



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

Facultad de Ingeniería  
y Ciencias  
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

## Monitoreo Energético

Janna Isabella Rodríguez Castro

*Director*

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

25 de febrero de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

---

Dr. Mateo López Victoria  
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

---

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano  
Director Carrera Ingeniería Electrónica

---

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano  
Director Trabajo de Grado

---

Dr. Alexander Martínez Álvarez  
Jurado 1

---

Dra. Claudia Lorena Esquivel García  
Jurado 2

Santiago de Cali, 9 de febrero de 2026

Señores  
Pontificia Universidad Javeriana – Cali  
Dr. Mateo López Victoria  
Decano  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Monitoreo Energético”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Janna Isabella Rodríguez Castro  
Janna Isabella Rodríguez Castro

Santiago de Cali, 9 de febrero de 2026

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana – Cali**

Dr. Mateo López Victoria

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado “Monitoreo Energético”, realizado por Janina Isabella Rodríguez Castro, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



---

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Director Trabajo de Grado

# Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres y a mi hermana, quienes han estado presentes a lo largo de estos años de formación, brindándome apoyo, consejos y fortaleza en cada etapa del camino. Sin su amor, paciencia y acompañamiento, nada de esto habría sido posible. Este logro no es únicamente mío, sino también el reflejo del compromiso, los valores y el cariño que me han inculcado a lo largo de mi vida.

Agradezco a mi profesor Luis Eduardo Tobón, quien me acompañó en el desarrollo de este trabajo, por su orientación constante, su disposición para aclarar dudas y por compartir su conocimiento con generosidad. Extiendo también mi gratitud a otros profesores que, con sus ideas y recomendaciones, contribuyeron a guiarme en cada etapa del proceso investigativo.

Finalmente, gracias a mis compañeros de carrera, quienes con su compañía, colaboración y apoyo hicieron que este camino fuera más llevadero. Gracias por las conversaciones, los consejos y el trabajo en equipo durante estos años de formación profesional.

# Glosario

## Símbolos

- $^{\circ}C$  Unidad de medición de la temperatura (Grados centígrados)  
 $\Omega$  Unidad de medida de la resistencia eléctrica (Ohmios)

## Acrónimos y Abreviaturas

<i>SIME</i>	Sistema de Información Minero Energético
<i>AIE</i>	Agencia Internacional de la Energía
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>PSIE</i>	Servicios Integrales de Energía
<i>SENER</i>	Secretaría de Energía
<i>PLA</i>	Ácido Poliláctico
<i>SDA</i>	Serial Data Line
<i>SCL</i>	Serial Clock Line
<i>mm</i>	Milímetro
<i>mA</i>	Miliamperio
<i>km</i>	Kilómetro
$\mu s$	Microsegundo
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
<i>COP</i>	Peso Colombiano
<i>m</i>	Metro
<i>ms</i>	Milisegundo
<i>kHz</i>	kilohertz
<i>ADC</i>	Convertidor Analógico-Digital
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display (Pantalla de Cristal Líquido)
<i>DC</i>	Direct Current (Corriente continua)
<i>DAC</i>	Convertidor Digital-Analógico

## Términos

<i>I2C</i>	Un protocolo de comunicación de bus serie síncrono de dos cables que permite que varios circuitos integrados se comuniquen entre sí.
<i>ESP32</i>	Un chip de microcontrolador de bajo coste y bajo consumo que integra Wi-Fi y Bluetooth.
<i>Power Bank</i>	Batería portátil recargable utilizada para alimentar dispositivos electrónicos de forma autónoma.

# Resumen

El acceso confiable a la energía es un componente fundamental para garantizar un desarrollo equitativo, especialmente en comunidades aisladas donde la cobertura del servicio eléctrico es limitada o inexistente. Estas zonas enfrentan dificultades para aprovechar alternativas basadas en energías renovables debido a la falta de información precisa sobre la disponibilidad real de recursos como la radiación solar, la velocidad del viento y la velocidad del agua. Ante esta problemática, se propone el diseño e implementación de un módulo de monitoreo energético de bajo costo, portátil y de fácil instalación, capaz de medir variables ambientales que permitan estimar el potencial energético de una zona.

El prototipo desarrollado integra tres sensores principales: un panel fotovoltaico para cuantificar radiación solar, un sensor Hall para medir la velocidad del flujo de agua y un anemómetro para registrar la velocidad del viento. El diseño físico del dispositivo se realizó en una caja acrílica resistente, compacta y adaptada para su uso en campo.

El módulo se evaluó mediante pruebas en ambientes reales y controlados, evidenciando un comportamiento estable de los sensores y su capacidad para identificar variaciones en las tres variables monitoreadas. El sistema propuesto se alinea con los objetivos de sostenibilidad relacionados con la reducción de la desigualdad energética, al ofrecer una herramienta accesible y práctica para identificar fuentes de energía renovable en comunidades con recursos limitados.

**Palabras Clave:** Monitoreo energético, energías renovables, comunidades aisladas, potencial energético.

# Abstract

Reliable access to energy is a fundamental component for ensuring equitable development, especially in isolated communities where electrical service coverage is limited or nonexistent. These areas face difficulties in adopting renewable energy solutions due to the lack of precise information about the actual availability of resources such as solar radiation, wind speed, and water flow velocity. In response to this challenge, this work proposes the design and implementation of a low-cost, portable, and easy-to-install energy monitoring module capable of measuring environmental variables that allow the estimation of a region's energy potential.

The developed prototype integrates three main sensors: a photovoltaic panel to measure solar radiation, a Hall effect sensor to determine water flow velocity, and an anemometer to record wind speed. The physical design of the device was built in a compact and durable acrylic enclosure suitable for field use.

The module was evaluated through tests conducted in both real and controlled environments, demonstrating stable sensor performance and their ability to detect variations in the three monitored variables. The proposed system aligns with sustainability objectives related to reducing energy inequality by providing an accessible and practical tool for identifying renewable energy sources in communities with limited resources.

**Keywords:** Energy monitoring, renewable energy, isolated communities, energy potential.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Planteamiento del Problema</b>	<b>3</b>
2.1. Formulación . . . . .	4
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo General . . . . .	7
4.2. Objetivos Específicos . . . . .	7
<b>5. Marco de Referencia</b>	<b>9</b>
5.1. Áreas Temáticas . . . . .	9
5.2. Marco Teórico . . . . .	9
5.3. Trabajos Relacionados . . . . .	14
<b>6. Materiales y Métodos</b>	<b>15</b>
6.1. Arquitectura general del sistema de monitoreo energético . . . . .	15
6.2. Sensor de viento . . . . .	17
6.2.1. Configuración y funcionamiento del sistema de medición . . . . .	23
6.3. Sensor de flujo de agua . . . . .	24
6.3.1. Configuración y funcionamiento del sistema de medición . . . . .	26
6.4. Sensor solar . . . . .	28
6.5. Diseño de PCB . . . . .	29
6.6. Diseño Estructural de la Caja del Dispositivo . . . . .	30
<b>7. Resultados y Discusión</b>	<b>33</b>
7.1. Pruebas de energía eólica . . . . .	33
7.2. Pruebas de energía hidráulica . . . . .	35
7.3. Pruebas de energía solar . . . . .	39
<b>8. Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>47</b>
<b>10. Anexos</b>	<b>49</b>
<b>Anexos</b>	<b>49</b>

Bibliografía

55

# Índice de figuras

6.1. Diagrama completo del sistema fuente: Propia . . . . .	15
6.2. Diseño en 3D del anemometro Fuente: Propia . . . . .	18
6.3. Balinera 624-ZZ Fuente: SKF . . . . .	20
6.4. Sensor de efecto Hall Fuente: Electronilab . . . . .	21
6.6. Sensor de caudal YF-S201 Fuente: Ferretrónica . . . . .	26
6.7. Panel solar Fuente: Mercado libre . . . . .	29
6.8. Diseño de PCB en Proteus Fuente: Elaboración propia. . . . .	30
6.9. Prototipo final Fuente: Elaboración propia. . . . .	31
7.1. Anemometro Fuente: Elaboración propia . . . . .	33
7.2. Velocidad del viento registrada por el anemometro . . . . .	34
7.3. Prueba de velocidad de flujo Fuente: Elaboración propia. . . . .	35
7.4. Comportamiento de la velocidad del agua en el riachuelo Fuente: Elaboración propia	37
7.5. Prueba en ambiente controlado Fuente: Elaboración propia . . . . .	37
7.6. Datos con variación en la velocidad. . . . .	38
7.7. Comportamiento del voltaje registrado en horas de la tarde. Fuente: Elaboración propia	40
7.8. Comportamiento del voltaje registrado en horas de la mañana. Fuente: Elaboración propia . . . . .	42
7.9. Comportamiento del voltaje registrado durante 12 horas. Fuente: Elaboración propia	42
8.1. Presupuesto del prototipo Fuente: Elaboración propia . . . . .	45
10.1. Diseño de Caja. . . . .	51
10.2. Diseño en 3D - Tapa anemómetro . . . . .	51
10.3. Diseño en 3D - Cazoleta . . . . .	52
10.4. Diseño en 3D - Base . . . . .	52
10.5. Diseño en 3D - Base . . . . .	52
10.6. Diseño esquemático en Proteus . . . . .	53
10.7. Descripción general . . . . .	53
10.8. Especificaciones eléctricas . . . . .	54
10.9. Especificaciones de medición . . . . .	54
10.10 Interfaces y visualización . . . . .	54

# Índice de cuadros

6.1. Comparación de cazoletas de anemómetro: semicirculares vs semitriangulares . . . . .	17
6.2. Comparación de materiales de impresión 3D . . . . .	19
6.3. Comparación de tipos de rodamientos . . . . .	19
6.4. Comparación entre sensor optoacoplador estilo herradura y sensor de efecto Hall . . . . .	20
6.5. Especificaciones técnicas del sensor de efecto Hall . . . . .	21
6.6. Comparación técnica entre Arduino Nano y ESP32 Fuente: Propia . . . . .	22
6.7. Comparación de sensores de caudal de agua . . . . .	25
6.8. Especificaciones técnicas del sensor de caudal YF-S201. Fuente: Propia . . . . .	26
6.9. Comparación de paneles fotovoltaicos utilizados como sensores de radiación solar . . . . .	28
7.1. Registro de velocidad del viento obtenida con el anemómetro. . . . .	34
7.2. Datos obtenidos en ambiente real . . . . .	36
7.3. Datos con velocidad controlada . . . . .	38
7.4. Datos con velocidad disminuida . . . . .	38
7.5. Datos registrados por el panel . . . . .	39
7.6. Datos registrados por el panel . . . . .	39
7.7. Datos registrados por el panel . . . . .	41
7.8. Voltaje registrado por el panel (parte 1) . . . . .	43
7.9. Voltaje registrado por el panel (parte 2) . . . . .	43

# Introducción

---

En la actualidad, las comunidades ubicadas en zonas aisladas presentan una marcada desventaja en cuanto al acceso a la energía eléctrica, en comparación con las áreas urbanas. La energía eléctrica constituye un recurso esencial para el desarrollo y bienestar humano, pues interviene en el funcionamiento de múltiples actividades cotidianas, tales como la iluminación, la preservación de alimentos, la operación de sistemas de comunicación y el suministro de agua potable mediante instalaciones sanitarias. La carencia de este recurso limita significativamente las oportunidades de desarrollo social y económico, afectando la calidad de vida de millones de personas que habitan en territorios remotos y dificultando la satisfacción de necesidades básicas y el progreso comunitario [1].

A partir de esta problemática, surge la iniciativa de evaluar el potencial energético presente en dichas comunidades, con el propósito de atender esta brecha y promover soluciones sostenibles que puedan adaptarse a sus características y condiciones particulares. Esta propuesta reconoce la existencia de diversos recursos naturales aprovechables para la generación energética, tales como la energía eólica proveniente de la fuerza del viento, la energía solar derivada de la radiación solar y la energía hídrica obtenida del caudal y la fuerza de los ríos. El aprovechamiento adecuado de estos recursos representa una alternativa viable para fomentar el desarrollo energético independiente y sostenible.

Evaluar el potencial energético implica analizar en qué medida los recursos disponibles en una zona pueden aprovecharse para la generación de energía de manera eficiente y sostenible. Este proceso no solo contempla la capacidad técnica de producir energía, sino también su viabilidad económica y operativa en el contexto real de la comunidad. Para ello, se examinan aspectos como la disponibilidad del recurso, el desempeño del sistema de conversión y los costos asociados a su implementación y mantenimiento. En este análisis, los datos climáticos desempeñan un papel fundamental, incluyendo valores de radiación solar, patrones de viento y la presencia de corrientes o cuerpos de agua utilizables. Esta información permite determinar la pertinencia de emplear fuentes solares, eólicas o hídricas y facilita el diseño de sistemas energéticos adaptados a las condiciones y necesidades específicas de cada comunidad.

Además de la evaluación de los recursos naturales y la viabilidad técnica, es esencial realizar un análisis de las posibles zonas donde se podría llevar un prototipo final según la demanda energética que se presente en dicha zona, teniendo en cuenta los informes de las necesidades de la comunidad y de otras posibles aplicaciones.

La evaluación del potencial energético en estas zonas aisladas representa una oportunidad para reducir las brechas en el acceso a la energía y promover condiciones de equidad en el desarrollo. Este enfoque permite impulsar soluciones sostenibles basadas en el aprovechamiento responsable de

los recursos naturales disponibles, y facilita el diseño de sistemas energéticos que respondan a las necesidades específicas de cada región. De esta manera, es posible contribuir a mejorar la calidad de vida de las comunidades, potenciando su bienestar y capacidad de crecimiento a largo plazo.

# Planteamiento del Problema

---

En la actualidad, la energía se ha convertido en un recurso indispensable en la vida diaria de las personas. Su función abarca desde la conservación de alimentos hasta la creación de ambientes cómodos, proporcionando iluminación y mejorando la calidad de los servicios de salud, entre otros aspectos esenciales. Todos estos servicios contribuyen de manera significativa a mejorar la calidad de vida de las personas y se consideran el motor que impulsa el crecimiento económico y el bienestar de un país. Cuando se produce una escasez de suministro energético, se genera una desigualdad en la sociedad, ya que no todos pueden acceder a una vida digna, lo que los expone a dificultades y condiciones desfavorables en comparación con aquellos que disfrutan de un servicio eléctrico.

Hoy en día, el 97 % de la población colombiana tiene acceso a la electricidad, según datos del Sistema de Información Minero Energético Colombiano (SIME), una cifra superior al promedio mundial, que se sitúa en 83 %, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Sin embargo, al compararse con otros países latinoamericanos de desarrollo similar, Colombia se encuentra por debajo del promedio regional. Por ejemplo: en Argentina la cobertura alcanza el 99,8 %, en Brasil y Costa Rica el 99,5 %, y en Chile el 99,6 % (según datos del Banco Mundial) [2]. Estos valores evidencian que, pese a los avances, aún persisten desigualdades territoriales y poblacionales en el acceso al servicio eléctrico en Colombia.

Las comunidades que permanecen excluidas del sistema eléctrico enfrentan afectaciones significativas en distintos ámbitos de su vida cotidiana. El problema no se limita únicamente a la ausencia del servicio, sino también a las consecuencias sociales, económicas y sanitarias que esta genera. En muchas zonas, especialmente rurales, las familias dependen de combustibles sólidos como la leña o el carbón para suplir necesidades básicas de iluminación y cocción, lo que incrementa la exposición a contaminantes y enfermedades respiratorias. Asimismo, la falta de energía reduce las oportunidades de empleo, limita la productividad y contribuye a la perpetuación de condiciones de pobreza y vulnerabilidad socioeconómica [3].

En Colombia, hasta la fecha, no se ha desarrollado una metodología exhaustiva para calcular la pobreza energética a nivel nacional y regional. Como resultado, los recursos que podrían dirigirse a abordar esta problemática se asignan a otras áreas que no requieren atención inmediata. Uno de los estudios más recientes al respecto fue realizado por Promigas, en colaboración con su fundación y la firma Inclusión SAS. Según este análisis, se estima que un 18.5 % de la población colombiana se encuentra en situación de pobreza energética, lo que equivale a aproximadamente 9.6 millones de ciudadanos [4]. Para lograr un desarrollo económico y social sólido en un país, es esencial garantizar una vida digna para todos sus ciudadanos y promover la equidad en la calidad de vida. En el caso de Colombia, se han implementado estrategias para llevar electricidad a comunidades aisladas. Sin embargo, ninguna de estas soluciones ha demostrado ser permanente ni sostenible, en gran parte

debido a la falta de infraestructura en estas zonas y a los desafíos que implica el mantenimiento de dispositivos. Una alternativa viable radica en la adopción de fuentes de energía renovable. En Colombia, se ha centrado en particular en la energía hidroeléctrica. No obstante, la doctora Martha Cobo, decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana, argumenta que la implementación de energía hidroeléctrica puede no ser la mejor elección. Afirmó: "No tenemos capacidad de crecimiento con las hidroeléctricas. Es una energía verde, es cierto; no tienen huella de carbono, es renovable, pero tiene otros problemas ambientales"[5].

Para lograr una solución eficaz y duradera que proporcione energía de manera sostenible en una zona aislada, es esencial evaluar el potencial energético. Este consiste en realizar un análisis exhaustivo de múltiples factores que pueden afectar la generación de energía en esa ubicación específica. Para evaluar el potencial energético en una zona rural, se deben seguir varios pasos importantes. En primer lugar, se debe recopilar información geográfica, incluyendo la altitud y la latitud de la zona. Además, es fundamental recopilar datos climáticos pertinentes, como la radiación solar, los patrones de viento y la disponibilidad de recursos hídricos. Estos datos son cruciales para determinar la viabilidad de fuentes de energía específicas, como la solar, eólica o hidroeléctrica. Además de la evaluación de los recursos naturales y la viabilidad técnica, es esencial llevar a cabo un análisis de la demanda de energía en la zona, teniendo en cuenta las necesidades de la comunidad y de otras posibles aplicaciones. También es fundamental realizar consultas y colaborar estrechamente con los habitantes locales para comprender sus necesidades. No obstante, la gran mayoría de los habitantes en estas zonas carecen de formación profesional, lo que dificulta su capacidad para proporcionar los datos necesarios para evaluar el potencial energético. Además, desconocen cuáles son las necesidades específicas o los derechos que deberían reclamar, ya que han vivido la mayor parte de sus vidas en comunidades aisladas con escaso contacto con el mundo exterior y han experimentado un estilo de vida carente de muchas de las comodidades modernas.

Por tanto, con el propósito de reducir las desigualdades en el acceso al suministro de energía, se propone un proyecto de desarrollo capaz de evaluar el potencial energético en zonas aisladas. Este sistema realizará la medición de variables ambientales como la radiación solar, la velocidad del agua y la velocidad del viento, consideradas como fuentes potenciales de energía renovable en estas regiones. De esta manera, el sistema permitirá cuantificar y registrar el potencial energético disponible, generando datos que podrán ser analizados por especialistas para evaluar la viabilidad de implementar soluciones basadas en energías renovables en dichas áreas.

## 2.1. Formulación

El presente proyecto de desarrollo se enfoca en la implementación de un sistema para el monitoreo del potencial energético en zonas aisladas, a partir del aprovechamiento de fuentes de energía alternativas. Por ello, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo monitorear el potencial energético de un lugar aislado empleando energías alternativas?.

# Justificación

---

El acceso a la energía eléctrica constituye un factor esencial para garantizar condiciones de vida dignas, acceso a oportunidades y desarrollo social. Sin embargo, en Colombia persisten brechas significativas en la cobertura del servicio. De acuerdo con la Dirección de Energía Eléctrica del Ministerio de Minas y Energía, entre 500.000 y 800.000 hogares ubicados en zonas rurales carecen de suministro eléctrico, lo que equivale aproximadamente a entre 1.5 y 2.4 millones de personas afectadas [6]. Esta desigualdad energética profundiza las brechas sociales entre las áreas urbanas y rurales, limitando el acceso a educación, salud, comunicación y productividad.

Actualmente, cerca del 18.4% de la población nacional no cuenta con acceso continuo o estable a energía, debido a factores como la falta de inversión en infraestructura moderna, la complejidad de los procesos administrativos para la conexión de sistemas renovables, el impacto de conflictos sociales y territoriales, y la priorización de inversiones en zonas con mayor rentabilidad económica [3]. Existen alternativas adicionales para la generación de energía, particularmente las energías no convencionales, que se definen como fuentes de energía renovable disponibles a nivel mundial y que son ambientalmente sostenibles. A pesar de ser una buena opción, en Colombia, la capacidad efectiva de generación de energía en 2024 se situó en 21.368,9 MW. De esta capacidad, 1.379,9 MW provienen de plantas solares fotovoltaicas y 66,7 MW corresponde a plantas térmicas. En comparación con el 2023 se puede decir que se incrementó la capacidad efectiva neta del sistema en un 7,39% [7]. Aunque se han impulsado estrategias como la expansión de redes, sistemas centralizados y soluciones fotovoltaicas individuales, estas alternativas continúan siendo costosas y difíciles de implementar a gran escala en el corto plazo [6] [8].

En este contexto, la implementación de un sistema de monitoreo energético para zonas aisladas se presenta como una solución estratégica que facilita la identificación del recurso energético renovable más viable en cada territorio. El dispositivo se encargará de medir y registrar variables ambientales como la velocidad del viento, la velocidad del flujo de agua y la radiación solar. Sin embargo, los valores obtenidos no determinan por sí solos la elección de la fuente energética; estos datos serán interpretados por expertos en energía y desarrollo rural, quienes evaluarán la viabilidad técnica, ambiental y económica de cada alternativa antes de tomar la decisión final sobre el tipo de sistema de generación a implementar.

La propuesta se caracteriza por ser una alternativa de bajo costo, portable y de fácil instalación, lo cual posibilita su adopción por comunidades rurales sin necesidad de modificar su infraestructura. A largo plazo, este sistema puede contribuir a reducir la brecha energética, promover el uso sostenible de los recursos naturales disponibles y fortalecer la autonomía y calidad de vida de las comunidades rurales colombianas.

# Objetivos

---

## 4.1. Objetivo General

- Diseñar un dispositivo capaz de medir las variables de radiación solar, velocidad del agua y viento de manera que permita determinar su potencial energético.

## 4.2. Objetivos Específicos

- Definir los requerimientos del sistema a partir de las necesidades de las comunidades donde se va a implementar el diseño.
- Desarrollar un prototipo capaz de medir las variables climáticas establecidas.
- Evaluar el funcionamiento del dispositivo según los requerimientos.

# Marco de Referencia

---

## 5.1. Áreas Temáticas

- Power engineering and energy - energy potential - Solar panels.
- Power engineering and energy - Solar energy - Photovoltaic cells - Solar power generation.
- Power electronics - Wind energy conversion - Wind energy - Wind energy generation.
- Power engineering and energy - Energy conversion - Hydroelectric power generation.
- Power engineering and energy - Hydroelectric-thermal power generation.

## 5.2. Marco Teórico

### Energía solar

La energía solar es aquella que nace de la fusión nuclear del helio e hidrógeno en el Sol. Como resultado de este proceso, se emite energía en forma de radiación electromagnética, la cual llega a la Tierra en forma de luz visible, calor y radiación ultravioleta. Desde el punto de vista físico, la potencia de la radiación solar incidente sobre una superficie puede expresarse como la irradiancia solar, definida por:

$$G = \frac{P}{A} \quad (5.1)$$

donde  $G$  es la irradiancia solar medida en  $\text{W}/\text{m}^2$ ,  $P$  es la potencia incidente y  $A$  es el área de la superficie receptora.

El Sol constituye la fuente primaria de tres tipos de energía renovable: solar fotovoltaica, solar termoeléctrica y solar térmica, las cuales contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático. Desde el punto de vista energético, se trata de una de las fuentes renovables más accesibles en términos de instalación, gestión y uso. Existen tres tipos principales de aprovechamiento de la energía solar:

- **Energía solar térmica:** Este sistema aprovecha el aporte calorífico que brinda el Sol. La radiación solar se convierte en energía térmica para calentar un fluido que se puede utilizar para diversos usos como puede ser la calefacción o el agua caliente sanitaria. La energía térmica absorbida puede expresarse como:

$$Q = mc\Delta T \quad (5.2)$$

donde  $Q$  es la energía térmica transferida,  $m$  es la masa del fluido,  $c$  es el calor específico y  $\Delta T$  es la variación de temperatura.

En cuanto a las centrales solares hay que destacar dos tipos: las termoeléctricas, que calientan un fluido para obtener vapor de agua y mover la turbina que genera electricidad; y los parques fotovoltaicos, que dominan la reacción del silicio que convierte la luz en electrones.

- **Energía fotovoltaica:** Este tipo de energía permite la obtención directa de electricidad a partir de la radiación solar mediante el efecto fotoeléctrico. La eléctrica generada por un panel fotovoltaico puede aproximarse mediante la expresión:

$$P_{FV} = G \cdot A \cdot \eta \quad (5.3)$$

donde  $\eta$  representa la eficiencia del panel fotovoltaico. Esta relación muestra que la energía generada depende directamente de la irradiancia solar incidente.

Se trata de un tipo de energía renovable, inagotable y no contaminante que puede producirse en instalaciones con paneles solares fotovoltaicos. Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que es modular: los paneles pueden usarse para el autoconsumo (brindar electricidad en hogares o edificios) o también para abastecer a la red eléctrica a través de grandes centrales.

- **Energía solar pasiva:**

La energía solar pasiva aprovecha directamente la radiación solar sin realizar transformaciones energéticas adicionales, reduciendo la necesidad de dispositivos mecánicos o eléctricos.

Entre las formas más comunes de aprovechamiento de la energía solar se encuentran las placas solares. Los fotones incidentes sobre las células fotovoltaicas generan pares electrón-hueco, produciendo una corriente eléctrica cuya magnitud es proporcional a la radiación incidente:

$$I_{ph} \propto G \quad (5.4)$$

Cuando la energía solar es absorbida, las células fotovoltaicas generan corriente continua, la cual es posteriormente transformada en corriente alterna mediante un inversor. La energía solar recibida por una superficie durante un intervalo de tiempo puede expresarse como:

$$E = G \cdot A \cdot t \quad (5.5)$$

donde  $t$  es el tiempo de exposición.

Entre las maneras más comunes de transformar las energías se encuentran las placas solares. Los fotones de la luz del sol inciden directamente en las células fotovoltaicas de la placa, lo que da paso a la creación de un campo de electricidad entre las capas que la componen y generando una corriente eléctrica. De tal manera que, cuanto más intensa sea la luz recibida, mayor será el flujo eléctrico.

Cuando la energía solar es absorbida, las células fotoeléctricas transforman esa energía en corriente continua, para luego a través del inversor transformarse en corriente alterna, y así darles uso a nuestros equipos eléctricos que tenemos en nuestro hogar u oficina. La energía solar se puede medir de diversas maneras, dependiendo del contexto y el propósito de la medición.

- **Radiación Solar:** Se mide la cantidad de energía solar que llega a una superficie en un período de tiempo dado. Esta medición se expresa en unidades como vatios por metro cuadrado o kilovatios por metro cuadrado.
- **Irradiancia Solar:** Es la potencia de la radiación solar por unidad de área. Se mide en vatios por metro cuadrado.
- **Radiación Solar Global:** Es la suma de la radiación solar directa y difusa que llega a una superficie horizontal. Se mide en vatios por metro cuadrado.
- **Insolación:** Es la cantidad total de energía solar recibida por una superficie en un período de tiempo dado. Se expresa comúnmente en horas de sol por día o en kilovatios-hora por metro cuadrado por día.

Para medir la energía solar, se utilizan instrumentos como piranómetros (para medir la radiación solar directa), pirgeómetros (para medir la radiación solar global), y radiómetros de sombra (para medir la insolación). Estos instrumentos pueden ser estacionarios o móviles, dependiendo de la aplicación y la ubicación de la medición [9].

**Energía Eólica** La energía eólica. Se trata de la energía que se obtiene del viento a través de un generador eólico, caracterizada por ser inagotable, no contaminante y que contribuye a la reducción del uso de combustibles fósiles causantes de los gases de efecto invernadero (GEI). Para entender de dónde proviene la energía eólica hay que tener en cuenta, en primer lugar, al sol. Es la radiación solar quien al calentar el aire, la tierra y el mar provoca que haya viento, elemento clave para generar este tipo de energía renovable. Cuando el aire está en movimiento produce energía cinética, la cual se puede expresar como:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.6)$$

donde  $m$  es la masa del aire y  $v$  su velocidad.

Las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación y posteriormente en energía eléctrica. La potencia disponible en el viento se calcula mediante la expresión:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (5.7)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  el área barrida por las palas del aerogenerador y  $v$  la velocidad del viento. Esta relación evidencia que la velocidad del viento es el factor más influyente en la generación de energía eólica.

La variación de la velocidad del viento con la altura puede modelarse mediante la ley de potencia:

$$v(z) = v_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (5.8)$$

donde  $\alpha$  depende de la rugosidad del terreno.

La energía eólica se puede medir de varias formas, algunas de esas formas son:

- **Velocidad del Viento:** La velocidad del viento es un factor crucial para determinar la cantidad de energía que se puede capturar. Se mide típicamente en metros por segundo o kilómetros por hora. Para medir la velocidad del viento, se utilizan anemómetros.
- **Densidad del Aire:** La densidad del aire afecta la cantidad de energía cinética disponible en el viento. Se mide en kilogramos por metro cúbico y varía con la altitud y la temperatura.
- **Potencia del Viento:** La potencia disponible en el viento se calcula utilizando la fórmula (5.7), donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área transversal interceptada por las palas del aerogenerador y  $v$  es la velocidad del viento.
- **Producción de Energía:** La producción real de energía de un parque eólico se mide en kilovatios o megavatios. Esta medida se obtiene directamente de los generadores eólicos.
- **Factor de Capacidad:** Es la relación entre la producción real de energía y la capacidad instalada de un parque eólico. Se expresa como un porcentaje y es un indicador de la eficiencia operativa del parque.

Para medir la energía eólica se instalan estaciones meteorológicas que registran la velocidad y dirección del viento, la temperatura y otros parámetros relevantes. Estos datos se utilizan para evaluar el potencial de energía eólica en la ubicación y diseñar sistemas de generación de energía eólica eficientes [10]

### Energía Hídrica

La energía hidráulica aprovecha la energía potencial y cinética del agua en movimiento para generar electricidad. La energía potencial asociada a un volumen de agua situado a una cierta altura se expresa como:

$$E_p = mgH \quad (5.9)$$

donde  $m$  es la masa del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $H$  la altura de caída.

El caudal del agua, parámetro fundamental en sistemas hidráulicos, se define como:

$$Q = A \cdot v \quad (5.10)$$

donde  $Q$  es el caudal volumétrico,  $A$  el área de la sección transversal y  $v$  la velocidad del agua.

Una de las mayores ventajas que presenta este tipo de energía es su carácter renovable, no contaminante y gracias al ciclo del agua se puede considerar inagotable. Por otro lado, la construcción de

presas o sistema de retención del caudal del agua, si no se proyectan de forma sostenible y ordenada, puede suponer un gran impacto medioambiental. La modificación de elementos del ecosistema pueden suponer otro tipo de perjuicios sobre la flora y la fauna del entorno.

La historia de la energía hidráulica se remonta a la antigüedad. De hecho, los molinos movidos por agua para moler trigo no dejan de ser una forma de aprovechar el movimiento del agua. A finales del siglo XIX, con el desarrollo de los transformadores eléctricos y su adaptación a esta metodología comienza la expansión de la energía hidráulica. Además, la Revolución Industrial contribuye a que su expansión se acelere. La generación de la energía hidráulica se da de distintas formas, puesto que el movimiento del agua se puede obtener de distintas formas.

- **Construcción de presas:** Es uno de los métodos más corrientes y con el que se suele obtener en la mayor parte de las ocasiones la electricidad. La potencia dependerá del caudal y del salto del agua, -la altura desde la que cae- la propia caída del agua hace que la turbina se mueva y conectada a un transformador genera la corriente eléctrica. Dentro de la modalidad de generación de energía mediante la construcción de presas existe la posibilidad de controlar el caudal mediante un sistema de bombeo. Este método satisface la demanda en función de los picos de consumo que se experimenten. De tal forma, que se libera el agua cuando es necesario producir energía. El principal problema de estos sistemas es que modifican el curso natural del agua con el impacto medioambiental que conlleva.
- **Corrientes de ríos:** Otro de los métodos utilizados para la generación de electricidad es aprovechar las corrientes de los ríos: la propia corriente es la encargada de mover la turbina. En este caso, y a diferencia de la anterior modalidad, uno de los inconvenientes es la capacidad de controlar el flujo del agua.
- **Mareas:** En este caso, la llamada energía mareomotriz es aquella que aprovecha el movimiento de las mareas para generar electricidad. El movimiento de las mareas es altamente predecible, por lo que en los lugares donde la pleamar y bajamar oscilan en gran magnitud puede ser una alternativa.
- **Olas:** Es conocida como energía undimotriz. Es el aprovechamiento energético producido por el movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, de ahí que sea muy irregular. Para solucionar este problema, se han desarrollado múltiples dispositivos o convertidores de energías del mar según el principio de captación del dispositivo. Se trata de una de las energías renovables más prometedoras.

La energía hidroeléctrica se mide y monitorea utilizando sistemas de medición integrados en las centrales hidroeléctricas, que registran datos como la cantidad de agua que fluye, la altura de caída y la cantidad de energía generada. Estos datos se utilizan para controlar y optimizar la operación de la central, así como para informar sobre su rendimiento y producción de energía [11]

### 5.3. Trabajos Relacionados

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un dispositivo destinado a apoyar la determinación del potencial energético en zonas aisladas. Para ello, se requiere el análisis de variables climatológicas que pueden constituirse en fuentes de energía no convencional, tales como la radiación solar, la velocidad del viento y la disponibilidad de recursos hídricos.

El dispositivo propuesto permitirá realizar el monitoreo y registro de estas variables de manera continua, con el fin de proporcionar información confiable que facilite la evaluación del potencial energético de un área específica.

En este contexto, en el año 2018, la cobertura eléctrica en México alcanzó el 96,6 %. A pesar de este avance, proporcionar electricidad a aproximadamente 3,5 millones de personas sin acceso, de las cuales el 60 % pertenece a comunidades indígenas, se presentaba como un desafío considerable. Esto se debía en gran medida a que la mayoría de estas personas residían en comunidades pequeñas y remotas que enfrentan diversas dificultades, incluida la falta de servicios e infraestructura básica, como carreteras, agua, telecomunicaciones, escuelas y atención médica [12]. Por esta razón, surgió el proyecto Servicios Integrales de Energía (PSIE), el cual respaldó los objetivos de largo plazo del Gobierno para llevar la electricidad a todas las regiones del país. Mediante estrategias y acciones implementadas y supervisadas por la Secretaría de Energía (SENER), se logró una ampliación significativa de la electrificación rural y la adopción de energías renovables. El enfoque se centró en la instalación de granjas solares y otras infraestructuras destinadas a suministrar electricidad a las comunidades remotas. A lo largo de los años, se han explorado diversas soluciones para llevar energía a las zonas aisladas. Sin embargo, muchos de estos intentos no han logrado ofrecer una solución duradera, enfrentándose a desafíos como costos elevados, problemas de infraestructura y dificultades en su gestión, entre otros. Ante esta situación, han surgido organizaciones con el objetivo de proporcionar soluciones sostenibles que puedan mantenerse.

En 2010, se estableció Hibrelec con el propósito principal de desarrollar plantas híbridas que integren dos fuentes de energía renovable (biomasa sólida y energía solar fotovoltaica). Este enfoque permite la generación de energía eléctrica y térmica, ofreciendo así una solución integral para el suministro de energía de calidad en zonas aisladas de Iberoamérica [13]. En el transcurso del año 2022, un grupo de estudiantes de la Universidad de La Guajira ideó una solución energética que se fundamenta en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Este enfoque innovador está diseñado para atender las necesidades energéticas de comunidades y grupos poblacionales que carecen de acceso a la electricidad, ya sea por encontrarse en zonas aisladas de difícil alcance o simplemente por la ausencia de cobertura en el sistema convencional. En un contexto donde la demanda energética se ha convertido en un imperativo para el desarrollo y la mejora de la calidad de vida, los sistemas eléctricos tradicionales enfrentan desafíos significativos derivados de la contaminación y la huella de carbono que generan. En este sentido, surge la urgente necesidad de explorar fuentes de energía eléctrica no convencionales. La singularidad de la propuesta desarrollada por estos estudiantes radica en su enfoque económico, pues se concibió con la premisa de ser fácilmente implementada en aquellas áreas que requieren una solución energética accesible y eficaz [14].

# Materiales y Métodos

## 6.1. Arquitectura general del sistema de monitoreo energético

El prototipo desarrollado corresponde a un sistema integrado de monitoreo energético diseñado para medir tres variables ambientales asociadas al potencial de generación renovable: velocidad del viento, velocidad del flujo de agua y radiación solar.

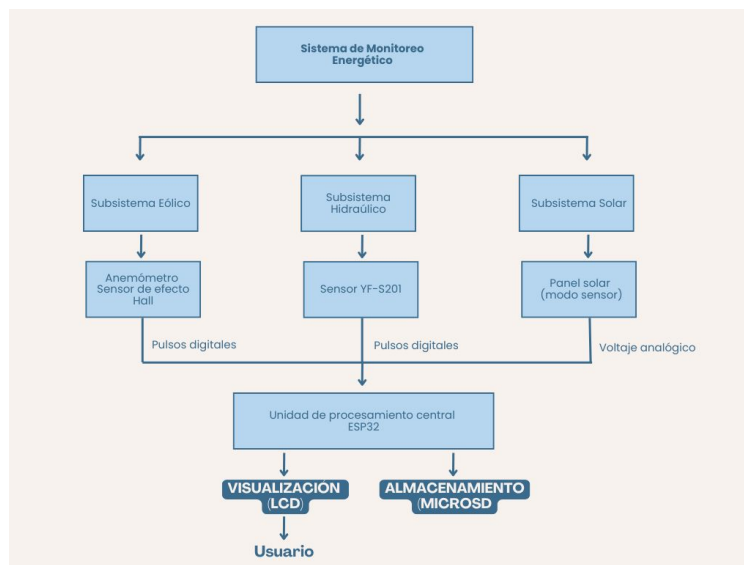


Figura 6.1: Diagrama completo del sistema fuente: Propia

Como se observa en la figura anterior, los tres subsistemas de medición comparten una única unidad de procesamiento basada en el microcontrolador ESP32, así como un sistema común de alimentación, visualización y almacenamiento.

La arquitectura general del sistema se compone de:  
Subsistema de adquisición de datos:

- Sensor de efecto Hall (anemómetro)
- Sensor de caudal YF-S201
- Panel fotovoltaico como sensor de radiación

Unidad de procesamiento:

- Microcontrolador ESP32
- Manejo de interrupciones para conteo de pulsos
- Conversión analógica-digital para medición de voltaje solar

Subsistema de visualización:

- Pantalla LCD 20x4 con interfaz I2C

Subsistema de almacenamiento:

- Módulo microSD para registro periódico de datos

Sistema de alimentación:

- Fuente DC portátil (Power Bank)

De esta manera, el dispositivo opera como una plataforma unificada de monitoreo ambiental, permitiendo la adquisición, procesamiento, visualización y almacenamiento de las variables energéticas en tiempo real.

Para la selección de cada uno de los sensores se consideraron los requerimientos derivados de las necesidades del usuario, las cuales se identificaron a través del contacto con una pareja responsable de una huerta ubicada en una zona con limitaciones en el acceso al servicio eléctrico. Este contexto resultó representativo de los usuarios finales a los que está destinado el prototipo.

Entre los requerimientos que se debieron considerar para el prototipo destacan los siguientes:

- Asequible: los dispositivos comerciales actuales son costosos, lo que limita el acceso de muchas personas. Por ello, el prototipo debía ser de bajo costo.
- Sustentable: dado que el prototipo se utilizará en entornos naturales, sus materiales y componentes deben ser amigables con el medio ambiente.
- Fácil de instalar y manejar: las personas que habitan zonas aisladas generalmente no cuentan con formación técnica avanzada, por lo que el prototipo debe ser intuitivo tanto en su instalación como en su operación.
- Resistente a la intemperie: al permanecer en funcionamiento durante periodos prolongados y estar expuesto a altas temperaturas, los componentes y materiales deben soportar las condiciones climáticas del entorno.

## 6.2. Sensor de viento

Inicialmente se realizó una exploración detallada de los distintos instrumentos disponibles para la medición de la velocidad del viento, analizando alternativas como anemómetros comerciales de cazoletas, sensores ultrasónicos y dispositivos portátiles, con el objetivo de identificar opciones de bajo costo que mantuvieran una precisión adecuada para el proyecto. Durante esta revisión se evaluaron factores como disponibilidad de componentes, facilidad de adquisición, requerimientos de calibración y costos de mantenimiento. No obstante, se determinó que muchas de estas alternativas implicaban costos elevados o limitaciones técnicas para su implementación en contextos de recursos restringidos. Por ello, se optó por diseñar y fabricar un anemómetro mediante impresión 3D, debido a su bajo costo de producción, facilidad de personalización, rápida fabricación y accesibilidad de los materiales, lo que permitió desarrollar una solución funcional, adaptable y económicamente viable.

El diseño del anemómetro de bajo costo desarrollado en este proyecto requirió la identificación y el análisis de diversos criterios que influyen tanto en la precisión como en la confiabilidad de la medición de la velocidad del viento, así como en las necesidades de las comunidades que en un futuro deseen implementar este dispositivo en sus territorios. Para ello, el anemómetro debía ser amigable con el medio ambiente, de fácil manejo y de bajo costo. En esta sección se presentan los criterios de diseño considerados, entre ellos las características mecánicas del rotor y los requisitos de acondicionamiento electrónico. Inicialmente, se definió una estructura adecuada para el anemómetro, lo que llevó al desarrollo de un diseño mediante impresión 3D para el prototipo, como se observa en la figura 6.2.

Cuadro 6.1: Comparación de cazoletas de anemómetro: semicirculares vs semitriangulares

Tipo de cazoleta	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas	Observaciones
<b>Semicircular</b>	Giro provocado por el viento que impacta de manera uniforme sobre la cazoleta	- Mayor captura de viento frontal - Giro más estable y uniforme - Alta sensibilidad a bajas velocidades - Reducción de turbulencias	- Fabricación ligeramente más compleja	<b>La opción más precisa y confiable para medir velocidad del viento</b>
<b>Semitriangular</b>	Giro provocado por el viento, pero con menor área de impacto	- Más ligera y fácil de fabricar - Resistente al impacto	- Menor torque generado - Giro menos uniforme - Sensibilidad reducida a bajas velocidades	Menos eficiente; puede subestimar la velocidad real del viento

La forma de las copas se eligió semicircular debido a que esta geometría es más eficiente para capturar la fuerza del viento gracias a su curvatura. Esto mejora la sensibilidad del sistema, permitiendo que el rotor inicie su giro incluso con vientos suaves, es decir, con un menor “umbral de arranque”.

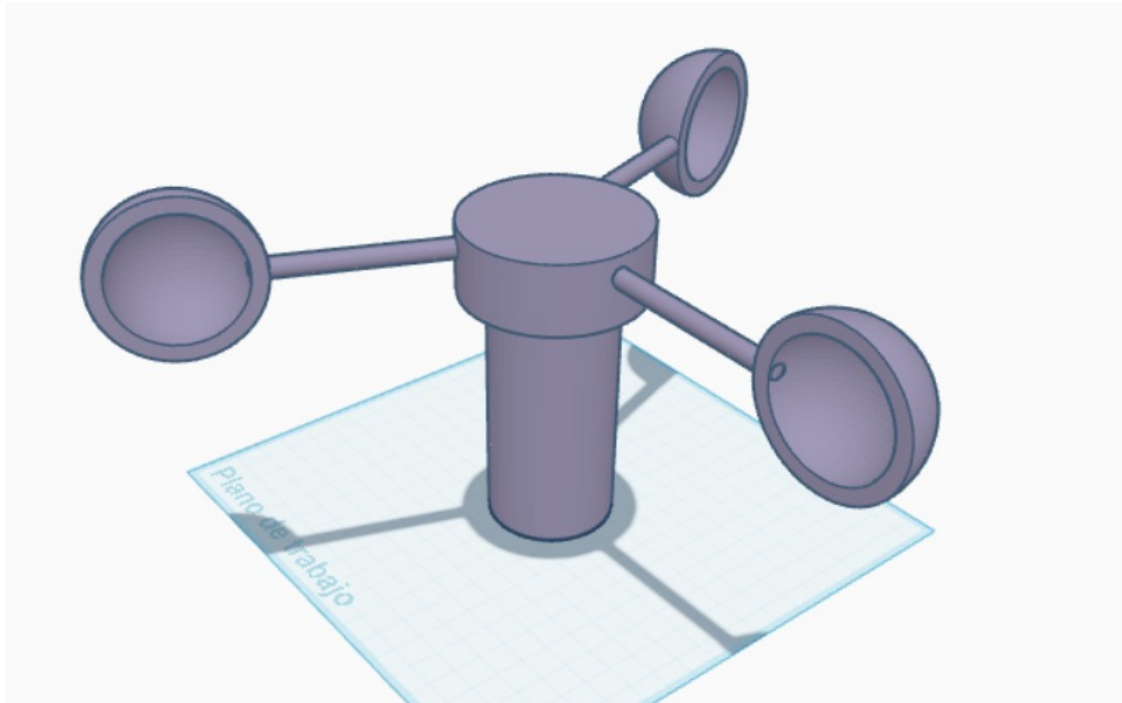


Figura 6.2: Diseño en 3D del anemómetro Fuente: Propia

Adicionalmente, se seleccionó un material que cumpliera con los requisitos del proyecto, destacando su carácter amigable con el medio ambiente. Para ello, se compararon distintos materiales de impresión 3D, como se muestra en el cuadro 6.2. Finalmente, se decidió utilizar PLA (ácido poliláctico), un material reconocido por ser una de las opciones más ecológicas en fabricación aditiva, ya que se obtiene de fuentes renovables como el maíz, la yuca o la caña de azúcar. Además, el PLA representa una alternativa más económica en comparación con otros materiales empleados en impresión 3D. Asimismo, se consideró que presenta una vida útil aproximada de entre 1,5 y 2 años en condiciones de uso normal, lo que permite que el prototipo pueda operar durante un periodo considerable antes de requerir su reemplazo. Estas características lo convierten en una opción práctica, accesible y adecuada para el desarrollo del proyecto.

Cuadro 6.2: Comparación de materiales de impresión 3D

Material	Temp. de impresión (°C)	Resistencia mecánica	Flexibilidad	Facilidad de impresión	Costo aproximado (COP/kg)	Observaciones
PLA	180–220	Media	Baja	Muy fácil	80.000–120.000	Biodegradable, baja deformación, ideal para prototipos.
ABS	220–250	Alta	Media	Moderada (requiere cama caliente)	100.000–150.000	Fuerte y resistente al calor, pero propenso a deformarse y emitir vapores.
PETG	220–250	Alta	Baja-moderada	Fácil a moderada	120.000–180.000	Combina resistencia del ABS con facilidad del PLA, duradero y resistente al agua.
TPU	210–230	Media	Muy alta	Difícil	150.000–200.000	Flexible y elástico, ideal para piezas que requieren absorción de impactos o elasticidad.
Nylon	240–270	Muy alta	Media	Difícil (higroscópico)	200.000–300.000	Muy resistente y duradero, pero absorbe humedad y requiere almacenamiento especial.

Una vez finalizado el diseño y seleccionado el material, se procedió a determinar el tipo de rodamiento más adecuado para ser incorporado en la base del anemómetro, garantizando que no generara fricción excesiva. Existen diversos tipos de rodamientos, tales como: rodamientos de rodillos cilíndricos, de rodillos esféricos, rodamiento híbrido y de bolas. Sin embargo, para este prototipo se eligió el rodamiento de bolas, dado que ofrece baja fricción, permite altas velocidades de rotación, tiene un costo relativamente bajo, es de fácil montaje y reemplazo, y presenta un menor desgaste.

Cuadro 6.3: Comparación de tipos de rodamientos

Tipo de rodamiento	Durabilidad	Fricción	Costo	Resistencia al desgaste	Capacidad de carga	Velocidad máxima	Aplicaciones típicas
Rodamiento de bolas	Alta en condiciones normales	Baja	Medio	Alta	Moderada (radial y axial leve)	Alta	Motores eléctricos, ventiladores, ejes de baja-media carga, ruedas pequeñas
Rodillos esféricos	Muy alta	Media	Alto	Muy alta	Muy alta (radial y axial variable)	Media	Equipos industriales pesados, maquinaria con desalineación
Rodamiento híbrido (bolas cerámicas + pistas metálicas)	Muy alta	Muy baja	Alto	Excelente	Alta	Alta velocidad, alta temperatura	Equipos de precisión, aplicaciones de alta velocidad
Rodamientos de rodillos cilíndricos	Alta	Media	Medio-Alto	Alta	Muy alta (radial)	Media-Alta	Bancadas, ejes con altas cargas radiales, maquinaria pesada

Para este proyecto se seleccionó una de las balineras más pequeñas del mercado que cumpliera con las características de un rodamiento de bolas: la balinera 624ZZ (Figura 6.3). Una vez se obtuvieron sus dimensiones, fue posible ajustar el diseño para permitir su correcta inserción. Para unir la parte superior de la impresión del anemómetro con la base, se empleó una varilla de aluminio de 4 mm de diámetro, correspondiente al diámetro interno de la balinera seleccionada, de manera que pudiera encajar a presión y permitir que el rodamiento girara simultáneamente con la velocidad de las aspas.



Figura 6.3: Balinera 624-ZZ Fuente: SKF

Uno de los requerimientos del sistema es que el dispositivo sea resistente a la intemperie, ya que el anemómetro operará la mayor parte del día en condiciones ambientales variables, expuesto al sol, la humedad e incluso al contacto directo con el agua. Para la sección electrónica del sistema se evaluaron distintos sensores capaces de medir la velocidad del viento. Inicialmente se consideraron el sensor tipo herradura y el sensor de efecto Hall; sin embargo, de acuerdo con sus características, el análisis del Cuadro 6.4 permitió determinar que el sensor de efecto Hall es la opción más adecuada para ser implementada en este proyecto.

Cuadro 6.4: Comparación entre sensor optoacoplador estilo herradura y sensor de efecto Hall

Característica	Sensor Optoacoplador Estilo Herradura	Sensor de Efecto Hall
Principio de operación	Interrupción o bloqueo de luz infrarroja	Detección de campo magnético
Precisión	Buena, sin embargo, depende de alineación óptica	Alta, respuesta lineal y estable
Contacto físico	No requiere contacto, sensible a suciedad	Sin contacto, menos afectado por polvo y suciedad
Durabilidad y vida útil	Media, desgaste por contaminación	Alta, sin partes móviles ni componentes ópticos
Sensibilidad a interferencias	Puede verse afectado por luz ambiental	Muy baja, más inmune a interferencias externas
Costo	Generalmente bajo	Moderado
Aplicaciones típicas	Conteo de objetos, detección de proximidad simple	Medición de velocidad, posición y corriente
Robustez	Menos robusto, requiere mantenimiento ocasional	Más robusto y confiable en ambientes industriales



Figura 6.4: Sensor de efecto Hall Fuente: Electronilab

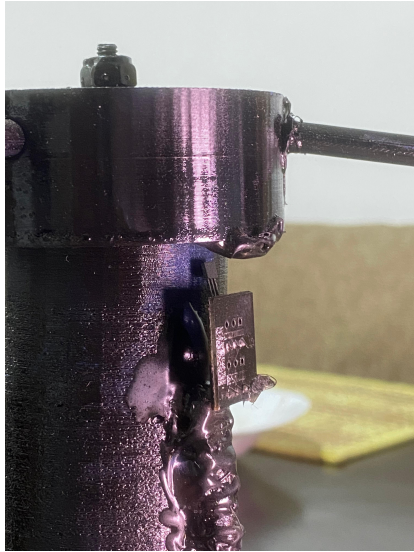
Este sensor fue elegido porque, en comparación con el optoacoplador estilo herradura, presenta un buen comportamiento frente a vibraciones y suciedad, ofrece una respuesta rápida y precisa, posee alta durabilidad, y además tiene un costo accesible y moderado, características que lo hacen ideal para dispositivos expuestos al entorno exterior.

En este diseño, el sensor se ubicó en la base del anemómetro, mientras que en la parte superior del rotor se instaló un imán de neodimio, encargado de generar la interrupción al sensor en cada giro como se puede observar en las imágenes 6.5a y 6.5b. De esta manera, cada vuelta completa del rotor produce un pulso detectado por el sensor, permitiendo calcular la velocidad del viento a partir del número de pulsos registrados.

Cuadro 6.5: Especificaciones técnicas del sensor de efecto Hall

Característica	Especificación
Voltaje de operación	4.5 V – 24 V DC
Corriente de consumo	4 mA – 10 mA
Tipo de salida	Digital (encendido/apagado)
Corriente máxima de salida	20 mA
Frecuencia máxima de respuesta	~100 kHz
Temperatura de operación	-40°C a 85°C
Sensibilidad	Activación por campo magnético
Distancia de activación típica	1–3 mm
Tiempo de respuesta	<3 $\mu$ s

En la fase inicial del proyecto se seleccionó un Arduino Nano como plataforma de control, principalmente debido a su tamaño compacto, su facilidad de uso y su bajo costo. Estas características lo convertían en una opción atractiva para el desarrollo rápido del prototipo. Sin embargo, a medida que avanzó el diseño del sistema y se consideró la posibilidad de futuras mejoras, se identificó la necesidad de contar con un módulo capaz de ofrecer mayores prestaciones, especialmente en lo relacionado con la transmisión y el procesamiento de datos.



(a) Sensor hall instalado en la base.



(b) Imán y rotor instalados.

Por este motivo, el Arduino Nano fue descartado y se decidió migrar a una ESP32, dado que este microcontrolador ofrece una serie de ventajas significativas como se observa en la tabla 6.6 para el crecimiento y la escalabilidad del proyecto. Entre sus principales beneficios se encuentran su conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, lo cual permite, en un futuro, implementar la transmisión inalámbrica de datos sin necesidad de módulos adicionales. Además, la ESP32 cuenta con un procesador de mayor capacidad, memoria ampliada y mayor cantidad de periféricos, lo que facilita la incorporación de nuevas funciones sin requerir modificaciones estructurales en el hardware.

Gracias a este cambio, el prototipo queda preparado para una futura evolución en la que se puedan integrar sistemas de monitoreo remoto, almacenamiento en la nube o comunicación entre múltiples nodos, evitando así la necesidad de realizar cambios mayores en la arquitectura del dispositivo. De esta manera, la selección de la ESP32 no solo mejora el desempeño actual, sino que también garantiza la posibilidad de ampliar el sistema con mayor facilidad en desarrollos posteriores.

Cuadro 6.6: Comparación técnica entre Arduino Nano y ESP32 Fuente: Propia

Característica	Arduino Nano	ESP32
Procesador	ATmega328P, 8 bits, 16 MHz	Dual Core, 32 bits, 240 MHz
RAM	2 KB	520 KB
Inalámbrico	No	Wi-Fi y Bluetooth
Voltaje	5 V	3.3 V
GPIO	22	+30
ADC	8×10 bits	18×12 bits
Consumo	Bajo	Variable

### 6.2.1. Configuración y funcionamiento del sistema de medición

Para la medición de la velocidad del viento, el anemómetro fue configurado empleando un sensor de efecto Hall conectado al pin digital 4 del ESP32. Este sensor detecta el paso de un imán adherido a la parte móvil del anemómetro, generando un pulso por cada giro completo del sistema. Para garantizar alta precisión, el conteo de pulsos se ejecuta mediante una interrupción externa, lo cual evita pérdidas de información incluso cuando el microcontrolador realiza otras tareas.

En cuanto al procesamiento de datos, la velocidad del viento se obtiene a partir de un modelo matemático directo. El sistema calcula primero las vueltas por segundo usando los pulsos capturados en un intervalo de un segundo. Posteriormente, se determina la distancia recorrida por las aspas calculando el perímetro del anemómetro mediante la ecuación:

$$\text{Perímetro} = 2\pi r$$

donde el radio del anemómetro es de 3.25 cm. La velocidad lineal del viento se obtiene multiplicando el número de vueltas por el perímetro:

$$v(\text{m/s}) = \text{vueltas/s} \times \text{Perímetro}$$

Finalmente, esta velocidad es convertida a km/h aplicando el factor de conversión:

$$v(\text{km/h}) = v(\text{m/s}) \times 3,6$$

Este método matemático es ampliamente utilizado en anemómetros de tipo rotacional, ya que se basa en la relación lineal entre la velocidad del viento y la velocidad angular del rotor, como señalan diversas implementaciones de sensores Hall en aplicaciones de velocidad rotacional.

El sistema está configurado para mostrar la información del anemómetro en una pantalla LCD de 20×4 mediante comunicación I<sup>2</sup>C, gracias al uso del módulo *PCF8574*. El protocolo I<sup>2</sup>C se seleccionó debido a que reduce significativamente la cantidad de pines requeridos en el microcontrolador, permitiendo manejar la pantalla solo con dos líneas: SDA y SCL. Esto es especialmente útil en el ESP32, ya que evita bloqueos de pines y facilita la integración con otros sensores.

El dispositivo realiza la actualización de la pantalla cada segundo, mostrando tanto la velocidad en m/s como en km/h. Además, con el fin de evitar la sobrecarga del sistema de almacenamiento, se optó por registrar el valor instantáneo correspondiente a cada minuto en una tarjeta microSD. Para ello, se integró un módulo lector de microSD compatible con Arduino, lo que permitió la gestión y el almacenamiento eficiente de los datos. Cada archivo generado incluye la fecha, la hora y los valores calculados, facilitando así su posterior análisis y procesamiento.

El sistema asume que cada pulso corresponde a una vuelta completa del anemómetro, empleando la constante `PULSOS_POR_VUELTA = 1`. Este método se utilizó ya que el anemómetro emplea un solo imán en su rotor, y permite obtener con precisión la velocidad angular necesaria para el cálculo de velocidad del viento.

### 6.3. Sensor de flujo de agua

En la etapa inicial del diseño para medir la velocidad del flujo de agua en un riachuelo, se evaluaron tres posibles enfoques experimentales. La primera propuesta consistía en emplear un objeto flotante como trazador superficial. El método consideraba ubicar dos sensores separados una distancia conocida, de manera que, al detectar el paso del flotador por el primer punto y luego por el segundo, fuese posible calcular el tiempo de tránsito y, con ello, la velocidad promedio del flujo. Aunque conceptualmente simple, esta alternativa presentaba limitaciones importantes: el método depende de las condiciones de la superficie del agua, es susceptible a turbulencias, requiere visibilidad constante y es poco práctico para automatizar mediciones continuas.

La segunda idea explorada fue el uso de un sistema inspirado en el principio del tubo de Pitot. En este planteamiento, la presión generada por la corriente del riachuelo elevaría el nivel del agua dentro de un tubo vertical, de modo que la altura alcanzada pudiese correlacionarse con la velocidad del flujo. No obstante, este enfoque presenta dificultades en ambientes naturales: los sedimentos y residuos pueden obstruir el tubo, las variaciones de presión pueden introducir errores significativos y la calibración depende de condiciones controladas que no siempre son reproducibles en campo.

Finalmente, se seleccionó el uso del sensor de caudal tipo YF-S201 (Figura 6.6), normalmente empleado en sistemas de tuberías, pero adecuado para este proyecto debido a las bajas tasas de flujo estimadas en los riachuelos. Se realizó un análisis comparativo entre los sensores de caudal disponibles y, considerando sus características técnicas y facilidad de implementación, se determinó que el YF-S201 era la opción más conveniente, como se evidencia en el cuadro comparativo que se presenta a continuación.

Cuadro 6.7: Comparación de sensores de caudal de agua

Característica	YF-S201	YF-S401	G1 Water Flow	Sensor genérico G1/4
Principio de operación	Efecto Hall con turbina interna	Similar (Hall y turbina)	Hall con rotor más grande	Hall con rotor pequeño
Rango típico de caudal	1–30L/min	1–60L/min	5–100L/min	0.5–20L/min
Salida (tipo de señal)	Pulso digital	Pulso digital	Pulso digital	Pulso digital
Facilidad de implementación	Fácil de instalar y usar con microcontroladores	Fácil	Moderada	Fácil
Costo aproximado (COP)	Bajo (80.000–120.000)	Bajo-Medio (100.000–150.000)	Medio (120.000–180.000)	Bajo (70.000–110.000)
Precisión en rangos bajos	Buena en caudales pequeños	Regular en caudales muy bajos	Mejor en caudales altos	Buena en caudales muy bajos
Robustez / resistencia	Adecuado para uso en campo	Similar al S201, carcasa plástica de mayor tamaño	Robusto, mayor volumen de fluido	Menos robusto
Consumo y mantenimiento	Bajo y sin partes móviles complejas	Bajo	Moderado	Bajo
Amigable con el entorno	Sin químicos, materiales plásticos estándar	Similar al S201	Medio (mayor tamaño)	Similar al S201
Aplicación ideal sugerida	Medición en riachuelos pequeños y prototipos de bajo alcance	Medición general con caudales variables	Caudales medianos-altos / canales más grandes	Microsistemas o caudales mínimos

Se seleccionó el sensor de caudal YF-S201 debido a su bajo costo, facilidad de implementación y mantenimiento, así como su adecuada precisión para medir flujos bajos, como los presentes en riachuelos. Además, está fabricado con materiales plásticos estándar, sin químicos, lo que lo hace amigable con el medio ambiente y adecuado para aplicaciones en campo. Su combinación de eficiencia, confiabilidad y disponibilidad lo convierte en la opción más adecuada para este proyecto.

Este dispositivo permite obtener mediciones directas de caudal a partir de la frecuencia de pulsos generados por una turbina interna, lo cual lo convierte en una solución compacta, económica y fácil de integrar con el microcontrolador seleccionado.

Las otras propuestas fueron descartadas debido a su baja estabilidad, su difícil adaptación al entorno del riachuelo y la complejidad para garantizar mediciones consistentes. En contraste, el sensor de caudal ofrece una lectura más controlada, repetible y adecuada para el prototipo desarrollado, además de facilitar la automatización y el registro continuo de datos.



Figura 6.6: Sensor de caudal YF-S201 Fuente: Ferretrónica

Cuadro 6.8: Especificaciones técnicas del sensor de caudal YF-S201. Fuente: Propia

Característica	YF-S201
Tipo de salida	salida por pulsos
Voltaje de operación	5–18 V DC
Corriente típica	15 mA (a 5 V)
Rango de caudal	1–30 L/min
Relación frecuencia–flujo	$f = 7,5 \times Q$ (Hz)
Pulsos por litro	$\approx 450$ pulsos/L
Temperatura de operación	-25°C a 80°C
Presión máxima	$\leq 1.75$ MPa
Material del cuerpo	Plástico (nylon reforzado)

### 6.3.1. Configuración y funcionamiento del sistema de medición

Para la medición del flujo de agua se empleó el sensor de caudal YF-S201 conectado al pin digital 2 del ESP32. Este dispositivo incorpora un rotor interno con un imán permanente y un sensor de efecto Hall que genera un pulso eléctrico por cada giro del rotor. Dichos pulsos permiten determinar el caudal volumétrico del fluido, ya que la frecuencia está directamente relacionada con la velocidad del flujo.

Con el fin de asegurar una captura precisa de los pulsos, el sistema utiliza una interrupción externa configurada en el flanco *FALLING*, esto permite que cada pulso sea registrado en tiempo real sin pérdidas, incluso cuando el microcontrolador ejecuta otras tareas simultáneamente.

### 6.3.1.1. Procesamiento matemático del caudal

Cada segundo, el programa detiene temporalmente la interrupción para realizar el cálculo del número de pulsos acumulados. La variable frecuencia se define como:

$$f = \text{pulsosFlujo} \quad (\text{Hz})$$

El YF-S201 posee la relación estándar entre frecuencia y caudal:

$$f = 7,5 \cdot Q$$

donde  $f$  es la frecuencia en Hz y  $Q$  el caudal en litros por minuto (L/min). Por tanto, el caudal se obtiene mediante:

$$Q_{L/min} = \frac{f}{7,5}$$

Posteriormente se convierte a metros cúbicos por segundo:

$$Q_{m^3/s} = \frac{Q_{L/min}}{1000 \cdot 60}$$

Para estimar la velocidad del flujo se modela el conducto como un tubo cilíndrico de diámetro interno de 12.7 mm. El área de la sección transversal es:

$$A = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

donde  $D = 0,0127$  m. La velocidad lineal del agua se obtiene mediante:

$$v = \frac{Q_{m^3/s}}{A}$$

El sistema realiza un ciclo de procesamiento cada segundo, durante el cual se contabilizan los pulsos del sensor, se calcula el caudal y la velocidad del flujo, y se gestionan tanto el almacenamiento de datos como la visualización en la pantalla LCD del mismo modo que fue descrito previamente para el anemómetro.

En esta pantalla se muestran:

- Pulsos detectados
- Caudal en L/min
- Velocidad del agua en m/s

Para determinar el caudal, el sistema utiliza la relación indicada por el fabricante del sensor YF-S201, expresada como:

$$f = 7,5 Q$$

donde  $f$  es la frecuencia en hertz (Hz) y  $Q$  el caudal en litros por minuto (L/min). A partir de esta ecuación se obtiene que el sensor produce aproximadamente 450 pulsos por litro, ya que:

$$7,5 \text{ pulsos/s} \times 60 \text{ s/min} = 450 \text{ pulsos/min}$$

## 6.4. Sensor solar

Para desarrollar el prototipo destinado a medir la radiación solar, se optó por un panel fotovoltaico comercial como sensor. Se seleccionó un panel fotovoltaico de 6 V ya que en comparación con otros paneles este destacaba debido a su amplia disponibilidad comercial, bajo costo y facilidad de integración en el prototipo (ver cuadro 6.9). Esta tensión proporciona una amplitud de señal suficiente para una medición confiable, incluso bajo condiciones de baja iluminación.

Cuadro 6.9: Comparación de paneles fotovoltaicos utilizados como sensores de radiación solar

Tipo de panel	Tensión nominal	Ventajas	Desventajas	Evaluación
Panel 3–3.3 V	3–3.3 V	No requiere adaptación de voltaje	Baja amplitud de señal y limitada resolución del ADC	Poco adecuado para medición continua
Panel 5 V	5 V	Fácil integración y buena disponibilidad	Menor margen ante baja irradiancia	Adecuado, pero menos robusto
<b>Panel 6 V</b>	<b>6 V</b>	Buena amplitud de señal y fácil acondicionamiento	Requiere adaptación de voltaje	<b>Mejor compromiso simplicidad–confiabilidad</b>
Panel 9–12 V	9–12 V	Alta tensión disponible	Requiere regulación adicional	Poco adecuado para el ESP32
Panel >12 V	>12 V	Aplicaciones energéticas	Alta complejidad del sistema	No adecuado para integración directa con el ESP32

El panel adquirido entrega aproximadamente 6 V (figura 8.1) en condiciones de iluminación estándar, mientras que el ESP32 solo admite un máximo de 3.3 V en sus entradas analógicas. Debido a esta diferencia, fue necesario adaptar la señal para evitar daños en el microcontrolador. Para ello se implementó un divisor de voltaje, permitiendo reducir la salida del panel a un nivel seguro para el ADC del ESP32.



Figura 6.7: Panel solar Fuente: Mercado libre

El divisor de voltaje se diseñó utilizando la ecuación fundamental:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

donde  $V_{\text{in}}$  es la tensión del panel (6 V),  $V_{\text{out}}$  la tensión permitida para el ESP32 (3.3 V), y  $R_1$  y  $R_2$  las resistencias seleccionadas. A partir de esta relación, se eligieron valores comerciales para  $R_1$  de 100 k $\Omega$  y  $R_2$  de 120 k $\Omega$  que permitieran obtener un voltaje cercano a 3.3 V bajo condiciones normales de operación.

Una vez acondicionada la señal y garantizada la protección del microcontrolador, fue posible continuar con el procedimiento matemático para convertir la lectura analógica en un valor proporcional a la radiación solar incidente, siguiendo principios similares a los métodos experimentales donde los paneles fotovoltaicos se emplean como sensores.

Cada segundo, el sistema lee el voltaje del panel, lo calcula usando el divisor y muestra en la pantalla el valor del voltaje y la lectura del ADC correspondiente, mediante comunicación I<sup>2</sup>C, de la misma manera que se hizo para el anemómetro.

La medición realizada con el panel no es lineal; sin embargo, proporciona información necesaria y suficiente. De igual manera, los datos obtenidos de los demás sensores, aunque no representan mediciones exactas, ofrecen una aproximación útil que permite evaluar el potencial energético del sitio.

## 6.5. Diseño de PCB

La PCB diseñada integra todos los módulos y conexiones necesarios para el funcionamiento del sistema de medición y control. En el centro de la placa se encuentra el microcontrolador principal, alrededor del cual se distribuyen las pistas y componentes periféricos. A este se conectan los sensores utilizados en el proyecto: el sensor de caudal YF-S201, que entrega una señal de pulsos, y un sensor de efecto Hall que detecta eventos magnéticos. Ambos sensores se conectan a pines digitales del

microcontrolador y cuentan con rutas de señal cortas para asegurar una lectura estable y minimizar interferencias. La alimentación del sistema proviene de una powerbank de 1 A, cuyos 5 V se distribuyen a través de una red de alimentación ubicada en la zona inferior del PCB. Esta sección incluye el conector de entrada, el plano de tierra y las pistas de potencia que alimentan tanto al microcontrolador como a los módulos externos.

En la parte superior del PCB se encuentra el módulo I2C, utilizado para la comunicación con periféricos digitales o futuras expansiones. De manera complementaria, el diseño incorpora un puerto USB, que facilita la programación y transferencia de datos sin necesidad de interfaces adicionales. También se incluye un buzzer, conectado mediante un pin digital y destinado a la generación de alertas acústicas durante la operación.

Además, el diseño incorpora un punto de expansión denominado Pin32, destinado a facilitar la conexión de sensores o módulos adicionales en caso de futuras ampliaciones del sistema, sin requerir modificaciones al PCB original.

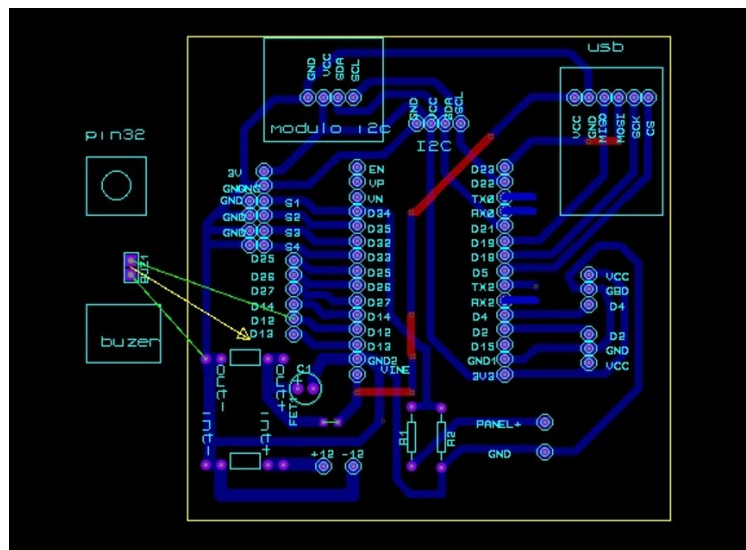


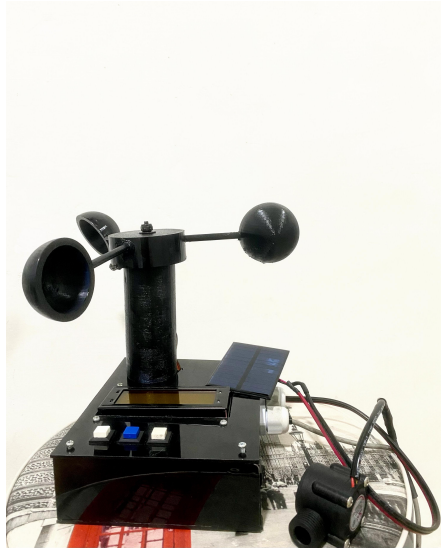
Figura 6.8: Diseño de PCB en Proteus Fuente: Elaboración propia.

## 6.6. Diseño Estructural de la Caja del Dispositivo

Para el diseño de la caja se planteó una estructura compacta, sencilla y fácil de transportar, que permitiera integrar adecuadamente los tres sensores utilizados en el prototipo. La distribución interna fue pensada para que cada sensor pudiera ajustarse sin dificultad, garantizando estabilidad y un funcionamiento adecuado durante la toma de datos.

Con el fin de facilitar la interacción del usuario, se incorporaron tres botones en la parte frontal de la caja, cada uno asociado a un sensor distinto. Estos botones permiten activar la lectura individual de las variables y visualizar los datos en tiempo real en la pantalla integrada. El material seleccionado para la fabricación de la caja fue acrílico negro. Esta elección se basó en su buena resistencia frente a

variaciones de temperatura, su durabilidad y su accesibilidad económica. Además, el acrílico facilita el corte y ensamblaje de las piezas, permitiendo un diseño final robusto y funcional como se puede observar en las figuras 6.9a y 6.9b.



(a) Diseño final del prototipo.



(b) Diseño final de la caja.

Figura 6.9: Prototipo final Fuente: Elaboración propia.

# Resultados y Discusión

---

## 7.1. Pruebas de energía eólica

Para la realización de las pruebas con el anemómetro se empleó un secador de cabello, con el fin de generar corrientes de aire controladas. Este dispositivo cuenta con tres niveles de potencia (1, 2 y 3), lo que permitió ajustar de manera gradual la velocidad del flujo de aire y observar cómo variaban las mediciones en cada cambio de nivel.

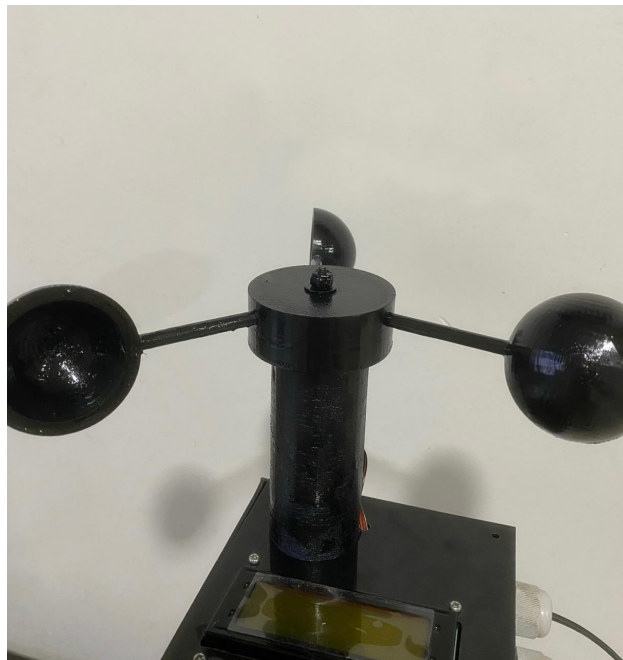


Figura 7.1: Anemómetro Fuente: Elaboración propia

El anemómetro se dejó registrando datos durante un intervalo continuo de tiempo, a partir del cual se obtuvieron los valores presentados en el siguiente cuadro.

Fecha y hora	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
2025-11-28 15:20:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:21:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:23:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:24:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:25:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:26:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:27:00	0,41	1,47
2025-11-28 15:28:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:29:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:30:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:31:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:32:00	1,23	3,68
2025-11-28 15:33:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:34:00	1,23	3,68
2025-11-28 15:35:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:36:00	1,02	3,68
2025-11-28 15:37:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:38:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:39:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:40:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:41:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:42:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:43:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:44:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:45:00	0,61	2,21
2025-11-28 15:46:00	0,61	2,21

Cuadro 7.1: Registro de velocidad del viento obtenida con el anemómetro.

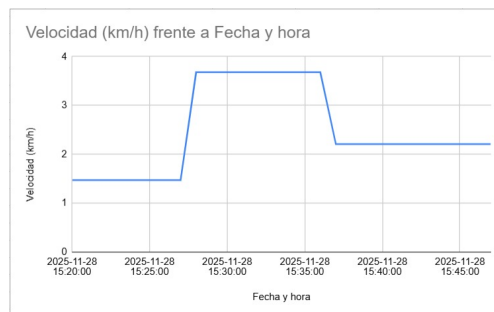


Figura 7.2: Velocidad del viento registrada por el anemómetro

El registro de velocidades muestra el efecto de las distintas intensidades de aire generadas por el secador utilizado durante las pruebas. En los primeros minutos (15:20 a 15:27), la velocidad del viento se mantiene constante en aproximadamente 0,41 m/s (1,47 km/h), lo que corresponde al nivel más bajo del secador.

A partir de las 15:28, se observa un incremento en los datos a 1,02 m/s (3,68 km/h) como se ve reflejado en la gráfica 7.2, reflejando el uso del mayor nivel del secador. Estos datos se mantienen hasta las 15:36. Posteriormente, en 15:37 hasta 15:46, se registra una disminución en la velocidad del viento ya que se pasó del nivel tres al nivel dos del secador alcanzando los 0,61 m/s (2,21 km/h).

Inicialmente, se calibró el sensor sometándolo a desplazamientos controlados a distancias conocidas mediante un carro. La calibración se realizó hasta una velocidad máxima de 35 km/h, registrando la cantidad de pulsos generados en cada distancia. A partir de esta calibración, se ajustó el anemómetro para detectar con las velocidades mínimas, aprovechando las tres velocidades diferentes del secador utilizadas durante las pruebas.

## 7.2. Pruebas de energía hidráulica

Inicialmente, se identificó un lugar adecuado dentro del campus universitario para llevar a cabo las pruebas en un entorno “real”. Por este motivo, las primeras mediciones se realizaron en un riachuelo ubicado dentro de la universidad.



(a) Prueba en ambiente real.



(b) Prototipo final.

Figura 7.3: Prueba de velocidad de flujo Fuente: Elaboración propia.

Una vez el sensor quedó registrando, se obtuvieron los datos que se presentan en la siguiente tabla:

Cuadro 7.2: Datos obtenidos en ambiente real

Fecha y hora	Caudal (L/min)	Velocidad (m/s)
2025-10-29 11:15:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:16:00	1.07	0.141
2025-10-29 11:17:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:18:00	1.07	0.141
2025-10-29 11:19:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:20:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:21:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:22:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:23:00	1.20	0.158
2025-10-29 11:24:00	1.07	0.141
2025-10-29 11:25:00	1.33	0.175
2025-10-29 11:26:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:27:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:28:00	1.47	0.193
2025-10-29 11:29:00	1.33	0.175
2025-10-29 11:30:00	1.33	0.175
2025-10-29 11:31:00	1.33	0.175
2025-10-29 11:32:00	1.47	0.193

Para obtener datos estimados del sensor, se realizó una calibración aplicando volúmenes exactos de agua y registrando la cantidad de pulsos generados por cada uno. Estos volúmenes se incrementaron gradualmente, asegurando que el sensor pudiera medir con precisión caudales por debajo del máximo permitido, que es de 30 L/min, límite establecido por las especificaciones del dispositivo.

Los valores presentados en la Tabla 7.2 evidencian que la velocidad del agua oscila entre 0.141 m/s y 0.193 m/s, con mediciones intermedias cercanas a 0.158 m/s y 0.175 m/s. Los datos muestran un comportamiento estable y sin variaciones abruptas (como se aprecia en la Figura 7.4), lo cual sugiere que el riachuelo mantiene un flujo relativamente constante durante el periodo de muestreo. Esto confirma que el paso del agua en este punto es continuo y no presenta alteraciones significativas.

Aunque el prototipo no corresponde a un instrumento de alta precisión, esto debido a que emplea un sensor de caudal tipo turbina, la coherencia entre las mediciones demuestra que el sistema es capaz de registrar adecuadamente la tendencia general del movimiento del agua. Esto permite estimar de manera confiable el potencial hidráulico disponible en el riachuelo. La estabilidad del flujo registrada en las mediciones también permite inferir que el comportamiento del riachuelo es relativamente constante a lo largo del tiempo, condición indispensable para considerar la implementación de un sistema de generación energética continua.

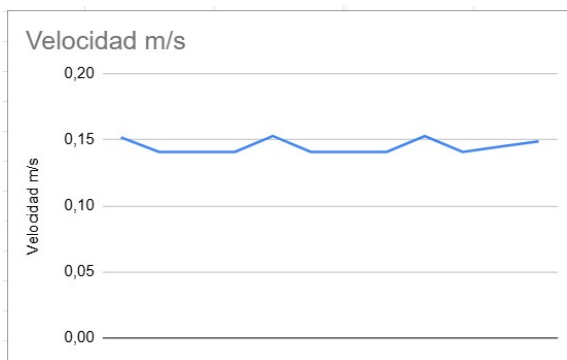


Cuadro 7.3: Datos con velocidad controlada

Fecha y hora	Caudal (L/m)	Velocidad (m/s)
2025-11-19 9:34:00	1.11	0.152
2025-11-19 9:35:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:36:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:37:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:38:00	1.16	0.153
2025-11-19 9:39:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:40:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:41:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:42:00	1.16	0.153
2025-11-19 9:43:00	1.07	0.141
2025-11-19 9:44:00	1.16	0.145
2025-11-19 9:45:00	1.22	0.149

Cuadro 7.4: Datos con velocidad disminuida

Fecha y hora	Caudal (L/m)	Velocidad (m/s)
2025-11-19 9:52:00	0.27	0.035
2025-11-19 9:53:00	0.27	0.035
2025-11-19 9:54:00	0.31	0.038
2025-11-19 9:55:00	0.27	0.035
2025-11-19 9:56:00	0.27	0.035
2025-11-19 9:57:00	0.31	0.038
2025-11-19 9:58:00	0.27	0.035
2025-11-19 9:59:00	0.27	0.035
2025-11-19 10:00:00	0.27	0.035
2025-11-19 10:01:00	0.27	0.035
2025-11-19 10:02:00	0.31	0.038
2025-11-19 10:03:00	0.27	0.035



(a) Datos con velocidad controlada.



(b) Datos con velocidad disminuida.

Figura 7.6: Datos con variación en la velocidad.

En la Figura 7.6, la gráfica (a) muestra que la velocidad del flujo se mantiene aproximadamente entre 0.14 y 0.15 m/s, con pequeñas fluctuaciones asociadas tanto al movimiento natural del agua como a la sensibilidad del sensor. Esta estabilidad evidencia que, cuando el caudal se mantiene constante en el laboratorio, el prototipo es capaz de registrar mediciones constantes.

Por otra parte, la gráfica (b) presenta valores notablemente menores, en el rango de 0.033 a 0.038 m/s. Esta reducción corresponde al ajuste manual realizado durante la prueba para disminuir la velocidad del flujo, con el fin de verificar la capacidad del sistema para identificar cambios pequeños pero consistentes.

En esta prueba no fue posible comparar los datos de velocidad obtenidos por el sensor con valores exactos del caudal de agua en el ambiente controlado, debido a que en el laboratorio de hidráulica la velocidad se regula mediante una perilla que no proporciona una lectura numérica del caudal, sino que únicamente permite ajustar la velocidad de forma incremental o decremental sin indicar valores específicos.

### 7.3. Pruebas de energía solar

Durante el muestreo realizado en horas de la tarde, el prototipo registró de manera continua el voltaje generado por el panel solar, como se puede evidenciar en las tablas 7.5 y 7.6. A partir de estos datos se construyó la gráfica (7.7) que permite observar el comportamiento del panel frente a las variaciones de radiación solar ambiental.

Cuadro 7.5: Datos registrados por el panel

Fecha y hora	Voltaje (V)
2025-11-12 14:09:00	3.16
2025-11-12 14:10:00	3.70
2025-11-12 14:11:00	3.81
2025-11-12 14:12:00	3.89
2025-11-12 14:13:00	3.71
2025-11-12 14:14:00	3.64
2025-11-12 14:15:00	3.63
2025-11-12 14:16:00	3.63
2025-11-12 14:17:00	3.65
2025-11-12 14:18:00	3.66
2025-11-12 14:19:00	3.61
2025-11-12 14:20:00	3.61
2025-11-12 14:21:00	3.61
2025-11-12 14:22:00	3.60
2025-11-12 14:23:00	3.60
2025-11-12 14:24:00	3.60
2025-11-12 14:25:00	3.60
2025-11-12 14:26:00	3.40
2025-11-12 14:27:00	3.59
2025-11-12 14:28:00	3.56
2025-11-12 14:29:00	3.53
2025-11-12 14:30:00	3.52
2025-11-12 14:31:00	3.52
2025-11-12 14:32:00	3.54
2025-11-12 14:33:00	3.55
2025-11-12 14:34:00	3.85
2025-11-12 14:35:00	3.89
2025-11-12 14:36:00	3.63
2025-11-12 14:37:00	3.62
2025-11-12 14:39:00	3.30
2025-11-12 14:40:00	3.12
2025-11-12 14:41:00	3.84
2025-11-12 14:42:00	3.89
2025-11-12 14:43:00	3.63
2025-11-12 14:44:00	3.62
2025-11-12 14:45:00	3.30
2025-11-12 14:46:00	3.12
2025-11-12 14:47:00	3.84

Cuadro 7.6: Datos registrados por el panel

Fecha y hora	Voltaje (V)
2025-11-12 14:48:00	3.89
2025-11-12 14:49:00	3.90
2025-11-12 14:50:00	3.90
2025-11-12 14:51:00	3.92
2025-11-12 14:52:00	3.92
2025-11-12 14:53:00	3.92
2025-11-12 14:54:00	3.93
2025-11-12 14:55:00	3.92
2025-11-12 14:56:00	3.92
2025-11-12 14:57:00	3.93
2025-11-12 14:58:00	3.93
2025-11-12 14:59:00	3.94
2025-11-12 15:00:00	3.93
2025-11-12 15:01:00	3.93
2025-11-12 15:02:00	3.93
2025-11-12 15:03:00	3.94
2025-11-12 15:04:00	3.94
2025-11-12 15:05:00	3.94
2025-11-12 15:06:00	3.94
2025-11-12 15:07:00	3.95
2025-11-12 15:08:00	3.94
2025-11-12 15:09:00	3.94
2025-11-12 15:10:00	3.95
2025-11-12 15:11:00	3.95
2025-11-12 15:12:00	3.95
2025-11-12 15:13:00	3.95
2025-11-12 15:14:00	3.95
2025-11-12 15:15:00	3.95
2025-11-12 15:16:00	3.95
2025-11-12 15:17:00	3.95
2025-11-12 15:18:00	3.95
2025-11-12 15:19:00	3.94
2025-11-12 15:20:00	3.94
2025-11-12 15:21:00	3.94
2025-11-12 15:22:00	3.90
2025-11-12 15:23:00	3.89
2025-11-12 15:24:00	3.89
2025-11-12 15:25:00	3.89



Figura 7.7: Comportamiento del voltaje registrado en horas de la tarde. Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 7.7 se evidencia que el voltaje se mantuvo mayormente entre 3.2 V y 3.9 V, con algunas fluctuaciones hacia valores inferiores. Estas variaciones pueden corresponder a cambios naturales en la intensidad de la luz incidente, producto del movimiento de las nubes, la posición solar, etc.

El comportamiento observado en la gráfica permite obtener una estimación del patrón general de radiación durante el periodo de muestreo. Esto se debe a que el voltaje generado por el panel fotovoltaico es directamente proporcional a la cantidad de energía luminosa que incide sobre él: a mayor iluminación, mayor es el voltaje producido. En los datos registrados se evidencia que el panel mantiene niveles de voltaje relativamente estables, lo que sugiere una disponibilidad energética constante a lo largo del intervalo analizado.

Se llevó a cabo otra prueba durante las horas de la mañana, en la cual se registraron valores de voltaje con una periodicidad de un minuto mediante el panel fotovoltaico. Los datos obtenidos se presentan en el cuadro 7.7.

Cuadro 7.7: Datos registrados por el panel

Fecha y hora	Voltaje (V)
2025-10-19 11:21:00	5,6
2025-10-19 11:22:00	5,53
2025-10-19 11:23:00	5,55
2025-10-19 11:24:00	5,55
2025-10-19 11:25:00	5,58
2025-10-19 11:26:00	5,62
2025-10-19 11:27:00	5,48
2025-10-19 11:28:00	5,45
2025-10-19 11:29:00	5,45
2025-10-19 11:30:00	5,43
2025-10-19 11:31:00	5,35
2025-10-19 11:32:00	5,48
2025-10-19 11:33:00	5,5
2025-10-19 11:34:00	5,5
2025-10-19 11:35:00	5,5
2025-10-19 11:36:00	5,48
2025-10-19 11:37:00	5,52
2025-10-19 11:38:00	5,23
2025-10-19 11:39:00	5,23
2025-10-19 11:40:00	5,23
2025-10-19 11:41:00	5,23
2025-10-19 11:42:00	5,23
2025-10-19 11:43:00	5,23
2025-10-19 11:44:00	5,23
2025-10-19 11:45:00	5,23
2025-10-19 11:46:00	5,35
2025-10-19 11:47:00	5,38
2025-10-19 11:48:00	5,42
2025-10-19 11:49:00	6
2025-10-19 11:50:00	6
2025-10-19 11:51:00	6
2025-10-19 11:52:00	6

2025-10-19 11:53:00	6
2025-10-19 11:54:00	6
2025-10-19 11:55:00	6
2025-10-19 11:56:00	6
2025-10-19 11:57:00	6
2025-10-19 11:58:00	6
2025-10-19 11:59:00	6
2025-10-19 12:00:00	6
2025-10-19 12:01:00	6
2025-10-19 12:02:00	6
2025-10-19 12:03:00	6
2025-10-19 12:04:00	6
2025-10-19 12:05:00	6
2025-10-19 12:06:00	6
2025-10-19 12:07:00	6



Figura 7.8: Comportamiento del voltaje registrado en horas de la mañana. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la gráfica 7.8 muestra la variación del voltaje generado por el panel solar, se observa una tendencia sostenida en la salida de voltaje. Al inicio del periodo de medición, el panel produce aproximadamente 5.6 V, manteniéndose relativamente estable durante los primeros minutos. Posteriormente, conforme avanza la mañana, el voltaje incrementa de manera progresiva hasta alcanzar los 6.0 V.

Este comportamiento tiene sentido con la dinámica habitual de la irradiancia solar: a medida que el Sol se eleva, la intensidad lumínica incidente sobre el panel aumenta, generando una mayor producción de energía eléctrica. La estabilización cercana a los 6.0 V hacia el mediodía indica que el panel se aproxima a su punto de operación óptimo bajo las condiciones ambientales registradas, momento en el cual la radiación solar es más intensa.

Finalmente, se llevó a cabo una prueba con el panel en funcionamiento continuo durante 12 horas. En esta ocasión, se decidió registrar los valores cada 10 minutos, desde las 8 de la mañana hasta las 8 de la noche, obteniendo así los datos que se presentan en el cuadro 7.8 y en el cuadro 7.9.



Figura 7.9: Comportamiento del voltaje registrado durante 12 horas. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.8: Voltaje registrado por el panel (parte 1)

Fecha y hora	Voltaje (V)
2026-02-01 8:10:00	4,71
2026-02-01 8:20:00	4,74
2026-02-01 8:30:00	4,74
2026-02-01 8:40:00	4,77
2026-02-01 8:50:00	4,81
2026-02-01 9:00:00	4,82
2026-02-01 9:10:00	4,80
2026-02-01 9:20:00	4,80
2026-02-01 9:30:00	4,77
2026-02-01 9:40:00	5,11
2026-02-01 9:50:00	5,14
2026-02-01 10:00:00	5,12
2026-02-01 10:10:00	5,17
2026-02-01 10:20:00	5,37
2026-02-01 10:30:00	5,37
2026-02-01 10:40:00	5,60
2026-02-01 10:50:00	5,39
2026-02-01 11:00:00	5,39
2026-02-01 11:10:00	5,59
2026-02-01 11:20:00	5,53
2026-02-01 11:30:00	5,53
2026-02-01 11:40:00	5,58
2026-02-01 11:50:00	5,60
2026-02-01 12:00:00	5,63
2026-02-01 12:10:00	5,75
2026-02-01 12:20:00	5,83
2026-02-01 12:30:00	5,76
2026-02-01 12:40:00	5,70
2026-02-01 12:50:00	5,81
2026-02-01 13:00:00	5,86
2026-02-01 13:10:00	5,52
2026-02-01 13:20:00	5,29
2026-02-01 13:30:00	5,47
2026-02-01 13:40:00	5,46
2026-02-01 13:50:00	5,51
2026-02-01 14:00:00	5,12
2026-02-01 14:10:00	5,22
2026-02-01 14:20:00	4,64
2026-02-01 14:30:00	3,88

Cuadro 7.9: Voltaje registrado por el panel (parte 2)

Fecha y hora	Voltaje (V)
2026-02-01 14:40:00	3,79
2026-02-01 14:50:00	3,75
2026-02-01 15:00:00	3,75
2026-02-01 15:10:00	3,60
2026-02-01 15:20:00	3,62
2026-02-01 15:30:00	3,52
2026-02-01 15:40:00	3,50
2026-02-01 15:50:00	3,42
2026-02-01 16:00:00	3,42
2026-02-01 16:10:00	3,40
2026-02-01 16:20:00	3,38
2026-02-01 16:30:00	3,35
2026-02-01 16:40:00	3,35
2026-02-01 16:50:00	3,33
2026-02-01 17:00:00	3,30
2026-02-01 17:10:00	3,33
2026-02-01 17:20:00	3,36
2026-02-01 17:30:00	3,15
2026-02-01 17:40:00	2,90
2026-02-01 17:50:00	1,80
2026-02-01 18:00:00	1,65
2026-02-01 18:10:00	1,63
2026-02-01 18:20:00	1,63
2026-02-01 18:30:00	1,60
2026-02-01 18:40:00	1,59
2026-02-01 18:50:00	1,58
2026-02-01 19:00:00	1,51
2026-02-01 19:10:00	1,55
2026-02-01 19:20:00	1,54
2026-02-01 19:30:00	1,50
2026-02-01 19:40:00	1,56
2026-02-01 19:50:00	1,51
2026-02-01 20:00:00	1,48
2026-02-01 20:10:00	1,42
2026-02-01 20:20:00	1,45
2026-02-01 20:30:00	1,40
2026-02-01 20:40:00	1,40
2026-02-01 20:50:00	1,38
2026-02-01 21:00:00	1,38

A partir de los datos recopilados se obtuvo la gráfica que se muestra en la figura 7.9 donde se muestra de forma clara cómo varía el voltaje durante este período de tiempo.

Como se observa en la gráfica, a partir de las 8:00 a. m. el voltaje inicia en 4,71 V y aumenta progresivamente con el transcurso de las horas. Este comportamiento se debe a que la mayor incidencia de radiación solar se presenta entre las 11:00 a. m. y las 12:00 p. m., momento en el cual se alcanzan valores cercanos a los 6 V, correspondientes al máximo de operación del panel. Posteriormente, durante la tarde, el voltaje disminuye de forma gradual y se mantiene en un rango aproximado entre 5,12 V y 3,33 V, debido a la reducción de la intensidad solar. Finalmente, al acer-

carse el atardecer, se observa una caída más pronunciada del voltaje, alcanzando valores mínimos cercanos a 1 V, como consecuencia de la baja iluminación solar.

# Conclusiones

El acceso a la energía es un requisito fundamental para garantizar un estilo de vida digno y estable, pues permite realizar actividades esenciales como la conservación de alimentos, el funcionamiento de servicios educativos y el acceso a la atención en salud. Sin embargo, en Colombia persiste una brecha significativa: aún existen comunidades que no cuentan con este servicio básico o lo reciben de manera intermitente, lo que genera desigualdades frente a las condiciones de vida en zonas urbanas. Aunque las energías renovables representan una alternativa viable para reducir esta brecha, la implementación de sistemas de medición y evaluación en territorios aislados continúa siendo un desafío, principalmente debido al alto costo de los equipos disponibles y a la complejidad de su instalación.

En respuesta a la problemática planteada, el proyecto de monitoreo energético desarrollado en este trabajo demostró ser una solución práctica y accesible. El prototipo se diseñó considerando las necesidades específicas de las comunidades, priorizando que fuera un dispositivo de bajo costo, de fácil implementación y manejo intuitivo. En cuanto a costos, el equipo desarrollado puede obtenerse con un presupuesto de 352.227 pesos colombianos, como se muestra en la tabla de presupuestos (figura 8.1).

Producto	Precio (COP)
Módulo ESP32	39.000,00
Pantalla LCD 2004	34.000,00
Módulo i2c	1.000,00
Buzzer 5v	4.000,00
Módulo lector de tarjeta sd	8.000,00
Modulo rtc	17.000,00
Sensor de flujo de agua de 1/2	30.000,00
Sensor efecto Hall 49E	6.882,00
Iman Neodimio rect 10x10x2	1.345,00
Panel solar 6V	25.000,00
Memoria microSD	31.000,00
Caja de acrilico	60.000,00
PCB	35.000,00
Impresión en PLA	60.000,00
Total	352.227,00

Figura 8.1: Presupuesto del prototipo Fuente: Elaboración propia

Asimismo, su funcionamiento fue pensado para que cualquier persona pueda operarlo de manera sencilla: El sistema se activa simplemente presionando un botón, ya que el dispositivo opera de manera autónoma durante la toma de datos. Estos se almacenan automáticamente en la tarjeta microSD, lo que permite un acceso sencillo: basta con extraer la tarjeta y conectarla a un PC para consultar la información registrada. Esto permitió cumplir con el objetivo 1, en el cual se delimitaron los requerimientos de las comunidades y se incorporaron al diseño y la implementación del prototipo.

El prototipo desarrollado también permitió estimar el potencial energético de la zona en la que se instale, cumpliendo con el objetivo 2. El dispositivo es capaz de medir las tres variables definidas: vientos de 10–15 m/s (aproximadamente 36–54 km/h), velocidad del flujo de agua de hasta 30 L/min, y la irradiancia solar, estimada a partir del voltaje generado por el panel, con un rango de hasta 6 V. Los datos obtenidos proporcionan una base de información que puede ser utilizada por expertos para evaluar la viabilidad de implementar energías renovables en zonas aisladas. Finalmente, se realizó la validación de cada sensor en ambientes reales y controlados, logrando demostrar que el dispositivo mide de manera confiable y precisa las variables propuestas. Esto evidencia que un sistema de bajo costo puede generar datos aproximados útiles para la toma de decisiones energéticas, cumpliendo con el objetivo 3 del proyecto.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el dispositivo propuesto es una herramienta útil, confiable y de gran potencial para apoyar la evaluación del recurso energético en comunidades aisladas. Su uso contribuye a facilitar la toma de decisiones informadas y resalta la importancia de tecnologías accesibles para disminuir la desigualdad energética en el país.

# Recomendaciones

---

- Se sugiere escalar el proyecto incorporando la transmisión remota de datos a una plataforma digital, de manera que la información no solo quede almacenada en la memoria microSD, sino que también pueda visualizarse en tiempo real. Esta funcionalidad es totalmente viable gracias al uso del microcontrolador ESP32, seleccionado precisamente por su capacidad de comunicación inalámbrica y su facilidad para integrarse con servicios en la nube.
- Para mejorar la precisión de las mediciones, especialmente en la variable de radiación solar, se recomienda utilizar un panel fotovoltaico de mayor capacidad de voltaje. Un panel con especificaciones superiores permitiría obtener lecturas más amplias y exactas. No obstante, es importante considerar que esta mejora podría aumentar el costo final del prototipo, dependiendo del tipo de panel seleccionado.
- Una vez el sistema inicia, la pantalla indica cuando está listo para utilizarse. Sin embargo, Se recomienda verificar que la microSD esté correctamente insertada en el módulo lector antes de iniciar el sistema, ya que una mala conexión puede impedir su arranque. En caso de que la tarjeta no esté bien colocada, la pantalla mostrará una advertencia; sin embargo, es aconsejable revisar su posición previamente para evitar fallas en la operación.
- Para futuras mejoras del sistema, se recomienda integrar sensores complementarios que permitan ampliar la cantidad y calidad de las variables analizadas. La inclusión de mediciones como temperatura ambiental, humedad relativa, presión barométrica u otras condiciones climáticas relevantes podría enriquecer la caracterización del entorno y facilitar un análisis más completo del potencial energético disponible.
- En caso de escalar el prototipo hacia una implementación permanente o hacia la integración con sistemas de generación energética reales, será necesario considerar el cumplimiento del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) vigente en Colombia. Este reglamento establece lineamientos obligatorios en materia de seguridad eléctrica, protección contra riesgos de choque eléctrico, sistemas de puesta a tierra, protección contra sobrecorrientes y adecuadas condiciones de instalación en ambientes exteriores. Aunque el presente prototipo opera en niveles de baja tensión y tiene carácter experimental, una futura versión orientada a uso comercial o instalación fija deberá diseñarse bajo los criterios técnicos y de seguridad establecidos por dicha normativa.

## Anexo 1 – Manual de usuario del prototipo de Monitoreo Energético

### Introducción

Este manual describe el uso correcto del prototipo de monitoreo energético, diseñado para medir variables ambientales que permiten a expertos evaluar la existencia de potencial energético en una zona aislada.

### Componentes del sistema

El prototipo está compuesto por:

- Anemómetro para medición de velocidad del viento.
- Sensor de caudal YF-S201 para medición de velocidad del agua.
- Panel fotovoltaico para medición de radiación solar.
- Microcontrolador ESP32.
- Pantalla LCD.
- Módulo de almacenamiento microSD.
- Fuente de alimentación (Power Bank)

### Requisitos previos

Antes de operar el dispositivo, asegúrese de:

- Contar con un Power Bank cargado.
- Verificar que los sensores estén correctamente conectados.
- Asegurar que la tarjeta microSD esté insertada.

### Encendido del dispositivo

1. Conecte el Power Bank al puerto de alimentación del sistema.
2. El dispositivo iniciará automáticamente.
3. La pantalla LCD mostrará los valores iniciales de los sensores.

Nota: Para visualizar los valores de cada sensor es necesario oprimir el primer botón de izquierda a derecha.

### **Funcionamiento del sistema**

#### Medición de viento

- Ubique el anemómetro en un área abierta, libre de obstáculos.
- El sistema registra la velocidad del viento en tiempo real.

#### Medición de agua

- Inserte el sensor de caudal en el flujo del riachuelo de manera que el orificio de este quede completamente sumergido.
- Asegúrese de que el sensor esté correctamente ubicado, de modo que la corriente no pueda desplazarlo.

#### Medición solar

- Coloque el panel solar en dirección al sol.
- Evite ubicar el panel en zonas con sombras.

**Visualización de datos** En la pantalla LCD se muestran:

- Velocidad del viento (m/s y km/h).
- Caudal y velocidad del agua.
- Voltaje del panel solar.

Nota: Los valores se actualizan cada segundo.

### **Almacenamiento de datos**

- Los datos se almacenan automáticamente en la tarjeta microSD.
- El registro se realiza una vez por minuto.
- Cada archivo contiene fecha, hora y valores medidos.

Nota: En caso de que se desee modificar el intervalo de almacenamiento de los registros, este ajuste debe realizarse directamente en el código base.

### **Apagado del dispositivo**

1. Desconecte el Power Bank.
2. Espere a que la pantalla se apague completamente.

### **Recomendaciones de uso**

- Limpiar periódicamente los sensores.
- Transportar el dispositivo con cuidado.
- Asegurarse de que la microSD esté correctamente insertada.

## Anexo 2 – Diseño de Caja del prototipo

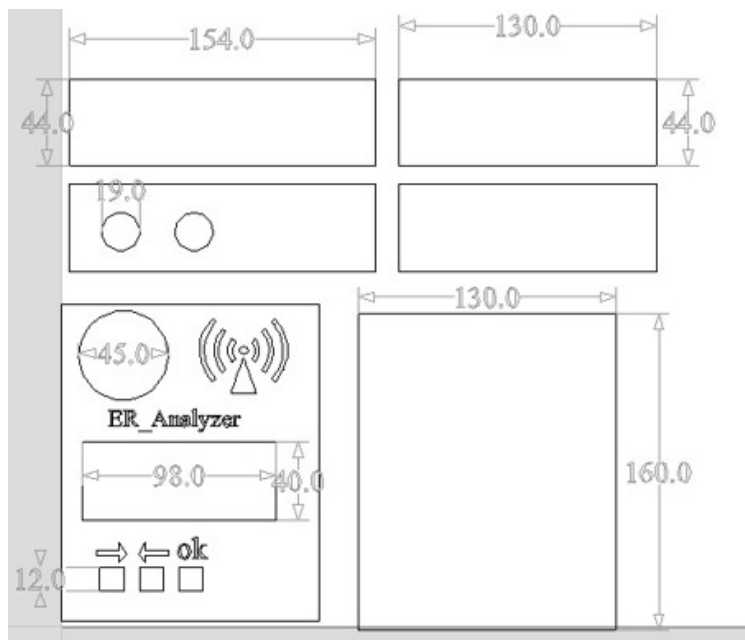


Figura 10.1: Diseño de Caja.

## Anexo 3 – Piezas del anemómetro

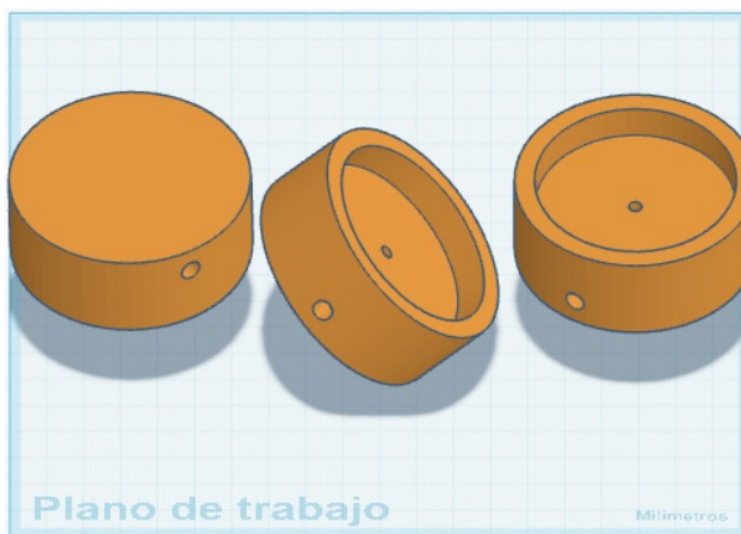


Figura 10.2: Diseño en 3D - Tapa anemómetro

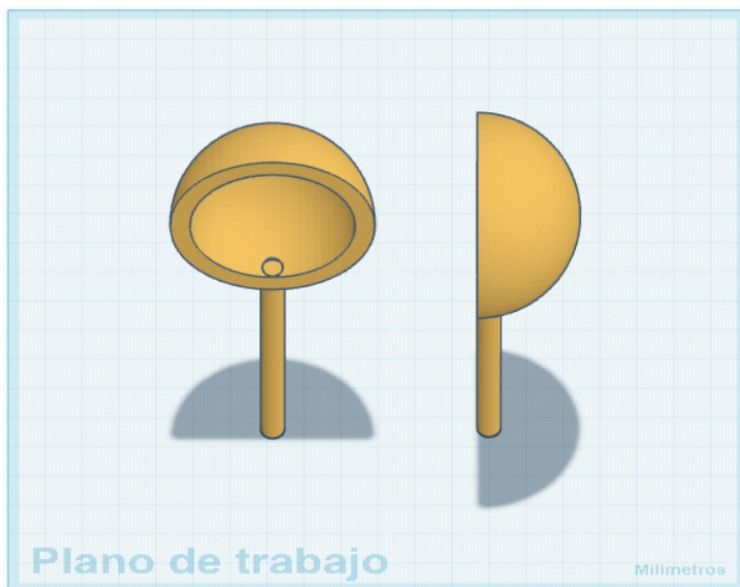


Figura 10.3: Diseño en 3D - Cazoleta

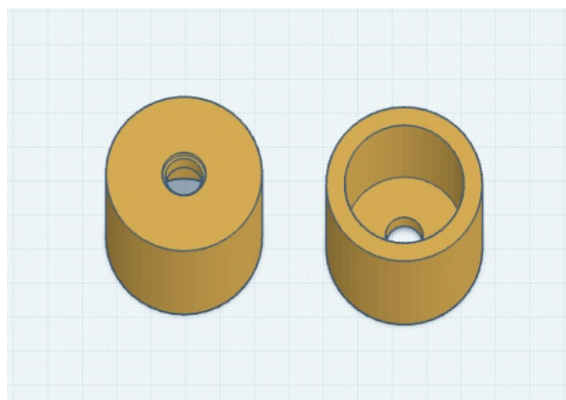


Figura 10.4: Diseño en 3D - Base

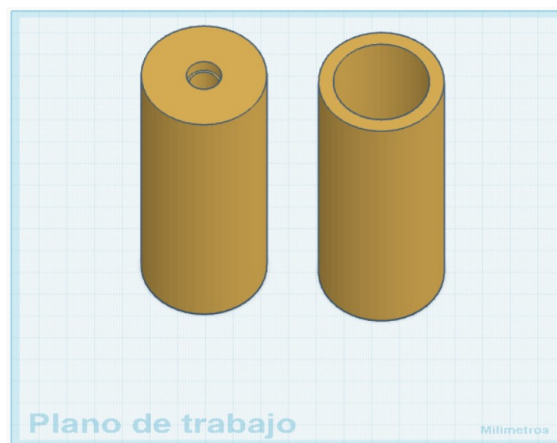


Figura 10.5: Diseño en 3D - Base

## Anexo 4 – Diseño esquemático en Proteus

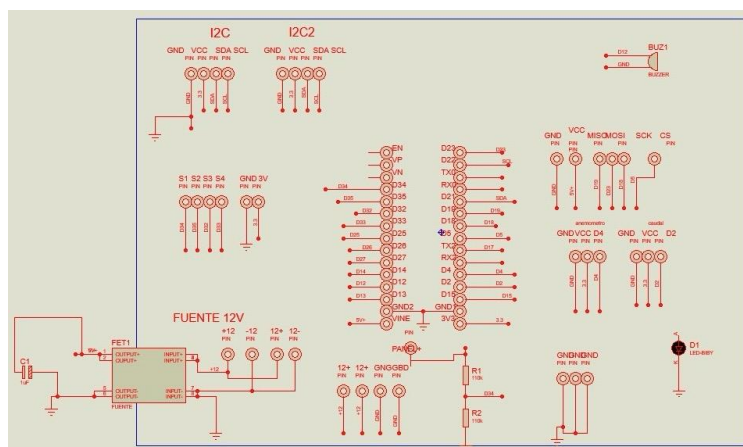


Figura 10.6: Diseño esquemático en Proteus

## Anexo 5 – Especificaciones

Característica	Especificación
Nombre del dispositivo	Módulo de Monitoreo Energético
Función principal	Medición de variables ambientales para estimar el potencial energético
Variables medidas	Radiación solar, velocidad del viento, velocidad del agua
Tipo de dispositivo	Portátil, de bajo costo, experimental
Uso previsto	Trabajo de campo en zonas rurales o aisladas

Figura 10.7: Descripción general

Parámetro	Valor
Microcontrolador	ESP32
Voltaje de operación	3.3 V
Voltaje de alimentación	5 V (Power Bank)
Fuente de energía	Power Bank USB (1A)
Consumo aproximado	< 1 W
Protección de entradas	Divisor de voltaje para panel solar

Figura 10.8: Especificaciones eléctricas

Especificaciones de medición		
Velocidad del viento	Velocidad del agua	Radiación solar
-Sensor: Anemómetro con sensor de efecto Hall. -Unidad: m/s, km/h. -Método: Conteo de pulsos por rotación. -Resolución: 1 pulso por vuelta.	-Sensor: YF-S201. -Rango de caudal: 1-30 L/min. -Unidad: m/s, L/min. -Método: Frecuencia de pulsos del rotor interno.	-Sensor: Panel fotovoltaico de 6 V. -Unidad: Voltaje (V) proporcional a la irradiancia. -Método: Lectura analógica mediante ADC. -Acondicionamiento: Divisor resistivo.

Figura 10.9: Especificaciones de medición

Elemento	Descripción
Pantalla	LCD
Comunicación	I <sup>2</sup> C
Almacenamiento	Tarjeta microSD
Frecuencia de actualización	1 segundo (pantalla)
Registro de datos	1 vez por minuto

Figura 10.10: Interfaces y visualización

# Bibliografía

- [1] ONU. (2023) Energía asequible y no contaminante. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [2] M. A. Almario. (2023) Cerca del 97% de los colombianos tiene acceso a la energía eléctrica según minenergía. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/especiales/el-apagon-de-1992-1993/cerca-de-97-de-los-colombianos-tiene-acceso-a-la-energia-electrica-segun-minenergia-a-3565120#:~:text=El%20nivel%20de%20embalses%20para,jugador%20fundamental%20en%20la%20regi%C3%B3n%E2%80%9D>.
- [3] P. F. Laura Castillo. (2023) Desigualdad energética en colombia: Un desafío para la paz, el desarrollo social y el bienestar. [Online]. Available: <https://ipazde.usta.edu.co/index.php/opinion/86-desigualdad-energetica-en-colombia-un-desafio-para-la-paz-el-desarrollo-social-y-el-bienestar>
- [4] J. M. Rojas. (2024) El 18.5% de la población en colombia se encuentra en situación de pobreza energética. [Online]. Available: <https://www.promigas.com/Paginas/NoticiasESP/Comunicado-IMPE.aspx>
- [5] M. Cobo. (2021) Energías limpias: retos de colombia para producir energía sin contaminar. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/energias-limpias-en-colombia-como-esta-el-pais-y-que-retos-tiene-620402>
- [6] ——. (2022) En el campo, alrededor de 2 millones de personas carecen de servicio de electricidad. [Online]. Available: <https://mascolombia.com/en-el-campo-alrededor-de-2-millones-de-personas-carecen-de-servicio-de-electricidad/>
- [7] XM. (2025) En el cuarto trimestre, 37 proyectos de transmisión y 67 de generación ingresaron para fortalecer el sistema interconectado nacional. [Online]. Available: <https://www.xm.com.co/noticias/7491-en-el-cuarto-trimestre-37-proyectos-de-transmision-y-67-de-generacion-ingresaron-para>
- [8] F. D. C. Hedier Diaz Narvaez. (2007) Análisis, modelado, simulación y validación de un sistema de generación de energía solar autónomo. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/462ddfe7-fadb-47cb-a18b-786fa0f3b354/content>
- [9] BBVA. (2022) Energía solar: qué es y cómo se produce. [Online]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>
- [10] repsol. (2023) La energía del viento. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/energia-eolica/index.cshtml>

- 
- [11] endesa. (2021) Energía hidráulica: qué es, cómo funciona y sus ventajas. [Online]. Available: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-hidraulica>
- [12] B. Mundial. (2017) Comunidades rurales alejadas de la red eléctrica logran acceso a electricidad en México. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/11/01/switching-on-remote-communities-through-electricity-access-in-mexico>
- [13] C. Janna. (2016) Hibrelec, el proyecto que busca llevar energía a zonas aisladas de Iberoamérica. [Online]. Available: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/771-hibrelec-el-proyecto-que-busca-llevar-energia-a-zonas-aisladas-de-iberoamerica>
- [14] M. L. Paolo Olivero. (2022) Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica para la generación de energía alternativa en la institución educativa Isabel María Cuesta González sede Mauricio López Sierra del distrito de Riohacha. [Online]. Available: <https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/entities/publication/c2e8d257-3f61-46ef-bc09-38f306d54f5b>