

# **Instrumentación y suministro energético para una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café**

**Autor (es)**

**Andrés Felipe Garibello Medina**

**Raúl Iván Mera Molano**

**Universidad de Cundinamarca**

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

# **Instrumentación y suministro energético para una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

**Autor (es)**

**Andrés Felipe Garibello Medina**

**Raúl Iván Mera Molano**

Director:

Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Co-director:

Faider Humberto Barrero Sánchez

Línea de investigación:

Aprendizaje, conocimiento, tecnologías, comunicación y digitalización

**Universidad de Cundinamarca**

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

## **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo a nuestros padres y familiares, quienes han sido una base fundamental en cada paso de nuestras vidas. Su paciencia y sacrificio han hecho posible la culminación de nuestra carrera y el crecimiento de nuestros sueños.

# Agradecimientos

- Andrés Felipe Garibello Medina: En primer lugar, me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, Jorge Isaac Garibello y Sandra Lucero Medina, por su continuo apoyo y dedicación a lo largo de mi educación. Por su inquebrantable sacrificio y las oportunidades que me han brindado para alcanzar este nuevo logro en mi vida. El cual no me pertenece sólo a mí, sino también a ustedes.

También quiero agradecer a mi padrino, Alexander Medina, por su valioso apoyo y orientación a lo largo de este camino. Siendo parte fundamental a lo largo de mi formación académica, de lo cual solo puedo agradecer.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que hicieron parte de este proceso, en los cuales encontré personas con altas capacidades y de buen corazón, que hoy en día puedo llamar amigos.

Para finalizar, agradezco a todos mis compañeros y amigos que me acompañaron en este proceso, a todas estas personas, muchas gracias.

- Raul Ivan Mera Molano: Agradezco primero a Dios y a mi familia, mi padre y madre Raúl Iván Mera y Francly Yamile Molano, mi hermana Lina Mariana Mera, mis abuelos Álvaro León Mera y Luz Cecilia Buitrago y de más personas que estuvieron a mi lado en este proceso quienes, con su esfuerzo, ayuda y amor incondicional, fueron el pilar en este trayecto. Un recorrido que fue largo a su vez, pero fue corto, donde estas personas siempre me acompañaron en mis mejores y peores momento.

Conjuntamente queremos agradecerles a nuestros directores, Andrés Felipe Guerrero Guerrero y Faider Humberto Barrero Sánchez, que, con su sabiduría y paciencia, nos guiaron a través de este gran proceso. Les agradecemos inmensamente por su dedicación y compromiso. Además, agradecemos a la Ing. Lina María Torres por su apoyo y constante motivación la cual nos permitió alcanzar nuestros objetivos.

# Resumen

Este documento presenta el proceso de diseño en un sistema de instrumentación y suministro energético fundamentado en energía solar fotovoltaica, para la implementación de redes inalámbricas de sensores (WSN) incorporadas en plantaciones de café. Que permita un mayor control y precisión con respecto a variables edafoclimáticas que afectan el rendimiento del cultivo.

El diseño se ejecuta sobre la selección de los diversos dispositivos teniendo en cuenta los parámetros de precisión, tensión, corriente y potencia consumida por los dispositivos. Por otra parte, en cuestión de la tarjeta de desarrollo se toma en cuenta el tipo de comunicación, velocidad y modos de bajo consumo, permitiendo esto generar autonomía energética y lectura de datos confiables.

La implementación del sistema se lleva a cabo por medio de una tarjeta de desarrollo ESP8266 y dispositivos de medición de parámetros como: temperatura, humedad, luminosidad y CO<sub>2</sub>. Adicionalmente cuenta con convertidores DC-DC que se encargan de regular la tensión proporcionada por los paneles, para mantenerla en el nivel requerido para el correcto funcionamiento de los dispositivos. Estos convertidores cuentan con dos modos, permitiendo activar y desactivar el suministro por medio de un pulso, logrando disminuir el consumo en dispositivos que no cuentan con modos de ahorro.

Los resultados obtenidos indican un bajo consumo de energía del sistema, lo cual se demuestra midiendo los diferentes modos de configuración disponibles en el ESP8266. Estas mediciones arrojan una reducción del 77.41 % en el consumo, ampliando así la autonomía del sistema. Además, los convertidores tienen una oscilación promedio del 2 % con respecto a su tensión de salida. Del mismo modo, se corroboran las medidas de las variables por medio de sensores industriales, en las cuales se obtienen porcentajes de error por debajo del 10 %.

Palabras claves: sistemas de instrumentación, energía fotovoltaica, redes inalámbricas de sensores, cultivos de café, variables edafoclimáticas

# Abstract

This document presents the design process of an instrumentation and energy supply system based on photovoltaic solar energy, for the implementation of wireless sensor networks (WSN) incorporated in coffee plantations. This will allow greater control and precision with respect to edaphoclimatic variables that affect crop yield.

The design is executed on the selection of the various devices taking into account the parameters of accuracy, voltage, current and power consumed by the devices. On the other hand, the development card takes into account the type of communication, speed and low consumption modes, allowing this to generate energy autonomy and reliable data reading.

The implementation of the system is carried out by means of an ESP8266 development board and devices to measure parameters such as: temperature, humidity, luminosity and CO<sub>2</sub>. Additionally, it has DC-DC converters that are responsible for regulating the voltage provided by the panels, to keep it at the required level for the correct operation of the devices. These converters have two modes, allowing to activate and deactivate the supply by means of a pulse, thus reducing the consumption in devices that do not have saving modes.

The results obtained indicate low system power consumption, which is demonstrated by measuring the different configuration modes available on the ESP8266. These measurements yield a 77.41 % reduction in consumption, thus extending the system's autonomy. In addition, the converters have an average oscillation of 2 % with respect to their output voltage. In the same way, the measurements of the variables are corroborated by means of industrial sensors, in which error percentages below 10 % are obtained.

Key words: instrumentation systems, photovoltaic energy, wireless sensor networks, coffee crops, edaphoclimatic variables.

# Contenido

Resumen .....	5
Abstract .....	6
INTRODUCCIÓN.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	14
Objetivo general .....	14
Objetivos Específicos .....	14
JUSTIFICACIÓN .....	14
ALCANCES Y LIMITACIONES .....	15
Alcances.....	15
Limitaciones.....	16
1. MARCO REFERENCIAL .....	17
1.1. ESTADO DEL ARTE .....	17
1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	27
1.2.1. Red inalámbrica de sensores (WSN) .....	27
1.2.2. Convertidores DC-DC.....	27
1.2.3. Batería en el nodo sensor.....	28
1.2.4. Cosechadores o recolectores de energía .....	28
2. DISEÑO METODOLÓGICO .....	30
3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES Y SUMINISTRO, INTEGRADOS EN UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES.....	31
3.1. ANÁLISIS .....	31
3.1.1. Factores influyentes .....	31
3.1.1.1. Temperatura en el cultivo de café .....	31
3.1.1.2. Radiación solar en el cultivo de café .....	33
3.1.1.3. Humedad en el cultivo de café .....	34
3.1.1.4. Dióxido de carbono en el cultivo de café .....	35
3.1.2. Características de implementación .....	35
3.2. DISEÑO.....	37
3.2.1. Selección de sensores.....	37
3.2.1.1. Sensores de temperatura.....	37

3.2.1.2.	Sensor de humedad.....	38
3.2.1.3.	Sensor de luminosidad.....	38
3.2.1.4.	Sensor de CO <sub>2</sub> .....	39
3.2.2.	Convertidor.....	39
3.2.2.1.	Circuitos integrados para el convertidor DC-DC.....	39
3.2.3.	Selección de microcontrolador.....	40
3.2.4.	Cuadro de cargas.....	41
3.2.4.1.	Selección de panel solar y almacenamiento .....	42
3.2.4.2.	Cálculo de componentes energéticos en la red WSN.....	42
3.2.5.	Gestor de cargas .....	45
3.2.6.	Parámetros de diseño para convertidor DC-DC.....	45
3.2.7.	Simulación .....	48
3.3.	IMPLEMENTACIÓN .....	50
3.4.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO.....	55
3.4.1.	Información de sensores: .....	55
3.4.1.1.	Sensor de Temperatura: .....	55
3.4.1.2.	Sensor de Humedad: .....	56
3.4.2.	Transformación energética .....	57
3.4.2.1.	Trabajo de convertidor DC-DC.....	58
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1.	Comprobación del envío de datos .....	60
4.2.	Gestión energética .....	61
4.2.1.	Valores de consumo energético: .....	64
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	66
5.1.	CONCLUSIONES.....	66
5.2.	PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO .....	67
5.3.	PRODUCTOS DE ESTE TRABAJO .....	68
	BIBLIOGRAFÍA.....	69

# Índice de figuras

Figura 1: Diseño estructural [19].	18
Figura 2: Sistema de carga WSN [20].	19
Figura 3: Diagrama de bloques Modelado de espacio de estado promedio y la aplicabilidad del convertidor Buck-Boost compensado en serie para la recolección de energía solar fotovoltaica [21].	20
Figura 4: Modelo MATLAB/SIMULINK de convertidor Buck con batería recargable (carga) [22].	22
Figura 5: Características de corriente-tensión (IV) de la energía solar fotovoltaica con temperatura a irradiación fija [23].	23
Figura 6: Diagrama de la conexión [29].	25
Figura 7: Fases de desarrollo.	30
Figura 8: Zona de cafetales en la Unidad Agroambiental “La Esperanza”.	32
Figura 9: Zona de cafetales en la Unidad Agroambiental “La Esperanza” percepción de luminosidad.	34
Figura 10: Cobertura de los cultivos.	36
Figura 11: Distancia zona central a los cultivos [55].	36
Figura 12: Proceso de desarrollo.	37
Figura 13: Diagrama de bloques LM2596 [58].	46
Figura 14: Valor inductor [58].	47
Figura 15: Capacitor de entrada [58].	48
Figura 16: Esquemas del convertidor DC-DC basado en LM2596.	49
Figura 17: Tensión y corriente de salida del convertidor DC-DC.	50
Figura 18: Pasos para el diseño del convertidor DC-DC.	50
Figura 19: Diseño Esquemático PCB y vista 3D convertidor fijo.	51
Figura 20: Diseño Esquemático PCB y vista 3D convertidor con pulso ON/OFF.	51
Figura 21: Fabricación de PCB en CNC.	52
Figura 22: Ensamble PCB.	52
Figura 23: Recubrimiento de protección.	53
Figura 24: Montaje del proyecto en la caja hermética.	53
Figura 25: Conexiones del sistema.	54
Figura 26: Sistema completo.	54
Figura 27: Comparación de medidas de temperatura.	56
Figura 28: Medidas de humedad.	57
Figura 29: Sensores de humedad del suelo.	57
Figura 30: Valores de tensión.	58
Figura 31: Convertidor DC-DC resultados en laboratorio.	58
Figura 32: Convertidores DC-DC resultados en ambiente exterior.	59
Figura 33: Datos temperatura.	60
Figura 34: Datos humedad.	61

Figura 35: Datos luminosidad. .... 61  
Figura 36: Consumo energético en funcionamiento activo. .... 63  
Figura 37: Consumo energético. .... 63  
Figura 38: Medición de los modos de la ESP8266. .... 64

# Índice de tablas

Tabla 1: Requisitos del sistema .....	16
Tabla 2: Estimación de energía para los diferentes modelos de vehículos [18].....	17
Tabla 3: Balance de potencia a través de los subsistemas de conversión de potencia SPV a SCBBC y SCBBC a batería en un prototipo [21]. .....	20
Tabla 4: Especificaciones de sensores de temperatura. ....	37
Tabla 5: Especificaciones de sensores de humedad. ....	38
Tabla 6: Especificaciones de sensores de luminosidad. ....	38
Tabla 7: Especificaciones de sensores de <i>CO2</i> . ....	39
Tabla 8: Características de circuitos integrados. ....	39
Tabla 9: Dispositivos para activación del ON/OFF. ....	40
Tabla 10: Especificaciones de microcontroladores. ....	40
Tabla 11: Cuadro de carga- nodo sensor.....	41
Tabla 12: Tipos de paneles [56]. ....	42
Tabla 13: Gestores de carga.....	45
Tabla 14: Consumo con el modo modem Sleep. ....	64
Tabla 15: Consumo en modo light sleep.....	65

# INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado se realizó dentro del proyecto de investigación titulado “Sistema de monitoreo de variables ambientales a través de tecnologías 4.0 en cultivos de café en la provincia del Sumapaz (Cundinamarca-Colombia)”, cuyo enfoque principal es desarrollar prototipos utilizando tecnología de nueva generación para monitorización de variables ambientales del cultivo de café, como la radiación solar, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la temperatura y la humedad relativa del suelo y el ambiente. El proyecto se enfoca en incrementar la producción y calidad del café para ingresar a los mercados nacionales e internacionales bajo una marca institucional. En cuanto a Cundinamarca, el café tiene una alta presencia y hace parte de la tradición agrícola, al punto que es posible encontrar cultivos de este producto en 69 de los 116 municipios del departamento, de las cuales cuenta con seis regiones cafeteras: Gualivá, Magdalena, Rionegro, Sumapaz- Oriente, Tequendama Norte y Sur [1].

Por otra parte, el suelo, el agua, el clima y el ecosistema están interrelacionados y desempeñan un papel esencial en la producción y calidad final del café. En el proceso de crecimiento de los granos de café, es importante considerar que tener un efecto adverso en el desarrollo, provoca una reducción en su tamaño y un impacto en sus características organolépticas, disminuyendo así las oportunidades de comercialización [2]. Asimismo, puede provocar enfermedades retrasando la producción, por lo tanto, hoy en día es una alternativa sustentable la incorporación de sensores para proporcionar información a los agricultores, dado que estas nuevas herramientas pueden monitorear los cambios que tienen un impacto significativo en el desarrollo de las plantas de café [3] [4]. En este sentido mejorar la producción y calidad en zonas rurales en diversos cultivos de la región, resaltando en eficiencia y rentabilidad agrícola. Teniendo en cuenta el uso de tecnologías 4.0, como las redes inalámbricas de sensores (WSN), que destacan por su capacidad para mejorar la productividad de los cultivos y permiten el seguimiento y en ocasiones el control de variables clave [5], en este sentido, aunque en la actualidad existen diferentes sensores y sistemas de detección y medida de estos parámetros fundamentales, la implementación de sistemas tecnológicos en las áreas rurales es casi nulo [6].

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cambios drásticos del clima han perjudicado a los agricultores, en países como Colombia, que se encuentra entre los líderes mundiales de café, el cual atraviesa una crisis en la producción [7], no obstante, dichos cambios se dividen en tres grandes categorías: ambientales, genéticos y de manejo [8]. Permitiendo asegurar un rendimiento óptimo, ya que el aprovechamiento del café depende en gran medida del grado en que estos factores ambientales tengan un impacto positivo en la planta [9]. Por esta razón es primordial incentivar la implementación de elementos electrónicos que permitan supervisar remotamente estas variables, retomando el conocimiento local en conjunto con nuevas tecnologías [7], sin embargo, su uso se ve obstaculizado por la falta de electricidad confiable y conectividad a internet en las zonas cafeteras que normalmente se encuentran en lugares de difícil acceso. Adicionalmente las largas extensiones de cultivo implican un reto en cuanto a la cobertura de un sistema de comunicación para transmisión de datos de campo.

En vista de lo anterior, es necesario establecer un sistema que garantice el suministro energético confiable a través de energía captada del entorno. Al mismo tiempo, también es importante la implementación de sistemas de monitoreo de variables específicas para mejorar la calidad de los cultivos y tomar decisiones acertadas para su óptimo desarrollo. Teniendo en cuenta las condiciones de los cultivos de café en la región del Sumapaz y los retos técnicos de las WSN, surge la siguiente pregunta.

¿Cómo diseñar un sistema de medida de variables con suministro energético eficiente para una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café en la región del Sumapaz Colombia?

# OBJETIVOS DEL ESTUDIO

## Objetivo general

Desarrollar un sistema de medida de variables a partir de dispositivos electrónicos integrados en una red inalámbrica de sensores aplicada a cultivos de café.

## Objetivos Específicos

- Identificar factores que influyen en la respuesta fisiológica de las plantas de café con el fin de determinar los componentes electrónicos de una WSN.
- Diseñar un sistema de medida de factores que influyen en la respuesta fisiológica de las plantas de café a partir de estrategias de instrumentación electrónica que integren fuentes alternativas de suministro energético.
- Implementar un sistema de medición funcional y compatible con tecnologías de redes inalámbricas de sensores para los factores que influyen en la respuesta fisiológica de las plantas de café.

# JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, especialmente el sector agrícola en la provincia del Sumapaz, teniendo como principal actividad económica la producción de café, enfrenta grandes dificultades en la producción de los cultivos, por precipitaciones continuas del suelo, el agua, temperatura y diversos factores edafoclimáticos que influyen en el desarrollo en las plantas de café. Dado que la interacción de estos componentes sin supervisión afecta de forma negativa el grano de café, disminuyendo su tamaño y aspectos organolépticos, por lo cual se disminuye la posibilidad de comercialización del producto [10]. La universidad de Cundinamarca cuenta con 2.3 hectáreas en plantaciones de café, de las cuales 1.3 hectáreas se encuentran en su tercer año de producción con un total de 1350 plantas de café ubicadas en la Unidad Agroambiental La Esperanza, de las cuales se busca generar una mayor productividad, logrando así establecer una marca institucional, permitiendo proyectarse como un centro de desarrollo de cultivos de café. Sin embargo, en la actualidad esta no cuenta con ningún tipo de tecnología que garantice esa eficiencia y productividad requerida para entrar en el mercado [11].

De acuerdo con la opinión de expertos, la revisión y análisis de seguimiento a diferentes sistemas productivos, incluido el café, las variables que pueden afectar

el rendimientos y calidad de la producción son: La radiación solar el cual se expresa en el crecimiento y desarrollo metabólico de la planta de café [12]. La humedad la cual ayuda al transporte de nutrientes [13] [14], junto con la humedad relativa la cual pueden afectar el metabolismo de la planta, disminuyendo la productividad debido a la probabilidad de aumento de agentes patógenos [15]. Del mismo modo, se requiere evaluar la capacidad de conversión de CO<sub>2</sub> y la temperatura ambiente para relacionar el comportamiento en los aspectos del cambio climático [16]. Por lo tanto, realizar seguimiento y control a las variables mencionadas, permite proponer procesos de seguimiento y control preventivo en búsqueda de la reducción de costos por las acciones correctivas que se hacen en los cultivos contrarrestando la presencia de plagas, enfermedades o afectaciones localizadas, los cuales se pueden evitar realizando análisis de datos y el uso de tecnologías [17].

Finalmente, con el desarrollo de un sistema de instrumentación y suministro energético, se busca que los agricultores puedan tener un control más certero de las variables edafoclimáticas mencionadas con anterioridad y una independencia en términos energéticos permitiendo usar este recurso en zonas de difícil acceso o baja disponibilidad de energía convencional, logrando optimizar la producción de los cultivos y aumentar la rentabilidad y disminuir los costos de producción.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **Alcances**

El dispositivo desarrollado hace uso de energía solar, captada por medio de un panel solar de 18 V de tensión y una potencia de 10 W, junto con un sistema de batería que permite una autonomía promedio de dos días.

El sistema de regulación de tensión consta de un convertidor DC-DC tipo Buck, permite el encendido y apagado del suministro energético mediante un pulso externo. Además, se hace uso de una caja hermética con resistencia IP56 y con ello las placas de cobre se recubren de silicona resistente a la humedad y a los hongos, para así evitar corrosión y daños en los dispositivos que son expuestos en el campo de medición.

El sistema cuenta con sensores para medir variables:

- Temperatura: 40 °C – 85 °C
- Humedad: 0 % – 100 %
- Luminosidad: ( $\mu\text{mol}/\text{s} \times \text{m}^2$ )

## Limitaciones

En la Tabla 1 se presentan las limitaciones de este sistema, estas abarcan diversos aspectos, desde las restricciones eléctricas hasta las restricciones de medición de los sensores.

Tabla 1: Requisitos del sistema

Componentes	Requerimiento												
Suministro energético	El sistema admite tensiones de entrada entre 6 V y 8 V, la potencia requerida será de máximo 3 W (considerando requerimientos de la tarjeta de desarrollo, sensores y circuitos de acondicionamiento de señales).												
Sistema de almacenamiento	Cuenta con una batería de litio de 3.7 V a 3300mAh, la cual permite una autonomía promedio de 2 días.												
Sistema para gestión de carga	El dispositivo de transferencia de energía cuenta con cambios de fuente de suministro energético (energía almacenada o fuente principal). Gestiona tensión de 6 V a 1 A.												
Regulación de tensión en el nodo	Permite asegurar una tensión de 3.3 V en todos los componentes de medida y procesamiento del nodo. Este componente soporta tensiones de entrada entre 3.7 V y 40 V.												
Sensores	Dispositivos de bajo consumo energético (corrientes menores a 100 mA) con posibilidad de cambio en modos de operación en función de la autonomía energética. Tensión de operación de 3.3 V. Características de sensores:												
	<table> <thead> <tr> <th></th> <th>GY-30</th> <th>BMP-180</th> <th>HD38</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Margen de error</td> <td>± 20 %</td> <td>± 0.5 %</td> <td>± 0.75 %,</td> </tr> <tr> <td>Comunicación</td> <td>I2C</td> <td>I2C</td> <td>DAC</td> </tr> </tbody> </table>		GY-30	BMP-180	HD38	Margen de error	± 20 %	± 0.5 %	± 0.75 %,	Comunicación	I2C	I2C	DAC
	GY-30	BMP-180	HD38										
Margen de error	± 20 %	± 0.5 %	± 0.75 %,										
Comunicación	I2C	I2C	DAC										

# 1.MARCO REFERENCIAL

---

En esta sección o apartado se evidencian algunos proyectos realizados recientemente, con la finalidad de brindar una visión clara de las soluciones propuestas a la instrumentación electrónica y suministro energético en redes inalámbricas de sensores.

## 1.1. ESTADO DEL ARTE

A través de los años, el uso y adaptación de circuitos de suministro energético en la agricultura ha experimentado un rápido crecimiento. Actualmente, existen diversos desarrollos tecnológicos que ofrecen soluciones para el suministro de energía en diferentes aplicaciones.

En 2019 Fubing Han y sus colaboradores, diseñaron un circuito de recolección de energía mediante las estelas que generan los vehículos en la carretera por medio de una turbina VAWT o un aerogenerador de eje vertical. Este artículo estudia la disponibilidad de energía eólica a lo largo de la carretera, considerando cómo el tráfico afecta a su recolección, que se ajusta a la aplicación de baja velocidad del viento en las carreteras para alimentar un sistema de iluminación LED basado en baterías, teniendo en cuenta factores como el tipo de vehículo e influencia en la generación de viento.

La cantidad total de energía generada proviene de la combinación de la turbulencia inducida por el tráfico y el viento natural, esto se refleja en la Tabla 2, la cual muestra que dicha energía recolectada a lo largo de la carretera es suficiente para aplicaciones pequeñas, como los sistemas de alumbrado público [18].

Tabla 2: Estimación de energía para los diferentes modelos de vehículos [18].

Modelo de vehículo	Sedan	Suv	Van	Truck
Potencia máxima ( $W$ )	43.1	54.4	54.4	519.3

Este sistema de iluminación almacena la energía de las turbinas eólicas en baterías, permitiendo que durante el día se almacene para uso en la noche o condiciones en las que los generadores eólicos no están produciendo energía.

En el año 2014 K Shrestha y demás autores, diseñaron un recolector de energía eólica rotacional y una estación meteorológica portátil que monitorea el medio ambiente y proporciona diferente información meteorológica, como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad y la calidad del aire. Los autores en este

documento recalcan que uno de los desafíos para el funcionamiento de la estación meteorológica, es el suministro energético [19], para solucionar este inconveniente incorpora un recolector de energía eólica rotativo que utiliza una matriz Halbach (RHA-WEH) con el propósito de generar energía eléctrica para alimentar dispositivos IOT, así como una unidad de microcontrolador (MCU), módulos de comunicación inalámbrica y otros componentes necesarios para crear una estación meteorológica autónoma y autosuficiente. La Figura 1 presenta el diseño estructural del RHA-WEH (ROTOR DE ALTA EFICIENCIA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA HÍBRIDA).

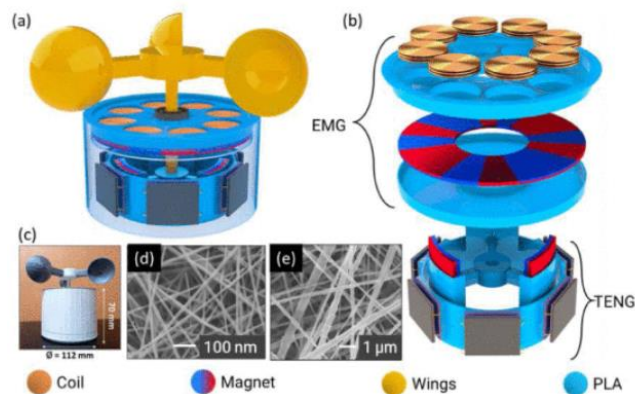


Figura 1: Diseño estructural [19].

En la parte (a) de la Figura 1, se exhibe un diagrama esquemático que resalta la integración de un generador electromagnético (EMG) y un generador triboeléctrico (TENG) en un solo dispositivo. Por consiguiente, la parte (b) ofrece una representación capa por capa del RHA-WEH, con este diseño se aprovecha la energía captada del viento para generar energía eléctrica y almacenarlas en baterías.

Xinqing Xiao y demás autores en 2023, desarrollaron un sistema de monitoreo de temperatura para el almacenamiento de alimentos fríos. Este sistema utiliza energía solar fotovoltaica y carga inalámbrica, y está equipado con una red inalámbrica de sensores de 3 nodos, se emplea un convertidor DC-DC con potencia  $40\text{ W}$  con una tensión de circuito abierto de  $21.8\text{ V}$  y una corriente de cortocircuito de  $2.58\text{ A}$ . Junto con batería de ion de litio, esta energía almacenada se utiliza para alimentar el transmisor de carga inalámbrica y el nodo de sensor, que forman parte del sistema de monitoreo de temperatura, como se muestra en la Figura 2.

El transmisor suministrará de forma inalámbrica la energía recolectada al nodo sensor, mediante una bobina de carga, donde el consumo de energía del nodo se obtuvo mediante la corriente de trabajo bajo una tensión de operación de  $5\text{ V}$ . La

corriente máxima pico fue de alrededor de  $205.1\text{ mA}$ , mientras que la corriente promedio fue de aproximadamente  $104.2\text{ mA}$  y una potencia promedio consumida aproximadamente de  $521\text{ mW}$ .

El sistema emplea sensores SHT31 inalámbricos para medir la temperatura de los alimentos almacenados. La energía solar se utiliza para cargar la batería de  $2000\text{ mAh}$  y el dispositivo de carga inalámbrica gestiona el suministro de energía a los sensores de temperatura. Se emplea el microcontrolador ESP8266 y una interfaz de usuario para controlar y monitorear la temperatura de los alimentos almacenados. Los datos de temperatura se transmiten a través de una red inalámbrica para su visualización y monitoreo en tiempo real.

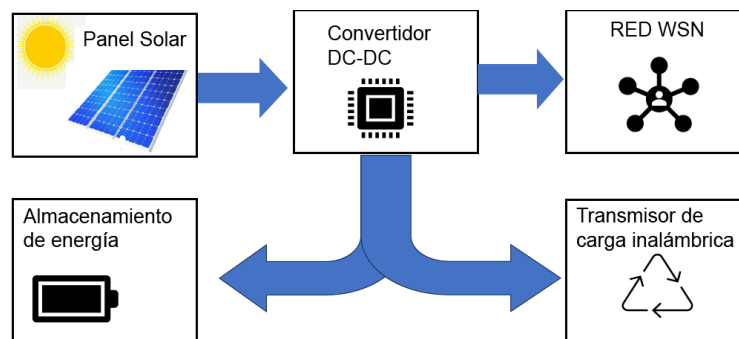


Figura 2: Sistema de carga WSN [20].

En 2022 Sakthivel y colaboradores diseñaron un convertidor Buck-Boost compensado en serie para la recolección de energía solar mediante paneles fotovoltaicos. El artículo propone un método de control de modo deslizante, para el seguimiento del punto de máxima potencia y presenta un análisis en la representación de espacio de estados del convertidor. Se evaluó un convertidor Buck-Boost compensado en serie en la recolección de energía solar fotovoltaica, comparándolo con otros métodos. Este convertidor maximiza la potencia de los paneles solares y permite una salida de tensión ajustable, además se utilizó un control de modo deslizante para mejorar la eficiencia. Dicho dispositivo se usó en un sistema solar compuesto por 10 paneles de  $125\text{ W}$ , con valores nominales que incluyen una tensión de circuito abierto de  $21.58\text{ V}$ , una corriente de cortocircuito de  $7.89\text{ A}$ , tensión máxima de  $17.19\text{ V}$  y una corriente en máxima de  $7.28\text{ A}$ . Además, este sistema puede cargar baterías, alimentar cargas directamente o suministrar energía a cargas de  $C_A$  a través de un inversor con un sistema de control de retroalimentación adecuado. Por ejemplo, con un ciclo de trabajo del  $50\%$  y una entrada de  $24\text{ V}$ , la salida es de  $48\text{ V}$  a  $1\text{ A}$ , suministrando  $48\text{ W}$  de potencia [21].

El sistema de carga de batería se compone de un subsistema de conversión de energía solar fotovoltaica (SPV) y un convertidor de carga de batería impulsado por SCBBC por sus siglas en inglés "Series Compensated Buck-Boost Converter" (convertidor Buck-Boost compensado en serie). El convertidor de carga de batería impulsado por SCBBC mantiene la tensión de salida del sistema y ajusta la corriente generada para cargar la batería de manera eficiente [21]. En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques del sistema de conversión, con el convertidor Buck-Boost compensado en serie.

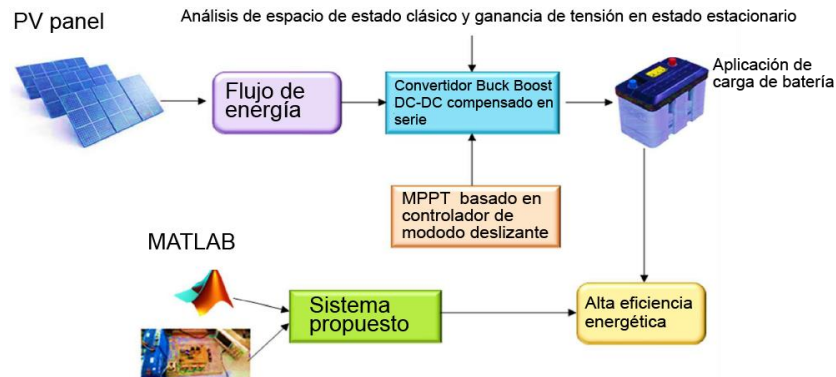


Figura 3: Diagrama de bloques Modelado de espacio de estado promedio y la aplicabilidad del convertidor Buck-Boost compensado en serie para la recolección de energía solar fotovoltaica [21].

La Tabla 3 proporciona información sobre la cantidad de energía que se está generando y entregando, a través de los distintos subsistemas en diferentes condiciones de irradiación solar:  $500 \text{ W/m}^2$  y  $950 \text{ W/m}^2$ . También se muestra la potencia entregada por el SPV y la potencia entregada por el SCBBC en cada nivel de irradiación solar.

Tabla 3: Balance de potencia a través de los subsistemas de conversión de potencia SPV a SCBBC y SCBBC a batería en un prototipo [21].

Radiación solar	Subsistema	Tensión de terminal de salida	Corriente de salida	Potencia entregada
$500 \text{ W/m}^2$	SPV a SCBBC	16.7 V	3.76 A	62.8 W
	SCBBC a batería	22.2 V	2.35 A	53.58 W
$950 \text{ W/m}^2$	SPV a SCBBC	17.1 V	6.8 A	116.2 W
	SCBBC a batería	24.7 V	4.45 A	110 W

Los datos recopilados bajo dos condiciones de radiación solar,  $500 W/m^2$  y  $950 W/m^2$ , revelan información sobre el sistema y su capacidad de conversión de energía. En el caso de  $500 W/m^2$ , la conversión desde los paneles SPV hasta el SCBBC genera una tensión de salida de  $16.7 V$  y una corriente de  $3.76 A$ , lo que resulta en una potencia de  $62.8 W$ . Posteriormente, esta energía se transfiere desde el SCBBC a la batería, donde la tensión de carga alcanza los  $22.2 V$  con una corriente de  $2.35 A$ , suministrando así un total de  $53.58 W$  a la batería. Por otro lado, cuando la radiación solar se incrementa a  $950 W/m^2$ , se evidencia una conversión de energía desde los SPV al SCBBC con una tensión de salida de  $17.1 V$  y una corriente de  $6.8 A$ , generando una potencia de  $116.2 W$ . Posteriormente, esta energía se transfiere desde el SCBBC a la batería, que alcanza una tensión de carga de  $24.7 V$  con una corriente de  $4.45 A$ , entregando así un total de  $110 W$  a la batería. Estos datos demuestran que el SCBBC aumenta la tensión de salida de los paneles SPV, lo que permite una carga más eficiente de la batería, especialmente cuando la radiación solar es más intensa. Esto es fundamental en sistemas de energía solar, dado que garantiza que la energía generada por los paneles se capture y almacene de manera efectiva para su uso posterior, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia energética [21].

En 2019, H. Sharma y colaboradores presentan el análisis y diseño de un convertidor DC-DC tipo Buck para nodos de redes inalámbricas de sensores alimentados por energía solar, las redes inalámbricas de sensores a menudo enfrentan restricciones en la disponibilidad de energía, este artículo propone la implementación de un convertidor reductor de energía solar DC-DC para los nodos de la red WSN. Para lograr este objetivo, los autores proponen y analizan diferentes topologías de convertidores DC-DC y evalúan su eficiencia y rendimiento en diferentes condiciones [22]. El convertidor Buck se emplea para ajustar la tensión excesiva generada en el panel solar.

La Figura 4 del artículo muestra el modelo de simulación en MATLAB/Simulink del convertidor DC-DC Buck alimentado por energía solar con una batería recargable. El modelo se utiliza para analizar el rendimiento del convertidor y afectación de los factores como: inductancia, capacitancia y el ciclo de trabajo, en la reducción de las fluctuaciones de la tensión de salida. Además, muestra los bloques de simulación utilizados en el modelo, incluyendo el panel solar, el convertidor Buck, la batería y la carga. El modelo se utiliza para simular el comportamiento del convertidor en diferentes condiciones, como la variación en la capacitancia y la inductancia, y se analizan dichos parámetros en función de la eficiencia y la reducción de las fluctuaciones de tensión de salida.

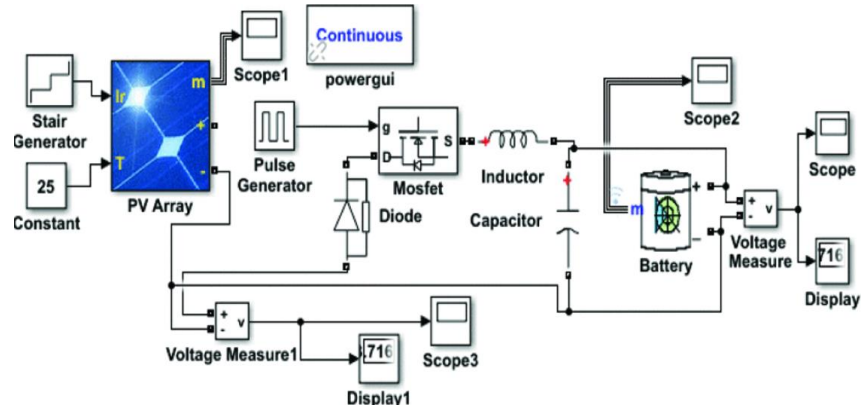


Figura 4: Modelo MATLAB/SIMULINK de convertidor Buck con batería recargable (carga) [22].

En 2020 Hegazy y colaboradores, diseñaron un sistema de recolección de energía solar para mejorar el rendimiento y dar solución a la carga de la batería en una red inalámbrica de sensores, el diseño se basa en una topología de un sistema de energía solar fotovoltaica que incluye paneles solares de baja potencia, un controlador de carga, una batería y un convertidor DC-DC de refuerzo. El objetivo de este diseño es un convertidor elevador DC-DC diferente con el propósito de optimizar la recolección de energía, además, se presentan casos de estudio que abordan el tipo solar fotovoltaico y el modelado y simulación de convertidores DC-DC Boost utilizando MATLAB SIMULINK.

Se presenta un caso de estudio de un panel solar de 9 W y un modelo de convertidor elevador DC-DC, y discute dos algoritmos de control, PWM y MPPT, evidenciando mayor eficiencia en el controlador MPPT [23]. El estudio introduce un convertidor elevador DC-DC diferente para mejorar el rendimiento del sistema de paneles solares para la recolección de energía, también proporciona información sobre la modelización y optimización de sistemas de recolección de energía solar para redes inalámbricas de sensores autoalimentados. Se modeló y simuló utilizando MATLAB SIMULINK para evaluar su eficiencia y capacidad de aumentar la tensión de salida del panel solar. En la Figura 5 se observan las características de potencia-tensión (PV) del panel solar con variaciones en el nivel de irradiación, también se muestra la relación entre la potencia y la tensión de salida del panel solar. Se puede observar que a medida que aumenta el nivel de irradiación, la potencia de salida del panel solar también aumenta, y la curva de potencia-tensión se desplaza hacia la derecha. Además, la figura muestra que la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) se incrementa al mismo tiempo que el nivel de irradiación.

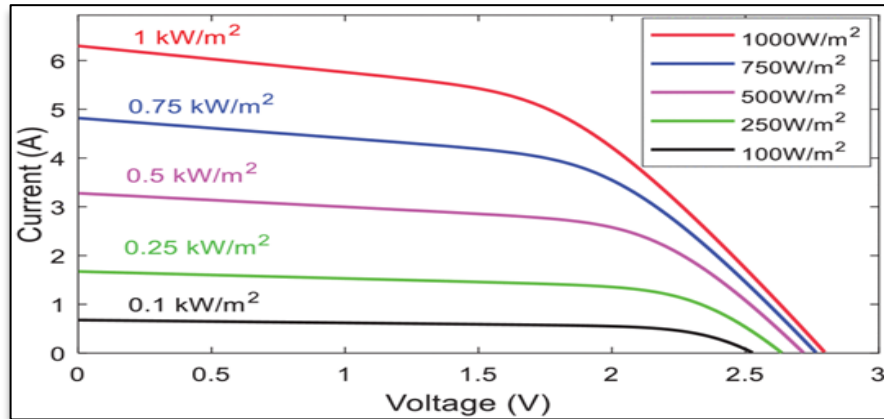


Figura 5: Características de corriente-tensión (IV) de la energía solar fotovoltaica con temperatura a irradiación fija [23].

Del Río, realizó en 2018 el diseño de un sistema de recolección de energía, con panel solar fotovoltaico junto con baterías recargables para lograr la autonomía energética de una placa NodeMCU v1.0/V3, dispositivo usado en redes WSN que posee un módulo Wi-Fi ESP-12E.

El artículo se centra en la utilización de paneles solares como fuente de energía para alimentar los nodos de una red WSN. El autor presenta diferentes técnicas de diseño electrónico para la implementación de un sistema de alimentación solar para los nodos de la WSN. En particular, se analizan las diferentes topologías de convertidor DC-DC que pueden ser utilizados para maximizar la eficiencia energética del sistema, además de realizar el modelado y las curvas características del panel solar, se emplea un circuito de control PWM para regular su funcionamiento. Posteriormente, se realizan mediciones precisas utilizando instrumentos como osciloscopios y multímetros para determinar la corriente promedio que requiere el NodeMCU. Con esta información, se puede diseñar el sistema de energía que incluye el panel solar y las baterías necesarias para su almacenamiento y distribución [24].

En este apartado, se ha evidenciado el suministro energético aplicado en redes inalámbricas de sensores, para respaldar la operación, así como la eficiencia en la distribución y el almacenamiento de energía. Por otra parte, para lograr una gestión precisa y eficiente de los cultivos de café, es imperativo sumergirse en el mundo de la instrumentación, se indaga bibliografía y se busca brindar un panorama general con respecto a los avances más recientes en el uso de sensores y evaluar su potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos agrícolas.

Durante las últimas décadas, el impacto de la tecnología en diversos ámbitos, que ha generado la optimización de los procesos y una notable mejora en la eficiencia productiva. Esta tendencia se ha observado tanto en el ámbito empresarial como en otros sectores de la sociedad, economía, agricultura y educación las que han sido impulsada por el rápido auge de la tecnología. Además, el uso de sensores y tecnologías de monitoreo en tiempo real, tales como los sensores de humedad, temperatura,  $CO_2$  y luminosidad, han permitido obtener información detallada y precisa del entorno en el que se desarrollan los cultivos de café.

En septiembre de 2014 W. Yitong y colaboradores describen el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo de redes inalámbricas de sensores para la agricultura de precisión. El objetivo es un sistema de monitoreo de varios parámetros del entorno de crecimiento de los cultivos, incluyendo la temperatura, humedad del aire, la velocidad y dirección del viento junto con la materia orgánica, temperatura y humedad del suelo [25]. Un uso adecuado de los recursos se ejerce mediante, el monitoreo de humedad y temperatura se llevó a cabo utilizando el sensor SHT11, el cual proporciona una salida de señal digital periódica calibrada mediante un proceso de integración y está compuesto por un elemento de polimerización capacitivo de humedad, emplea un termistor de óxido de metal semiconductor para medir la temperatura junto con un convertidor A/D de 14 bits y un circuito de interfaz serial en el mismo chip. La precisión de medición de humedad de este sensor es del 4.5 % RH, mientras que la precisión de medición de temperatura es de  $\pm 0.5$  %, la tensión de alimentación del sensor es de 2.4 V – 5.5 V [25] [26].

El sensor de luz utilizado en este sistema es el BH1750FVI, es un sensor de tipo digital que emplea una interfaz de bus serie de dos líneas, el rango de tensión es de 2.4 V – 3.6 V. El valor típico de sensibilidad de longitud de onda máxima es de 560 nm, el rango de variación de error mínimo es del 20 % [25] [27].

En el año 2022 Hurtado, implementó un sistema de una red inalámbrica de sensores para monitoreo de cultivo de café, en el cual resalta la importancia de los siguientes parámetros para el desarrollo de las plantas: humedad, temperatura, pH, conductividad, macronutrientes del suelo, temperatura ambiente, humedad ambiente y precipitaciones, lo que se refiere a la medición y detección de la lluvia en el cultivo de café. La comunicación se realizó a través de tecnología IOT y protocolo WIFI (802.11) basado en una ESP8266, permitiendo así a la red inalámbrica de sensores recopilar datos de manera automatizada y remota, lo que facilita el seguimiento continuo y la generación de información detallada, brindando a los caficultores datos de manera precisa y completa de las condiciones de los

cultivos, lo que les permitiría tomar decisiones oportunas para mejorar su producción y rentabilidad [28].

En el año 2018 Juan Abad y colaboradores, implementan un sistema de monitoreo de variables climáticas que afectan al cultivo de café, basada en protocolos ZIGBEE y GPRS, con la finalidad de desarrollar un sistema de bajo costo y autosustentable energéticamente. En la Figura 6 se evidencia el diagrama de conexión, destacando la importancia de los siguientes parámetros: humedad y precipitación, potencial de hidrogeno (pH), luminosidad, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), todo conectado a un sistema WSN con estándares IEEE 802.15.4 o IEEE 802.11(WI-FI), con suministro a partir de energía solar fotovoltaica [29].

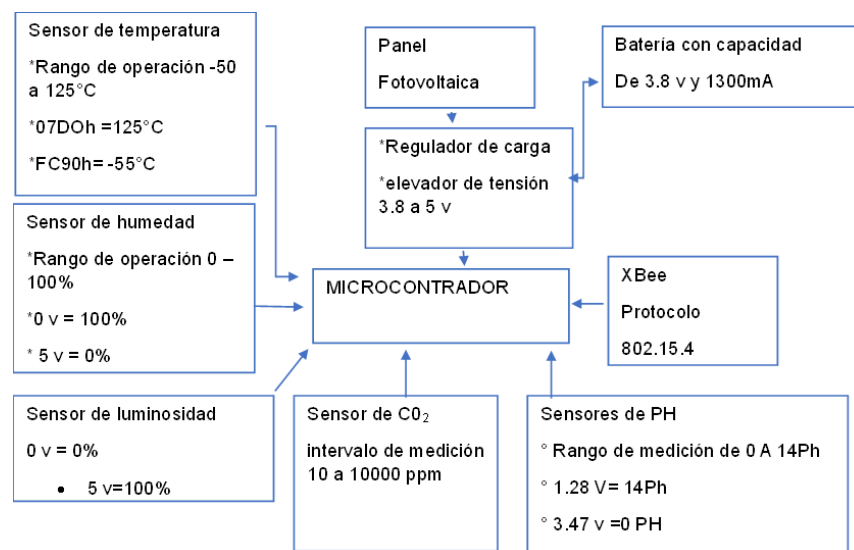


Figura 6: Diagrama de la conexión [29].

En el año 2016 Sofia Abad, implementa un sistema de seguimiento de parámetros ambientales en plantaciones de café, se basa en medir los parámetros del ambiente (temperatura y humedad relativa, radiación solar y lluvia) y parámetros del suelo (temperatura y humedad del suelo en 3 diferentes niveles). Además, el sistema está conformado por una estación meteorológica equipada con un Datalogger modelo CR1000 encargado de la gestión y almacenamiento de los datos que se adquieren de los sensores. Adicionalmente, cuenta con un sistema de comunicación el cual utiliza un Modem Enfora GSM 318 configurado a base de comandos AT, conectado al Datalogger para así enviar datos por medio de un correo electrónico. Por último, su alimentación está basada en un panel solar (energía fotovoltaica) que almacena energía en una batería de 12 Vdc a 7Ah [30].

En el año 2014 S. M. Saad y demás colaboradores, elaboraron un sistema de monitoreo de invernaderos en tiempo real para frutos de mango, este artículo presenta el uso de redes inalámbricas de sensores aplicadas en el monitoreo de temperatura, la humedad y los niveles de dióxido de carbono [31]. Dicha red se compuso de los dispositivos de medición: sensor de gas TGS4161 se utiliza para la detección de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) este dispositivo emplea un elemento de detección de dióxido de estaño ( $SnO_2$ ), que responde a las moléculas de gas. Debido a alta sensibilidad y respuesta, este sensor se emplea en hogares, oficinas y fábricas, el dispositivo requiere una tensión de  $5 V$  [31]. Para el sensor de temperatura y humedad se utilizó el módulo Carlo Gavazzi, el cual mide la temperatura entre los rangos de  $0\text{ }^\circ C - 50\text{ }^\circ C$ , con una precisión de aproximadamente  $\pm 0.3\text{ }^\circ C$ , incorpora detección de humedad relativa (RH) del  $10\% - 90\%$  con precisión  $\pm 0.3\%$ . La salida analógica de temperatura y humedad es de  $0 V - 10 V$ . Por otra parte, la gestión de monitoreo dentro del invernadero es mediante Zigbee debido a su menor consumo de energía.

En el año 2018 W. M. Nooriman y demás autores desarrollaron una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de temperatura y humedad del suelo aplicado en cultivos de Mango Harumanis, dicho sistema emplea dispositivos de temperatura y humedad con el chip CMOS SHT75. Los sensores integran procesamiento de señales y proporcionan una salida digital totalmente calibrada en el sensor de humedad y temperatura, el dispositivo contiene un amplificador, un convertidor ADC, una memoria OTP y una interfaz digital. Ambos sensores están perfectamente acoplados a un convertidor analógico digital de 14 bits que transmite datos al microcontrolador a través de la interfaz serial I2C. El sensor de humedad del suelo SN-M114, se utiliza para medir el nivel de humedad del suelo basándose en la medición de la resistividad del suelo, dicho dispositivo mide la cantidad de humedad presente en el suelo que lo rodea [32].

En el año 2018 D. Shinde y colaboradores elaboran un sistema de control y monitoreo de variaciones ambientales basado en IOT aplicado en invernadero implementando red WSN, el propósito de este sistema es diseñar un circuito basado en la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 para monitorear continuamente los valores de humedad del suelo, humedad, temperatura y luz del ambiente que varían y se controlan para obtener el máximo desarrollo de la planta. Dicho sistema emplea el sensor de temperatura LM35, el cual mide desde  $-55\text{ }^\circ C - 150\text{ }^\circ C$  la salida de tensión del LM35 aumenta  $10\text{ mV} \times\text{ }^\circ C$ . El LM35 funciona con una fuente de alimentación de  $5 V$  y  $60\text{ }\mu A$  y posee una precisión  $\pm 0.5\text{ }^\circ C$ . En cuanto al sensor de humedad y luminosidad emplean un módulo sensor de humedad del suelo resistivo

higrómetro LM393 tiene como características de 3.3 V – 5 V de tensión de entrada y una corriente de 35 mA [33]. Por consiguiente, el sensor de luminosidad se emplea un LDR, este dispositivo es de limitada precisión en condiciones de luz extremadamente baja o alta, lo que puede dificultar la precisión de la medición en entornos con cambios drásticos en la intensidad lumínica.

La revisión bibliográfica vista anteriormente ante el tema de sensores de bajo costo que aprovechan las ventajas de las redes inalámbricas de sensores para garantizar una mayor confiabilidad de medidas, además, se exploraron soluciones de suministro energético mediante captación de fuentes de energía del ambiente. Estas investigaciones buscan optimizar la eficiencia y la durabilidad de los dispositivos, lo que resulta prometedor en la implementación de sistemas de supervisión y control en diversas aplicaciones.

## **1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

En esta sección se presentan definiciones y conceptos relacionados a elementos de suma importancia al momento de la elaboración del proyecto.

### **1.2.1.Red inalámbrica de sensores (WSN)**

Una red inalámbrica de sensores es un conjunto de nodos (sensores), que están interconectados entre sí, con el fin de transmitir señales de los eventos que hacen seguimiento o controlan y de la información relacionada con los aspectos técnicos de la misma, comparten uno o varios canales para la transmisión de datos, implementando diferentes tecnologías y protocolos de tipo inalámbrico con un fin específico y definido por el usuario. Un aspecto adicional para considerar es la definición de este tipo de redes, el acrónimo que se utiliza para referirse a ellas y que viene de sus siglas en inglés, que corresponden a WSN, que significan Wireless Sensor Network [34].

### **1.2.2.Convertidores DC-DC**

En muchas aplicaciones industriales se requiere convertir una tensión DC fija a una tensión DC variable, este proceso es posible mediante un dispositivo conocido como convertidor DC-DC. Un convertidor se puede considerar como equivalente de DC a un transformador de AC con una relación de vueltas continuamente variable. Al igual que un transformador, se puede utilizar para reducir o elevar una fuente de voltaje de DC [35]; este dispositivo funciona mediante la conmutación de la entrada de tensión para regular la corriente en la salida del dispositivo por medio

del ciclo de trabajo (D) el cual es una medida de tiempo en que el interruptor (transistor) está encendido en relación con el período total de conmutación.

El ciclo de trabajo se controla típicamente mediante técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) en convertidores regulados, el PWM controla el interruptor debe permanecer encendido y apagado durante cada ciclo de conmutación para mantener la salida dentro de los límites deseados. Este control de ciclo de trabajo permite regular la tensión de salida incluso cuando las condiciones de carga y entrada varían [36] [37].

Existen diferentes tipos de convertidores DC-DC que se pueden clasificar por su topología, algunas de estas topologías son las siguientes [35]:

- Convertidor Buck: Se emplea para transformar una tensión entrante DC en una tensión de salida DC a un valor menor que la entrada, mientras mantiene la corriente constante.
- Convertidor Boost: Se emplea para aumentar la tensión de entrada DC y obtener una tensión de salida DC mayor que la entrada.
- Convertidor Buck-Boost: puede aumentar o reducir la tensión de entrada, según el nivel de salida deseado.
- Convertidor Flyback: utiliza un transformador para proporcionar aislamiento galvánico entre la entrada y la salida del convertidor. Es la versión aislada del convertidor Buck-Boost.
- Convertidor SEPIC: combina las topologías de Buck y Boost para lograr una regulación de tensión independiente de la polaridad de la tensión de entrada.

### **1.2.3. Batería en el nodo sensor**

Las baterías son dispositivos importantes en los sistemas de almacenamiento de energía porque brindan la independencia necesaria para que los sistemas electrónicos funcionen sin problemas. Las baterías solares tienen una mayor profundidad de descarga (PD) que las baterías convencionales que se usan en otros sistemas [38]. Esta característica les da una ventaja significativa en términos de versatilidad y resistencia, porque pueden soportar descargas más profundas sin sufrir daños significativos. En aplicaciones como los nodos de sensores, donde la autonomía energética es crucial [39].

### **1.2.4. Cosechadores o recolectores de energía**

La creciente demanda mundial de electricidad ha llevado a la exploración de recursos energéticos renovables para abastecer las necesidades de redes inalámbricas de sensores (WSN) inteligentes. Los recursos energéticos

convencionales han demostrado ser insuficientes para satisfacer esta demanda, lo que ha impulsado el interés en sistemas de recolección sostenible y verde. Entre estas alternativas, la energía solar se destaca por su bajo costo y su impacto positivo en el medio ambiente. Para maximizar los beneficios de la energía solar en las WSN, es crucial comprender las características y el rendimiento de los paneles solares en diferentes condiciones [40]. En consecuencia, se ha dado una considerable atención a la aplicación de estos sistemas de recolección de energía en las WSN, brindándoles autosuficiencia energética [41].

## 2. DISEÑO METODOLÓGICO

---

En esta sección se aplican diversas herramientas, estrategias, técnicas junto a procedimientos requeridos con la finalidad de cumplir el objetivo principal del proyecto con ello dar una solución a la problemática planteada. El desarrollo se efectúa trabajando individualmente cada objetivo específico detallando las actividades necesarias para su total cumplimiento. Las fases para el desarrollo del proyecto se observan en la Figura 7.

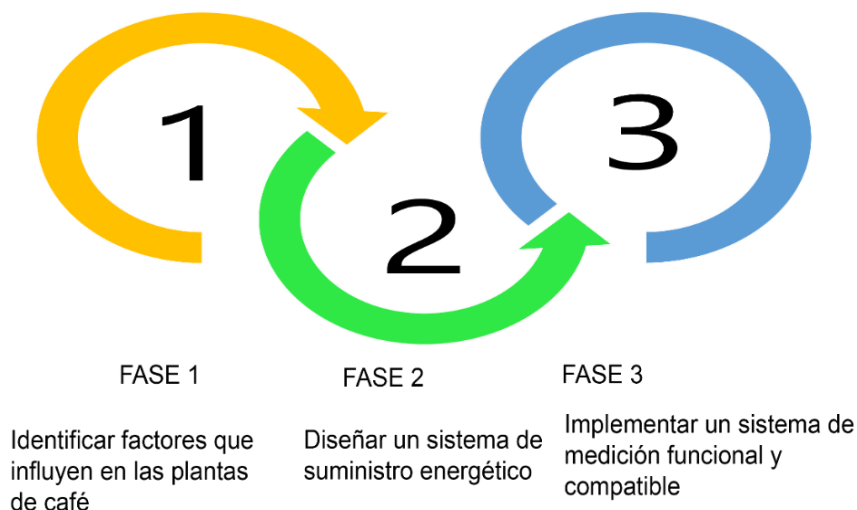


Figura 7: Fases de desarrollo.

En la fase inicial se definió el tipo de variables influyentes en desarrollo de las plantas de café, por medio de una búsqueda exhaustiva la cual permitió definir dichos parámetros, para así tener una recopilación de información con relación al monitoreo de las variables. Una vez identificado los factores de mayor influencia en las plantas de café, en la segunda fase, se llevó a cabo el diseño del sistema energético con energía solar fotovoltaica, teniendo en cuenta la información encontrada en la fase 1, permitiendo incorporar las necesidades encontradas al sistema de suministro e instrumentación, seleccionando dispositivos de bajo consumo y alta eficiencia.

Finalmente, en la última fase se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar el comportamiento del sistema, tanto en los sensores como el convertidor DC-DC, con el fin de identificar fallos para tomar acciones correctivas para así, obtener un correcto funcionamiento del sistema. Por otra parte, una vez finalizada cada una de las fases se desarrolla un manual de usuarios, con el fin de capacitar a los caficultores permitiendo así una fácil manipulación del sistema.

## **3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES Y SUMINISTRO, INTEGRADOS EN UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES.**

En este capítulo se proporciona una descripción detallada del desarrollo del proyecto y se presentan los componentes necesarios para su ejecución. Este proceso se divide en cuatro fases de desarrollo: análisis, diseño, implementación y pruebas.

### **3.1. ANÁLISIS**

En esta sección se describe en detalle las condiciones a las cuales el sistema de instrumentación y suministro energético debe satisfacer para cumplir con cada uno de los objetivos planteados. Se detallan los procesos de los dispositivos y elementos necesarios para el sistema, para asegurar la confiabilidad de los datos y la eficiencia energética.

#### **3.1.1. Factores influyentes**

La producción de café juega un papel fundamental en el desarrollo económico de Colombia, siendo uno de los productos líderes en el mercado nacional e internacional, con una producción anual de aproximadamente 14 millones de sacos [42]. Sin embargo, los organismos cafetaleros han expresado su preocupación por las amenazas que representa el cambio climático para los sistemas de producción de café. Estos cambios incluyen variaciones de temperatura, luz solar y humedad atmosférica [43], que dificultan la detección de parámetros clave.

Aún hoy, en algunas zonas productoras de café, diversas actividades como riego, fertilización, supervisión y cosecha aún se realizan de forma tradicional sin tomar en cuenta ninguna variable ambiental que pueda afectar directamente el crecimiento y la calidad del café. A continuación, se analiza de forma concreta las diferentes variables mencionadas con anterioridad, permitiendo conocer su comportamiento y especificaciones para llevar a cabo un monitoreo de variables eficiente.

##### **3.1.1.1. Temperatura en el cultivo de café**

Esta variable influye directamente en las tasas de crecimiento, en el desarrollo del fruto y el número de botones florales. Por lo tanto, el aumento o disminución de esta variable, puede conllevar aumentos o disminuciones en tiempos para lograr su máximo desarrollo foliar [8] [43].

Del mismo modo la temperatura óptima varía según su nivel o etapa de crecimiento, que generalmente se requieren rangos entre ( $18^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C}$ ) y un máximo de  $30^{\circ}\text{C}$  [44] [45]. Por consiguiente, si se tienen valores fuera de este rango se tendrán efectos negativos en calidad y rendimiento del cultivo [45]. En lo cual la región de Sumapaz y específicamente en Fusagasugá, el clima se divide en cuatro categorías diferentes: cálido ( $20^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$ ), templado ( $13^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C}$ ), frío ( $9^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}$ ) y subpáramo ( $0^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$ ) [45]. En el caso de la unidad agroambiental “La Esperanza”, el clima es cálido, con temperaturas promedio entre ( $20^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$ ) a una altitud de 1.557 metros sobre el nivel del mar.

Del mismo modo, no se recomienda establecer sistemas de cultivo a pleno sol para las variedades cultivadas en Colombia cuando la temperatura ambiente supera los  $22^{\circ}\text{C}$ . En este punto, se hace necesario implementar sistemas agroforestales, que son más adecuados en altitudes específicas: por debajo de 1.200 metros en la región andina, por debajo de 1.000 metros en la zona Atlántica y por debajo de 900 metros en las regiones Oriental y Pacífica [44]. En la Figura 8 se observa cómo las instalaciones de la Unidad Agroambiental “La Esperanza”, cuenta con sistemas agroforestales permitiendo regular y proteger los cultivos de fuertes oleadas de calor.



Figura 8: Zona de cafetales en la Unidad Agroambiental “La Esperanza”.

### **3.1.1.2. Radiación solar en el cultivo de café**

En cuanto al brillo solar, este factor puede influir en la saturación lumínica en los cultivos, especialmente cuando se combina con altas temperaturas, lo que puede dar lugar a procesos de fotorrespiración (respiración durante el día) y reducción en la fotosíntesis, lo que, en última instancia, afecta el rendimiento [46]; considerando este factor que es fundamental en el desarrollo y crecimiento óptimo del cultivo, en vista que esta proporciona la energía necesaria para que se generen y sinteticen los nutrientes y elementos químicos que la planta necesita para el desarrollo. En el caso específico de los cultivos de café, este parámetro es adecuado y fundamental para la formación de flores y la maduración de los frutos [47].

En la región Andina, que conforma Cundinamarca y la región del Sumapaz, según el IDEAM, gran fracción de esta zona el comportamiento del brillo solar durante el año tiene características similares, con máximos en diciembre-enero-febrero y julio-agosto y mínimos en abril-mayo y octubre-noviembre. En los periodos de máxima insolación, las magnitudes diarias oscilan alrededor de 6 horas-sol/día. En los periodos de mínima la duración de la insolación puede llegar a 4 horas-sol/día, en promedio. Estos valores guardan estrecha relación con el régimen de lluvia predominante en cada zona, aumentando ligeramente en las zonas más secas como el fondo de los valles interandinos y disminuyendo en zonas de ladera con altas precipitaciones. Sin embargo, el tipo de distribución durante el año se conserva, independientemente de la magnitud de los valores medios [48]. En ese sentido, los cultivos que son expuestos a una radiación excesiva pueden sufrir de estrés térmico y con ello quemaduras en las hojas, afectando de forma directa la producción. Por lo contrario, la ausencia de radiación solar puede ocasionar baja tasa de crecimiento y poca absorción de nutrientes [49].

A partir de lo mencionado con anterioridad los agricultores perciben las zonas que reciben una luminosidad mayor o menor, lo cual permite planificar estratégicamente la ubicación de cultivos nuevos o emergentes y seleccionar variedades de café más adecuadas, también definir distancias de sombrío generada por árboles [49]. En la zona geográfica de Sumapaz y más concretamente en el municipio de Fusagasugá, se registra un promedio significativo de 151 horas de radiación solar al mes [50]. Este dato es fundamental para los estudios y análisis relacionados con la agricultura y con ello la caficultura de la zona teniendo así un aproximado de 4.8 horas-sol/día. Por esta razón, la unidad agroambiental “La Esperanza” cuenta con una posición geográfica adecuada, para el desarrollo óptimo de los cultivos de café. Y adicionalmente con una ventaja significativa en la distribución de los cultivos, dado que se divide en dos sectores: uno expuesto directamente al sol y otro que cuenta con sombrío, como se puede apreciar en la Figura 9.



Figura 9: Zona de cafetales en la Unidad Agroambiental “La Esperanza” percepción de luminosidad.

### 3.1.1.3. Humedad en el cultivo de café

La disponibilidad de agua es un factor principal que determina si es posible llevar a cabo el proceso de siembra del cultivo. En Colombia, donde la caficultura se realiza sin riego, esta disponibilidad hídrica se ve influenciada por la distribución de las precipitaciones y la capacidad del suelo para retener agua, cuya capacidad de retención de agua superior a 80 mm pueden soportar condiciones secas alrededor de un mes, sin afectar la producción. Sin embargo, un suelo menor de 80 mm requiere al menos 40 mm de lluvia por mes [42]. El crecimiento, el desarrollo y el transporte de los nutrientes de los cultivos dependen del agua presente en el suelo [51], por lo tanto, la cantidad de lluvia disponible es esencial para los cultivos porque proporciona condiciones favorables para su crecimiento y nutrición.

Considerando que la cantidad de humedad inmersa en los cultivos puede cambiar dependiendo de las condiciones del clima y las características de la zona, dichas particularidades generan un efecto de gran relevancia ante el crecimiento y desarrollo del cultivo, teniendo en cuenta que los niveles de humedad llegan a generar afectaciones importantes en la salud y rendimiento, es de importancia tomar medidas precisas para mantener los parámetros idóneos. Es recomendable mantener el suelo del cultivo en un rango de humedad entre (60 % – 80 %). Esto implica ejercer decisiones correctivas y preventivas para garantizar que los niveles de humedad se encuentren dentro de este margen [47]. De la misma manera en la región de Sumapaz, específicamente en Fusagasugá, se presenta una humedad relativa en un rango de (60 % – 85 %). No obstante, puede variar a lo largo del año [50].

#### **3.1.1.4. Dióxido de carbono en el cultivo de café**

Los elementos como el carbono, hidrógeno y oxígeno no se consideran nutrimentos minerales, pero son esenciales ya que se utilizan para formar los componentes orgánicos cruciales para la supervivencia de la planta, como azúcares, grasas, ácidos orgánicos, aminoácidos y proteínas, entre otros. Estos elementos se incorporan a la planta a través del proceso de fotosíntesis, que principalmente tiene lugar en las hojas. En este proceso, la planta emplea la energía de la luz solar y el agua ( $H_2O$ ) para convertir el dióxido de carbono  $CO_2$  en carbohidratos. Estos carbohidratos, en forma de azúcares, proporcionan la energía metabólica necesaria para el crecimiento y desarrollo de la planta. La planta de café (genotipo) transforma  $CO_2$ , agua, energía solar y minerales, en cerezas de café [52]. El proceso de intercambio de gases en los frutos se realiza a través de las estomas y está influenciado de manera positiva por factores como su tamaño, la cantidad de clorofila presente, los niveles de dióxido de carbono, la intensidad de la luz y la limitada conductividad a través de la epidermis [53].

Uno de los desafíos ambientales más significativos que ha impactado el planeta es el fenómeno del calentamiento global, el cual se origina a causa de las elevadas concentraciones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Esto ha resultado en la afectación de cultivos como el café debido al cambio climático provocado por los gases de efecto invernadero (GEI) [53] [54].

#### **3.1.2. Características de implementación**

La identificación de los factores que influyen en la respuesta fisiológica de las plantas de café es aspecto fundamental, la implementación de sistemas de monitoreo en los cultivos de café permite la medición de los parámetros de cada variable edafoclimática.

Partiendo de la revisión expuesta y las condiciones del cultivo de café en la Unidad Agroambiental La Esperanza la implementación debe garantizar lo siguiente:

1. Cobertura: la ubicación estratégica de los sensores debe garantizar la cobertura de todas las áreas relevantes del cultivo de café, teniendo en cuenta que la unidad agroambiental posee un área total de  $3750 m^2$ , en la visita de campo se identificaron zonas con diferentes condiciones de sombrero en las secciones de cultivo, además estos cultivos son de tipo de siembra de hileras con una distancia de siembra de  $1.8 m - 2 m$  entre cada plantación, con esta información permite identificar las áreas de distribución de los nodos y así tener

diversos puntos de medición, teniendo en cuenta la geografía del terreno como se ilustra en la Figura 10.



Figura 10: Cobertura de los cultivos.

2. Eficiencia energética: en la unidad agroambiental, especialmente en la zona central, la extensión de los cultivos abarca un rango entre 100 y 200 metros, como se muestra en Figura 11. Considerando estas condiciones y la dificultad de proporcionar una fuente de energía convencional estable a esta distancia, para lograrlo, es fundamental que los componentes de instrumentación y comunicación tengan un bajo consumo energético, con el objetivo de ampliar la autonomía del sistema.

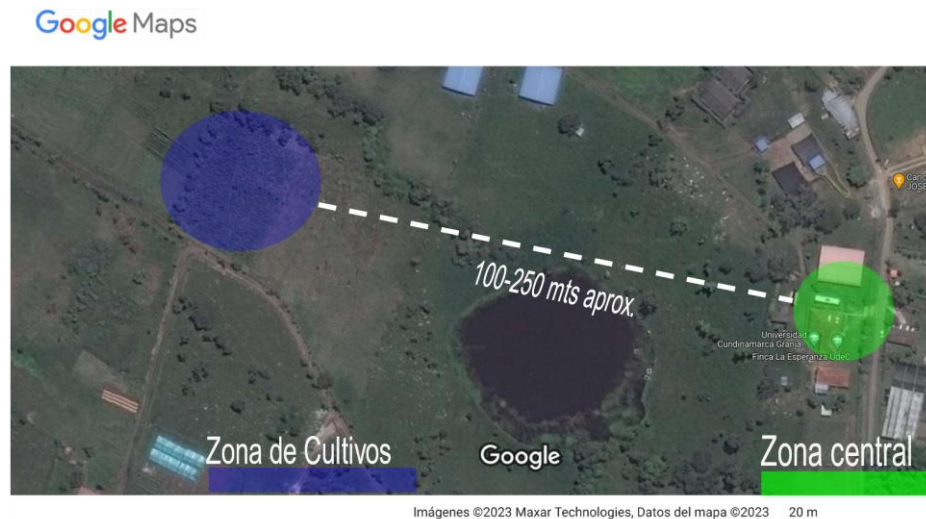


Figura 11: Distancia zona central a los cultivos [55].

3. Fiabilidad: El sistema debe ser confiable, minimizando la pérdida de datos y los fallos en la medición.

## 3.2. DISEÑO

Una vez identificados los factores que influyen en la respuesta fisiológica de las plantas de café se determinan los componentes electrónicos que harán parte del nodo sensor. Siguiendo el proceso de desarrollo el cual se evidencia en la Figura 12.

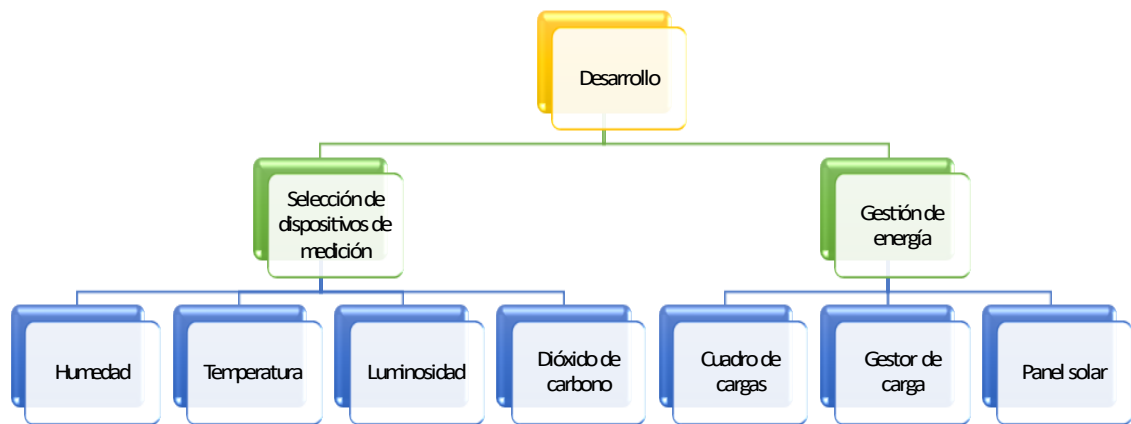


Figura 12: Proceso de desarrollo.

### 3.2.1. Selección de sensores

A continuación, se presentan varios dispositivos que pueden medir las variables mencionadas con anterioridad. Estos dispositivos serán evaluados en comparación con otros, que cuentan con funciones y características similares, esto permitirá seleccionar los dispositivos más adecuados para el sistema.

#### 3.2.1.1. Sensores de temperatura

La selección de los dispositivos se hace teniendo en cuenta la eficiencia y el bajo consumo de los diferentes sensores, de los cuales se comparan 5 dispositivos siendo seleccionados por diferentes factores como: rango de medida, precisión, tensión y tipo de comunicación o interfaz como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4: Especificaciones de sensores de temperatura.

Dispositivo	Rango de medición (°C)	Precisión	Tensión de alimentación (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Interfaz
BMP-180	-40 – 85	± 0.2 %	1.8 – 3.6	0.07	0.000231	I2C
SHT40	-40 – 125	± 0.2 %	3 - 5	0.00035	2.8E-06	I2C
NTC	-40 – 120	± 5 %	5	0.5	0.0025	DAC
DS18B20	-10 – 85	± 0.5 %	3 – 5.5	0.1 - 0.15	-	1-Wire
MCP9808	-40 - 125	± 0.25 %	2.7 – 5.5	0.2	-	I2C

De estos, se seleccionaron dos dispositivos: BMP-180 y SHT40, debido a su alta precisión, bajo consumo de energía y tamaño compacto, lo que los hace ideales para la implementación del sistema, del cual se opta por utilizar el BMP-180 debido a su fácil adquisición y bajo costo.

### 3.2.1.2. Sensor de humedad

En la siguiente selección se toma como referencia, el rango de medición, precisión, tensión y aún más importante su capacidad para soportar tiempo en la intemperie, como se puede observar en la Tabla 5

Tabla 5: Especificaciones de sensores de humedad.

Dispositivo	Rango de medición (%)	Precisión	Tensión de alimentación (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Interfaz	Soporta Intemperie
HD38	0 - 100	± 2 %	3.3 - 12	30	0.099	DAC	si
SHT31	0 - 100	± 2 %	3.3 - 5	1.5	0.00495	I2C	si
DHT22	0 - 100	± 2 %	3.3 - 6	2.5	-	DAC	no
SI7021	0 - 100	± 3 %	3 - 5	0.015	-	I2C	no
HTU21D	0 - 100	± 2 %	1.5 - 3.6	0.5	2.7E-06	I2C	no

Con lo mencionado anteriormente, se seleccionaron los siguientes dispositivos: HD38 y SHT31. Sin embargo, se decide utilizar el HD38 considerando que este cuenta con una sonda de dos terminales resistentes al oxido, permitiendo medir directamente la humedad del suelo. Por lo contrario, el SHT31 es más enfocado en la medición de la humedad relativa.

### 3.2.1.3. Sensor de luminosidad

En la Tabla 6 se evidencian los dispositivos de medición de luminosidad, seleccionados por su bajo consumo y rangos de medición en luxes.

Tabla 6: Especificaciones de sensores de luminosidad.

Dispositivo	Rango de medición (lux)	Precisión	Tensión de alimentación (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Interfaz
GY-30	1 - 65535	± 5 %	2.4 - 3.6	1.2	0.26	I2C - DAC
OPT3001	0.01 - 80000	± 2 %	1.6 - 3.6	0.1	-	I2C - DAC

La elección del sensor se argumenta en la fácil adquisición y bajo costo. Dado que los dos dispositivos son óptimos para un correcto funcionamiento del sistema, pero por dichas razones se opta por el uso del sensor GY-30.

### 3.2.1.4. Sensor de CO<sub>2</sub>

En la Tabla 7 se exponen 3 posibles opciones para la selección del sensor de CO<sub>2</sub>, de la cual se recomienda el uso del sensor NDIR CO<sub>2</sub> por factores como: bajo consumo energético, tipos de comunicación o interfaz y rangos de medición. Debido a que este variable puede llegar a variar en el peor de los casos por debajo de 400ppm, permitiendo descartar los otros dispositivos. Sin embargo, este no se puede poner a prueba dado que no se cuenta con ningún dispositivo de este tipo.

Tabla 7: Especificaciones de sensores de CO<sub>2</sub>

Dispositivo	Rango de medición (ppm)	Precisión	Tensión de alimentación (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Interfaz
NDIR CO <sub>2</sub>	0 – 5000	± 3 %	3.3 - 5	19-75	0.2475	UART o I2C
CCS811	400 - 8192	± 5 %	3.3 – 5	30	0.60	I2C
SCD41	400 - 2000	± 5 %	2.4 – 5.5	17	-	I2C

### 3.2.2. Convertidor

En esta sección se describe los posibles dispositivos que harán parte del del convertidor DC-DC.

#### 3.2.2.1. Circuitos integrados para el convertidor DC-DC

En este apartado se muestra la selección de posibles circuitos integrados (CI) o reguladores DC-DC para la conversión de energía eléctrica para la red de sensores WSN con sus diferentes características como se muestra en Tabla 8, permitiendo abarcar más de fondo que dispositivo tienen mejores características para un convertidor eficiente.

Tabla 8: Características de circuitos integrados.

Características	IP5306	XL7015	RP118x Series	TPS7A10	LM2596	MC34063
Rango de tensión de entrada (V)	4.4 -6.5	5 – 80	2.5 - 5.5	0.7 - 3.3	3.7 - 40	4-40
Rango de tensión de salida (V)	2.8 -5.2	1.25 -20	1.5 - 5.0	1.4-5.5	1.23 - 37	1.25-40
Rango de corriente de salida	2.4 A	0.8 A (Max)	10 mA – 60 mA	605 mA	3 A	1.5 A
Eficiencia	80 %	86 %	94 %	94 %	73- 98 %	83.7 %
Corriente de operación en modo Hibernación	500 mA	10-20 $\mu$ A	100 nA	4.3 $\mu$ A	80 $\mu$ A	-

Teniendo en cuenta la información presentada con anterioridad, se selecciona el LM2596 debido a que es un regulador de tensión con características adecuadas para un sin número de aplicaciones. Siendo capaz de alimentar dispositivos con un alto consumo de hasta 40 V a 3 A, con una salida de tensión ajustable que permite adaptarse a las necesidades del usuario con una alta eficiencia energética, además el dispositivo cuenta con un sistema de ON/OFF haciéndolo adecuado para incorporar en sistemas que busquen una mayor autonomía de energética, el cual su activación es mediante un pulso externo de los cuales se toman como posibles opciones los dispositivos presentados en Tabla 9.

Tabla 9: Dispositivos para activación del ON/OFF.

Dispositivo	Consumo	Tamaño
Optoacoplador PC817	1.2 V – 1.4 V 5 mA - 20mA	0.6 cm *0.4 cm
Transistor 2n2222a	Soporta hasta 40 V 600 mA	0.45 cm * 0.4 cm
Relé	5 V 15 mA – 20 mA	4 cm x 1.5 cm x 2 cm

Del mismo modo se busca un dispositivo compacto y de bajo consumo, tomando como mejor opción el uso del optoacoplador PC817.

### 3.2.3. Selección de microcontrolador

Después de la selección de los diferentes dispositivos de medición, se gestiona un microcontrolador que permita llevar a cabo la recolección de información, de los cuales surgen 3 posibles alternativas entre ellas se encuentra: la ESP32, Arduino MKR WIFI 1010 y la ESP8266. Teniendo en cuenta diferentes parámetros de importancia tales como: CPU, memoria SRAM, comunicación inalámbrica, modos de consumo y protocolos de comunicación entre otros como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10: Especificaciones de microcontroladores.

Especificaciones	ESP32	Arduino MKR WiFi 1010	ESP8266
Arquitectura	Xtensa (32 bits)	ARM Cortex-M0+ (32 bits)	Microcontrolador
CPU	Dual-core, 240 MHz	Single-core, 48 MHz	Single-Core Xtensa LX106
Memoria Flash	Hasta 16 MB	256 kB	Flash Interno (hasta 16 MB)
Memoria SRAM	520 kB	32 kB	160 kB
Lenguaje de Programación	Arduino IDE, ESP-IDF	Arduino IDE	Arduino IDE, ESP-IDF

Comunicación Inalámbrica	Wi-Fi y Bluetooth (BLE)	Wi-Fi	WIFI
Corriente de Alimentación	80 mA en reposo 160 mA en modo activo	Modo activo 140 mA	Varía según uso, típicamente 80-170 mA
Tensión de Alimentación	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Modos de Bajo Consumo	Modem-sleep: 20-68 mA Light-sleep: 0.8mA Deep-sleep: 10-150 $\mu$ A Hibernación: 5 $\mu$ A Power off: 1 $\mu$ A	Modo suspensión 1mA	Modem.sleep: 15mA Light-sleep: 0.9mA Deep-sleep: 20 $\mu$ A Shut dow: 0.5 $\mu$ A
Protocolos de Comunicación	WiFi, Bluetooth, SPI, I2C, UART, GPIO	Wi-Fi, SPI, I2C, UART, CAN	WiFi, SPI, I2C, UART, GPIO

Del análisis anterior, se han identificado dos alternativas viables: ESP32 y ESP8266, las cuales cumplen con los requisitos necesarios. Estos microcontroladores se caracterizan por su alta velocidad, bajo consumo de energía y pueden configurarse con modos de bajo consumo, aumentando así la autonomía del sistema. Si bien se recomendó la ESP32 debido a su procesador Dual Core y mayor capacidad de memoria, se tomó la decisión de utilizar la ESP8266 debido a consideraciones de disponibilidad y menor costo.

### 3.2.4. Cuadro de cargas

El cuadro de cargas identifica los dispositivos que participan en la red inalámbricas de sensores (WSN), con ello evaluar y determinar la potencia energética global del sistema; como se evidencia en la Tabla 11, en el cual se llevó a cabo el cálculo del consumo total del sistema.

Tabla 11: Cuadro de carga- nodo sensor.

Cantidad	Dispositivo	Potencia (w)	Frecuencia	Tiempo total (min/día)	Horas/día	Wh/día
1	ESP8266	0.288	30 min cada hora	720	12	3.456
1	BMP-180	0.0000231	30 min cada hora	720	12	0.0002772
1	GY-30	0.26	30 min cada hora	720	12	3.12
1	HD-38	0.099	30 min cada hora	720	12	1.188
1	NDIR CO2	0.2475	30 min cada hora	720	12	2.97
1	Modulo TP4056	0.003	24 horas	1440	24	0.072
consumo total en watts						10.806

### 3.2.4.1. Selección de panel solar y almacenamiento

Teniendo en cuenta lo presentado en la Tabla 11, se tomaron en consideración diferentes tipos de paneles DC para alimentar el sistema en los cuales se observan en la Tabla 12, donde se describe el tipo de material, su rendimiento y vida útil.

Tabla 12: Tipos de paneles [56].

TIPO DE PANEL	MATERIAL	RENDIMIENTO
SILICIO MONOCRISTALINO	Utiliza células de silicio monocristalino, las cuales son cortadas en un solo cristal de silicio.	Estas cuentas con una eficiencia en la conversión de luz solar, alrededor del 20 %. Con una vida útil de 25 a 30 años
SILICIO POLICRISTALINO	Utiliza células de silicio policristalino, las cuales son cortadas en múltiples cristales de silicio.	Estas cuentas con una eficiencia en la conversión de luz solar, alrededor del 12 % - 14 %. Con una vida útil de 25 a 30 años
PELÍCULA DELGADA	Sus componentes principales son el Teluro de cadmio o cobre indio galio selenio.	Estas cuentas con una eficiencia en la conversión de luz solar, alrededor del 8 % - 10 %. Con una vida útil de 20 a 25 años

De la información obtenida en la Tabla 12, se considera que cualquiera de las 3 alternativas es viable en la implementación del sistema, ubicados de mayor a menor eficiencia y costo, siendo particularmente utilizados en sistemas de baja potencia. Por consiguiente, se determinó el uso de un panel de silicio policristalino, por razones de eficiencia, costo y de fácil obtención.

Por otra parte, es de suma importancia establecer qué tipo de almacenamiento de energía va a ser usada en el sistema, para tener certeza del funcionamiento en condiciones poco favorables. De tal modo se selecciona el uso baterías de lones de Litio siendo los dispositivos más utilizados en implementaciones a base de energía fotovoltaica.

### 3.2.4.2. Cálculo de componentes energéticos en la red WSN

En la instalación del sistema de energía solar, es necesario calcular la potencia mínima que se necesita, la capacidad de corriente que el regulador debe tener, la potencia mínima requerida y la corriente mínima de descarga de la batería [38]. La energía necesaria se calcula en función de la potencia requerida por los dispositivos [56]. Considerando los valores de horas solares pico, este parámetro se refiere a las horas de luz solar con una intensidad de radiación que recibe la superficie del panel solar, en la ecuación se asume la eficiencia de un 14 % y una dimensión de  $0.1632m^2$ , en ecuación (1) [56] [57].

$$P_{Panel} = I_{RS} \times \eta \times D \quad (1)$$

Donde:

- $I_{RS}$  = Irradiación solar.
- $\eta$  = Eficiencia del panel.
- $D$  = Dimensión del panel.

$$P_{Panel} = 437.64W/m^2 \times 0.14 \times 0.1632m^2 = 9.9 W \approx 10 W$$

La selección del panel solar se llevó a cabo teniendo en cuenta las propiedades energéticas del sistema, por lo que los factores cruciales en su elección incluyeron la potencia máxima de  $10 W$  y tensión entre  $6 V - 10 V$ , elementos clave para la elección.

Se calcula el consumo de energía teniendo en cuenta el cuadro de cargas de la Tabla 11 y se evidencia en la ecuación (2):

$$E = \frac{CT}{V} \quad (2)$$

Donde:

- $E$  = Consumo de energía.
- $CT$  = Consumo total.
- $V$  = Tensión generada por el panel.

$$E = \frac{10.806}{6V} = 1.8 Ah/día$$

Batería: La capacidad de la batería es un aspecto fundamental, la cual se define como se muestra en la ecuación (3) [56] :

$$C_B = \frac{E}{R_G} \quad (3)$$

Donde:

- $C_B$ : Capacidad de la batería.
- $E$ : Energía.
- $R_G$ : Rendimiento global.

El rendimiento global de la batería se obtiene a partir de la ecuación (4):

$$R_G = 1 - \left[ \frac{k_a \times N}{P_d} \right] \quad (4)$$

Donde:

- $k_a$  = es el coeficiente de autodescarga dentro de la batería, para este caso es de 0.2.
- $N$  = días de autonomía.
- $P_d$  = es la profundidad de la descarga admisible, normalmente se sitúa entre un 60 % – 75 %.

$$R_G = 1 - \left[ \frac{k_a \times N}{P_d} \right] = 1 - \left[ \frac{0.2 \times 2}{0.75} \right] = 0.466$$

$$C_B = \frac{10.806 \text{ Ah/día}}{0.466} = 23.17 \text{ Ah/día}$$

Capacidad útil de la batería, se necesita conocer la potencia diaria necesaria se calcula multiplicando la energía (Ah/día) requerida por los días de autonomía (N) [56] este valor se obtiene en ecuación (5):

$$C_u = C_B \times N \quad (5)$$

$$C_u = 23.17 \text{ Ah/día} \times 2$$

$$C_u = 46.35 \text{ Ah/día}$$

Se calcula la corriente mínima de la batería a utilizar dividiendo el  $C_B$  con el  $V_N$ , el cual es el voltaje nominal de la batería, el valor resultante se observa en la ecuación (6).

$$I_{\text{MIN}} = \frac{10.806}{3.7 \text{ V}} = 2.92 \text{ Ah} \quad (6)$$

Posteriormente se halla el valor de la potencia de la batería, teniendo en cuenta el valor máximo de descarga de la batería, que para este caso es del 75 %, este valor se halla en la ecuación (7):

$$P_{\text{bat}} = E \times P_d \quad (7)$$

$$P_{\text{bat}} = 10,806 \text{ Wh} \times 0,75 = 8.1 \text{ Wh}$$

### 3.2.5. Gestor de cargas

El gestor de carga es un dispositivo electrónico diseñado para administrar la carga y descarga de baterías de iones de litio, este dispositivo desempeña funciones importantes como: protección, control de carga y descarga, algunos de estos dispositivos se evidencian en Tabla 13.

Tabla 13: Gestores de carga.

Características	TP4065	MP2617	MCP73831
Número de celdas admitidas	1 celda de Li-Ion	1 celda de Li-Ion	1 celda de Li-Ion
Voltaje de entrada	4.5V - 5.5V	2.7V - 5.5V	3.75V - 6V
Corriente de carga máxima	Hasta 1A	Hasta 2A	Hasta 1A
Eficiencia	Alta	Alta	Variable
Precisión de voltaje de carga	0.5 %	0.5 %	0.75%
Protección de sobrecarga	Sí	Sí	Sí
Protección de sobre descarga	Sí	Sí	Sí
Modo de carga	CC/CV (Corriente constante / Voltaje constante)	CC/CV (Corriente constante / Voltaje constante)	CC/CV (Corriente constante / Voltaje constante)

De la información obtenida de la Tabla 13 se selecciona el TP4056, el cual proporciona una protección esencial contra la sobrecarga y la descarga excesiva de la batería, su simplicidad de diseño, bajo costo y disponibilidad lo convierten en una opción favorable.

### 3.2.6. Parámetros de diseño para convertidor DC-DC

En el diseño del convertidor DC-DC se emplea el circuito integrado LM2596, es un regulador de tensión ajustable que funciona según el principio de modulación por ancho de pulsos (PWM), lo que significa que controla la entrega de potencia conmutando rápidamente entre los estados de encendido y apagado, esto reduce las pérdidas de potencia y aumenta la eficiencia general del sistema. Al mismo tiempo, el LM2596 ofrece funciones como protección térmica y contra sobre corriente, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones, desde la alimentación de dispositivos electrónicos hasta cargadores de baterías y sistemas

de iluminación [58]. Los reguladores de la serie LM2596 son circuitos integrados monolíticos que proporcionan todas las funciones activas para un regulador de conmutación reductor (Buck), capaz de manejar una carga de 3 A. Requieren un número mínimo de componentes externos, estos reguladores son fáciles de usar e incluyen compensación de frecuencia interna y un oscilador de frecuencia fija con una conmutación de 150 kHz [58]. En la Figura 13 se utiliza el terminal ON/OFF para generar un apagado externo en este integrado, se añade de forma externa un condensador que acumula carga y eleva el nivel lógico del terminal ON/OFF, manteniendo al regulador en estado OFF. Una vez que la tensión de entrada alcanza su valor nominal y cesa la acumulación de carga en el condensador, la resistencia R2 disminuye el nivel lógico del terminal ON/OFF, permitiendo así que el circuito inicie su conmutación. La resistencia R1 se incorpora con el propósito de limitar la tensión máxima aplicada al pin ON/OFF que soporta 25 V de tensión de entrada, reduciendo tanto la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas procedentes de la fuente de alimentación como la corriente de descarga del condensador C1 [58].

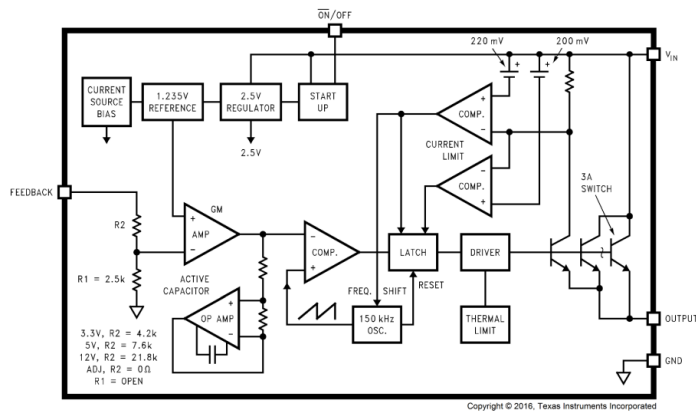


Figura 13: Diagrama de bloques LM2596 [58].

En particular, los reguladores tipo Buck demandan una menor corriente de entrada cuando la tensión de entrada es más alta [58]. Para el diseño de este convertidor se realizan los siguientes cálculos, basados en la hoja de datos que posee el LM2596:

$$V_o = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (8)$$

dónde  $V_{REF} = 1.23 \text{ V}$ , para obtener el valor de  $V_o$  se selecciona  $R_1$  de un valor aproximado de  $1 \text{ k}\Omega$ , con ello se calcula  $R_2 = R_1 \left( \frac{V_o}{V_{REF}} \right) - 1$ , para este sistema se requiere una salida de tensión de 3.3 V, con este dato se calcula  $R_2$ :

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega \left( \frac{3.3 \text{ V}}{1.23 \text{ V}} - 1 \right) = 1.68 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

Obtenido el valor de  $R_2$  se corrobora que el valor de  $V_o$  sea el indicado:

$$V_o = 1.23 \text{ V} \left( 1 + \frac{1.68 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \right) = 3.3 \text{ V} \quad (10)$$

El valor del inductor se obtiene de la siguiente forma:

$$V_{SAT} = 1.16 \text{ V}$$

$$E \cdot T = (V_{IN} - V_{OUT} - V_{SAT}) \times \left( \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} - V_{SAT} + V_D} \right) \times \frac{1000}{150 \text{ kHz}} \quad (11)$$

$$E \cdot T = (7.5 \text{ V} - 3.3 \text{ V} - 1.16 \text{ V}) \times \left( \frac{3.3 \text{ V} + 0.5 \text{ V}}{7.5 \text{ V} - 1.16 \text{ V} + 0.5 \text{ V}} \right) \times \frac{1000}{150 \text{ kHz}} = 11.256 \text{ V} \times \mu\text{s}$$

En la selección del inductor se toma en cuenta la Figura 14, lo que permite obtener el valor requerido del inductor, tomando en consideración la corriente máxima de diseño que en este caso es de  $3 \text{ A}$  y la ecuación (8), para trazar la línea característica, esto lleva a optar por un valor de inductor en el rango de  $22 \mu\text{H}$  –  $15 \mu\text{H}$  [58]. La correcta selección de este componente afecta en la eficiencia y estabilidad del sistema, en un convertidor tipo Buck, el inductor almacena energía durante la fase de encendido y la libera durante la fase de apagado. Esta función permite una conversión eficiente de energía. Además, el inductor suaviza la corriente de salida, contribuyendo a una salida de voltaje más constante y reduciendo el rizado.

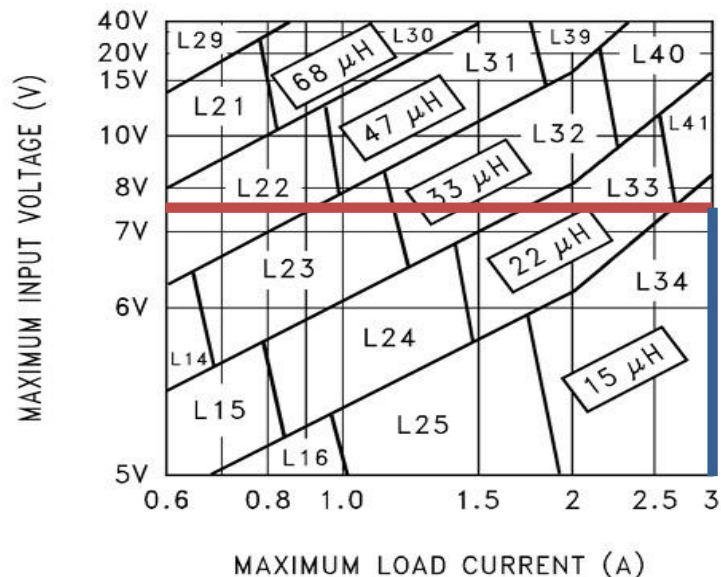


Figura 14: Valor inductor [58].

La selección del capacitor de entrada se obtiene del trazo de la corriente máxima del capacitor vs el voltaje máximo que este soporte, este componente evita que se produzcan valores grandes de transitorios en la tensión y proporciona una corriente instantánea cada vez que el integrado ejerce la conmutación de encendido y pagado, la elección de este componente se observa en la Figura 15, dando como resultado un capacitor de  $270\mu F$ , pero se incorpora un capacitor de  $220\mu F$  por temas de valores comerciales. El capacitor de salida se selecciona siguiendo las recomendaciones de la hoja del fabricante del circuito integrado junto con una tabla de valores específicos para cada ajuste de salida de tensión, dando como resultado un valor de  $330\mu F$ .

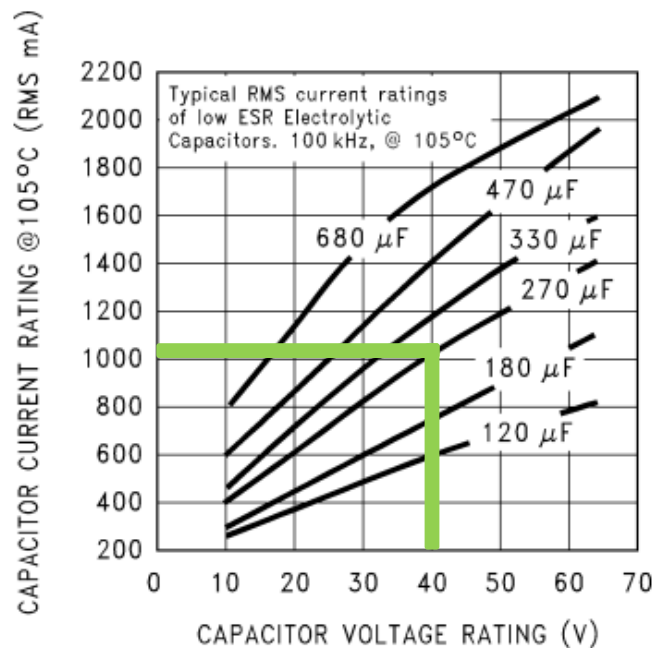


Figura 15: Capacitor de entrada [58].

### 3.2.7.Simulación

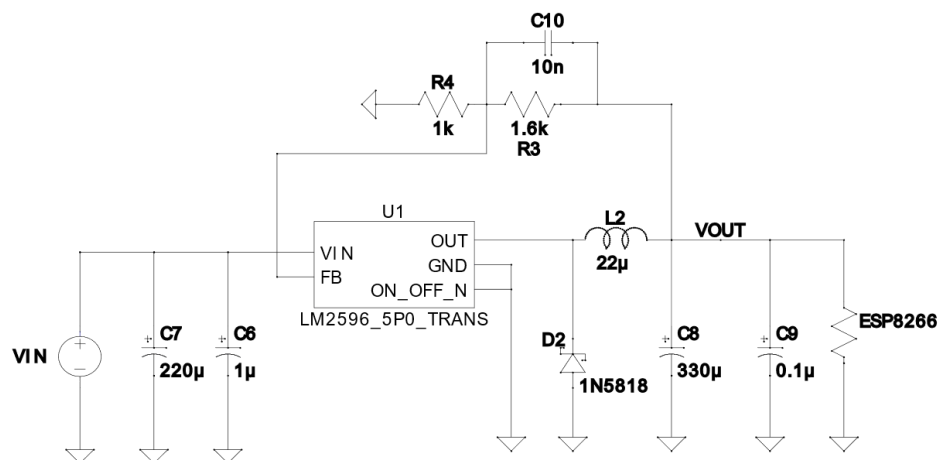
En el ámbito de la simulación electrónica, se hace uso del circuito integrado LM2596 el cual ha sido configurado en su modo de operación de tipo Buck, cuya simulación fue realizada mediante el software LTspice XVII.

En la Figura 16, se evidencia el diseño esquemático de los convertidores, en este proceso los componentes que complementan al circuito integrado son los que se obtuvieron en la sección de parámetros de diseño para convertidor DC-DC. En estos esquemas se presenta el circuito tipo Buck estático, en donde está funcionando de forma continua para suministrar energía a la ESP8266, adicionalmente se observa

el convertidor DC-DC con pulso ON/OFF que integra un optoacoplador en modo inversor este al recibir dicha condición proveniente del microcontrolador envía una señal de apagado en el pin 5 del LM2596, pin que se destina a desactivar y activar el convertidor, siendo este enfocado en los sensores de medición, esta configuración gestiona un mejor consumo energético.

Los resultados de tensión y corriente fueron obtenidos en circuito abierto, es importante destacar que estos resultados son altamente dependientes de la carga utilizada, afectando directamente la corriente de salida del convertidor. Por lo tanto, se deben de incorporar los elementos para los cuales fue diseñado, para garantizar una operación adecuada del sistema.

## Convertidor DC-DC



## Convertidor DC-DC con pulso ON/OFF

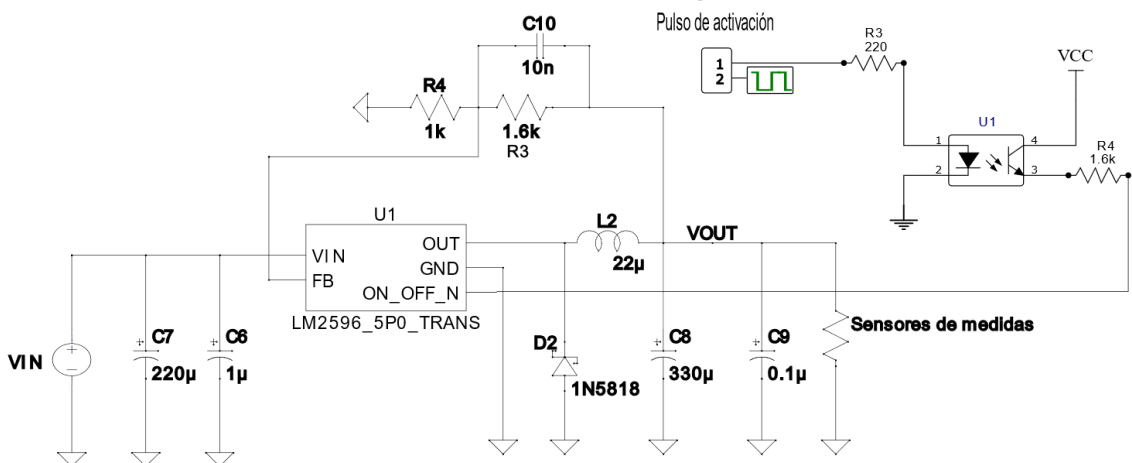


Figura 16: Esquemas del convertidor DC-DC basado en LM2596.

En la Figura 16 se muestra el circuito resultante, el cual fue sometido a simulación para evaluar el desempeño del convertidor DC-DC, en donde la tensión de salida el valor teórico calculado es de 3.3 V mientras que la simulación arrojó 3.39 V de salida con una corriente de impulso de 3.4 A y se estabiliza en los 3 A de salida que requiere el sistema tal como se evidencia en Figura 17.

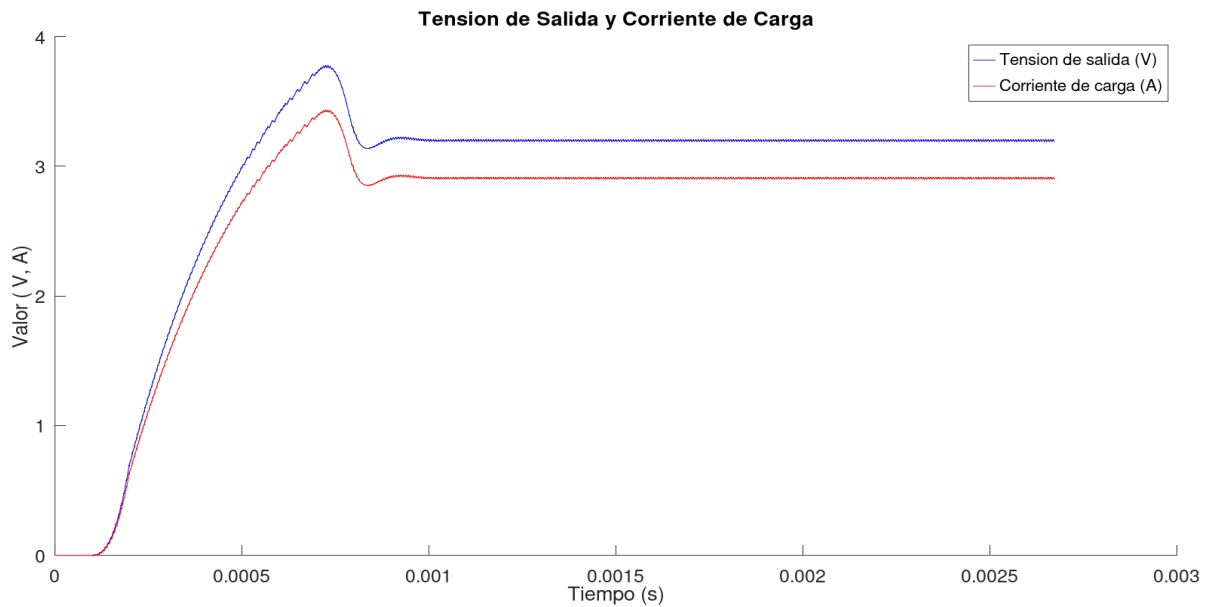


Figura 17: Tensión y corriente de salida del convertidor DC-DC.

### 3.3. IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se lleva a cabo la implementación del diseño del convertidor presentado en la Figura 16, el cual se elaboró siguiendo los siguientes pasos como se presenta en la Figura 18.

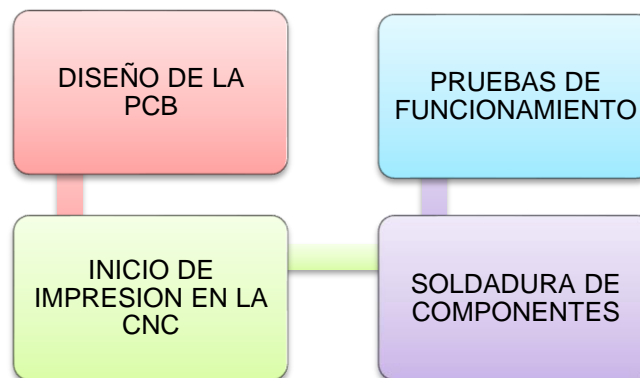


Figura 18: Pasos para el diseño del convertidor DC-DC.

A partir de esto, se presenta un modelado 3D que permite observar de forma clara la posición de cada uno los elementos que compone el circuito, como se puede observar en la Figura 19 y Figura 20.

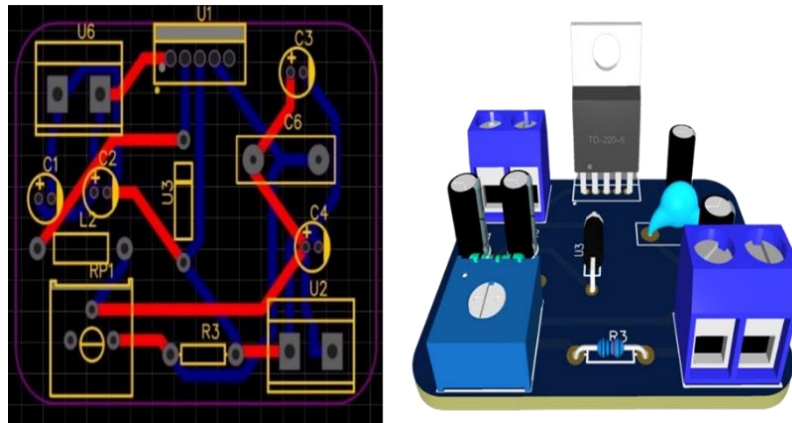


Figura 19: Diseño Esquemático PCB y vista 3D convertidor fijo.

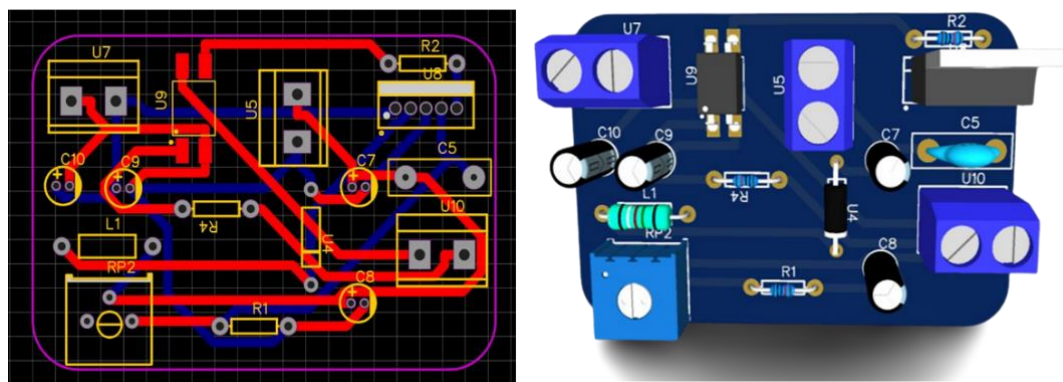


Figura 20: Diseño Esquemático PCB y vista 3D convertidor con pulso ON/OFF.

El diseño se ejecuta eficientemente a través del software EasyEDA, permitiendo la integración precisa de diversos componentes para optimizar el espacio y elevar la fiabilidad del sistema. Una vez completado, se exporta al formato Gerber para una transición sin contratiempos a la etapa de producción.

Posteriormente, mediante una impresora CNC, se utiliza el formato Gerber para materializar el diseño en una placa base, como se muestra en la Figura 21. Este proceso específico reduce posibles errores de cableado o fallas de conexión. La Figura 22 ilustra los resultados obtenidos de las placas PCB de cada convertidor.

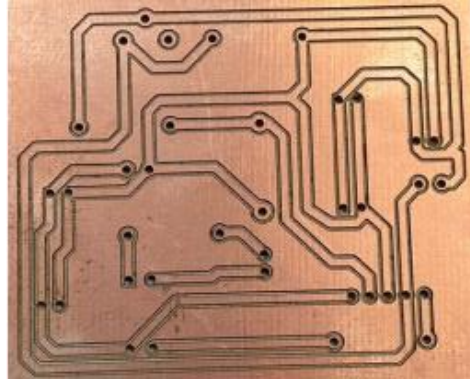


Figura 21: Fabricación de PCB en CNC.



Figura 22: Ensamble PCB.

Además, es importante considerar la condensación de aire y obtener un ambiente hermético, para asegurar la vida útil del circuito. La presencia de condensación puede ser perjudicial ya que provoca la oxidación de los componentes, lo que a su vez afecta negativamente su rendimiento.

Por consiguiente, se toman las siguientes medidas de prevención contra daños o fallas en el sistema. Como el uso de recubrimiento con silicona antihongos y humedad, para los circuitos impresos como se evidencia en la Figura 23, también se hizo uso de una caja hermética al agua y polvo con normativa IP65, que permite mantener todos los dispositivos protegidos contra la lluvia como se observa en la Figura 24.

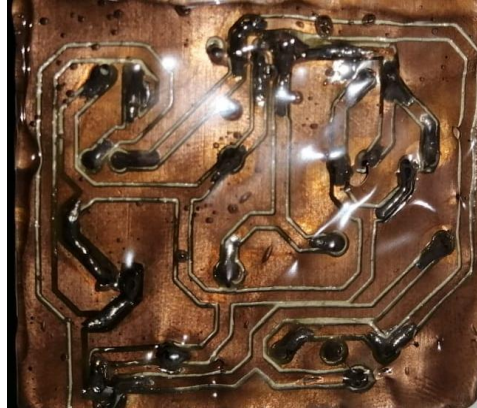


Figura 23: Recubrimiento de protección.

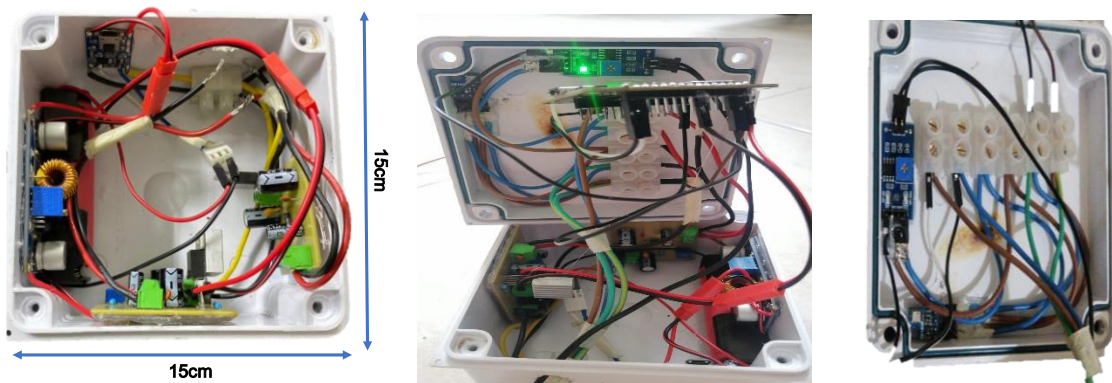


Figura 24: Montaje del proyecto en la caja hermética.

Finalmente, después de la implementación del convertidor y acatar las precauciones, se realiza el montaje final del sistema el cual se puede evidenciar sus conexiones y proceso final en la Figura 25 y Figura 26.

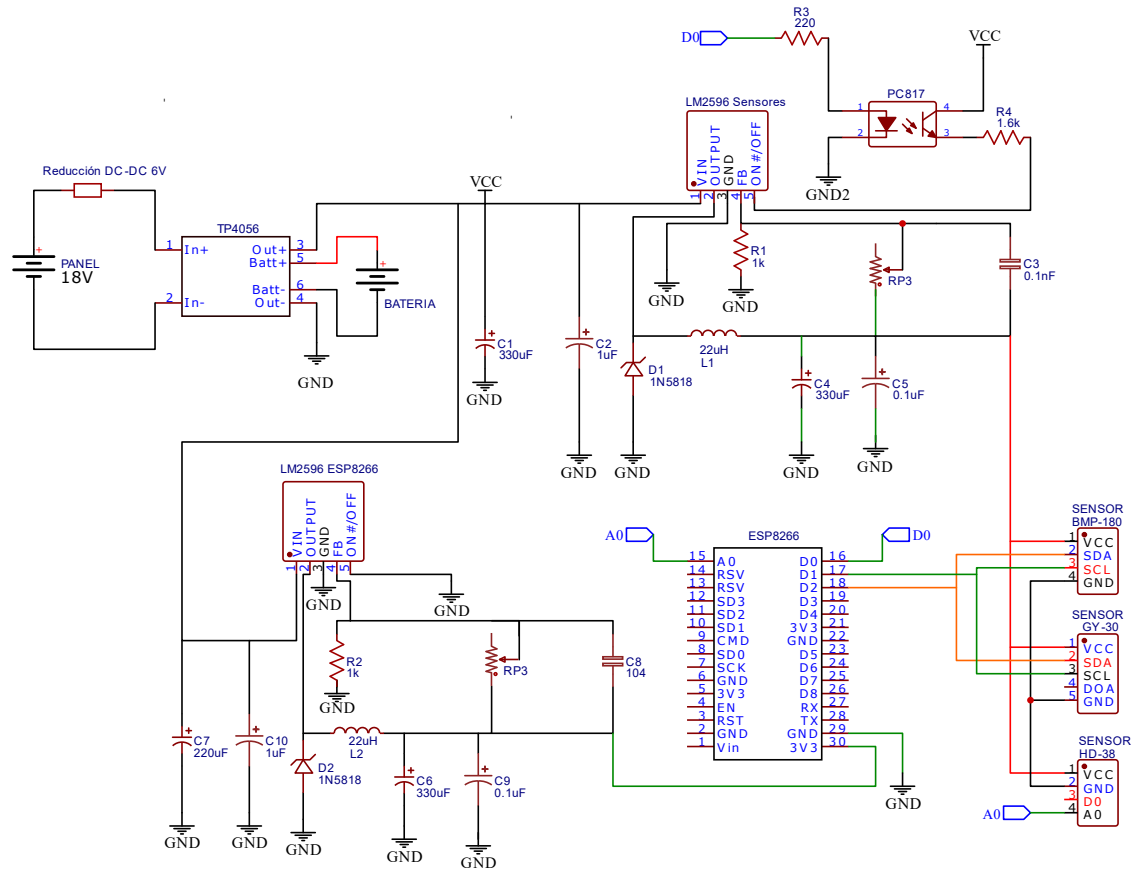


Figura 25: Conexiones del sistema.



- Sensor HD-38
- Sensor GY-30
- Sistema en la caja Hermética
- Panel solar

Figura 26: Sistema completo.

### 3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO

En esta sección se evidencian resultados de las pruebas de funcionamiento llevadas a cabo en el trabajo de campo. Estas pruebas estuvieron enfocadas en la caracterización de los sensores integrados en la red inalámbrica de sensores (WSN) y su interacción con un convertidor DC-DC. A continuación, se describen los resultados obtenidos en detalle:

#### 3.4.1. Información de sensores:

En el proceso de obtener información verídica de los sensores, se realizaron pruebas junto con otros dispositivos de medición, con la finalidad de adquirir la diferencia de medidas que se tiene entre cada sensor comparado, los resultados de estas pruebas se detallan a continuación:

##### 3.4.1.1. Sensor de Temperatura:

El porcentaje de diferencia de las medidas de temperatura del BMP-180 junto con la medida del multímetro de la marca UNI-T, este dispositivo tiene la opción de medir temperatura en °C, el rango de medición de -40 °C a 1000 °C, con una precisión de  $\pm(1\% + 4)$  [59], la diferencia de medida entre estos dos dispositivos se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{|\sum \text{Muestra Anterior} - \sum \text{Muestra Nueva}|}{|\sum \text{Muestra Anterior}|} \times 100\% \quad (12)$$

$$\frac{|1667.2 - 1615|}{|1667.2|} \times 100\% = 3.13\%$$

La medida de la variable de temperatura que se obtiene con el sensor BMP-180 se comparó con un sensor termohigrómetro, la cual tiene un rango de medición de temperatura de  $-50^{\circ}C$  a  $70^{\circ}C$  con una precisión de  $\pm 1C$  [60], la comparación de estas dos medidas se evidencia en la ecuación (13):

$$\frac{|1689.8 - 1615|}{|1689.8|} \times 100\% = 4.4\% \quad (13)$$

Dando como resultado 4.4 % de diferencia de medida con el sensor termohigrómetro, en la Figura 27, se observan las medidas obtenidas con los diferentes sensores de temperatura, en donde se evidencia que dichas lecturas tienen un margen de error pequeño, siendo así el sensor BMP-180 un dispositivo con un rango de medición aceptable.

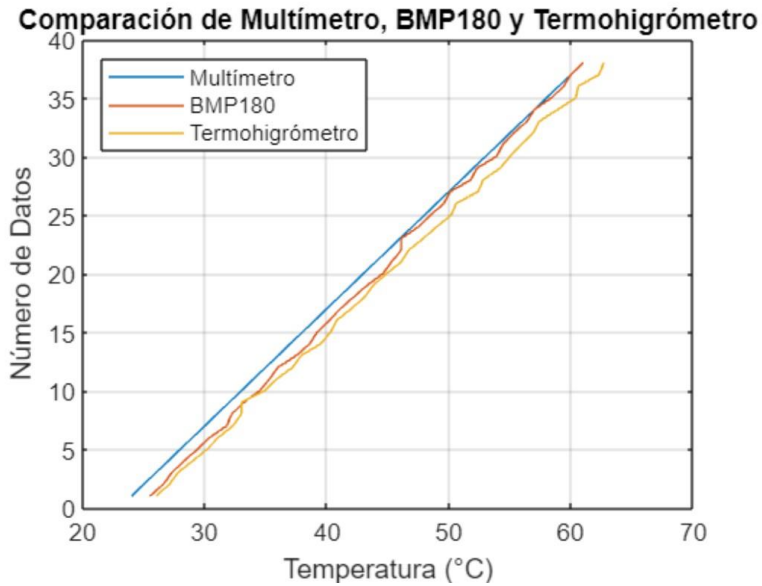


Figura 27: Comparación de medidas de temperatura.

#### 3.4.1.2. Sensor de Humedad:

La comparación de medidas de la humedad en el suelo se realizó mediante dos sensores de humedad, dicha comparación se evidencia en la Figura 28 y la comparación física en la Figura 29, se observan los dos sensores, a la derecha el sensor extech, es un sensor de precisión usado en la agricultura para medición de humedad de suelo, posee una sonda de 17.2 cm con una escala de medida de 0 % – 50 % de humedad del suelo junto con una resolución de  $\pm 0.1$  % [61] a la izquierda se observa el sensor HD-38 el cual es un dispositivo de medición de humedad enfocado más en el ámbito académico.

$$\frac{|\sum \text{Muestra Anterior} - \sum \text{Muestra Nueva}|}{|\sum \text{Muestra Anterior}|} \times 100 \% \quad (14)$$

$$\frac{|669 - 637|}{|669|} \times 100 \% = 8.47 \%$$

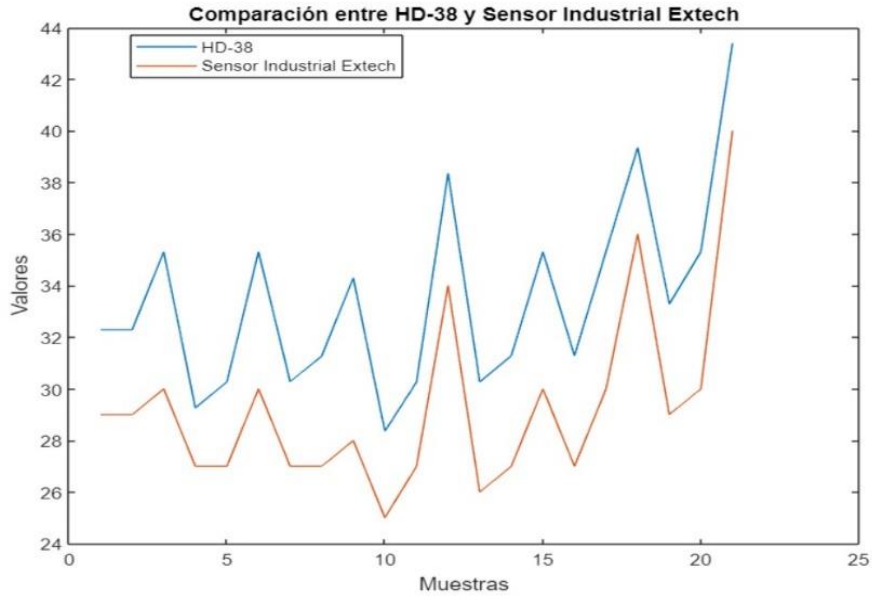


Figura 28: Medidas de humedad.



Figura 29: Sensores de humedad del suelo.

### 3.4.2. Transformación energética

En el proceso de recolección y conversión de energía del sistema, se logra la autonomía energética. Para adaptar la tensión a las necesidades del gestor de carga TP4056, el cual opera a una tensión de 6 V, se hizo uso de un reductor genérico, esta decisión se tomó debido a que el panel solar usado en la práctica tenía una tensión de 17.5 V y esta llegaba a dañar el módulo de carga, mostrado en la Figura 30, este dispositivo es crucial al administrar el almacenamiento y uso de la energía. Cuando el panel está activo, este ejerce la carga de la batería y suministrar energía a la siguiente a la etapa de conversión.

TENSIÓN DEL PANEL



TENSIÓN DEL GESTOR DE CARGAS



TENSIÓN DEL REGULADOR

Figura 30: Valores de tensión.

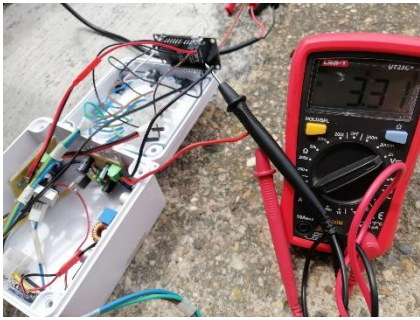
#### 3.4.2.1. Trabajo de convertidor DC-DC

Se llevo a cabo la prueba con la finalidad de obtener información de como el sistema de regulación de tensión de suministro proporcionar la energía necesaria para el sistema, los resultados de estas pruebas se resumen a continuación.

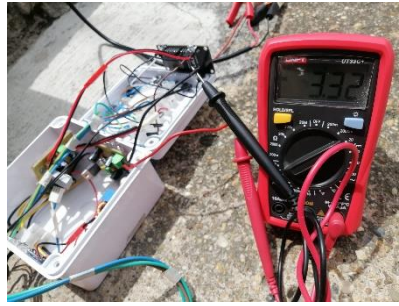
En la implementación, se evaluó el comportamiento del convertidor DC-DC en la regulación de la energía suministrada por los paneles solares y en la alimentación de los sensores de la red WSN, estos resultados se observan en Figura 31 y Figura 32.



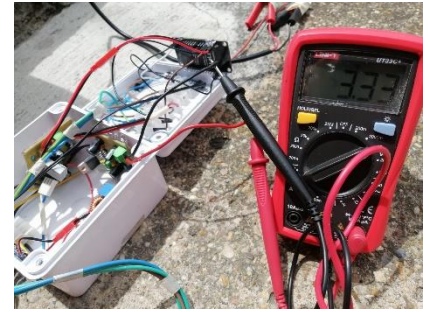
Figura 31: Convertidor DC-DC resultados en laboratorio.



TENSIÓN DE 3.31 V



TENSIÓN DE 3.32 V



TENSIÓN DE 3.33 V

Figura 32: Convertidores DC-DC resultados en ambiente exterior.

En este sentido, el convertidor DC-DC juega un papel crucial, dado que garantiza una eficiencia energética que asegura una salida estable de 3.3 V, con un margen de error u oscilación máximo del 2 % y puede manejar hasta 3 A de corriente máxima, además ofrece la opción de ajustar la tensión mediante un trimmer, siendo ideal para alimentar de forma segura el sistema, con una ventaja adicional, mediante la condición ON/OFF permitiendo activar y desactivar el suministro energético de los sensores. Los resultados mostraron que el sistema de energía solar fotovoltaica fue capaz de suministrar la energía necesaria para alimentar los sensores de la red inalámbrica de sensores.

Variación de tensión del convertidor:

$$\frac{|\sum \text{Muestra Anterior} - \sum \text{Muestra Nueva}|}{|\sum \text{Muestra Anterior}|} \times 100 \% \quad (15)$$
$$\frac{|3.379 - 3.3|}{|3.379|} \times 100 \% = 2 \%$$

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se profundiza acerca de los logros y desafíos que se encontraron a lo largo de la implementación del suministro energético y comunicación de los diversos dispositivos de medición del nodo sensor utilizado en los cultivos de café. En la descripción presentada en el apartado de análisis, diseño, implementación y pruebas el cual permitió identificar los factores de importancia en el desarrollo de las plantas de café y la influencia del monitoreo de variables edafoclimáticas y del suministro energético, cuyo beneficio incluye una mayor fiabilidad en el monitoreo de los cultivos. Beneficiando el desarrollo de las plantas de café, dado que los agricultores puedan tomar acciones de forma certera para contrarrestar alguna adversidad que involucre alguna de las variables. Por otra parte, es de suma importancia conocer un poco más la comunicación de los sensores y la base del suministro energético.

### 4.1. Comprobación del envío de datos

Tomando en consideración la adquisición de datos por medio de la plataforma ThingSpeak conectada mediante un microcontrolador ESP8266 se comprueba el correcto envío de datos de los diferentes dispositivos, entre los cuales se encuentran: sensor de temperatura (BMP180), luminosidad (GY-30) y humedad (HD-38). En este sentido, se obtiene una lectura adecuada de las variables mencionadas con anterioridad en tiempos establecidos de 1 hora. Por razones de verificar la transmisión de los datos como se observa en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35. No obstante, se puede cambiar el tiempo de envío según las necesidades del usuario.

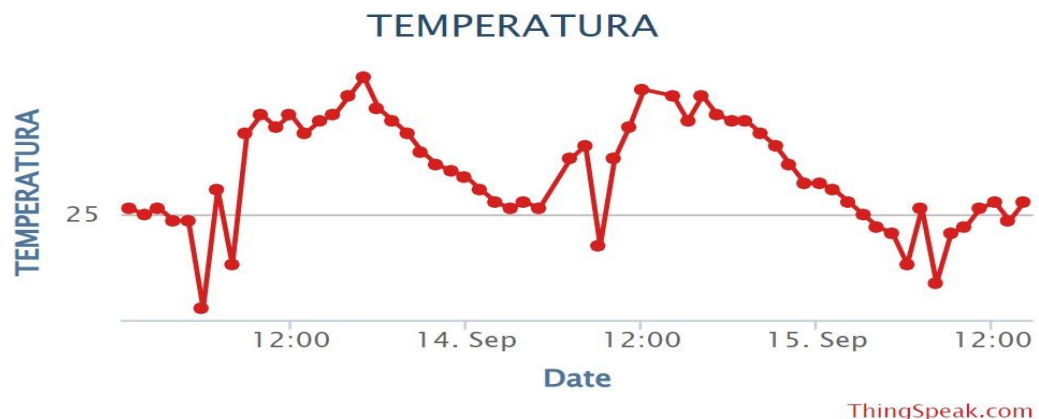


Figura 33: Datos temperatura.

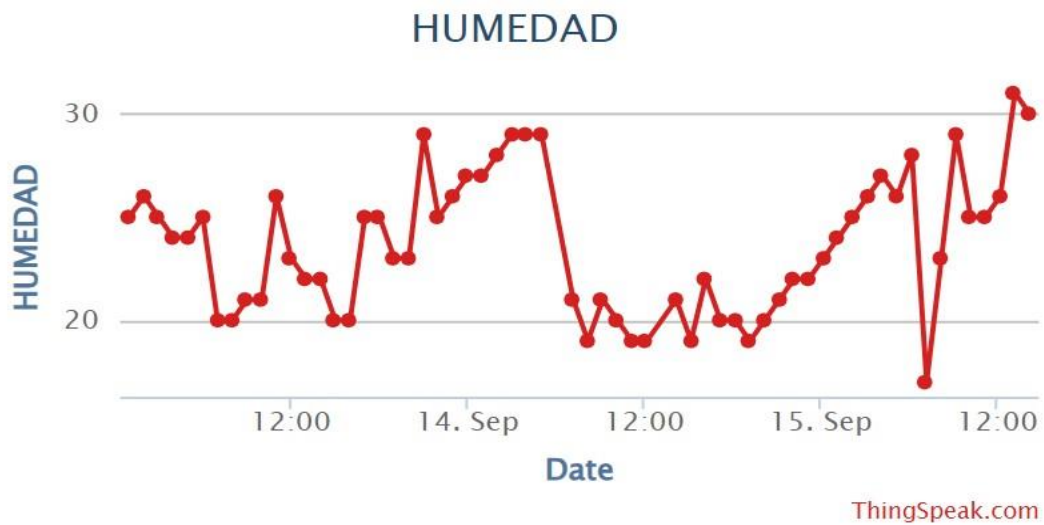


Figura 34: Datos humedad.



Figura 35: Datos luminosidad.

## 4.2. Gestión energética

El sistema fue diseñado con un enfoque en la eficiencia energética y el uso de dispositivos tipo LDO o de bajo consumo, con el objetivo de minimizar el consumo de energía y aprovechar al máximo la batería. Lo cual se comprueba por medio de la medición de tensión, corriente y potencia consumida del sistema, mediante el sensor INA226. El cual es utilizado para analizar los diferentes modos de los cuales se encuentran: funcionamiento activo, Modem-sleep y Light-sleep.

En la implementación del modo activo, se obtienen una pequeña variación de tensión de  $3.23\text{ V} - 3.2\text{ V}$  junto con una corriente promedio de  $60.15\text{ mA}$  y una potencia de  $187\text{ mW}$ , como se puede ver en la Figura 36 . Permitted evaluar la eficiencia energética de la red y garantizar un funcionamiento óptimo, dado que estos valores tienen implicaciones significativas en la capacidad de la red para mantener operativas sus funciones durante un período de tiempo determinado. Por otro lado, en la misma configuración, aunque los sensores permanecen inactivos, la duración de la batería se limita a 11 horas debido al alto consumo de energía. Principalmente por el uso continuo de Wi-Fi en la tarjeta de desarrollo, como se puede observar en la Figura 37, donde la tensión y la potencia tiene un decrecimiento significativo a partir de las 4 pm considerando su ausencia a la exposición solar, mientras que la corriente permanece relativamente constante con una variación mínima.

De lo mencionado con anterioridad es importante resaltar que para aumentar la eficiencia y autonomía energética es esencial incluir modos de bajo consumo en el microcontrolador de la red WSN, estos modos se aplican en una ESP8266, los cuales son: modem sleep, el cual permite desactivar el módulo WiFi mientras se mantiene en funcionamiento la CPU, lo que indica que el microcontrolador va ser capaz de procesar datos. El modo light sleep, cuya característica permite reducir significativamente el consumo de energía de la placa cuando no se está utilizando, en este modo, la ESP8266 apaga la mayoría de sus componentes y entra en un estado de bajo consumo de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren una larga duración de la batería. También se encuentra el modo deep sleep, en donde, la mayoría de los componentes del chip se apagan, y la CPU se detiene, solo se permite que ciertas partes del chip, como el RTC (Real-Time Clock) y algunos GPIO específicos permanezcan activos para despertar el microcontrolador en un momento específico o cuando se detecta una interrupción [62]. El consumo energético de dichos modos se evidencia en la Figura 38.

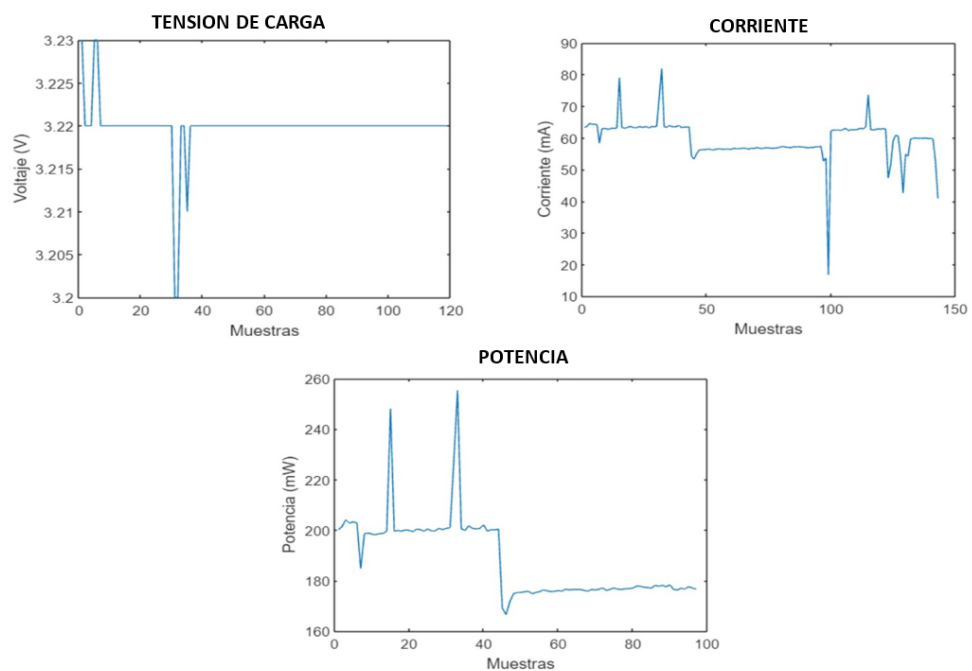


Figura 36: Consumo energético en funcionamiento activo.

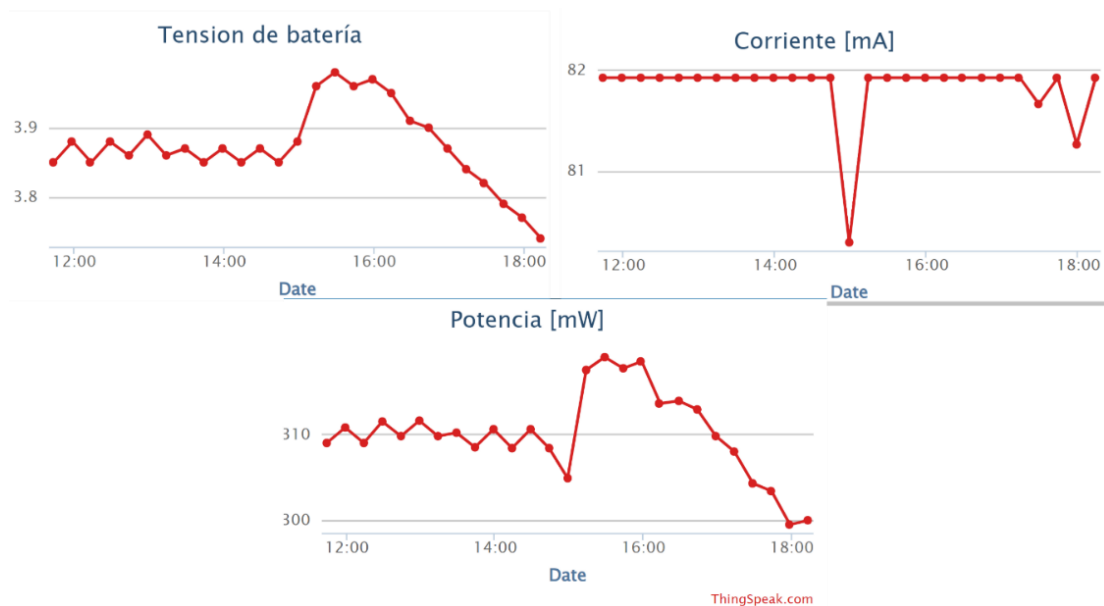


Figura 37: Consumo energético.

<b>Modo modemsleep</b>	<b>Modo light sleep</b>
Shunt Voltage [mV]: 0.15	Shunt Voltage [mV]: 0.20
Bus Voltage [V]: 3.32	Bus Voltage [V]: 3.32
Load Voltage [V]: 3.33	Load Voltage [V]: 3.33
Current [mA]: 15.60	Current [mA]: 0.20
Bus Power [mW]: 5.00	Bus Power [mW]: 0.70
OK	

Figura 38: Medición de los modos de la ESP8266.

Finalmente, la configuración de los diferentes modos permite una mayor optimización energética en el sistema, prologando la capacidad de la batería y con ello tener un respaldo energético ante la ausencia de la radiación solar. Lo que a su vez tiene un impacto significativo en la gestión de energía, dicha mejora no solo prolonga la duración de la batería, sino que también garantiza una mayor autonomía operativa. Debido a que el aumento en el consumo el sistema se convierte en un elemento crítico, especialmente en aplicaciones donde la fuente principal de energía, como la radiación solar puede tener interrupciones.

#### 4.2.1. Valores de consumo energético:

Teniendo en cuenta que la tarjeta de desarrollo ESP8266, posee diversas modalidades de bajo consumo, se realizan los siguientes escenarios en donde se plantea un funcionamiento activo de 10 minutos, para comprobar la eficiencia energética en cada uno de los modos como se observa en la Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 14: Consumo con el modo modem Sleep.

Modo modem sleep						
Cantidad	Dispositivo	Potencia (w)	Frecuencia	Tiempo total (min/día)	Horas/día	Wh/día
1	ESP8266	0.0156	10 min cada hora	240	4	0.0624
1	BMP-180	0.0000231	10 min cada hora	240	4	0.0000924
1	GY-30	0.26	10 min cada hora	240	4	1.04
1	HD-38	0.099	10 min cada hora	240	4	0.396
1	NDIR CO2	0.2475	10 min cada hora	240	4	0.99
1	Modulo TP4056	0.003	24 horas	1440	4	0.012
Consumo total en watts						2.5

$$E = \frac{2.5}{6V} = 0.417Ah/día$$

$$C_B = \frac{E}{R_G} \rightarrow R_G = 1 - \left[ \frac{k_a \times N}{P_d} \right] \rightarrow R_G = 1 - \left[ \frac{0.2 \times 2}{0.75} \right] = 0.466$$

$$C_B = \frac{2.5 \text{ Ah/día}}{0.466} = 5.36 \text{ Ah/día}$$

$$C_u = C_B \times N \rightarrow C_u = 5.36 \text{ Ah/día} \times 2 \rightarrow C_u = 10.72 \text{ Ah/día}$$

$$I_{\text{MIN}} = \frac{2.5}{3.7 \text{ V}} = 0.68 \text{ Ah}$$

$$P_{\text{bat}} = E \times P_d \quad P_{\text{bat}} = 2.5 \text{ Wh} \times 0.75 = 1.87 \text{ Wh}$$

Tabla 15: Consumo en modo light sleep.

Modo light Sleep						
Cantidad	Dispositivo	Potencia (w)	Frecuencia	Tiempo total (min/día)	Horas/día	Wh/día
1	ESP8266	0.0002	10 min cada hora	240	4	0.0008
1	BMP-180	0.0000231	10 min cada hora	240	4	0.0000924
1	GY-30	0.26	10 min cada hora	240	4	1.04
1	HD-38	0.099	10 min cada hora	240	4	0.396
1	NDIR CO2	0.2475	10 min cada hora	240	4	0.99
1	Modulo TP4056	0.003	24 horas	1440	4	0.012
Consumo total en watts						2.4388924

$$E = \frac{2.43 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 0.405 \text{ Ah/día}$$

$$C_B = \frac{E}{R_G} \rightarrow R_G = 1 - \left[ \frac{k_a \times N}{P_d} \right] \rightarrow R_G = 1 - \left[ \frac{0.2 \times 2}{0.75} \right] = 0.466$$

$$C_B = \frac{2.43 \text{ Ah/día}}{0.466} = 5.21 \text{ Ah/día}$$

$$C_u = C_B \times N \rightarrow C_u = 5.21 \text{ Ah/día} \times 2 \rightarrow C_u = 10.42 \text{ Ah/día}$$

$$I_{\text{MIN}} = \frac{2.43 \text{ W}}{3.7 \text{ V}} = 0.656 \text{ Ah}$$

$$P_{\text{bat}} = E \times P_d \quad P_{\text{bat}} = 2.43 \times 0.75 = 1.8 \text{ Wh}$$

Los resultados obtenidos al evaluar los modos de bajo consumo energético, específicamente el modo sleep y light sleep en la ESP8266, se evidencia una notable reducción alrededor de un 77.41%, este resultado tiene un impacto significativo en la vida útil de la batería y en la eficiencia energética de la red inalámbrica de sensores (WSN). Teniendo en cuenta que la implementación del sistema sin los modos mencionados tiene una duración de dos días, la incorporación de estas condiciones puede prolongar la duración y autonomía de la batería por mucho más tiempo, siendo esto una gran ventaja en la eficiencia energética del sistema.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas a través de la implementación de este proyecto. Detallando los resultados y perspectivas del trabajo a futuro que podrían ser realizados a partir de lo obtenido en este trabajo de grado.

### 5.1. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo de grado permitió garantizar la confiabilidad del suministro y veracidad de los diversos sensores, logrando así satisfacer las necesidades de los usuarios. A continuación, se destacan los logros obtenidos:

La selección de sensores se llevó a cabo mediante la revisión bibliográfica que permitió identificar los factores que influyen en el cultivo del café, en los cuales se encuentran las siguientes variables: en primer lugar, la humedad debe mantenerse en un rango de 60 % - 80 %, asimismo, la temperatura se debe situar entre 18°C y 24°C, en cuanto a la intensidad lumínica presente en la región del Sumapaz, se ha identificado una variación entre 4 a 6 horas sol/día, por último, en lo que respecta al dióxido de carbono este se encuentra en un rango entre 400 ppm a 2000 ppm.

El diseño del sistema está pensado en beneficio del caficultor, buscando así que se puedan ejercer acciones con un nivel mayor de precisión, con respecto a las variables identificadas para el correcto desarrollo de los cultivos. Asimismo, se incorporan tecnologías 4.0 y suministro solar fotovoltaico, proporcionando un sistema compacto, de fácil manipulación y que no representa ningún riesgo al caficultor en su trabajo cotidiano.

El sistema de instrumentación y suministro energético con energía solar fotovoltaica consigue mantener la tensión de salida en 3.3 V con la posibilidad de ajustar este valor según las necesidades del usuario con una oscilación del 2 %. Esto no sólo lo hace adecuado para microcontroladores vistos en la Tabla 10, sino que también puede adaptarse a otros dispositivos con mayor o menor consumo energético. Además, tiene la capacidad de activar y desactivar el suministro de los diferentes sensores o dispositivos conectados a este, por medio de un optoacoplador lo que resulta en un ahorro de energía significativo y es particularmente útil para dispositivos que carecen de un modo de ahorro de energía o de una desactivación temporal. Asimismo, los sensores integrados en el sistema tuvieron un rendimiento óptimo, logrando una precisión aceptable que oscila entre 3,13% y 8,47% en comparación a la de dispositivos industriales, (ver en la Figura 27 y Figura 28).

Adicionalmente este trabajo recalca la importancia de seleccionar sensores adecuados con una alta precisión y bajo consumo energético, para la lectura de datos certeros en tiempo real sobre las condiciones ambientales de los cultivos de café y a su vez implementar sistemas de comunicación eficientes para la transmisión de la información.

Por consiguiente, un suministro energético confiable es otro factor crucial en este sistema de medidas. Al garantizar la disponibilidad constante de energía, se asegura el funcionamiento continuo de los nodos sensores y la selección de dispositivos de bajo consumo permiten una mayor autonomía y adecuado uso del recurso eléctrico.

Finalmente, la incorporación de modos de ahorro de energía en la tarjeta de desarrollo ESP8266, logra reducir hasta en un 77.41 % el consumo energético total del sistema, permitiendo una mayor duración y autonomía energética, para la red WSN. De este modo, al contar con una red de sensores eficiente y confiable, los caficultores podrán tomar decisiones informadas y precisas para mejorar la producción y lograr un manejo sustentable de las plantaciones.

## **5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO**

El crecimiento de la tecnología es progresivo, lo cual es fundamental cada vez incorporar nuevas tecnologías para lograr un sistema de instrumentación y suministro energético cada vez más eficientes. Para potenciar aún más estos sistemas en el futuro, se sugiere la implementación de sensores de última generación con mayor precisión, permitiendo respuestas más certeras y mediciones detalladas de variables clave. A su vez incorporar nuevas variables también es crucial, considerando la incorporación de sensores que abarquen aspectos como la calidad del aire y los nutrientes del suelo o el pH para obtener una visión más completa. Asimismo, se propone la miniaturización de componentes electrónicos y mejorar la eficiencia energética de los convertidores, garantizando así una integración más compacta del sistema.

Finalmente, incorporar el uso de tecnologías de comunicación más flexibles, como redes de baja potencia y largo alcance (LPWAN), contribuirá a mejorar la conectividad en entornos agrícolas, donde las redes wifi-convencionales pueden llegar a ser escasas. Buscando **siempre** la máxima **eficiencia** y **comodidad** para los cafetaleros **sin dejar** atrás lo más **importante** que es el **bajo consumo** energético.

### **5.3. PRODUCTOS DE ESTE TRABAJO**

- Ponencia en el “I ENCUENTRO TRANSLOCAL LATINOAMERICANO DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN “, bajo el título “Instrumentación y suministro energético para una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café en la unidad agroambiental La Esperanza, de la Universidad de Cundinamarca” Autores Andrés Felipe Garibello Medina, Raúl Iván Mera Molano, Andrés Felipe Guerrero Guerrero.
- Artículo aceptado en modalidad ponencia oral en Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería – EIEI ACOFI 2023. Producto titulado “Instrumentación y suministro energético para una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café en la unidad agroambiental La Esperanza, de la Universidad de Cundinamarca” Autores: Andrés Felipe Garibello Medina, Raúl Iván Mera Molano, Andrés Felipe Guerrero Guerrero.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tamayo Tamyó Helio Rafael *et al*, "PDEA-Cundinamarca," *Gobernación de Cundinamarca*, 2020. Disponible en: <https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/PDEA-Cundinamarca.pdf>
- [2] W. Aunsa-Ard and T. Kerdcharoen, "Electronic Nose for Analysis of Coffee Beans Obtained from Different Altitudes and Origin," *Kst*, pp. 147-151, Jan 26, 2022. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9729071>
- [3] J. Arnó Satorra, J. A. Martínez Casasnovas and A. Escolà i Agustí, "Monitoreo por sensores en la Agricultura de Precisión," *New Ag International*, 2017, Vol. Oct/Nov 2017, P. 14-19, pp. 14-19, 2017. Disponible en: <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/971c5279-6ea5-45e1-9da6-ad5af41d1e81/content>
- [4] R. K. Kodali, S. Soratkal and L. Boppana, "WSN in coffee cultivation," in Apr 2016, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7813804> DOI: 10.1109/CCAA.2016.7813804.
- [5] Á AlarcónLópez *et al*, "Vista de WSN redes de sensores inalámbricos y su aplicación a la agricultura de precisión un caso de metaanálisis," 2022. Disponible en: <https://revistas.uncyt.org/index.php/actasidi-uncyt/article/view/58/47> DOI: <https://doi.org/10.47300/actasidi-uncyt-2022-38>
- [6] Myriam Cañón Hernández, "Determinación de las necesidades hídricas en un cultivo de café, en etapa productiva, con base en el conocimiento del balance hídrico." 2018. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3627>
- [7] V. Sánchez Castillo *et al*, "Cambio climático y café (Coffea arábica) en Acevedo, Huila: una lectura desde sus cultivadores," *Revista de Investigaciones (En Línea)*, vol. 12, (2), pp. 59-69, 2018. Disponible en: <https://sievi.udi.edu.co/ojs/index.php/ID/article/view/187/184> DOI: <https://doi.org/10.33304/revinv.v12n2-2018006>
- [8] V. H. RAMIREZ B., A. JARAMILLO R. and J. ARCILA P., "Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia," *Repositorio Digital Del Centro Nacional De Investigaciones Del Café*, 2013. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4322> DOI: [https://doi.org/10.38141/cenbook-0026\\_10](https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_10)
- [9] Jaime Arcila Pulgarin, "Sistemas de producción de café en Colombia," pp. 22-60, 2007. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/720>

- [10] W. Aunsa-Ard and T. Kerdcharoen, "Electronic Nose for Analysis of Coffee Beans Obtained from Different Altitudes and Origin," *Kst*, pp. 147-151, Jan 26, 2022. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9729071> DOI: <https://doi.org/10.1109/KST53302.2022.9729071>
- [11] Universidad de Cundinamarca, "Sistema de monitoreo de variables ambientales a través de tecnologías 4.0 en cultivos de café en la provincia del Sumapaz (Cundinamarca -Colombia)." *Universidad De Cundinamarca*, 2022.
- [12] Rodríguez Larramendi *et al*, "Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba," *Acta Agronomica (Palмира)*, vol. 65, (3), pp. 248-254, 2016. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58465>
- [13] Hudson de Paula Carvalho *et al*, "Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café development weighing lysimeters for coffee culture," *Original Article Biosci. J*, vol. 26, (6), pp. 1750-1760, 2013. Disponible en: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22303/13412>
- [14] Sánchez Hernández *et al*, "Optimización del monitoreo del nivel del agua subterránea para una frecuencia fija," *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, vol. 8, (5), pp. 19-38, 2017. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7357230> DOI: 10.24850/j-tyca-2017-05-02.
- [15] Manrique and Vargas, "Estudio de la estructura del agroecosistema cafetero mediante el diagrama de ciclos causales. Estudio de caso (Cundinamarca, Colombia)," *Ager (Zaragoza, Spain)*, (28), pp. 135-159, 2020. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7275034> DOI: 10.4422/ager.2019.08.
- [16] N. L. Tarazona Meza *et al*, "Efecto de las variables climáticas sobre la fluctuación del nivel freático en suelos fluvisoles del valle del río carrizal," *Ciencia Y Tecnología (Quevedo, Ecuador)*, vol. 13, (2), pp. 55-62, 2020. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7895144> DOI: 10.18779/cyt.v13i2.393.
- [17] Enrique *et al*, "Módulo Terminal Remoto, para la adquisición de datos, monitoreo y control de procesos Agroindustriales -AgricultIC Remote Terminal Module, for data acquisition, monitoring and control of Agro-industrial processes -AgricultIC," *Revista Chilena De Ingeniería*, vol. 29, (2), pp. 245, 2021. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8025021>

- [18] F. Han, A. W. Bandarkar and Y. Sozer, "Energy harvesting from moving vehicles on highways," in *Congreso Y Exposición De Conversión De Energía IEEE 2019 (ECCE)*, Sep 2019, pp. 974-978. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8912688>
- [19] K. Shrestha *et al*, "A rotational wind energy harvester and self-powered portable weather station," in Dec 06, 2021, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9658382> DOI: 10.1109/PowerMEMS54003.2021.9658382
- [20] X. Xiao, M. Wang and G. Cao, "Solar energy harvesting and wireless charging based temperature monitoring system for food storage," *Sensors International*, vol. 4, 2023. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100208> DOI: 10.1016/j.sintl.2022.100208.
- [21] K. Sakthivel *et al*, "Averaged state space modeling and the applicability of the series Compensated Buck-Boost converter for harvesting solar Photo Voltaic energy," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, pp. 102611, 2022. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2022.102611> DOI: 10.1016/j.seta.2022.102611.
- [22] H. Sharma *et al*, "Performance analysis of solar powered DC-DC buck converter for energy harvesting IoT nodes," in Nov 2018, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8724183> DOI: 10.1109/CIPECH.2018.8724183.
- [23] E. Hegazy, W. Saad and M. Shokair, "Studying the effect of using a low power PV and DC-DC boost converter on the performance of the solar energy PV system," in Dec 15, 2020, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9334581> DOI: 10.1109/ICCES51560.2020.9334581.
- [24] J. Antonio and D. R. Malo, "Diseño electrónico con panel solar para extender la vida de un nodo en una red inalámbrica de sensores (WSN)," *Fundación Universitaria Los Libertadores*, 2018.
- [25] Wang Yitong, Shi Yunbo and Yu Xiaoyu, "Design of multi-parameter wireless sensor network monitoring system in precision agriculture," in Sep 2014, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6995123>. DOI: 10.1109/IMCCC.2014.153.
- [26] SENSIRIO, "Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15)," *The Sensor Company*, 2011. Disponible en: [https://www.sensirion.com/media/documents/BD45ECB5/61642783/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT1x\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/media/documents/BD45ECB5/61642783/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT1x_Datasheet.pdf)

- [27] ROHM SEMICONDUCTOR, "Ambient Light Sensor IC Series Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI," 2010. Disponible en: <https://www.vistronica.com/images/Documentos/BH1750FVI.pdf>
- [28] L. D. Valderrama Hurtado, "Red Inalámbrica de sensores para monitoreo de cultivo de café," *Repositorio Institucional Séneca*, 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/64067>
- [29] J. A. Abad Buri and J. P. Farez Sigcha, "Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de variables climáticas que afectan al cultivo de café, en la plantación ASOPROCCSI ubicado en Santa Isabel," 2018. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16218/1/UPS-CT007877.pdf>
- [30] A. S. Abad Alameda, "Diseño e implementación de un sistema de seguimiento de parámetros ambientales en plantaciones de café," 2016. Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2639/MAS\\_IME\\_AUT\\_012.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2639/MAS_IME_AUT_012.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [31] S. M. Saad *et al*, "A real-time greenhouse monitoring system for mango with Wireless Sensor Network (WSN)," *Iced*, pp. 521-526, Aug, 2014. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7015862>
- [32] W. M. Nooriman *et al*, "Development of wireless sensor network for harumanis mango orchard's temperature, humidity and soil moisture monitoring," in Apr 2018, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8405482> DOI: 10.1109/ISCAIE.2018.8405482.
- [33] D. Shinde and N. Siddiqui, "IOT based environment change monitoring & controlling in greenhouse using WSN," in Aug 2018, Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533808> DOI: 10.1109/ICICET.2018.8533808.
- [34] Sixto Enrique Campaña Bastidas *et al*, "Redes de sensores Inalámbricas (WSN) caso de aplicación," 2019. Disponible en: <https://libros.unad.edu.co/index.php/selloeditorial/catalog/view/55/29/235> ISBN: 978-958-651-654-9
- [35] Muhammad H. Rashid, *Electrónica De Potencia*. (4 © 2015 - Idioma Español ed.) Pearson Educación, 2015.
- [36] A. Torres López, "Instituto politecnico nacional escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica "sistema de carga con paneles solares para baterías de autos eléctricos" 2014. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/13872?show=full>

- [37] G. P. Adam *et al*, "Review of dc–dc converters for multi-terminal HVDC transmission networks," *IET Power Electronics*, vol. 9, (2), pp. 281-296, 2016. Disponible en: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2015.0530> DOI: 10.1049/iet-pel.2015.0530.
- [38] Peña Cifuentes Oscar Andrés, "Prototipo de un cargador solar fotovoltaico autónomo para dispositivos móviles en la "finca la esperanza" de la universidad de Cundinamarca," 2019. Disponible en: <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/1817>
- [39] P. Y. Munca Cadena, "Prototipo inalámbrico de supervisión de eventos aplicado en áreas con riesgo de remoción en masa," 2023.
- [40] A. C. D. Sarmiento *et al*, "The Effect of Attached Spring on the Efficiency of a Vortex-Induced Wind Energy Harvester," *2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 2022. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10109577> DOI: 10.1109/hnicem57413.2022.10109577.
- [41] Hanjun Ryu, Hong Joon Yoon and Sang Woo Kim, "Hybrid Energy Harvesters: Toward Sustainable Energy Harvesting," *Special Issue: Materials Research at Sungkyunkwan University*, vol. 31, (34), 2019. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201802898> DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201802898>.
- [42] Instituto Colombiano Agropecuario, "Informe de gestion ," *Ica*, vol. 65, (1), 2021. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/getattachment/Modelo-de-P-y-G/Transparencia-Participacion-y-Servicio-al-Ciudadano/Rendicion-de-Cuentas/INFORME-DE-GESTION-ICA-2021.pdf.aspx?lang=es-CO>
- [43] V. H. Ramírez Builes, Á J. Robledo and A. J. Peña Quiñones, "Gestión del riesgo agroclimático Vulnerabilidad y capacidad de adaptación del sistema de producción de café," *Federación Nacional De Cafeteros De Colombia, Manual Del Cafetero Colombiano: Investigación Y Tecnología Para La Sostenibilidad De La Caficultura (Vol. 1, Pp. 91–114)*, vol. Vol. 1, pp. 91-114, 2013. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4319> DOI: [https://doi.org/10.38141/cenbook0026\\_06](https://doi.org/10.38141/cenbook0026_06)
- [44] B. CHAVES C. and A. JARAMILLO R., "Regionalización de la temperatura del aire en Colombia," *Cenicafé, Cenicafé 49(3):224-230*. 1998., 1998. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/860/1/arc%2049%283%29224-230.pdf>

- [45] Gómez Vargas *et al*, "Aspectos generales del cultivo de café en Cundinamarca," 2022. Disponible en: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/37214/Ver\\_documento\\_37214.pdf?sequence=5](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/37214/Ver_documento_37214.pdf?sequence=5) DOI: 10.21930/agrosavia.nbook.7405415.
- [46] V. H. Ramírez Builes, "Germinadores y almácigos Tomo 2 Establecimiento de cafetales al sol," 2013. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4329>
- [47] Julio Montero Torres, "Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas," *Revista de investigación e innovación agropecuaria y de recursos Naturales*, vol. 9, (1), pp. 52-66, 2022. Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v9n1/2409-1618-riiarn-9-01-48.pdf> DOI: 10.53287/oqym7033yy88k.
- [48] IDEAM, "Comportamiento espacio temporal del brillo solar en Colombia," IDEAM. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/inso-text.pdf>
- [49] Sergio Cao León, "Diseño de una estación de sensores para la monitorización de las magnitudes físicas relacionadas con el crecimiento de un cultivo," *Universidad Politécnica De Valéncia*, pp. 69, 2017. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/80453> DOI: <http://hdl.handle.net/10251/80453>.
- [50] J. J. Rojas Cadena and Y. Corso Solano, "PMA vía el progreso," 2022. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/25656>
- [51] (IDEAM). *Características de la radiación solar*. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>
- [52] J. ARCILA P. *et al*, "Sistemas de producción," FNC Cenicafé, Editorial Blanecolor Ltda. 2007. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- [53] D. M. Ocampo Agudelo *et al*, "Intercambio de dióxido de carbono y cambios bioquímicos en el pericarpio durante el desarrollo del fruto del cafeto," *Cenicafé*, pp. 327-343, 2014. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/507>
- [54] J. P. Manchabajoy Cañar, D. Andrade Díaz and Castillo Marín Álvaro José, "Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café en el departamento de Nariño," *UPTC Univeersidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia*, vol. 19, (1), pp. 24-44, 2022. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5600/560070786003/html/#B9> DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13358>.

- [55] (Google). *Imagen Unidad Agroambiental La Esperanza*. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Cundinamarca+Granja+La+Esperanza/@4.2760323,74.386612,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x8e3f0320a2764d0f:0x5035be9b9b0c5ff0!8m2!3d4.2760323!4d-74.386612!16s%2Fq%2F11c6rx626m?hl=es&entry=ttu>.
- [56] M. C. Tobajas, *Energía Solar Fotovoltaica*. (2 © 2020 - Idioma Español ed.) Ecoe Ediciones, 2018.
- [57] S. Torres Pacheco *et al*, "Eficiencia en paneles solares," *Instituto Tecnológico Superior De Irapuato. Carretera Irapuato*, 2018. Disponible en: [https://www.ecorfan.org/taiwan/research\\_journals/Diseno\\_Innovativo/vol2num2/Revista\\_Disenio\\_Innovativo\\_V2\\_N2\\_2.pdf](https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Disenio_Innovativo_V2_N2_2.pdf)
- [58] Texas Instruments, "LM2596 SIMPLE SWITCHER power converter 150-kHz 3-A step-down voltage regulator," 1999-2023. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [59] UNI-T. (). *UT33+ Series Palm Size Multimeters - UNI-T Meters | Test & Measurement Tools and Solutions*. Disponible en: <https://meters.uni-trend.com/product/ut33plus-series/>
- [60] libertylab. (). *Termohigrometro Pantalla, Sonda Humedad Relativa*. Disponible en: <https://www.libertylab.co/producto/termohigrometro-pantalla/>
- [61] Extech Instruments Corporation, "Manual del usuario Medidor de humedad de suelos Modelo MO750," 20090. Disponible en: <https://www.extech-online.com/>
- [62] Espressif Systems, "ESP32 Series," *Espressif*, 2023. Disponible en: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)