02-18	20:04:24	29.3 °C	52 %
710	2024-02-18	20:03:56	29.3 °C	53 %
709	2024-02-18	20:03:30	29.3 °C	53 %
708	2024-02-18	20:03:01	29.3 °C	53 %
707	2024-02-18	20:02:33	29.3 °C	53 %
706	2024-02-18	20:02:05	29.3 °C	53 %
705	2024-02-18	20:01:36	29.3 °C	53 %
704	2024-02-18	20:01:09	29.3 °C	53 %
703	2024-02-18	20:00:41	29.3 °C	53 %
702	2024-02-18	20:00:12	29.3 °C	54 %

Fuente: [elaboración propia]

Figura 35. Base de datos



The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a database named 'id21893695_pruebastrabajodegrado'. The table 'datos_medidos' is selected, and a SQL query 'SELECT * FROM `datos_medidos`' is executed. The results show 8 rows of data with columns: ID, ID_Tarj, Temperatura, Humedad, Fecha, and Hora. The data is as follows:

ID	ID_Tarj	Temperatura	Humedad	Fecha	Hora
647	2	30.2	52	2024-02-18	19:32:32
648	2	30.8	52	2024-02-18	19:33:00
649	2	30.8	49	2024-02-18	19:33:49
650	2	30.8	50	2024-02-18	19:34:18
651	2	30.8	51	2024-02-18	19:34:44
652	2	30.8	51	2024-02-18	19:35:14
653	2	30.8	51	2024-02-18	19:35:42
654	2	30.8	52	2024-02-18	19:36:08

Fuente: [elaboración propia]

4.5. Evaluación del desempeño del sistema

A partir de los resultados obtenidos del sistema implementado, es posible afirmar que esta es el nivel de factibilidad para el desarrollo de un prototipo de un nodo IoT de bajo consumo de energía el cual esté alimentado por energía solar a través de un panel fotovoltaico es bastante alto, ya que dichos resultados muestran la capacidad de convertir la energía solar en energía eléctrica por medio de un sistema electrónico, permitiendo incrementar la eficiencia del proceso de conversión haciendo uso del mecanismo MPPT. Adicionalmente, los resultados muestran que el nivel de autonomía del sistema es apropiado, debido a que en los periodos de tiempo en que se cuenta con una luminosidad reducida, el sistema ha sido capaz de cargar completamente la batería para mantener encendido el dispositivo en dichos periodos, considerando que el consumo de energía se logró mantener bajo gracias a las facilidades del microcontrolador de mantener su funcionamiento en estado profundo, en donde su funcionamiento se basa en un oscilador de muy baja frecuencia, la cual se encarga de permitir un conteo lento en el microcontrolador hasta que se requiera hacer una nueva medida.

Por otra parte, en la práctica se percibió que cierto tipo de baterías consiguen mantener la carga durante un tiempo mayor, dado que su tasa de descarga es menor. Esto sucedió con la batería de Li-Ion, ya que los resultados más favorables se consiguieron al cargar completamente esta batería, mientras que con la batería de Li-Po los resultados no fueron tan favorables, y su tiempo de duración de carga fue mucho más reducida, a pesar de que ambas contaban con características similares de almacenamiento. Debido a eso se asume que alguna diferencia en los

procesos y materiales de fabricación de dichas baterías afecta en el tiempo de almacenamiento de la carga.

Finalmente, gran parte del éxito del funcionamiento del sistema se debe a las ventajas del circuito integrado de gestión de energía solar AEM10941, puesto que este dispositivo realiza la carga de la batería por medio de la energía proveniente del panel solar, y como se mencionó previamente, una de sus principales ventajas proviene de la adaptación que este circuito realiza a la carga del panel solar para extraer al máximo la potencia entregada por el panel. Esto se aprecia en el hecho de obtener la carga completa de la batería en un tiempo relativamente corto y en la capacidad de generar un voltaje de salida bastante estable para mantener el funcionamiento de un circuito electrónico digital como es un microcontrolador en un periodo de tiempo prolongado.

5. DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE NODO IoT

A pesar de que con las medidas anteriores se cumplen los objetivos de este trabajo de grado, como parte adicional de este proyecto, se ha desarrollado un dispositivo electrónico que incorpora tanto a un microcontrolador de bajo costo y el dispositivo de gestión AEM10941 con el fin de desarrollar un nodo IoT en una placa de circuito impreso, para completar el diseño electrónico.

5.1.1. Herramienta Altium

Para elaborar el diseño de este nodo IoT, se utilizó la herramienta Altium Designer, a través de una licencia abierta para estudiantes que permite el uso de la mayor parte de sus funcionalidades.

Altium es una empresa dedicada al desarrollo de circuitos impresos, cuenta con varias líneas de desarrollo de estos sistemas y entre ellas está Altium Designer, mediante la cual se puede realizar diseños de circuitos, aplicarlos a PCB, obtener precios y características de los dispositivos, entre otras, todo esto a partir de una aplicación de escritorio que cuenta con conexión a la nube logrando trabajar tanto individualmente como en equipo, así mismo logrando obtener copias de diferentes versiones de los proyectos, de forma local y también en la nube.

Para iniciar el desarrollo del diseño en la herramienta, inicialmente fue necesario realizar la instalación de diversas librerías no incluidas por defecto, con el fin de poder conectar cada uno de los dispositivos necesarios, este proceso es explicado con detenimiento en el Anexo A.

5.1.2. Diagrama esquemático del sistema

En etapa inicial del desarrollo del diseño se realizó el esquemático del sistema plasmando cada uno de los dispositivos pasivos y activos al igual que sus conexiones obteniendo el circuito mostrado en el Anexo B.

El circuito requiere en cada una de sus etapas una serie de conexiones que serán explicadas a continuación:

En la etapa inicial donde se encuentra la celda solar, esta cuenta con una conexión como fuente o positiva y una a tierra, la primera va directamente al AEM10941, implementando dos capacitores de bypass para prevenir ruido en la señal. Seguido de esto en el caso del circuito AEM10941, se tuvieron en cuenta las conexiones recomendadas por el fabricante según la aplicación que se le dará al dispositivo, de esta manera se optimizará su funcionamiento.

Seguidamente en la etapa de almacenamiento, la batería es conectada tanto al microcontrolador como al AEM10941, también con capacitores de bypass para la prevención del ruido.

En la etapa de control a través del ATmega1284P, se realiza la conexión del cristal oscilador con sus respectivos capacitores, adicionalmente resistencias de control en puertos estratégicos, y conexiones externas para su programación y la conexión del sensor, al igual que el transmisor.

Este diagrama esquemático fue realizado teniendo en cuenta aplicaciones previas de los microcontroladores, teniendo como objetivo contar simultáneamente con un diseño pequeño, de bajo costo y de alto rendimiento.

Adicionalmente a los componentes necesarios para cada uno de estos, se implementaron capacitores de bypass para la reducción del ruido en las señales de comunicación de todo el sistema.

5.1.3. Diseño PCB

En los procesos de elaboración de circuitos impresos las normas de estandarización juegan un papel fundamental, pues es a través de estas que se obtienen resultados correctos y un buen desempeño de los sistemas, igualmente facilita a los fabricantes el llevar a cabo los procesos de impresión de tarjetas de una o varias capas; para el caso del nodo IoT diseñado se tuvieron en cuenta las normas del Instituto de Interconexión y Empaquetado de Circuitos Electrónicos (IPC, *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*), específicamente la norma IPC2221 que representa un estándar genérico de circuitos impresos, a continuación se mencionarán los factores considerados desde esta norma para la elaboración del diseño.

5.1.3.1. Grosor de las pistas

El grosor de las pistas que conectan los elementos debe ser proporcional al tamaño de los puertos de cada uno de estos, sin embargo no debe ser menor a 1 mm, en el caso de este diseño fue necesario realizar conexiones primarias principalmente en las conexiones correspondientes al microcontrolador AEM10941, puesto que los puertos de este corresponden a 0.7 mm de ancho. Sin embargo dichas conexiones fueron ensanchadas inmediatamente atravesaban la región ocupada por dicho dispositivos, de esta manera y teniendo en cuenta también la disipación térmica necesaria, las pistas tomaron gran parte de la superficie del circuito con el propósito de que logren soportar no solo las corrientes sino los cambios de temperatura debidos a las condiciones físicas y climatológicas a las que se verá sometido el nodo IoT.

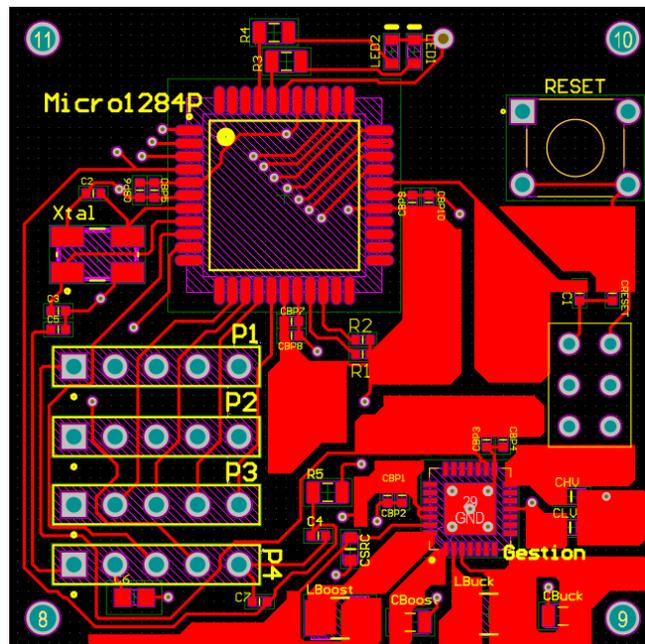
5.1.3.2. Separación de elementos

La norma establece que por la generación de campos electromagnéticos provenientes de cada uno de los componentes del circuito, debe existir una separación mínima entre ellos, adicionalmente dependiendo de su altura estos deberán encontrarse separados por grupos según este parámetro, sin embargo las dimensiones de los componentes de este circuito no aplican más allá de una separación de 5 mm entre elementos.

5.1.4. Elaboración del diseño PCB

Tras tener en cuenta los criterios previamente mostrados, se realizaron las conexiones correspondientes en la plataforma Altium, obteniendo lo plasmado en las Figuras 36 y 37, el cual cuenta con dimensiones de 4 cm x 4 cm.

Figura 36. Diseño PCB cara frontal

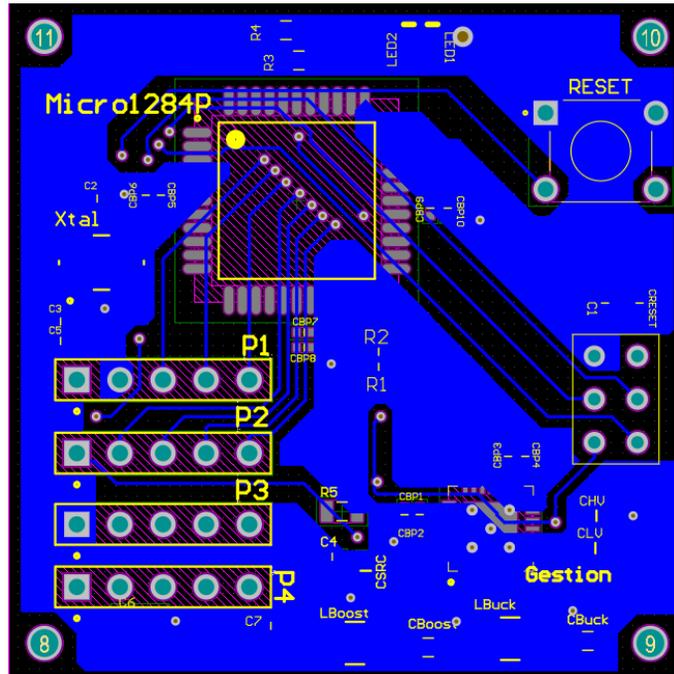


Fuente: [elaboración propia]

En esta imagen se muestran las conexiones plasmadas en la capa frontal del circuito, realizando zonas amplias que permitan la difusión térmica para reducir riesgos de rompimiento de pistas por altas temperaturas.

Por otra parte en la figura 37 se pueden observar las conexiones de la capa posterior del circuito, las cuales mayormente son tierra, esto ayuda al desempeño del circuito.

Figura 37. Cara posterior del circuito



Fuente: [elaboración propia]

Tras realizar este diseño, se envía a fabricación, la placa y se adquieren los componentes necesarios para el montaje, detallados en la siguiente sección de este capítulo.

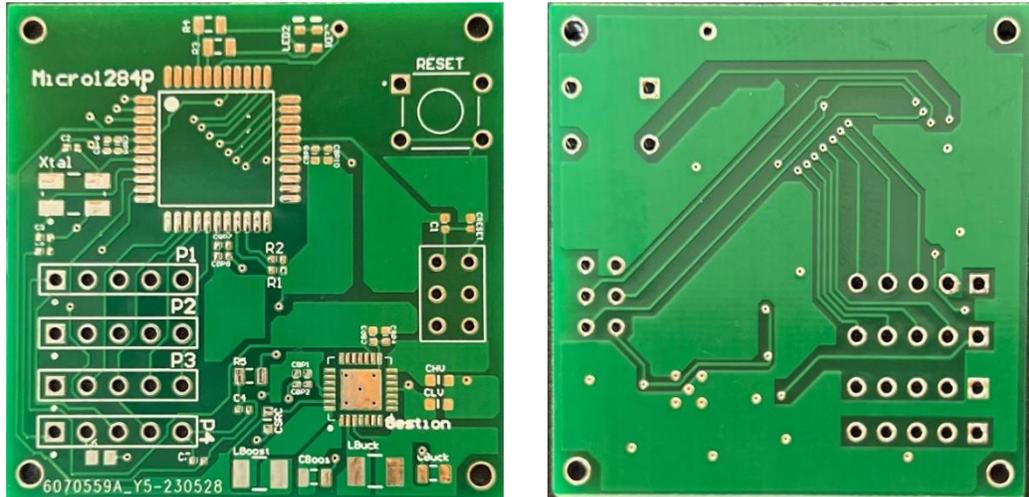
Se realiza el montaje del circuito utilizando soldadura líquida, por las dimensiones mínimas de los componentes.

5.2. Elaboración del prototipo

5.2.1. Elaboración de la placa

La placa base del circuito se elaboró con la empresa JLCPCB, la cual se encuentra en Hong Kong, China, el pedido se realizó a través de su página web, remitiendo los archivos tipo Gerber del circuito, este proceso desde la realización del pedido hasta la recepción de este ocupó un tiempo de aproximadamente 20 días, recibándose 8 placas como las mostradas en la figura 38. Estas fueron fabricadas con las medidas correspondientes de 40 mm x 40 mm x 1,5mm, el costo de estas se observará junto con el de los demás componentes en la siguiente sección de este capítulo.

Figura 38. Placas elaboradas



Fuente: [elaboración propia]

5.2.2. Costos de los materiales

A continuación, en la tabla 2 se presenta la relación de todos los componentes requeridos en la elaboración del prototipo con sus cantidades y costos para cada una de las placas.

Tabla 3. Relación de componentes del circuito

Descripción del componente	Cantidad	Valores	Precio Total
Capacitor 100nF +/- 20% 10V 0402	10	C1, C4, C5, C7, CBP1, CBP3, CBP5, CBP7, CBP9	\$20.000
Capacitor 22pF +/-10% 50V 0402	2	C2, C3	\$2.000
Capacitor 1uF +/- 10% 16V 0603	1	C6	\$7.600
Capacitor 22µF +/-40% 16V 0805	2	CBoost, Cbuck	\$6.500
Capacitor 1µF +/-20% 10V 0402	5	CBP2, CBP4, CBP6, CBP8, CBP10	\$10.000
Capacitor 10µF +/-20% 10V 0603	3	CHV, CLV, CSRC	\$13.500
Chip Inductor, 10 uH, +/- 10%		LBoost, LBuck	\$12.200
LED Naranja, 20 mA, 2.1 V	2	LED1, LED 2	\$9.200

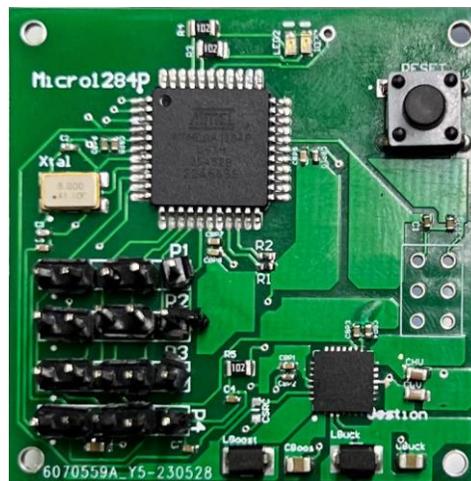
Resistencia 2K 0.063W 5% 0402 (1005 Metric) SMD	2	R1, R2	\$3.400
Resistencia 1K 0.125W 5% 0805 (2012 Metric) SMD	3	R3, R4, R5	\$4.900
SMD Seam Sealing Crystal, 8 MHz, +/- 30 ppm, 18 pF	1	Xtal	\$20.200
AEM10941	1	Gestión	\$40.000
ATMEGA1284P-AU	1	ATMEGA1284	\$60.000
Pines macho	26	P1, P2, P3, P4, AVR	\$4.000
Switch/Botón	1	RESET	\$2.000
Placas	1		\$5.000
Total			\$220.000

Como se mencionó anteriormente, los valores corresponden a la elaboración de una placa, sin embargo con fines de prueba se realizó el montaje de dos placas, adicionalmente se pidieron algunos elementos extra en caso de fallas.

5.2.3. Montaje del circuito y verificación de funcionamiento

El montaje del circuito por sus dimensiones y elementos requirió soldadura líquida, y su montaje debió hacerse con la utilización de microscopio, el montaje completo de las dos placas requirió aproximadamente 10 horas de trabajo, dando como resultado dos placa idénticas como la que se muestra en la figura 36.

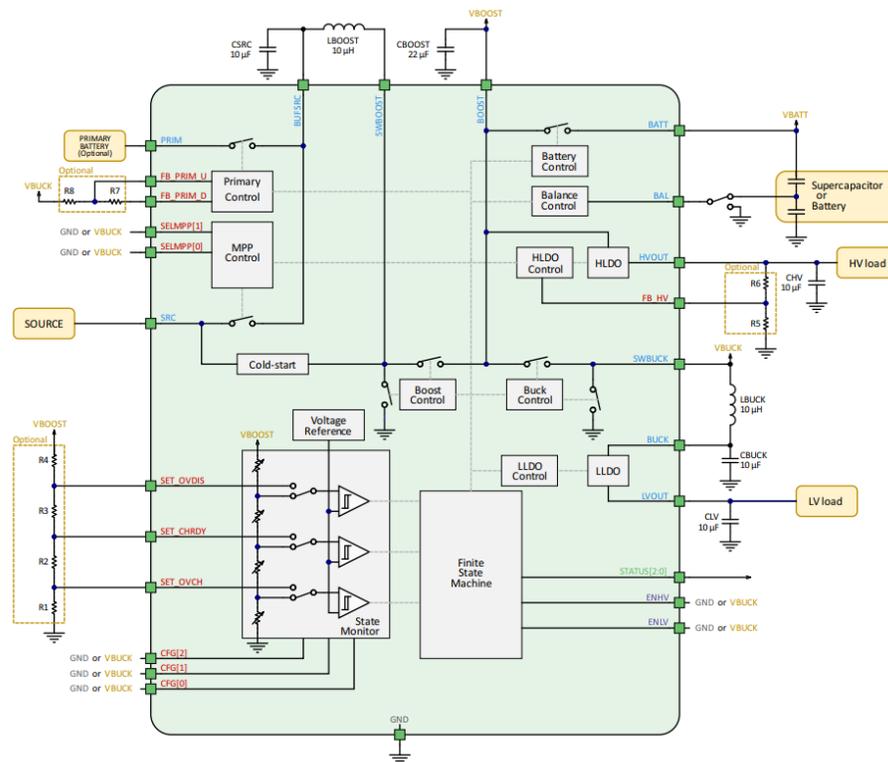
Figura 39. Placas montadas



Fuente: [elaboración propia]

Al poner a prueba el dispositivo inicialmente se encontraron resultados deseados puesto que se conectó un capacitor de 470uF en su salida, el cual alcanzó una carga de 4.3 V la cual sostenía de manera autónoma, sin embargo este resultado solo se obtuvo en las primeras pruebas puesto que posteriormente este comportamiento cambió y el circuito dejó de entregar un voltaje suficiente para cargar el capacitor, se realizaron pruebas repetitivas recreando el mismo escenario y se identificó la presencia de un corto circuito que desviaba la corriente dentro del circuito impidiendo la carga del capacitor por lo que se empezó a validar una a una las conexiones del circuito encontrando un comportamiento de corto en el capacitor CSRC, lo que conllevó a un análisis del comportamiento interno del circuito AEM10941, ilustrado en la Figura 40.

Figura 40. Diagrama de bloques funcional del AEM10941



Fuente: [40]

Como se muestra en la parte superior de la Figura 41, el capacitor CSRC, internamente se conecta a través del puerto BUFSRC a la fuente y externamente también a tierra, por lo que considerando una falla del componente se realizó el reemplazo de este por un capacitor nuevo de las mismas características, encontrando el mismo comportamiento de corto circuito, posterior a este se recurrió a la validación de los puertos de configuración del circuito según su datasheet, encontrando que los puertos ENLV y ENHV debían contar con una entrada digital

de 1 para habilitar las salidas en los puertos LVOOut y HVOOut, de la misma manera, los puertos CFG [0, 1, 2] debían contar con entrada digital de uno simultáneamente [1 1 1] para que el comportamiento fuera acorde a una batería Li-ion, o [0 0 1] respectivamente para un capacitor, por esto se hizo una adaptación manual al circuito para lograr establecer la entrada de estos puertos en 1, la cual se muestra en la Figura 38.

Figura 41. Adaptación del circuito



Fuente: [elaboración propia]

Esta modificación se realizó únicamente en una de las placas de prueba mientras que la otra se mantuvo con el diseño inicial, tras este cambio se inició nuevamente la toma de medidas obteniendo en las placas comportamientos anómalos, y sin lograr la carga de la batería ni el manejo de la energía para etapas posteriores.

se validó con un multímetro la continuidad de las conexiones en el circuito de acuerdo con el diseño, encontrando que todas ellas estaban en buen estado y conectaban los puntos necesarios de acuerdo con las conexiones del diagrama esquemático del anexo B. Sin embargo, debido al comportamiento errático de las placas se validó que no se podría realizar un proceso de carga mediante el circuito diseñado por lo que se optó por un circuito de prueba del módulo AEM10941 para establecer un patrón de comportamiento para la carga de una batería.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

La implementación de un nodo IoT destinado al monitoreo de variables ambientales se presenta como una contribución esencial en el contexto actual, debido a que la creciente adopción de sistemas de control busca obtener información valiosa sobre el entorno para analizar datos y anticipar comportamientos futuros. La interconexión global de sensores a través de redes IoT, combinada con la creciente conciencia ambiental, resalta la necesidad de un análisis exhaustivo del diseño del dispositivo para garantizar el mejor rendimiento posible con el menor impacto ambiental.

En el marco de la sostenibilidad, la elección de fuentes de energía renovables, especialmente la energía fotovoltaica derivada de la radiación solar se destaca como la alternativa más viable; la abundancia de radiación solar en la mayoría de la superficie terrestre hace que esta fuente sea totalmente sostenible a lo largo de la vida útil del dispositivo propuesto, apuntando hacia un diseño amigable con el medio ambiente, destacando la relevancia de energías renovables en nodos IoT.

Los objetivos planteados, desde definir los requerimientos energéticos, hasta diseñar un prototipo electrónico de recolección de energía fotovoltaica, se han alcanzado con éxito, la evaluación del rendimiento del sistema electrónico propuesto ha proporcionado resultados que respaldan la viabilidad y eficacia del enfoque planteado.

La dificultad experimentada con el circuito implementado, destaca la complejidad inherente al diseño electrónico, aunque inicialmente exitoso, la posterior falta de funcionalidad sugiere posibles problemas de estabilidad debido a diferentes factores del diseño, como lo son el grosor de las pistas, el calor al que fueron expuestos los componentes durante el montaje del circuito, posible efecto cínico en los elementos por las condiciones del laboratorio o el flujo de energía cinética proveniente del cuerpo humano, o incluso defectos de fabricación, este incidente subraya la importancia de realizar pruebas exhaustivas y considerar la robustez del diseño antes de implementar soluciones electrónicas.

La necesidad de realizar validaciones experimentales se revela como una parte integral del proceso de desarrollo, aunque las simulaciones y cálculos teóricos son esenciales, la validación en condiciones reales puede revelar aspectos que no se pueden anticipar completamente en etapas anteriores del diseño.

Durante la fase de medición, se observó que el nodo IoT exhibe un rendimiento alto en condiciones soleadas, la autonomía registrada para un día completamente soleado destaca la eficiencia de la recolección de energía fotovoltaica, respaldando la elección de esta fuente de energía renovable.

La capacidad del nodo para mantener su autonomía incluso en condiciones de nubosidad parcial durante medio día es un hallazgo significativo, este aspecto destaca la adaptabilidad del sistema a variaciones en la disponibilidad de radiación solar, garantizando un funcionamiento continuo y confiable en diversas circunstancias climáticas.

Los resultados recolectados en las pruebas de este trabajo tienen implicaciones directas en la aplicación práctica del nodo IoT en el sector agrícola colombiano, la capacidad de mantener su autonomía incluso en días parcialmente nublados asegura que en un contexto real, los agricultores cuenten con datos precisos y actualizados mitigando los riesgos asociados con la falta de información en condiciones climáticas cambiantes.

6.2. Trabajos futuros

Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de nodos IoT orientados al monitoreo ambiental, especialmente en el contexto de la agricultura colombiana, se sugiere explorar nuevas aplicaciones, la optimización del manejo de la energía recolectada, y expansiones del sistema propuesto para maximizar su utilidad y alcance en la mejora de prácticas agrícolas sostenibles. Algunos de los trabajos a futuro que se proponen son:

- Optimización del circuito, explorar las causas subyacentes de las fallas presentadas en la implementación del circuito y desarrollar estrategias para su optimización, esto podría incluir un análisis detallado de la durabilidad de los componentes, la estabilidad del diseño y la influencia de los factores ambientales en el desempeño del sistema, La implementación de las mejoras basadas en estas investigaciones podría conducir a un circuito más robusto y estable.
- Estudio de factores ambientales, realizar un análisis exhaustivo de los factores ambientales que podrían afectar el rendimiento de los circuitos, esto podría incluir investigaciones sobre la resistencia a la humedad variaciones de temperatura y otros elementos ambientales específicos del entorno en el que se utilizaran los circuitos, esto junto con medidas de protección o ajustes en el diseño podría mitigar dichos efectos para mejorar la durabilidad del sistema.
- Desarrollo de sistemas de diagnóstico y monitoreo remoto, implementar sistemas de diagnóstico y monitoreo remoto que permitan detectar problemas en los circuitos en tiempo real, esto podría incluir la incorporación de sensores adicionales para evaluar el estado de los componentes y la comunicación remota para recibir informes del estado del circuito. Esto facilitaría la identificación rápida de problemas y la implementación de soluciones a distancia.

- Exploración de nuevas tecnologías y componentes, investigar y evaluar nuevas tecnologías que puedan mejorar la eficiencia y la durabilidad de los circuitos, la evolución constante en el campo de la electrónica ofrece oportunidades para utilizar dispositivos más avanzados, lo que podría conducir a mejoras significativas en el rendimiento.
- Desarrollo del circuito de forma modular, explorar la posibilidad de diseñar circuitos modulares que permitan la fácil sustitución y actualización de componentes individuales, esta aproximación facilitaría la adaptación del circuito a cambios en los requisitos o la corrección de problemas específicos sin tener que rediseñar por completo el sistema.
- Integración de sistemas de alimentación redundante, investigar y desarrollar sistemas de alimentación redundante que aseguren la continuidad del suministro eléctrico incluso en el caso de fallos en componentes individuales, la implementación de fuentes de energía alternativas o baterías de respaldo podría mejorar la confiabilidad del sistema.
- Investigación de materiales innovadores, evaluar materiales innovadores que puedan mejorar la durabilidad y el rendimiento de los componentes electrónicos, la incorporación de nuevos materiales más resistentes a las condiciones ambientales adversas podría ser fundamental para el desarrollo de circuitos más robustos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Equipo ItSMF España, «Retos de la implementación de IoT y el futuro desarrollo de estándares,» *Canal de Noticias de Buenas Prácticas de Gobierno y Gestión de Tecnología de itSMF España*, 29 abril 2021.
- [2] M. Peñalosa Acosta, F. Árevao Cohen y R. Daza Suárez, «Impacto de la gestión tecnológica en el medio ambiente,» *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 15, nº 2, 2009.
- [3] T. Sanislav, G. Dan Mois, S. Zeadally y S. C. Folea, «Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT),» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39530-39549, 2021.
- [4] «Dispositivos electrónicos cada vez más pequeños,» *El Imparcial*, abril 2009.
- [5] S. Sudevalayam y P. Kulkarni, «Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, nº 3, pp. 443-461, 2011.
- [6] Nobbot, 2020.
- [7] S. E. L. C. Karen Rose, «Internet Society,» octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>. [Último acceso: 13 noviembre 2022].
- [8] itUser, «El número de dispositivos conectados crecerá a un ritmo anual del 12% hasta 2024».
- [9] M. Alioto, *Enabling the Internet of Things*, M. Alioto, Ed., Singapore, Singapore, 2017.
- [10] «LedBox,» [En línea]. Available: <https://blog.ledbox.es/que-es-el-protocolo-zigbee/>.
- [11] «ELT.es,» [En línea]. Available: <https://www.elt.es/ble-bluetooth-low-energy>.
- [12] «Research Gate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Arquitectura-de-una-Red-Bluetooth_fig3_258278889.
- [13] «BisMark,» 1 julio 2020. [En línea]. Available: [https://bismark.net.co/sigfox-lora-nb-iot-redes-lpwan-para-iot/#:~:text=Sigfox%2C%20Lora%20y%20NB%2DIOT%20\(Narrowband%20OT\)%20son,ello%20es%20necesario%20conocerlas%20bien..](https://bismark.net.co/sigfox-lora-nb-iot-redes-lpwan-para-iot/#:~:text=Sigfox%2C%20Lora%20y%20NB%2DIOT%20(Narrowband%20OT)%20son,ello%20es%20necesario%20conocerlas%20bien..)
- [14] «SigFox,» [En línea]. Available: <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>.
- [15] Á. F. Ramos, «Energy Harvesting: Una técnica para generar energía,» Madrid, 2017.
- [16] «Educar Chile,» 2017. [En línea]. Available: https://centroderecursos.educarchile.cl/bitstream/handle/20.500.12246/14327/articles-26555_recurso_pdf.pdf?sequence=1.

- [17] APREAN, «APREAN,» [En línea]. Available: <https://www.aprean.com/energia-termoelectrica/#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20termoelectrica%20convencional%20es,para%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20electricidad..>
- [18] «Santander,» [En línea]. Available: <https://www.becas-santander.com/es/blog/tipos-de-energia-no-renovable.html#:~:text=En%20este%20sentido%2C%20algunas%20fuentes,desaparecer%C3%A1%20aproximadamente%20en%2015%20a%C3%B1os..> [Último acceso: 2023 marzo 08].
- [19] Naciones Unidas, «Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Las%20energ%C3%ADas%20renovables%20son%20un,estas%20fuentes%20se%20renuevan%20continuamente..> [Último acceso: 1 octubre 2022].
- [20] Diplomado de Ultrasonografía Medica, «Medica Capacitación,» [En línea]. Available: <https://diplomadomedico.com/fenomeno-piezoelctrico/>.
- [21] «ResearchGate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-116-Efecto-piezoelctrico-directo-e-inverso-3_fig9_321084545.
- [22] «UMA,» [En línea]. Available: https://www.uma.es/media/files/Poster_LSAUBC_IT_2016_4.pdf.
- [23] «ThinkBig,» [En línea]. Available: <https://blogthinkbig.com/plantillas-generadoras-de-energia>.
- [24] «TEC ELECTRÓNICA,» [En línea]. Available: <https://tec-mex.com.mx/aplicaciones-con-rfid/>.
- [25] J. H. P. Duque, «Sistema de recolección de energía de señales de radiofrecuencia utilizando antenas textiles,» Santa María Tonantzintla, Puebla, México, 2019.
- [26] «StackExchange,» [En línea]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/464069/rectenna-whats-the-purpose-of-the-capacitors>. [Último acceso: 2023 marzo 26].
- [27] «Telectrónica,» [En línea]. Available: <https://telectronica.com/como-funciona-la-radiofrecuencia/>.
- [28] «Tecnica Industrial,» [En línea]. Available: <https://www.tecnicaindustrial.es/termoelectricidad-la-energia-del-desequilibrio/>. [Último acceso: 2023 marzo 19].
- [29] «Calculisto,» [En línea]. Available: <https://www.calculisto.com/topics/mecanica-cuantica/summary/511>. [Último acceso: 06 marzo 2023].
- [30] «Heliosfera,» [En línea]. Available: <https://www.heliosfera.com/diferencia-entre-efecto-fotoelctrico-y-efecto-fotovoltaico/>.

- [31] «BBVA,» [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-tipos-de-placas-solares-existen-y-para-que-se-utilizan/>.
- [32] Spellman, «Spellman,» [En línea]. Available: <https://www.spellmanhv.com/es/Technical-Resources/FAQs/Technology-Terminology/What-is-a-voltage-multiplier#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20multiplicador%20de,altos%20voltajes%20de%20Corriente%20Directa..>
- [33] «Foros de electrónica,» [En línea]. Available: <https://www.forosdeelectronica.com/threads/multiplicadores-de-voltaje.359/>. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [34] «Appa Renovables,» [En línea]. Available: <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-tipos-y-ventajas/diferencias-entre-energias-renovables-y-convencionales/>.
- [35] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_reductor. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [36] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_elevador. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [37] «UNAM Mexico,» [En línea]. Available: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/70300/66831>. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [38] [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Seguidor_de_punto_de_m%C3%A1xima_potencia. [Último acceso: 2023 marzo 19].
- [39] «SolarPLack,» [En línea]. Available: <https://solarplak.es/energia/que-es-un-regulador-mppt#:~:text=Un%20regulador%20MPPT%20es%20un,aprovechar%20al%20m%C3%A1ximo%20su%20potencia..>
- [40] «e-peas semiconductors,» [En línea]. Available: <https://e-peas.com/product/aem10941/>.
- [41] [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/the-future-of-energy-harvesting-iot-applications>.
- [42] L. J. H. Fonseca*, «Cells, Batteries And Lithium-Ionc Batteries for an Alternative??». *Universidad del Valle*.
- [43] «330 ohms,» [En línea]. Available: <https://blog.330ohms.com/2020/06/22/que-diferencias-hay-entre-una-li-po-y-una-li-ion/>.
- [44] «Guía Profi,» [En línea]. Available: <https://www.jungheinrich-profishop.es/es/guia-profi/como-funciona-una-bateria-de-litio/>. [Último acceso: 05 marzo 2023].

- [45] [En línea]. Available: <https://es.natapa.org/difference-between-capacitor-and-supercapacitor-2631>. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [46] DigiKey, «DigiKey». *Electronic Products y ElectronicProducts.com*.
- [47] «RP2040 - Sigma Electrónica,» Sigma Electrónica, [En línea]. Available: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/rp2040/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2023].
- [48] «Microchip,» [En línea]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega1284P>. [Último acceso: 05 marzo 2023].
- [49] J. Beningo, «DigiKey,» 21 enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module>.
- [50] Jasper Sikken on Tindie, «Solar harvesting into Li-ion battery,» [En línea]. Available: <https://www.tindie.com/products/jaspersikken/solar-harvesting-into-li-ion-battery/>.
- [51] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE LA FUNCIÓN PÚBLICA, *DECRETO No. 447 DE 2022*, 2022, pp. 1-2.
- [52] S. Boselli, R. Gaudio y M. P. Grilli, «Circuitos para cosecha de energía a ultra baja tensión,» 2021.
- [53] E. Dallago, A. Lazzarini Barnabei, A. Liberale, P. Malcovati y G. Venchi, «An Interface Circuit for Low-Voltage Low-Current Energy Harvesting Systems,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, nº 3, pp. 1411-1420, marzo 2015.
- [54] A. Fahad, T. Soyata, T. Wang, G. Sharma, W. Heinzelman y K. Shen, «SOLARCAP: Super capacitor buffering of solar energy for self-sustainable field systems,» de *2012 IEEE International SOC Conference*, 2012.
- [55] D. Gunduz, K. Stamatiou, N. Michelusi y M. Zorzi, «Designing intelligent energy harvesting communication systems,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nº 1, pp. 210-216, 2014.
- [56] A. Haque, «Maximum Power Point Tracking (MPPT) Scheme for Solar Photovoltaic System,» *Energy Technology & Policy*, vol. 1, nº 1, pp. 115-122, 2014.
- [57] M. Hassanlieragh, T. Soyata, A. Nadeau y G. Sharma, «UR-SolarCap: An Open Source Intelligent Auto-Wakeup Solar Energy Harvesting System for Supercapacitor-Based Energy Buffering,» *IEEE Access*, vol. 4, pp. 542-557, 2016.
- [58] Y. Li y R. Shi, «An intelligent solar energy-harvesting system for wireless sensor networks,» *J Wireless Com Network* 2015, p. 179, 2015.
- [59] N. E. Pimiento Serrano y M. R. Vargas Avila, «Diseño e implementación de un sistema de micro generación distribuida,» 2012.
- [60] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman y M. Srivastava, «Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems,» de

IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.

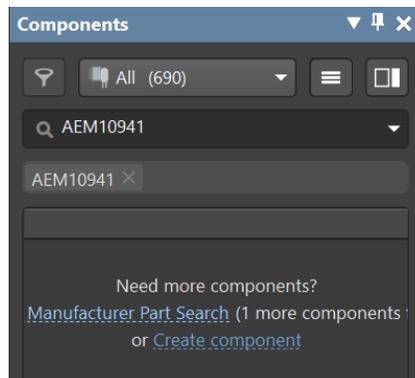
- [61] M. M. Salazar Cardona, «Design of a solar energy harvesting system for supplying energy to an autonomous wireless sensor node,» *ing. Solidar*, vol. 17, n^o 2, pp. 1-18, mayo 2021.
- [62] H. Sharma, H. Ahteshamul y J. Zainul Abdin, «Research Issues in Energy Harvesting Internet of Things,» de *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*, 2019.
- [63] F. Simjee y P. H. Chou, «Everlast: long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node,» de *ISLPED '06: Proceedings of the 2006 international symposium on Low power electronics and design*, 2006.
- [64] J. Taneja, J. Jeong y D. Culler, «Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks,» de *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008)*, 2008.
- [65] EcuRed, «EcuRed,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Efecto_Seebeck.
- [66] Microchip, «Microchip,» [En línea]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC24FJ1024GB610>.
- [67] «LA.network,» [En línea]. Available: <https://la.network/carreteras-que-producen-energia-el-futuro-cercano/>. [Último acceso: 2023 marzo 08].
- [68] «EcoConstruccion,» [En línea]. Available: <https://www.ecoconstruccion.net/articulos-online/carreteras-inteligentes-y-su-aprovechamiento-energetico-5D6GF>.
- [69] U. d. I. R. d. Uruguay, «Introducción a IoT (Internet de las Cosas)».

ANEXO A. IMPORTACIÓN DE LIBRERIAS A LA HERRAMIENTA ALTIUM

La herramienta Altium por defecto cuenta con una lista de dispositivos básicos para realizar conexiones, como resistencias, capacitores, inductores o incluso algunos microcontroladores, sin embargo muchos de los dispositivos necesarios para el circuito de este prototipo no se encuentran directamente en la herramienta, por lo que deben ser añadidos externamente como librerías, en este anexo se muestra el proceso llevado a cabo con el dispositivo AEM10941, mismo que se repitió con gran parte de los dispositivos necesarios, lista que se encuentra al final de este anexo. Adicionalmente todas las imágenes mostradas en este anexo hacen parte de evidencias cuya fuente es el proceso realizado.

Inicialmente se comprueba la existencia del dispositivo en la herramienta a través del buscador de componentes.

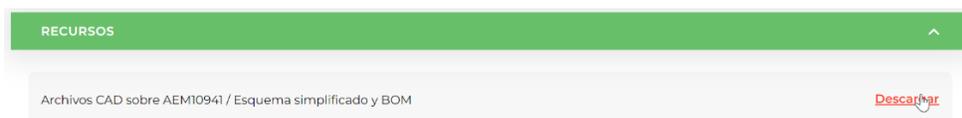
Figura A.1. Búsqueda del dispositivo



Tras comprobar que el dispositivo no se encuentra en la herramienta se procede a realizar la búsqueda de su esquemático y su huella a través de internet, dichos archivos pueden ser proporcionados por los fabricantes o encontrados en diversos sitios web dedicados a esta función.

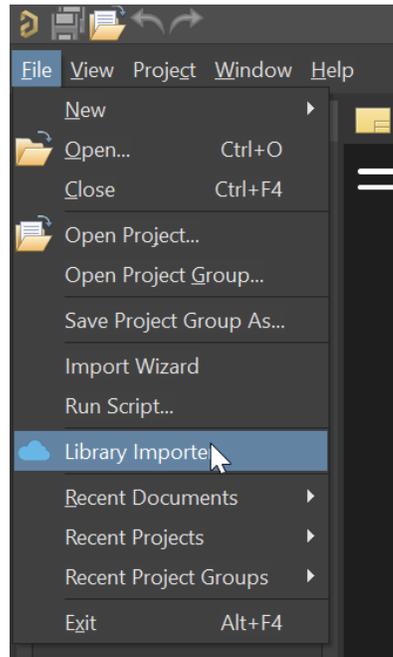
En el caso del AEM10941, su fabricante proporciona esta información a través de su sitio web, como se puede ver en la figura C.2.

Figura A.2. Descarga de recursos



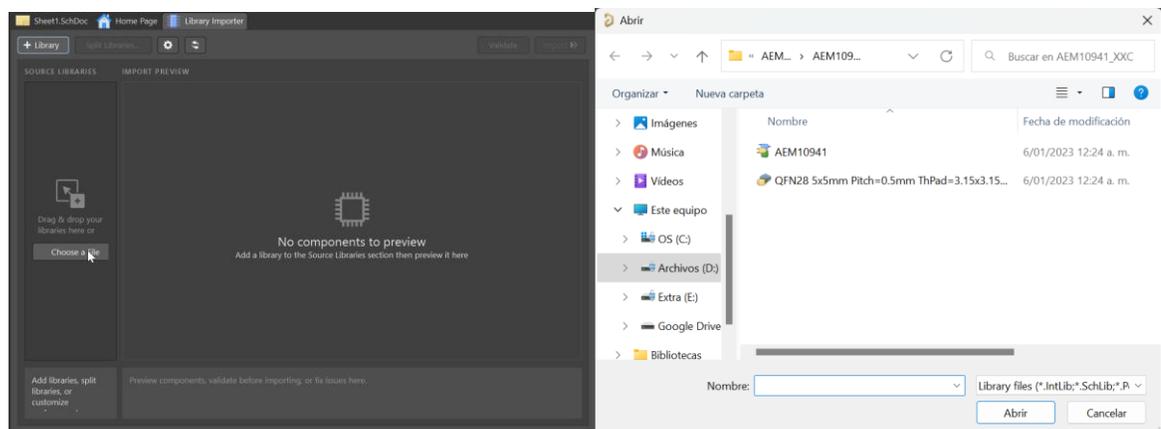
Continuo a la descarga de los recursos, se ingresa a la herramienta para la importación de librerías en la herramienta, como se muestra en la figura C.3

Figura A.3. Importador de librerías



Al dar clic en esta opción se desplegará una nueva ventana, en la que se deberá seleccionar la opción para elegir un archivo, donde clic en “Choose a file” y seguidamente buscando el archivo en la tura en la que se descargó al ordenador.

Figura A.4. Selección del archivo



Tras realizar la selección, la herramienta llevará a cabo una revisión del archivo y nos indicará el estado de la importación de esta, para finalmente mostrar el dispositivo importado en la lista de componentes, desde donde podrá ser utilizado tanto su esquemático como su huella en PCB.

Figura A.5. Importación del dispositivos

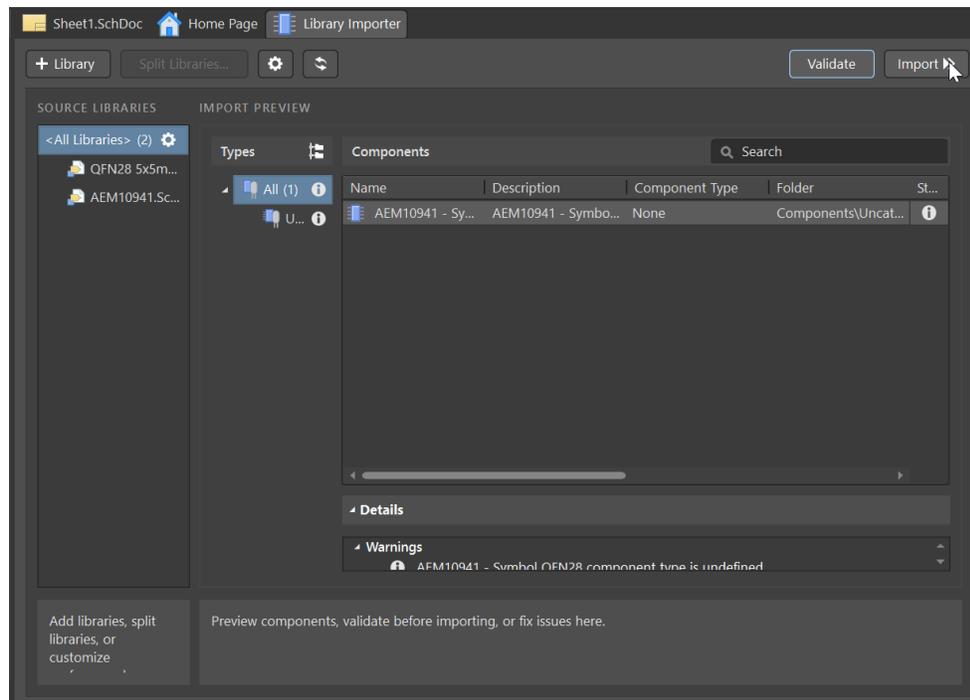


Figura A.6. Estado de la importación

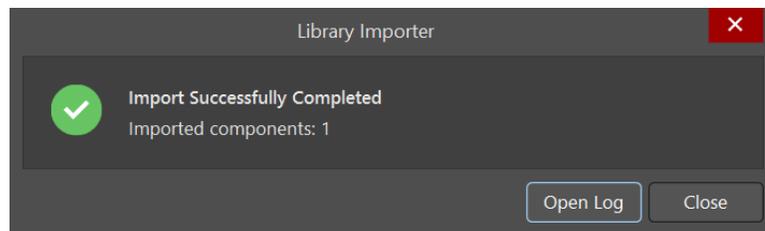
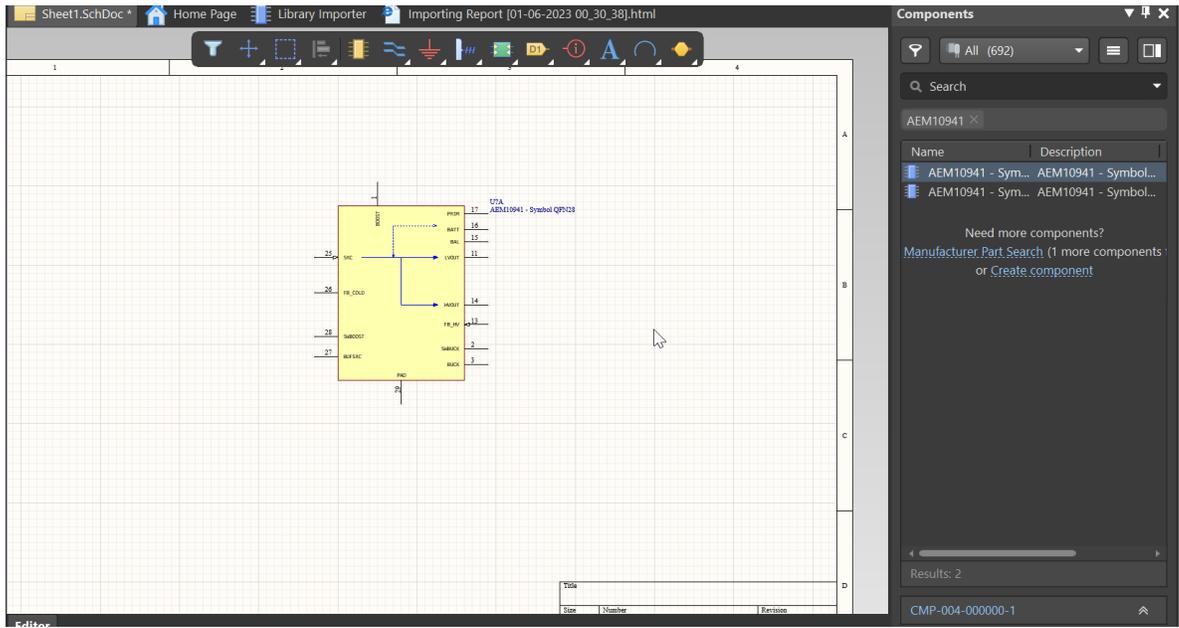


Figura A 7. Uso del esquemático



ANEXO B. DIAGRAMAS ESQUEMATICOS DEL SISTEMA

Figura B. 1. Diagrama Esquemático de la etapa de administración de energía del sistema

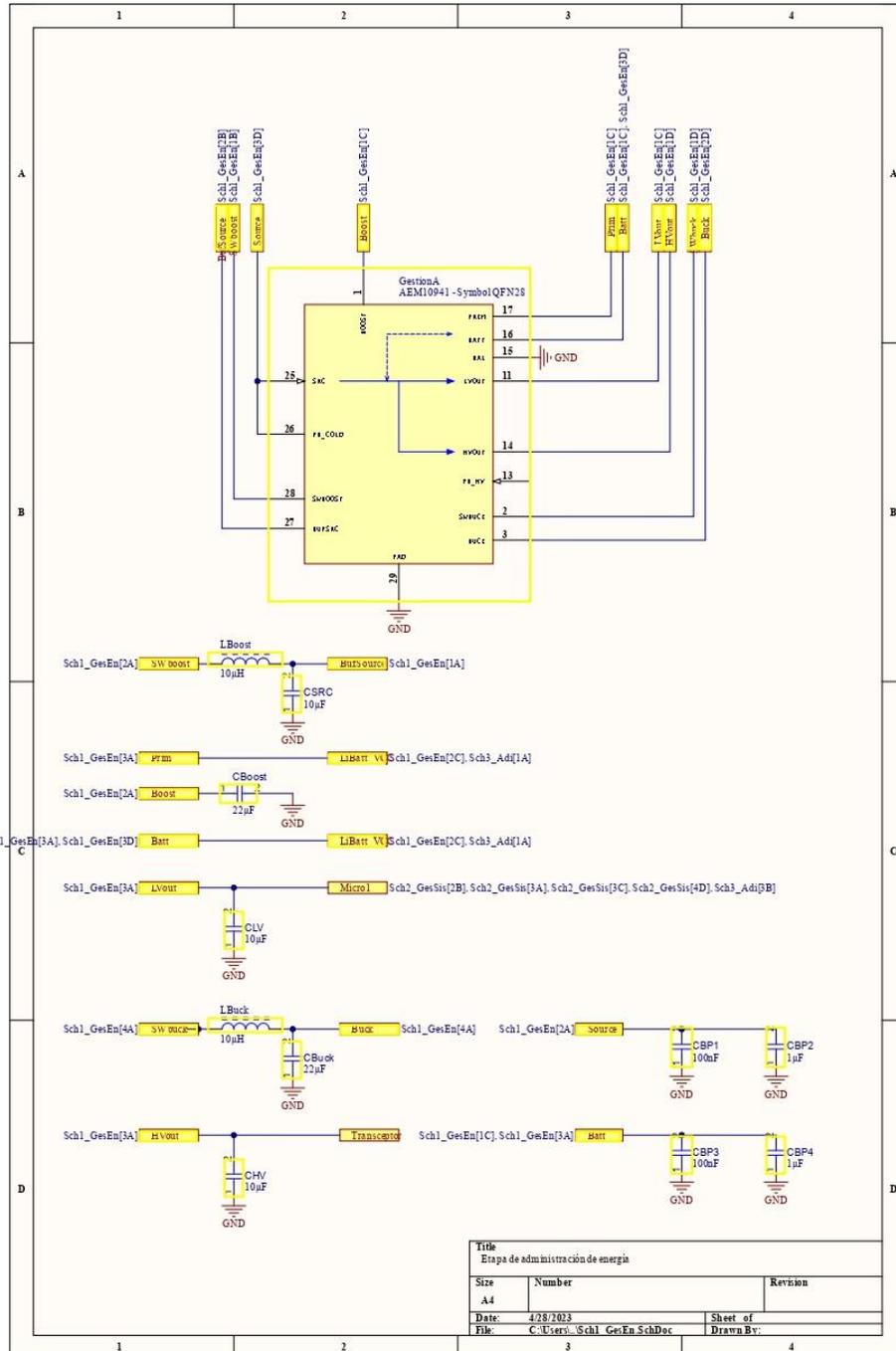


Figura B. 3. Conexiones adicionales

