

**DESARROLLO DE UN MÓDULO DE DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO
PARA SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA-EÓLICA**

BRAYAN JESUS ACEVEDO BOTELLO

Autor



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PAMPLONA
2021**

**DESARROLLO DE UN MÓDULO DE DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO
PARA SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA-EÓLICA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

BRAYAN JESUS ACEVEDO BOTELLO

Autor

PhD. CRISTHIAN IVAN RIAÑO JAIMES

Director

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PAMPLONA
2021**

Agradecimientos

Agradezco a mí director de tesis, PhD. Cristhian Ivan Riaño Jaimes, por su entrega, paciencia y compromiso con esta investigación, siendo de gran ayuda y guía a lo largo del desarrollo. A mi madre por tantos sacrificios detrás de cada uno de mis pasos, por ser ese pilar y fortaleza que me mantiene para seguir adelante en perseguir cada uno de mis sueños. A ella principalmente agradezco y dedico cada uno de mis esfuerzos por ser persona. A los amigos hechos a lo largo de mi carrera universitaria agradezco por tanto aprendizaje, ayudas y guías recibidas de su parte. A mi abuelo, familiares y amigos gracias por cada palabra de apoyo.

Dedico este trabajo a mi madre, a mi abuelo y a la memoria de todos mis seres queridos que han partido de este plano terrenal, en especial a la memoria de mi padre y mis abuelos. Por las enseñanzas recibidas con su ejemplo de dedicación, valentía y resiliencia.

Abstract

Nowadays many homes, most of them rural ones, don't have electric energy services in Colombia, and they're not near to get it due to different social, geographic and environmental reasons and/or for living in places that are hard to access, which makes difficult for them to connect to the national energy suppliers; this makes the implementation of clean energies a viable, realistic and environmental friendly option to face this trouble, this book documents the design and building of an unit put together with manufactured pieces through Fused Deposition Modeling methods (FDM) and subtractive manufacture schemed by CNC, this unit is equipped with sensors that get climatic information of the specific location where it's installed, this data can be watched online allowing to have remote access to its information in real time. With the collected data is implemented an algorithm in order to evaluate a hybrid system using photovoltaic-wind energy in accordance with the weather conditions of the studied location to satisfy the needs of the rural home in this location. In this investigation the importance of knowing the climatic information and weather conditions of a place stands out when planning to evaluate and carry out a hybrid photovoltaic-wind energy system.

Keywords: wind speed, solar radiation, temperature, renewable energy systems, wind energy, photovoltaics, hybrid power systems, power system sizing.

Resumen

Actualmente muchos hogares en su mayoría rurales, no cuentan con el servicio de energía eléctrica en Colombia, y no están próximos a contar con el servicio por diferentes razones sociales, geográficas, ambientales y/o por habitar lugares de difícil acceso, dificultando la conexión a la red nacional de energía; siendo la implementación de energías limpias una opción viable, realista y amigable con el medio ambiente para contrarrestar esta problemática, este libro documenta el diseño y construcción de un módulo ensamblado con piezas manufacturadas a través de métodos de Modelado por Deposición Fundida (FDM) y manufactura sustractiva maquinada por Control Numérico Computarizado (CNC), el cual está dotado de sensores para la recolección de información climática en una localización específica donde sea instalado, esta información puede ser observada vía internet permitiendo tener acceso remoto a los datos recolectados por el módulo en tiempo real. Con los datos recolectados se realizó la implementación de un algoritmo para dimensionar un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica, acorde a las condiciones climáticas presentes en la localización de estudio para cubrir las necesidades energéticas del hogar rural donde se realizó el estudio. En esta investigación se destaca la importancia de conocer la información climática y las condiciones ambientales del lugar en donde se planea dimensionar y desarrollar un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica.

Palabras clave: velocidad de viento, radiación solar, temperatura, sistemas de energía renovable, energía eólica, energía fotovoltaica, sistemas híbridos de energía, dimensionamiento de sistemas de energía.

Índice

1. Introducción	11
1.1. Justificación	12
1.2. Objetivos	13
1.3. Lugar de Desarrollo	14
2. Marco Teórico y Estado del Arte	15
2.1. Energías Renovables	16
2.2. Herramientas para Medición y Manejo de Variables Ambientales	20
2.3. Dimensionamiento de Sistemas de Energía (fotovoltaicos-eólicos)	25
2.4. Antecedentes	28
3. Metodología de Investigación	32
3.1. Ruta de Investigación	32
4. Selección de Componentes y Diseño del MMA	35
4.1. Selección de Componentes	35
4.2. Diseño de Modelo CAD del MMA	36
4.3. Modelo CAD del MMA	37
5. Ensamble y Construcción del MMA	40
5.1. Manufactura de Piezas para Construcción del MMA	40
5.2. Integración de Componentes	42
5.3. Características Generales del MMA	44
6. Adquisición, Almacenamiento y Transmisión de Datos	46
6.1. Sistema Embebido (Tarjeta de Control)	46
6.2. Medición de Variables Climáticas	48
6.3. Código de Adquisición, Almacenamiento y Envío de Datos	52
6.4. Tareas Programadas en Cron	54
6.5. Plataforma IOT ThingSpeak	54
6.6. Flujo de Información	54
7. Dimensionamiento del Sistema Híbrido de Energía Fotovoltaica-Eólica	57
7.1. Manipulación de Datos Recolectados	57
7.2. Selección de Equipos	60
7.3. Casos de Estudio para Dimensionamiento de Sistemas	60
7.4. Resultados del Algoritmo de Dimensionamiento	64
7.5. Caso de Estudio 1	64
7.6. Caso de Estudio 2	65
7.7. Caso de Estudio 3	65
8. Conclusiones	66
8.1. Contribuciones de Tesis	67
8.2. Futuras Investigaciones	68

Índice de cuadros

1.	Características de la Raspberry Pi Zero W	21
2.	Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)	27
3.	Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)	27
4.	Características de la Batería (MTEK MT121050)	28
5.	Características del Inversor (Cobra CPI 1000)	28
6.	Revisión de antecedentes	29
7.	Lista de Materiales del Módulo de Medición Ambiental (MMA).	35
8.	Parámetros para Impresión 3D del MMA. Donde V es 'Velocidad de impresión' [mm/s] y D es 'Densidad de impresión' [%].	41
9.	Piezas Cortadas con Láser	42
10.	Tornillería Necesaria en Ensamblaje del Dispositivo	43
11.	Características del Dispositivo	45
12.	Valores Diarios Promedio Medidos por el MMA	58
13.	Equipos de Referencia para Dimensionamiento.	60
14.	Información Ambiental de Villa Marina (Caso de Estudio 1)	60
15.	Información Ambiental de Pamplona (Caso de Estudio 2)	62
16.	Información Ambiental de Pamplona (Caso de Estudio 3, supuesto)	63
17.	Síntesis Contribuciones de Tesis	67
18.	Dataset en el Almacenamiento Interno de la Raspberry Pi por un Periodo de Cuatro Horas, Aproximadamente.	75

Índice de figuras

1.	Predicción climática de dispositivos electrónicos.	15
2.	(i) Sistema fotovoltaico con una batería de respaldo (fuera de la red), y (ii) Sistema fotovoltaico con la red eléctrica de respaldo.	17
3.	Módulo de adquisición de energía eólica y ubicación del mismo en el túnel de metro.	17
4.	Sistemas híbridos de energía renovable	18
5.	Sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica	19
6.	Raspberry Pi Zero W	20
7.	Raspberry Pi como ordenador de escritorio.	21
8.	Anemómetro Rotativo	22
9.	Piranometro de la Universidad de Pamplona.	23
10.	Sensor AM2301 y sus Respectivos Pines de conexión.	23
11.	Sistema de Internet of Things (IOT).	24
12.	Diagrama de metodología secuencial.	32
13.	Primera versión Diseño Asistido por Computador (CAD).	36
14.	Segunda versión CAD.	36
15.	Parte inferior del modelo CAD.	37
16.	Parte central e interna del MMA.	37
17.	Rotulas de las extensiones.	38
18.	Sensor de velocidad de viento.	38
19.	Paneles solares del MMA.	39
20.	Caja de sensores MMA.	39
21.	Algunas piezas manufacturadas.	40
22.	Impresión 3D de pieza Armazón lateral parte 1 en una impresora artesanal.	41
23.	Tornillos cilíndricos usados en sujeción entre piezas y componentes electrónicos del MMA.	43
24.	Inclusión de componentes electrónicos al ensamblaje del MMA.	44
25.	Rutas internas del cableado en el MMA.	44
26.	Visualización real del MMA posterior a la construcción.	45
27.	Módulo de Mediciones Ambientales (MMA).	46
28.	Raspberry Pi Zero W del (MMA).	47
29.	Paso a paso para instalación del sistema operativo Raspberry Pi OS en disco duro (memoria SD).	48
30.	Anemómetro Rotativo Diseñado y Fabricado por Autor	49
31.	Parte interna del Anemómetro Rotativo Fabricado por Autor	49
32.	Sensor de Rayos UV veml6070.	51
33.	Sensor de temperatura y humedad relativa AM2301.	52
34.	Diagrama de flujo del código para adquisición, almacenamiento y envío de datos.	53
35.	Interfaz IoT de ThingSpeak para visualización de variables ambientales.	55
36.	Diagrama de Flujo de la Información.	56
37.	Información organizada en Excel.	57
38.	Variables Diarias Promedio Medidas por el MMA.	59
39.	Datos de Entrada por Teclado del Algoritmo del Caso 1.	61
40.	Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 1.	62
41.	Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 2.	63
42.	Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 3.	64

Siglas

- CAD** Diseño Asistido por Computador. 9, 33, 35–37, 40, 66
- CNC** Control Numérico Computarizado. 6, 35, 40, 42, 66
- CSV** Comma-Separated Values. 52, 54, 57, 58
- ESS** Sistemas de Almacenamiento de Energía. 18, 30
- FDM** Modelado por Deposición fundida. 6, 40, 42
- GPIO** General Purpose Input/Output. 20, 21, 52
- HESS** Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido. 30
- HOMER** Optimization Model for Electric Renewable. 29
- I2C** Inter-Integrated Circuit. 50, 54
- IOT** Internet of Things. 9, 20, 21, 24, 46, 54
- MMA** Módulo de Medición Ambiental. 8, 9, 35–47, 49, 50, 52, 54, 57–59, 62, 63, 66–68
- PLA** Ácido Poliláctico. 40, 42, 66
- RAM** Random Access Memory. 54
- RES** Fuentes de Energía Renovable. 18, 30
- STL** STereoLithography. 40
- WSN** redes de sensores inalámbricos. 31

1. Introducción

En las últimas décadas en las actividades comunes del hogar el uso y necesidad de la energía eléctrica ha crecido exponencialmente, llegando al punto de convertirnos en personas dependientes al acceso continuo de esta en cada lugar que transitamos durante el día, incluso mientras nos movilizamos la consumimos, con nuestros teléfonos móviles, el reloj de mano, en automóviles o en el transporte público. Todo esto pasa porque la electricidad fue descubierta, estudiada y utilizada para mejorar la calidad de vida de las personas facilitando tareas, evitando situaciones de riesgo, optimizando tiempos de producción, comunicarnos, etc.

Sin embargo, según El Tiempo, en Colombia existen 1.710 localidades rurales que no cuentan con el servicio de energía eléctrica constante, teniendo la posibilidad de acceder al servicio entre cuatro y doce horas al día viéndose afectadas alrededor de 128.587 personas en el país. En Sipí, Chocó para mantener el servicio en la cabecera municipal usan plantas que consumen 36 galones de ACPM durante 10 horas en promedio, teniendo una inversión al día de 360.000 pesos a la que debemos agregar el transporte en lancha durante 6 horas debido a las pocas vías de acceso a la cabecera municipal [1]. El panorama en el departamento de Norte de Santander no es diferente, con lugares de difícil acceso por condiciones ambientales o problemas sociales, se estima que son 22.605 las viviendas rurales y 256 las viviendas urbanas sin servicio de energía eléctrica [2].

Con la alta dispersión de los hogares rurales la implementación de energías renovables es una posible solución con gran viabilidad de implementación por su versatilidad de fuentes de energía como el sol, viento, agua, entre otros [1][3]. A nivel mundial los sistemas fotovoltaicos como generadores de energía se han destacado más que otros sistemas de energía renovables. Entre el año 2010 y 2018 la capacidad mundial de generación de electricidad a partir de la energía solar aumentó de 40 GW a 500 GW aproximadamente (en potencia producida). Es decir, de fuentes solares proviene el 2,4 % de la electricidad generada en el año 2018 del mundo, aunque la capacidad instalada para la generación solar en el planeta representa el 7,2 % aproximadamente. La desigualdad presente en los porcentajes de la capacidad instalada y la electricidad generada se debe a la intermitencia de la fuente solar [4]. Algo similar sucede en los sistemas de energía eólica al no generar equivalente a la capacidad total instalada porque las corrientes de viento suelen tener velocidad variable aleatoria en el transcurso del día.

Para lograr un equilibrio de producción energética durante el día se plantea hacer una combinación en la configuración del sistema de producción de energía con fuentes renovables, como la fotovoltaica y eólica, para que se compense una con la otra. Sin embargo, el verdadero reto es hallar una configuración de este sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica adecuada que integre paneles solares y aerogeneradores para satisfacer las necesidades básicas del hogar en estudio.

1.1. Justificación

Al optar por alguno de los dos sistemas de generación de energía (fotovoltaicos o eólicos) se estará sujeto a una afectación negativa en la producción energética con la variabilidad climática presente en el clima tropical de Colombia y otros países, para ello se tendría que sobre escalar el sistema para cumplir con las necesidades requeridas elevando significativamente los costos en la implementación de este. Por esta razón, los sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica adquieren importancia buscando un equilibrio de generación de energía teniendo como fuentes el sol y el viento. Al caracterizar el lugar de estudio analizando la información recolectada durante un prolongado periodo de tiempo de las condiciones climáticas podemos realizar un dimensionamiento acertado de las proporciones en la producción de energía de cada sistema (fotovoltaico y eólico) individualmente para compensar el uno al otro las pérdidas provocadas por intermitencia de los recursos. De manera que, es necesario el conocimiento del comportamiento climático en la localización de estudio para llegar a un dimensionamiento óptimo basándose en información propia de determinado lugar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un módulo para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar las variables ambientales que influyen en los sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.
- Proponer una estrategia para medición de variables ambientales necesarias para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.
- Construir un módulo de medición, almacenamiento, procesamiento y transmisión de datos.
- Desarrollar un código para procesar los datos ambientales obtenidos que caracterizan el comportamiento eléctrico.
- Crear estrategia para dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.
- Analizar el funcionamiento y los resultados obtenidos.

1.3. Lugar de Desarrollo

La característica más importante de esta investigación es la obtención de información personalizada en un lugar determinado de estudio en el cual se planea dimensionar e implementar un sistema híbrido de energía fotovoltaico-eólico. A diferencia de otros trabajos donde el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía renovable lo realizaron basándose en información ambiental consultada en sitios web gubernamentales, estos datos son suministrados por estaciones meteorológicas normalmente ubicadas en centros urbanos, lo que significa que al realizar un estudio en una vivienda rural con una distancia considerable de alguna estación meteorológica los datos de las variación climática suministrados por esta no coincidirán con las condiciones reales de dicha vivienda.

El lugar para el desarrollo de esta investigación fue en la azotea de un edificio en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Lugar seleccionado por la completa accesibilidad del autor.

2. Marco Teórico y Estado del Arte

La investigación meteorológica desarrolla un crecimiento constante desde hace varias décadas, siendo utilizada para diversas aplicaciones como la simulación de variables atmosféricas, creando modelos de predicción numérica del tiempo para obtener una estimación del clima precisa (ver Figura: 1) [5]. También es necesario el análisis meteorológico en lugares como las centrales nucleares para testear constantemente el entorno de trabajo para prevenir o responder rápidamente ante algún accidente nuclear, ya que al presentarse uno de estos puede liberarse al medio ambiente material radioactivo y afectar la salud de la población [6].

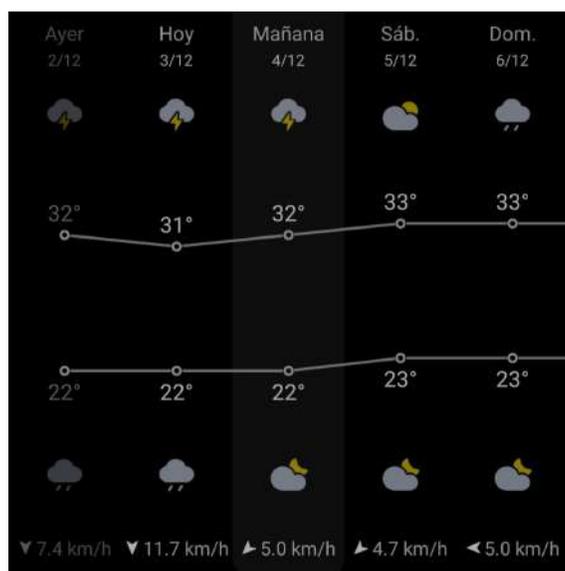


Figura 1: Predicción climática de dispositivos electrónicos.

Fuente: Autor

La calidad del aire y la variación climática brusca ha disparado las alarmas a nivel hospitalario y gubernamental por la frecuente y masiva atención a pacientes que presentan enfermedades respiratorias en diferentes ciudades del mundo. En un estudio realizado en el distrito de Haidian de Beijing, China, analizaron los datos aportados por tres hospitales de las visitas diarias de pacientes que reportaron enfermedades respiratorias y circulatorias en la sala de emergencias. Recolectaron datos meteorológicos locales, como temperatura, humedad relativa, luz solar, presión atmosférica y velocidad del viento para concluir con dar recomendación a estos pacientes de tomar cuidados preventivos ante los cambios climáticos bruscos que se presentan en la ciudad [7].

2.1. Energías Renovables

Los seres humanos a parte de contar con su fuerza física siempre han requerido la disponibilidad de fuentes de energía externas para realizar tareas, como la de animales domésticos, o el uso y manejo del aire y agua, para luego llegar a la explotación de combustibles fósiles como carbón, gas natural y petróleo. El empleo de la energía ha sido y sigue siendo indispensable en la vida humana tanto como lo es el agua potable[8].

Sin embargo, los combustibles fósiles son recursos no renovables limitados que en la producción energética afectan negativamente el medio ambiente emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera y no son suficientes para satisfacer la creciente demanda energética, por esta razón es fundamental la implementación de sistemas de energía sostenibles y limpias, siendo necesario el desarrollo de nuevas técnicas que a partir de fuentes renovables se produzcan combustibles alternativos amigables con el medio ambiente [9]. Es importante resaltar que la energía aprovechable producto de recursos renovables se caracterizan por su continua presencia en la naturaleza considerándose inagotables [8].

Las energías renovables tienen como punto de partida al sol ya que las diferencias de presión que provocan los vientos se producen por su calor emitido, así como el sol es el factor principal para la generación de corrientes de aire, este también controla el ciclo del agua con la evaporación creando nubes que posteriormente generan lluvias. Por ende el sol es fundamental y necesario para que el planeta tierra presente diferentes fuentes de energía como son; la energía eólica, hidráulica, térmica, fotovoltaica, etc [8]. Pero para implementar sistemas de energía renovables se necesita crear indicadores de sostenibilidad fijándose en: los recursos disponibles, el desarrollo económico, el desempeño ambiental, social y técnico, para así realizar una correcta adecuación del sistema de energía renovable [9].

2.1.1. Sistemas Fotovoltaicos de Energía Renovable

La producción de energía eléctrica en países como Irak no es suficiente para cubrir las necesidades energéticas industriales y domésticas, por lo tanto, es necesario buscar soluciones limpias reduciendo las emisiones de dióxido de carbono y otros gases altamente nocivos producto de la incineración de combustibles fósiles generalmente usados en la producción tradicional de energía eléctrica. Irak es un país que como en muchos otros la energía solar como fuente de energía limpia es la más favorable y promete ser una solución viable a la crisis energética de estos países reduciendo la emisión de gases tóxicos que deterioran la capa de ozono [10].

Las dos configuraciones más comunes que se presentan en el uso de sistemas fotovoltaicos como generadores de energía renovable se observan en la Figura 2 y se pueden implementar en hogares dentro o fuera de la red eléctrica nacional [10].

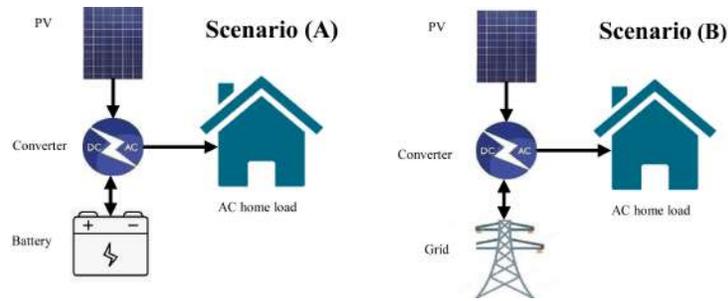


Figura 2: (i) Sistema fotovoltaico con una batería de respaldo (fuera de la red), y (ii) Sistema fotovoltaico con la red eléctrica de respaldo.

Fuente: [10]

2.1.2. Sistemas Eólicos de Energía Renovable

Al buscar alternativas a la producción energética a partir de recursos fósiles nos cruzamos directamente con la energía eléctrica obtenida de fuentes como el sol y el viento [11]. Sin embargo, el uso de energías renovables no sólo se implementan como energías alternativas a los combustibles fósiles, sino que también para aprovechar al máximo las fuentes de energía renovables en cualquier entorno.

De manera que, los sistemas de energía renovables también son usados como suministro de energía para diferentes sistemas aislados de la red eléctrica que requieren una alimentación energética propia y cuentan con disponibilidad de alguna fuente de energía renovable, como son los sistemas de monitoreo en túneles de metro garantizando la seguridad de operación. En esta investigación, Zhang busca dar fin a la dificultad de abastecer eléctricamente estos sistemas de monitoreo, los cuales están encargados de chequear el estado estructural de dichos túneles subterráneos. El sistema autoalimentado desarrollado aprovecha la energía eólica presente en los túneles de metro con los módulos de adquisición mostrados en la Figura 3, generando energía eléctrica disponible para uso y/o almacenamiento, logrando la capacidad de suministrar energía de manera continua y estable al sistema de monitoreo en la seguridad de túneles de metro [12].

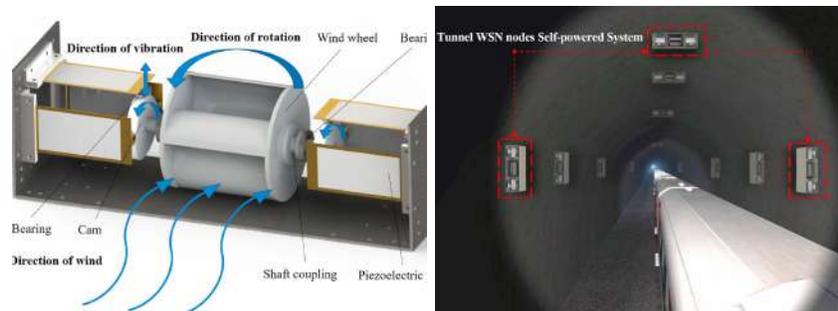


Figura 3: Módulo de adquisición de energía eólica y ubicación del mismo en el túnel de metro.

Fuente: [12]

Sin embargo, la producción eléctrica obtenida a partir de la energía eólica se ve directamente afectada por la disponibilidad irregular del recurso (corrientes de viento), siendo este un problema en la implementación de sistemas de energía eólica de gran tamaño. Para contrarrestar esta problemática se lleva a cabo la inclusión de Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS) en el uso de Fuentes de Energía Renovable (RES) en sistemas de producción de energía [13].

2.1.3. Sistemas Híbridos de Energía Renovable

La implementación de sistemas de energía basados en fuentes renovables como la solar fotovoltaica, la eólica, la solar concentrada, la biomasa, la geotérmica y la oceánica son el comienzo para un frenado y reducción al calentamiento global sin dejar a un lado la estabilidad energética mundial. La elección e implementación de los sistemas de energía adecuado requiere tener en cuenta diferentes variables como son la disponibilidad del recurso (fuente renovable), la discontinuidad de los recursos, el valor monetario del sistema, la eficiencia del sistema, la calidad de la energía producida y el costo de vida de la electricidad [9].



Figura 4: Sistemas híbridos de energía renovable

Fuente: [14]

De manera que los sistemas híbridos de energía renovable se caracterizan por mezclar y coordinar dos o más sistemas de producción de energía renovable (ver Figura 4) para lograr un correcto uso de sus propiedades de operación y conseguir mayor eficiencia a las que tendría con una fuente de energía [15].

Antes de realizar el montaje y puesta en marcha de un sistema híbrido de energía es conveniente realizar con anterioridad un estudio de prefactibilidad, este estudio se basa en analizar el comportamiento climático, los recursos disponibles de las fuentes de energía renovable y la demanda energética del lugar de aplicación. Dicho análisis ajusta de manera precisa la localización y configuración del sistema híbrido de energía renovable [15].

2.1.3.1. Sistemas Híbridos de Energía Fotovoltaica-Eólica Las fuentes de energía renovables más utilizadas son el sol y el viento, las cuales se popularizaron desde la década de los años 2000 aumentando cada vez más la generación de energía a partir de estas fuentes [16], los sistemas basados en la energía solar o eólica trabajan comúnmente de manera autónoma o conectada a la red, siendo poco eficientes por la aleatoriedad en la naturaleza presente en los recursos solares o eólicos [15]. Por esta razón los sistemas híbridos de energía tienen como objetivo principal la producción energética de forma ininterrumpida [16]. En la Figura 5 se observa un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica.

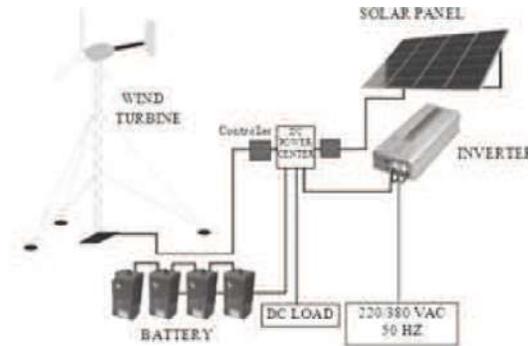


Figura 5: Sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica

Fuente: [16]

Combinando la producción de energía solar y eólica en un sistema híbrido de energía operan de dos modos: simultaneo y secuencial; el modo simultaneo ocurre cuando considerablemente hay presencia de ambas fuentes de energía (solar y eólica) para alimentar el sistema, pero en el modo secuencial cuando alguna de las fuentes no produce por la condición climática u otro factor, aún queda la otra fuente como respaldo en la producción energética disminuyendo las intermitencias de energía [15].

2.2. Herramientas para Medición y Manejo de Variables Ambientales

En el desarrollo de esta investigación se planteó una estrategia de medición de variables ambientales que permitieran caracterizar el comportamiento eléctrico en la localización de estudio y con esta información dimensionar un sistema híbrido de energía fotovoltaica eólica. Para esto, se realizó la búsqueda de diferentes herramientas útiles que nos ayudaron a cumplir los objetivos propuestos inicialmente, entre las herramientas encontradas están: la tarjeta de control (Raspberry Pi Zero W), sensores para medición de variables ambientales, una plataforma IOT como visualizador de información remoto y por último la implementación de redes neuronales para el dimensionamiento del sistema.

2.2.1. Tarjeta de Control

La familia de las tarjetas Raspberry Pi son conocidas como ordenadores del tamaño de una tarjeta de crédito que integran 40 pines General Purpose Input/Output (GPIO) los cuales permiten hacer lectura de sensores para lo cual se han utilizado en la construcción de este módulo módulo, sin embargo, tienen infinitas aplicaciones. Las tarjetas Raspberry Pi son una serie de ordenadores de placa única fabricadas desde el año 2012 por Raspberry Pi Foundation, organización del Reino Unido. Estos ordenadores ejecutan Linux y cuentan con pines GPIO usados como entradas o salidas permitiendo controlar o recibir información de una gran variedad de componentes electrónicos. Estos dispositivos se utilizan con gran frecuencia en proyectos relacionados con IOT [17].



Figura 6: Raspberry Pi Zero W

Fuente: [18]

2.2.1.1. Raspberry Pi Zero W Teniendo definida la familia de tarjetas Raspberry Pi para incluir en el proyecto se realizó la búsqueda de una placa que estuviera acorde a las necesidades de rendimiento, un tamaño reducido y precio de acuerdo al presupuesto disponible, teniendo en cuenta estas acotaciones se escogió la tarjeta Raspberry Pi Zero W (ver Figura 6), ideal para

incluir en proyectos de IOT por su reducido tamaño, versatilidad de conectividad inalámbrica y su precio en Colombia no supera los 20 USD [18].

2.2.1.1.1. Características de la Raspberry Pi Zero W Las características más importantes de la tarjeta Raspberry Pi Zero W seleccionada para ser implementada en el proyecto las podemos observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Características de la Raspberry Pi Zero W

Especificaciones	Descripción
wireless LAN	802,11 b / g / n
Bluetooth	4,1
Bluetooth	Baja energía (BLE)
CPU	Único núcleo de 1GHz
Memoria RAM	512MB
Puertos	Mini HDMI y USB On-The-Go
Alimentación	Micro USB
GPIO	40 pines
Conector de cámara	CSI

Fuente: [18]

2.2.1.1.2. Sistema Operativo (Raspberry Pi OS) Siendo las tarjetas Raspberry Pi ordenadores, estas requieren de un disco duro y un sistema operativo para su funcionamiento como ordenador (ver Figura 7). Por esto, se utilizó una tarjeta SD como disco duro y en ella se instaló el sistema operativo Raspberry Pi OS (anteriormente llamado Rasbian”) el cual es propio y compatible con estas tarjetas, para esto, hay diferentes maneras de realizar la instalación siendo cada una de ellas muy intuitivas y sencillas de realizar [18].



Figura 7: Raspberry Pi como ordenador de escritorio.

Fuente: [18].

2.2.2. Sensores de Variables Climáticas

2.2.2.1. Velocidad de Viento La medición de velocidad de viento en máquinas como estaciones meteorológicas se realizan usando un anemómetro, el dispositivo traduce la variable de velocidad de viento en una señal eléctrica. Hay diferentes tipos de anemómetros, como son los de empuje, los de compresión y los anemómetros rotativos que son los usados en esta investigación [19].

2.2.2.1.1. Anemómetro Rotativo Consta de cazoletas (Robinsón), cubetas o hélices conectadas a un eje central rotativo, la rotación de dicho eje es proporcional a la velocidad del viento que lo hace mover (ver Figura 8). La velocidad angular del eje puede ser medida de diferentes maneras, como los anemómetros magnéticos que activan un sensor en cada revolución obteniendo una medida precisa [19].



Figura 8: Anemómetro Rotativo
Fuente: [19]

2.2.2.2. Radiación Solar La radiación solar es un flujo energético recibido por la corteza de la tierra y emitido por el sol en forma de ondas electromagnéticas de distintas frecuencias (luz visible, infrarrojo y ultravioleta). La luz visible tiene una longitud de onda entre $0,4 \mu\text{m}$ y $0,7 \mu\text{m}$, esta puede ser percibida por el ojo humano. La radiación visible está entre la radiación infrarroja y ultravioleta del espectro, la radiación solar se suele medir con un dispositivo llamado piranómetro [20]. Este instrumento de medición de radiación solar se muestra en la Figura 9.

2.2.2.3. Temperatura y Humedad Relativa La temperatura es una variable necesaria en los dimensionamientos de sistemas de energía fotovoltaica o eólica y en esta investigación se midió con un sensor de temperatura y humedad relativa llamado AM2301. El dispositivo AM2301 es fabricado por Aosong (Guangzhou) Electronics Co. Ltda, y cuenta con un sensor de



Figura 9: Piranometro de la Universidad de Pamplona.

Fuente: Autor.

humedad, que además mide temperatura ambiental. Este envía una salida digital serie OneWire de 40 bits. Los 16 bits más significativos equivalen al valor de la humedad relativa con una precisión de $\pm 3\%$ y otros 16 bits que equivalen al valor de la temperatura con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ [21].

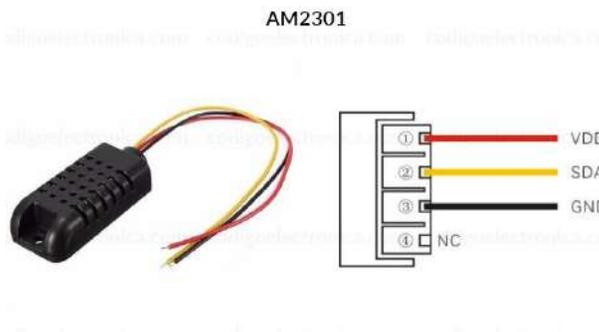


Figura 10: Sensor AM2301 y sus Respetivos Pines de conexión.

Fuente: [22].

Este sensor de temperatura y humedad (ver Figura 10) es una versión cableada del sensor DHT21, dentro de una gran carcasa plástica. Cuenta un sensor capacitivo para medir la humedad y un termistor, midiendo el aire transitorio, y arrojando una señal digital por el pin de datos. Es muy sencillo de usar, sin embargo, tiene un problema real y es que sólo puede medir datos nuevos una vez cada 2 segundos [22].

2.2.3. Internet de las Cosas (IOT)

El internet de las cosas (Internet of Things) busca que los dispositivos físicos cotidianos y no cotidianos que involucran componentes electrónicos, sensores, software y conectividad, tengan su propia red al interactuar vía internet recopilando y compartiendo datos entre ellos [23]. Todos estos dispositivos pueden interactuar con personas u otros dispositivos, como también recopilan datos para almacenar en la nube donde se pueden analizar y obtener información de interés [24]. A grandes rasgos podemos caracterizar los sistemas de IOT como se muestra en la figura 11.

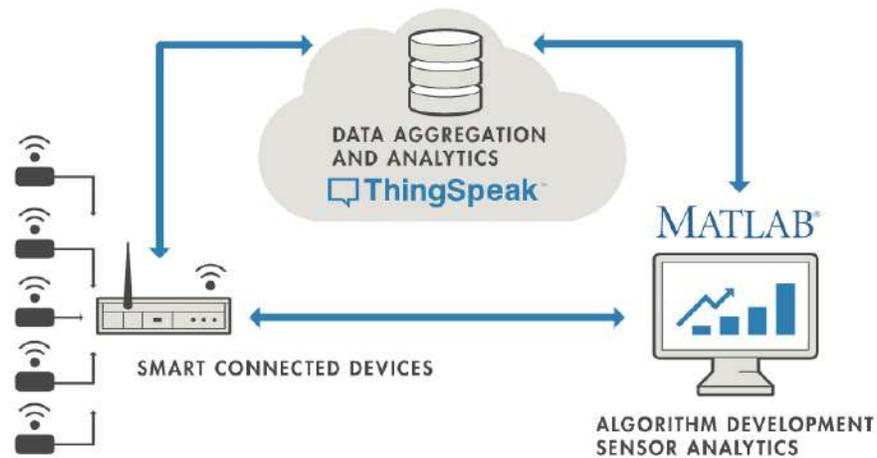


Figura 11: Sistema de IOT.

Fuente: [24]

2.3. Dimensionamiento de Sistemas de Energía (fotovoltaicos-eólicos)

Las variables de velocidad de viento, radiación solar y temperatura de determinado lugar son claves para realizar dimensionamientos de sistemas de energía previos a su implementación. Sin embargo, para usar estas variables en el dimensionamiento de sistemas es necesario tener en cuenta los cálculos matemáticos que determinan la cantidad de paneles solares, aerogeneradores y baterías para calcular la cantidad necesaria de cada uno de estos equipos para satisfacer la demanda energética de la vivienda en estudio.

2.3.1. Análisis Matemático

Para llegar a dimensionar un sistema de energía es preciso conocer las formulas matemáticas que determinan el consumo diario, la potencia aprovechable del panel solar y de la turbina electrica, la capacidad de almacenamiento de las baterías, y cuántos equipos necesito de cada uno para cumplir con los objetivos individuales de los lugares donde se desean implementar estos sistemas energía [25].

2.3.1.1. Consumo Diario Real El consumo diario real corresponde al consumo promedio diario del hogar de estudio más las perdidas que se presentan en las baterías e inversor del sistema, esto se representa matemáticamente en la Ecuación 1 [25].

$$Cdr = Cd + (Cd * Pbat) + (Cd * Pinv) \quad (1)$$

Donde: **Cdr**: Es el consumo real diario, **Cd**: Es el consumo diario sin considerar perdidas del sistema, **Pbat**: Son las perdidas en las baterías (30 %), y **Pinv**: Son las perdidas en el inversor (10 %) [25].

2.3.1.2. Capacidad de Almacenamiento Es la capacidad de almacenamiento que se debe lograr con una configuración de baterías para mantener el sistema cuando las fuentes no producen energía efectivamente, esto se representa matemáticamente en la Ecuación 1 [25].

$$Cbat = ((Cdr * D)/(Pd * nbat))/Vbat \quad (2)$$

Donde: **Cbat**: es la capacidad de almacenamiento necesaria en las baterías, **D**: son los días sin recursos obtenidos de las fuentes de energía, **Pd**: es la profundidad de descarga dependiendo de la tecnología de la batería puede ser 0.5, 0.6 ó 0.8. Para este caso particular $Pd = 0.5$, **nbat**: Eficiencia de la batería, **Vbat**: voltaje nominal de la batería [25].

2.3.1.3. Calcular Cantidad de Paneles Solares El cálculo de la cantidad de paneles solares necesarios para satisfacer una necesidad de potencia eléctrica es fundamental en la investigación, esto se representa matemáticamente en las Ecuaciones 3, 4 y 5 [25].

$$R = RadiacionMedida * HorasPico[W * h/m^2] \quad (3)$$

$$Wp = 1200 * (Cdr/R) \quad (4)$$

$$Np = Wp/Pmax \quad (5)$$

Donde: **R**: Es la radiación durante las horas pico $W * h/m^2$, **Wp**: Potencia pico relacionada con la radiación y el consumo real diario, **Pmax**: Potencia máxima del panel solar, **Np**: Número de paneles [25].

2.3.1.4. Calcular Cantidad de Aerogeneradores Al igual que calcular la cantidad de paneles solares es importante para la investigación, el cálculo de la cantidad de aerogeneradores también lo es, este calculo se representa matemáticamente en las Ecuaciones 6, 7, 8 y 9 [25].

$$Pwind = 0,5 * p * A * Vwind^3 \quad (6)$$

$$Pturb = Cp * Pwind \quad (7)$$

$$Pturbdia = Pturb * 24 \quad (8)$$

$$Na = Cdr/Pturbdia \quad (9)$$

Donde: **Pwind**: Es la potencia generada por el viento, **p**: Es la densidad de aire (en función de la altura [msnm] y la temperatura del lugar), **Vwind**: Velocidad de viento promedio, **Pturb**: Es la potencia real de la turbina teniendo en cuenta el **Cp**: que es su coeficiente de potencia, **Pturbdia**: Es la potencia de la turbina en $[W * h/d]$, **Na**: Es el número de aerogeneradores necesarios para cumplir la requerida [25].

2.3.2. Dispositivos Seleccionados para Realizar el Dimensionamiento de Sistemas de Energía

Para realizar un dimensionamiento de sistemas de energía fotovoltaica y/o eólica se deben seleccionar los principales dispositivos que influyen en el dimensionamiento y son necesarios para la implementación de estos sistemas de energía. En esta investigación se utilizaron de referencia equipos con los que cuenta la Universidad de Pamplona instalados en la granja experimental Villa Marina. Estos dispositivos son: panel solar (Solutechnia YB-156M36-150), aerogenerador (SOUTHWEST AIR 40), batería (MTEK MT121050) e inversor (Cobra CPI 1000)

2.3.2.1. Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150) Uno de los paneles solares con el que cuenta la Universidad de Pamplona es el panel Solutechnia YB-156M36-150, y sus características se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)

Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)	
Característica	Magnitud
Potencia máxima (Pmax)	150 [W]
Voltaje en circuito abierto (Voc)	21,60 [V]
Eficiencia del modulo	17,63 %
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	18 [V]
Corriente a máxima potencia (Imp)	8,33 [A]
Corriente de corto circuito (Isc)	9,65 [A]
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0,38 [%/C]
Coeficiente de temperatura (Isc)	+0,1 [%/C]
FF (%)	70 %
Voltaje máximo del sistema	1000 [V]

Fuente: [25].

2.3.2.2. Aerogenerador (SOUTHWEST AIR 40) Uno de los aerogeneradores con el que cuenta la universidad de Pamplona es el aerogenerador SOUTHWEST AIR 40 y sus características se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)

Características del Panel Solar (Solutechnia YB-156M36-150)	
Característica	Magnitud
Energía potencial generada aproximada	40 [KWh] al mes a 5.4 [m/s]
Área barrida	1,07 [m ²]
Diámetro del rotor	1,17 [m]
Peso	5.9 [Kg]
Velocidad de inicio a vientos	3 [m/s]
Tensión	12 [V]
Resistencia al viento	49,2 [m/s]
Razón de potencia	12.5 [m/s]

Fuente: [25].

2.3.2.3. Batería (MTEK MT121050) Una de las baterías con las que cuenta la universidad de Pamplona es la batería MTEK MT121050 y sus características se muestran en el Cuadro 4.

2.3.2.4. Inversor (Cobra CPI 1000) Uno de los inversores con el que cuenta la universidad de Pamplona es el inversor Cobra CPI 1000 y sus características se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 4: Características de la Batería (MTEK MT121050)

Características de la Batería (MTEK MT121050)	
Característica	Magnitud
Voltaje nominal	12 [V]
Capacidad	105 [Ah]
Dimensiones	330 x 171 x 214 [mm]
Peso Aproximado	32 [Kg]
Material de los terminales	Cobre [m/s]

Fuente: [25].

Cuadro 5: Características del Inversor (Cobra CPI 1000)

Características del Inversor (Cobra CPI 1000)	
Característica	Magnitud
Voltaje de alimentación	12 [VDC]
Voltaje de salida	109 - 120 [VAC]
Capacidad de potencia	1000 [Ah]
Dimensiones	31.75 x 24.13 x 12.7 [cm]
Peso aproximado	2 [Kg]
Eficiencia máxima	>88 %

Fuente: [25].

2.4. Antecedentes

En esta investigación se realizó una previa y permanente revisión bibliográfica de varios trabajos relacionados con la temática del trabajo expuesto en este documento, dicha revisión fue realizada y de manera concisa plasmada en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Revisión de antecedentes

Autor	Título	Observaciones
Khare, [15].	Sistema de energía renovable híbrido solar-eólico: una revisión.	Los sistemas híbridos de energía renovable se caracterizan por mezclar y coordinar dos o más sistemas de producción de energía renovable para lograr un correcto uso de sus propiedades de operación y conseguir mayor eficiencia a las que tendría con una fuente de energía. Es conveniente realizar con anterioridad un estudio de prefactibilidad, este estudio se basa en analizar el comportamiento climático, los recursos disponibles de las fuentes de energía renovable y la demanda energética del lugar de aplicación. Dicho análisis ajusta de manera precisa la localización y configuración del sistema híbrido de energía renovable. Combinando la producción de energía solar y eólica en un sistema híbrido de energía operan de dos modos: simultaneo y secuencial; el modo simultaneo ocurre cuando considerablemente hay presencia de ambas fuentes de energía (solar y eólica) para alimentar el sistema, pero en el modo secuencial cuando alguna de las fuentes no produce por la condición climática u otro factor, aún queda la otra fuente como respaldo en la producción energética disminuyendo las intermitencias de energía eólicos.
Ghenai, [9].	Diseño de un sistema híbrido de energía de turbina eólica-solar fotovoltaica para la pirólisis térmica de residuos plásticos.	Un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica es usado en un procedimiento experimental de producción de combustibles alternativos a partir de residuos plásticos por medio de un reactor de pirólisis. Dicho reactor es alimentado eléctricamente con la producción energética aprovechando recursos renovables de un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica, al estar alimentado el reactor transforma los residuos plásticos sin presencia de oxígeno a temperaturas elevadas en combustibles, finalizando el proceso de pirólisis, aquella energía residual del reactor puede ser utilizada en la generación de vapor o energía térmica.
Akyuz, [26].	Aspectos energéticos, ambientales y económicos de un sistema híbrido de energía renovable: un estudio de caso	En esta investigación realizaron un análisis de la información ambiental con los datos de irradiación solar y velocidad de viento en Balikesir, Turquía. También considerando el consumo energético de un gallinero comercial, para llegar a diseñar y optimizar un sistema híbrido de energía que satisfaga dichas necesidades energéticas, por lo tanto se implementa la herramienta software Optimization Model for Electric Renewable (HOMER). El software HOMER utiliza como entrada los datos de radiación solar, velocidad de viento, consumo energético y el costo de los componentes, para hallar una rentabilidad tecnoeconómica considerando cuatro sistemas simulados que son: sólo diesel, PV - diesel - batería, viento - diesel - batería y PV - viento - diesel - batería.

Continúa en la siguiente página

Cuadro 6 – Continuación de la página anterior

Autor	Título	Observaciones
Hassan, [10].	Evaluación y optimización del sistema de energía fotovoltaica fuera de la red y dentro de la red para la electrificación doméstica típica	Teniendo como objetivo reducir el costo en la producción energética, al igual que las emisiones de dióxido de carbono, se diseñó un sistema de energía fotovoltaica capaz de cumplir con la demanda eléctrica de los hogares en Irak. Para lograr la electrificación de casas comunes en este país se realizaron simulaciones y optimizaciones del sistema con resolución de un minuto, caracterizando y evaluando la productividad o rendimiento, y el costo neto de dos tipos de sistemas de energía fotovoltaica, el primero es el sistema instalado fuera de la red eléctrica nacional y el segundo es el sistema fuera de dicha red. Se concluye que ambas configuraciones mantienen un óptimo rendimiento, sin embargo el sistema fotovoltaico implementado aislado a la red eléctrica requiere de un costo mayor que el del sistema que cuenta con dicha red de respaldo.
Khosravi, [13].	Selección de tecnología y tamaño óptimos del sistema de almacenamiento de energía híbrido con una potencia de despacho novedosa para la integración de la energía eólica.	Esta investigación muestra la utilización de ESS como una solución práctica para la implementación de energía de RES. Este archivo muestra un procedimiento de gestión de energía con un modelo linealizado integral para el dimensionamiento óptimo de Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido (HES), la selección de tecnología y el despacho de energía de viento-HES. Al usar la energía eólica reducida y HES, se resuelve el problema de la categorización de almacenamiento enorme en el procedimiento de despacho de energía eólica que existe. En la administración de energía a corto plazo, se investigan el rendimiento de viento-HES y la entrega de energía preprogramada a la red. Al final, el procedimiento postulado se evalúa aplicándolo a los datos reales de un parque eólico limitado al grado de potencia de 3 MW para lograr compararlo mejor con otros estudios.
Continua en la siguiente página		

Cuadro 6 – Continuación de la página anterior

Autor	Título	Observaciones
Zheng, [12].	Un novedoso sistema de captación de energía eólica con mecanismo híbrido para aplicaciones auto-alimentadas en túneles de metro.	Debido al auge del tránsito ferroviario urbano, esta investigación se enfocan en crear un nuevo sistema autoalimentado para nodos redes de sensores inalámbricos (WSN) encargados de suministrar electricidad al sistema de monitoreo de seguridad en las vías subterráneas de un metro. Este sistema aprovecha la energía eólica presente en los túneles para generar energía eléctrica. El sistema de autoalimentación está compuesto por tres partes: módulo de adquisición de energía eólica electromagnética (principio de inducción electromagnética), módulo de adquisición de energía eólica piezoeléctrica (parches piezoeléctricos) y módulo de almacenamiento de la energía eléctrica generada. Los resultados de la investigación muestran que a una velocidad de viento de 7 m/s el sistema genera una potencia de 59.31 mW. Siendo esta potencia suficiente para proporcionar energía continua y estable a sistemas de nodo WSN en túneles de metro, como fue en la línea 2 del metro de Chengdu el cual fue seleccionado para esta investigación.
Vera D, [27].	Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab	La finalidad de este estudio fue realizar un análisis estadístico y una validación de los resultados conseguidos de las simulaciones de un panel solar, con el uso de la herramienta Matlab/Simulink. Hicieron una serie de mediciones de la potencia producida por el panel solar, bajo diferentes condiciones de radiación y temperatura de operación; prosiguieron con la simulación del comportamiento del panel por medio de el modelo matemático y el modelo del mismo determinado por Simulink; para finalizar, realizaron un estudio de la aproximación de cada una de las simulaciones con los datos reales. Los resultados indicaron que, para la simulación con el modelo matemático del panel solar, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9889, mientras que, para el modelo del panel solar determinado por Simulink fue de 0,8673. Lo que demostró la buena correlación de cada una de las simulaciones hechas con los valores reales, concluyendo que, aunque los dos métodos trabajados se aproximan a la realidad, el modelo matemático del panel solar alcanza una mejor aproximación.

3. Metodología de Investigación

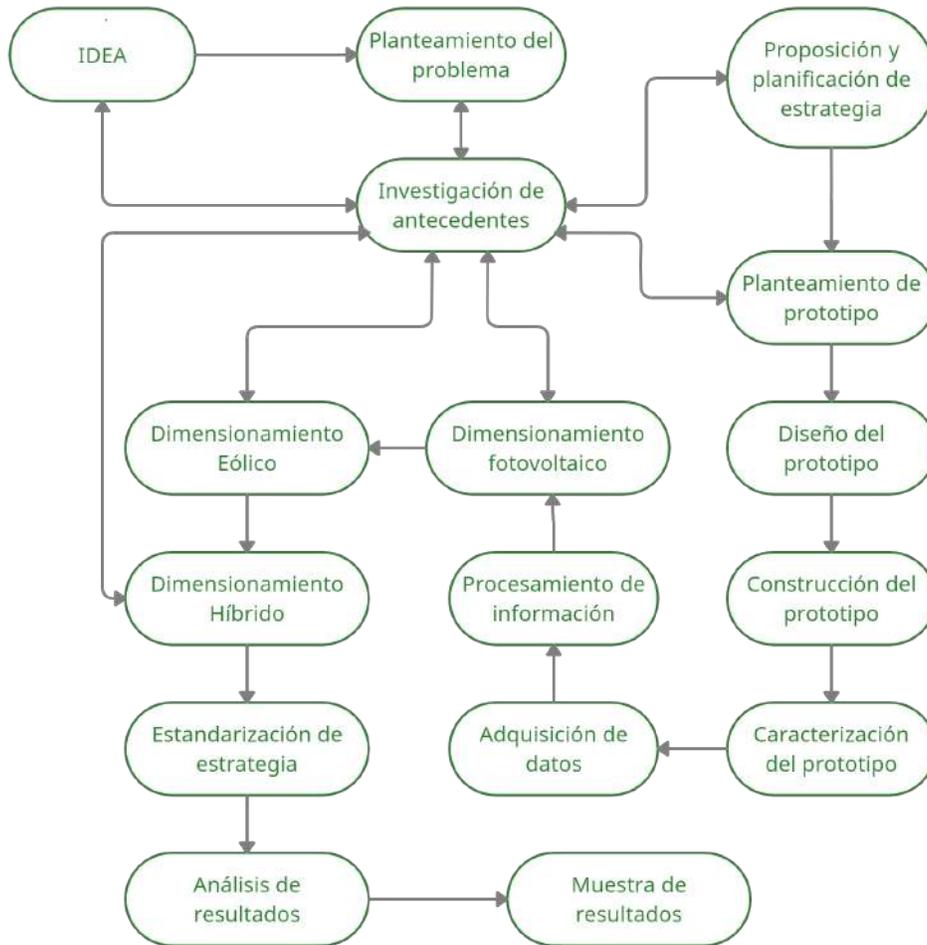


Figura 12: Diagrama de metodología secuencial.

Fuente: Autor

3.1. Ruta de Investigación

Para lograr cumplir cada uno de los objetivos de esta investigación ha sido necesario el desarrollo de una serie de fases, las cuales se muestran gráficamente en la Figura 12 y se describen a continuación:

1. **Idea:** Esta investigación es motivada por plantear una estrategia que permita electrificar hogares rurales con un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica dimensionado según las características climáticas específicas de la localización de dicho hogar rural, y así disminuir sobre costos por un sobre dimensionamiento o un mal dimensionamiento.

2. **Planteamiento del problema:** Se busca contrarrestar a largo plazo con esta investigación la falta de suministro eléctrico en muchos hogares rurales de Colombia, esto se quiere lograr incentivando el uso de las energías limpias fotovoltaica y eólica aprovechando ambas fuentes de al tiempo de manera óptima.
3. **Investigación de antecedentes:** Se realizó una investigación preliminar donde se estudian trabajos afines anteriormente realizados.
4. **Proposición y planificación de estrategia:** Se propuso una estrategia de medición y análisis de la información ambiental del lugar de estudio que se basa en un módulo de medición que toma lectura y almacena los datos de donde esté ubicado sin interrupciones para luego ser analizados.
5. **Planteamiento de prototipo:** Se encuentra la necesidad de crear un prototipo de módulo de medición el cual fue usado para la recolección de la información ambiental utilizada en esta investigación.
6. **Diseño del prototipo:** Con apoyo de un software CAD se diseñaron dos prototipos escogiendo el más robusto para proseguir a construirlo, dicho diseño fue realizado, analizado y corregido cuidadosamente teniendo en cuenta los requerimientos básicos del módulo de medición.
7. **Construcción del prototipo:** Para llevar a cabo la construcción del módulo de medición es necesario la implementación de dos tipos de manufactura (aditiva y sustractiva) para la fabricación de piezas usadas en la estructura física de dicho módulo.
8. **Caracterización del prototipo:** Contando con el prototipo construido en su totalidad se caracterizan los datos medidos por cada uno de los sensores usados verificando su correcta medición.
9. **Adquisición y almacenamiento de datos:** El módulo de medición es usado para recolectar y almacenar los datos que permitan caracterizar el comportamiento eléctrico de las fuentes de energía solar y eólica en la localización de estudio, entre más prolongada sea esta adquisición mayor precisión se obtendrá en el dimensionamiento.
10. **Procesamiento de información:** Toda la información recolectada es organizada y analizada para realizar la implementación de algoritmos encargados de llegar a un correcto dimensionamiento del sistema híbrido de energía.
11. **Dimensionamiento fotovoltaico:** Se dimensiona un sistema de energía solar basándose en la información recolectada anteriormente.
12. **Dimensionamiento eólico:** Se dimensiona un sistema de energía eólica basándose en la información recolectada anteriormente.
13. **Dimensionamiento híbrido:** Se dimensiona un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica basándose en la información recolectada anteriormente.

14. **Estandarización de estrategia:** Cada fase de la investigación fue sintetizada para llegar a la culminación de los objetivos contando con un módulo de medición ambiental para adquisición de datos y algoritmos para el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.
15. **Análisis de resultados:** Para concluir la investigación se realiza un análisis de los resultados de todo lo trabajado durante el desarrollo de la investigación.
16. **Muestra de resultados:** Finalmente el trabajo es plasmado en este libro, expuesto y presentado a los supervisores delegados por la institución.

4. Selección de Componentes y Diseño del MMA

Para realizar la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos en esta investigación se construyó un módulo capaz de soportar la variabilidad climática en la localización de estudio. Por lo tanto, previamente se realizó una selección de materiales y componentes electrónicos usados en la regulación de potencia, la lectura de las variables ambientales y el controlador del módulo. Basado en dicha selección se procedió a diseñar un prototipo en función de los componentes seleccionados y las condiciones en la intemperie usando un software CAD que permitió detectar con anterioridad futuros fallas y así se corrigieron errores de diseño antes de iniciar su construcción.

4.1. Selección de Componentes

Para realizar lectura de las información ambiental se buscó adquirir componentes comerciales tanto mecánicos, eléctricos y tarjetas embebidas, combinado con una estructura diseñada desde cero integrando piezas obtenidas implementando tecnología de impresión 3D y cortes CNC logrando su construcción con elementos de fácil obtención y ensamblaje. En el Cuadro 7 se observa el listado de materiales, componentes y elementos utilizados en la construcción del MMA. Se anexó la estimación de costos de los componentes electrónicos usados (ver apéndice).

Cuadro 7: Lista de Materiales del MMA.

N°	Nombre	Referencia	Cant
1	Sensor de posición angular (encoder)	KY-040	1
2	Pantalla OLED de 0.96 pulgadas i2c	OLED 0,96 pulgadas	1
3	Sensor digital de temperatura humedad relativa	AM2301	1
4	Sensor detector de lluvia	comparador LM393	1
5	Convertidor DC-DC BOOST	XL6009	1
6	Módulo sensor de corriente	ACS712 de 5A	1
7	Módulo sensor de corriente	ACS712 de 20A	1
8	Módulo fotorresistencia LDR	comparador LM393	1
9	Ventilador 3010	3010 5v	2
10	Ventilador 4010	4010 5v	2
11	Cable con conector JST macho	JST 1.5mm de 2P	5
12	Cable con conector JST hembra	JST 1.5mm de 2P	5
13	Portapila para 1 Batería 18650 (3.7V)	18650	2
14	Bateria recargable 18650	18650 3.7v - 2600mAh	2
15	Modulo Cargador Baterías Litio	TP4056 5V - 1A	1
16	Lámina de acrílico traslúcida 3mm	Color verde	1
17	Lámina de acrílico traslúcida 3mm	Color transparente	1
18	Filamento 3d Pla Carrete	1 Kg - color blanco	1
19	Conversor Análogo Digital	Ads1115 16 Bit I2c Adc 4C	1
20	Trípode	TR - 90 cm	1

4.2. Diseño de Modelo CAD del MMA

Previamente a la construcción del MMA se realiza algunos intentos de diseño en donde se busca la creación de un prototipo robusto y capaz de recolectar datos en la intemperie. El primero de estos intentos no se consideró apto para continuar con su construcción y se observa en la Figura 13.



Figura 13: Primera versión CAD.

Fuente: Autor

Al analizar el primer modelo se concluye que hay mejoras significativas las cuales se tuvieron en cuenta para rediseñar el MMA llegando a una versión más idónea respecto a los requerimientos del proyecto. En la Figura 14 se observa la versión final del MMA con dos vistas diferentes.

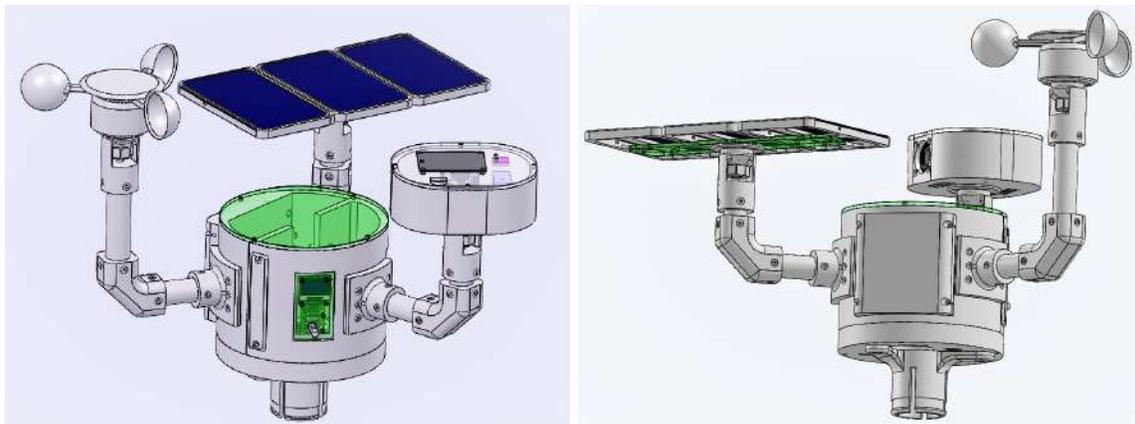


Figura 14: Segunda versión CAD.

Fuente: Autor

4.3. Modelo CAD del MMA

Características relevantes del modelo CAD seleccionado para el proyecto:

- En la parte inferior del MMA está ubicada la ventilación y una pieza de sujeción para acoplarse con facilidad a diferentes bases o trípodes (ver Figura 15).

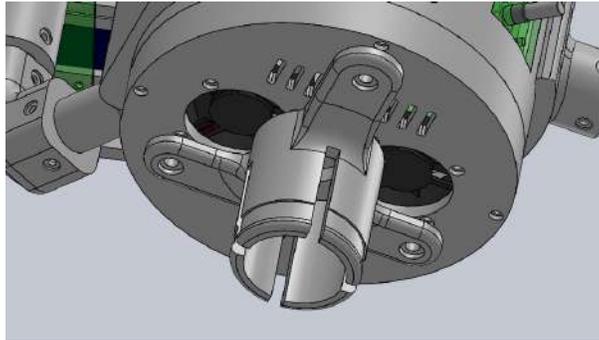


Figura 15: Parte inferior del modelo CAD.

Fuente: Autor

- En la parte central del MMA se encuentra todo el cableado del dispositivo, allí llega el cableado de los paneles solares y los sensores, este pasa a través de los brazos tubulares para evitar la exposición con el medio ambiente. Del mismo modo, en la parte central se encuentran las placas reguladoras de tensión encargadas de la alimentación de la tarjeta de control, sensores y carga de las baterías ubicadas en la parte trasera (ver Figura 16).

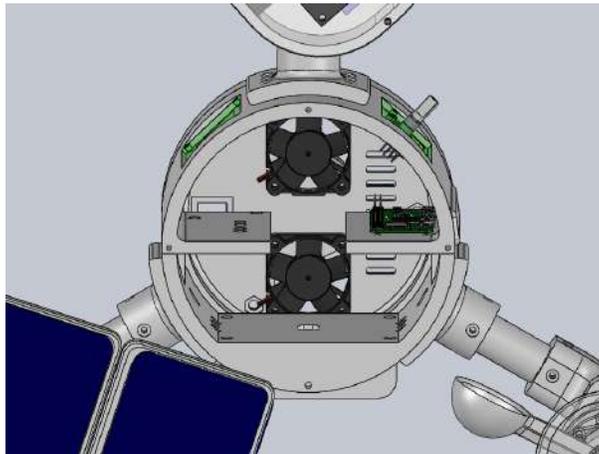


Figura 16: Parte central e interna del MMA.

Fuente: Autor

- El MMA cuenta con tres extensiones donde se encuentran ubicados los paneles solares, el sensor de velocidad de viento y una caja dotada de diferentes sensores de variables

ambientales que están sujetas por medio de brazos tubulares y acopladas a estos por medio de rótulas. El propósito de estas rótulas es dar flexibilidad en el ajuste angular manual de cada uno de los componentes sujetos a ellas, al usarla en los paneles solares se busca que se pueda ajustar el ángulo de estos para aprovechar mejor la energía solar. Sin embargo, al usar las rótulas con el sensor de velocidad de viento y la caja de sensores ambientales se hace con el fin de poder ajustar su ángulo en caso de que el MMA no se encuentre en un terreno totalmente plano (ver Figura 17).

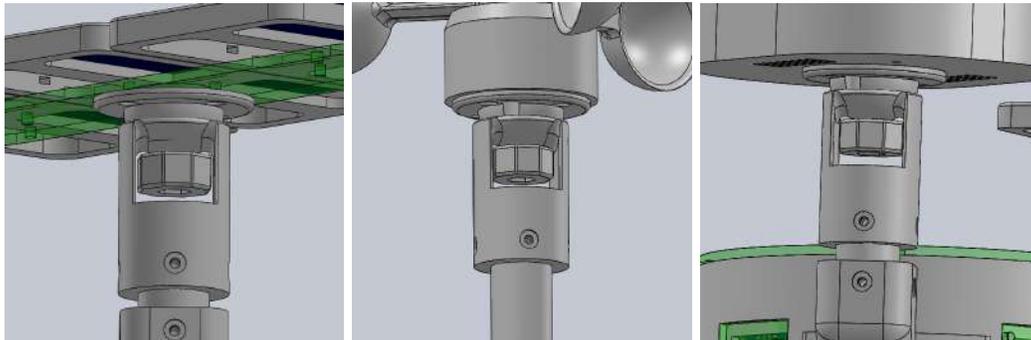


Figura 17: Rotulas de las extensiones.

Fuente: Autor

- Todo el MMA ha sido diseñado desde cero y el sensor de viento no es la excepción, por los altos costos de los sensores de viento en el mercado se diseñó logrando cumplir las expectativas, la lectura de la velocidad de viento se da por medio de un sensor magnético REED Switch que se activa cada vez que pasa un imán cerca de él, los imanes están puestos al rededor del rotor del sensor de velocidad de viento. Este sensor está ubicado en una de las extensiones anteriormente mencionadas (ver Figura 18).

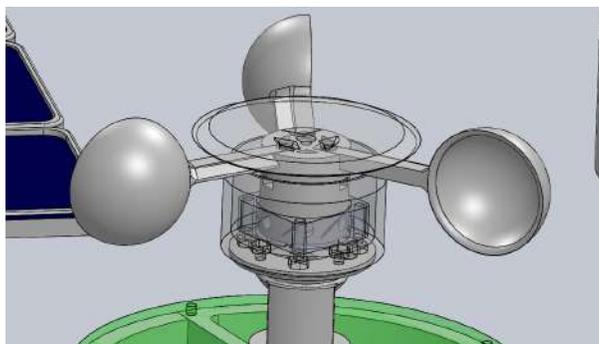


Figura 18: Sensor de velocidad de viento.

Fuente: Autor

- La alimentación del MMA es a partir de una conexión externa a la red eléctrica. Sin embargo, el módulo cuenta con tres paneles solares conectados en paralelo que almacenan

la energía producida en baterías como seguridad por cualquier pérdida energética del lugar de estudio. Dichos paneles están ubicados en una la segunda extensión del mismo (ver Figura 19).

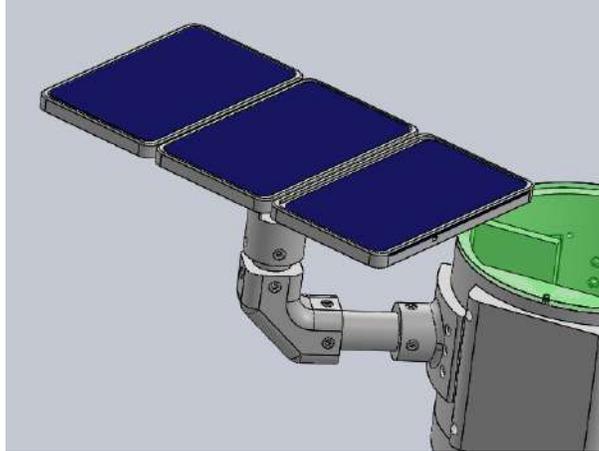


Figura 19: Paneles solares del MMA.

Fuente: Autor

- En la tercera extensión se encuentra una caja dotada de sensores que le permiten al MMA realizar lectura de diferentes variables ambientales como lo es el índice de rayos UV, temperatura, humedad relativa y determinar si se presentan precipitaciones (ver Figura 20).

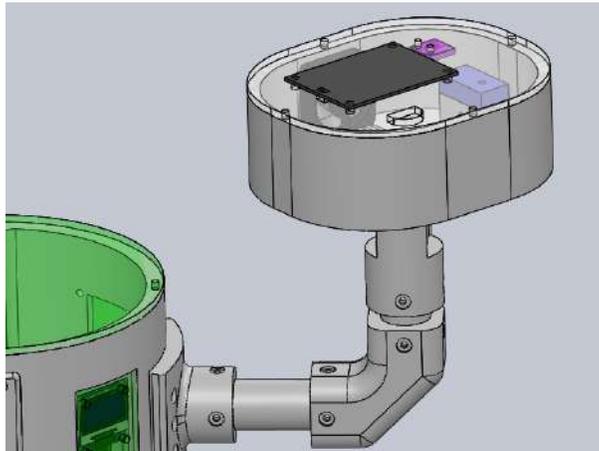


Figura 20: Caja de sensores MMA.

Fuente: Autor

5. Ensamble y Construcción del MMA

Al realizar un ensamblaje virtual de las piezas diseñadas con el apoyo de un software CAD se prosigue con la manufactura de estas piezas para poder llegar a la construcción final incluyendo los dispositivos electrónicos necesarios para el funcionamiento y cumplimiento de las tareas del MMA. Dicha manufactura de estas piezas es realizada aplicando tecnología de impresión 3D y cortes a láser con máquinas CNC, esta información se verá reflejada de manera específica en este capítulo.

5.1. Manufactura de Piezas para Construcción del MMA

Para la fabricación de piezas necesarias en la construcción del módulo se usan dos tipos de manufactura, el modelado por deposición fundida (FDM) y por máquinas cortadoras con control numérico computarizado (CNC). Estas piezas cumplen papeles estructurales en el dispositivo y se pueden observar en la Figura 21.



Figura 21: Algunas piezas manufacturadas.

Fuente: Autor.

5.1.1. Impresión 3D de Piezas Diseñadas

Las piezas fundamentales en la estructura del MMA se han fabricado con material plástico: Ácido Poliláctico (PLA) obtenidas a partir del uso de impresoras 3D artesanales construidas por estudiantes de la Universidad de Pamplona, un ejemplo de impresión se observa en la Figura 22.

Se generó un archivo STereoLithography (STL) de las piezas diseñadas con el apoyo del software CAD elegido para el diseño, al recopilar información detallada de los parámetros de impresión se requiere analizar y parametrizar cada pieza en un software de impresión 3D como el Ultimaker Cura o Repetier Host, cada uno de estos software permiten conocer los tiempos de impresión de cada pieza diseñada los cuales se pueden ver en el Cuadro 8.

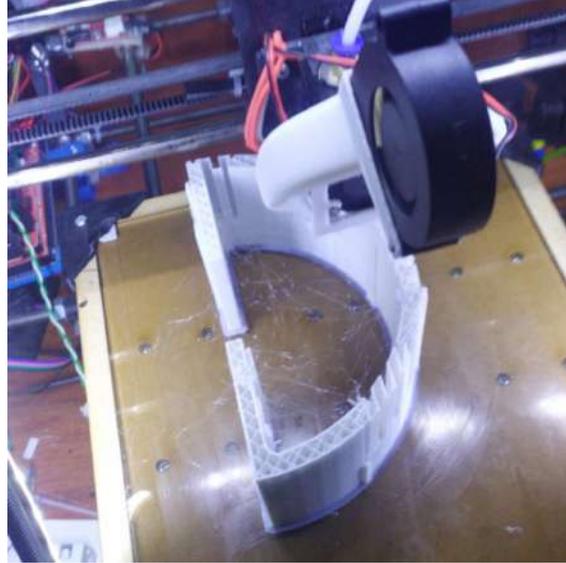


Figura 22: Impresión 3D de pieza Armazón lateral parte 1 en una impresora artesanal.
Fuente: Autor.

Cuadro 8: Parámetros para Impresión 3D del MMA. Donde **V** es 'Velocidad de impresión' [mm/s] y **D** es 'Densidad de impresión' [%].

Pieza	V [mm/s]	D [%]	Peso [g]	Cantidad	Tiempo
Base inferior (coolers)	60	20	52	1	08:46:00
Armazón lateral parte 1	60	20	94	1	23:12:00
Armazón lateral parte 2	60	20	82	1	20:17:00
Acople para trípode	60	15	26	1	06:54:00
Tapa baterías	60	20	21	1	03:59:00
Tapa Raspberry Pi	60	15	3	1	00:47:00
Acople para extensiones	60	20	19	3	04:56:00
Codo de extensiones	60	20	20	3	04:50:00
Conducto extensiones C	60	20	18	2	03:15:00
Conducto extensiones L	60	20	22	3	04:02:00
Conducto extensión SV	60	20	24	1	04:29:00
Pieza 1 rotula	40	30	4	3	00:57:00
Pieza 2 rotula	40	30	2	3	00:32:00
Pieza 3 rotula	40	30	9	3	02:12:00
Pieza 4 rotula	40	30	2	3	00:28:00
Porta panel	60	30	13	3	01:55:00
Caja de sensores	60	15	49	1	09:52:00
Gorro sensor T H	60	15	11	1	02:22:00
Cubre sensor T H	60	15	7	1	01:41:00

Continuación de Tabla 8					
Pieza	V [mm/s]	D [%]	Peso [g]	Cantidad	Tiempo
Alerón SV	60	15	5	3	01:45:00
Unión de alerones SV	50	15	8	1	02:15:00
Paraguas SV	60	15	5	1	00:48:00
Unión cooler SV	60	20	12	1	03:08:00
Total			718	41	159:51:00

Algunos parámetros como la densidad y la velocidad de impresión varían según el uso de cada una de estas piezas teniendo en cuentas sus esfuerzos y geometría. Sin embargo, la altura de capa si es la misma para todas las piezas impresas con un valor de 0.16 mm.

En resumen, para la construcción MMA se requiere del un total de 718 g de material PLA en la impresión de 41 piezas durante un tiempo total de 159 horas y 51 minutos.

5.1.2. Cortes Láser en Máquinas de CNC

Algunas piezas del prototipo diseñado no fueron obtenidas por métodos FDM, sino con máquinas CNC con cortes a láser, este tipo de corte se caracteriza por su precisión y tiempos cortos de maquinado. Las características de estos cortes la podemos ver en el Cuadro 9, el material utilizado en la fabricación de estas piezas ha sido láminas de acrílico traslucido con 3mm de grosor, se escoge de estas características para tener la posibilidad de supervisar desde afuera el estado del MMA en el interior.

Cuadro 9: Piezas Cortadas con Láser

Pieza	Color	Grosor [mm]	Cantidad	Tiempo
Unión de paneles	Verde traslucido	3	1	00:00:03
Lámina lateral	Verde traslucido	3	1	00:00:01
Lámina lateral pantalla	Verde traslucido	3	1	00:00:01
Lámina sensores	Transparente	3	1	00:00:03
Lámina superior	Verde traslucido	3	1	00:00:04
Total			5	00:00:12

Fuente: Autor.

5.2. Integración de Componentes

Para ensamblar las piezas fabricadas fue necesario el uso de una diversa tornillería logrando una sujeción fija y estable entre estas mismas o entre piezas y componentes electrónicos. También fue importante tener en cuenta el orden de las piezas en el momento de ensamblar para que el cableado de la alimentación, lectura de sensores, funcionamiento de tarjeta de control y demás

componentes electrónicos pasen dentro de las piezas impresas logrando una excelente apariencia visual con todo el cableado oculto.

5.2.1. Tornillería

En el ensamble final del prototipo es necesario el uso de tornillos para la sujeción y unión entre piezas, se determinó la inclusión de tornillos cilíndricos milimétricos M3 (3mm de diámetro) y M5 (5mm de diámetro) de diferentes longitudes, los cuales se muestran a detalle en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Tornillería Necesaria en Ensamblaje del Dispositivo

Tipo de Tornillo	Longitud [mm]	Cantidad
Cilíndrico 3M	8	74
Cilíndrico 3M	10	32
Cilíndrico 3M	15	26
Cilíndrico 3M	20	4
Cilíndrico 5M	20	3
Hexagonal 5M	20	3

Fuente: Autor.

En la figura 23 se observa la implementación de tornillería en el ensamble y construcción del MMA.



Figura 23: Tornillos cilíndricos usados en sujeción entre piezas y componentes electrónicos del MMA.

Fuente: Autor.

5.2.2. Componentes Electrónicos

Los componentes electrónicos son ensamblados a las piezas estructurales del MMA usando los tornillos mencionados en el Cuadro 10 y conectados a alimentación y tarjeta de control

(Raspberry Pi) por medio del cableado. Estos componentes electrónicos se pueden observar en la Figura 24.

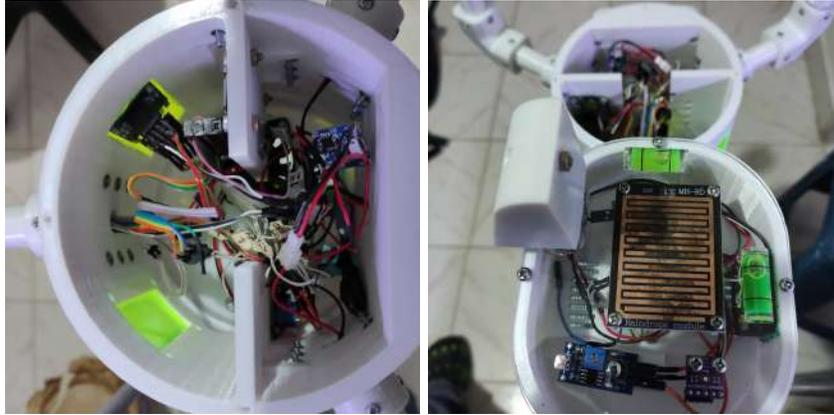


Figura 24: Inclusión de componentes electrónicos al ensamblaje del MMA.

Fuente: Autor.

5.2.3. Cableado de Componentes Electrónicos

Al diseñar el MMA se tienen en cuenta detalles importantes para lograr un prototipo completo y robusto, detalles como son las rutas del cableado usado en la lectura y alimentación de los sensores, las rutas de este cableado pasan de manera discreta por un canal interno de cada extremidad, de tal manera que los cables no son visibles desde el exterior afectando positivamente la buena apariencia del módulo. El cableado del módulo puede observarse en la Figura 25.



Figura 25: Rutas internas del cableado en el MMA.

Fuente: Autor.

5.3. Características Generales del MMA

Las características generales del módulo son organizadas y plasmadas en el Cuadro 11, las magnitudes encontradas en el cuadro mencionado corresponden a las medidas reales del

dispositivo ensamblado y con todos sus componentes incluidos.

Cuadro 11: Características del Dispositivo

Características del Dispositivo	
Dimensiones	36cm * 36cm * 32cm
Peso	2 Kg
Autonomía Diurna	8 horas
Autonomía Nocturna	3 horas
Alimentación requerida	5V/1A (min)

Fuente: Autor.

Los datos plasmados en el Cuadro 11 son propios del MMA (excluyendo el trípode). Por lo tanto, el trípode puede ser cambiado según las necesidades particulares de las aplicaciones en las que se de uso del módulo, es decir, del trípode o base usado para darle soporte al módulo dependerá la altura real del dispositivo (MMA) instalado. En la Figura 26 se aprecia una vista real del módulo.



Figura 26: Visualización real del MMA posterior a la construcción.

Fuente: Autor.

6. Adquisición, Almacenamiento y Transmisión de Datos

Una característica importante del proyecto es la recolección de información ambiental en una localización específica, permitiendo observar y analizar de manera precisa el comportamiento climático del lugar de estudio, por esta razón se creó un método para la medición de datos, como son la velocidad del viento, la radiación solar, temperatura, humedad relativa, entre otros. Dicho método se basó en el diseño y construcción de un módulo de medición (MMA, ver Figura 27) capaz de soportar las condiciones climáticas de la intemperie midiendo constantemente las variables anteriormente mencionadas por largos periodos de tiempo. El MMA está dotado de una serie de sensores y componentes electrónicos comerciales acordes al presupuesto planteado del proyecto cumpliendo con los requerimientos del mismo y dejando una opción abierta a la fácil replicación.



Figura 27: Módulo de Mediciones Ambientales (MMA).

Fuente: Autor.

6.1. Sistema Embebido (Tarjeta de Control)

El sistema embebido elegido para encargarse de la ejecución de las tareas de adquisición, almacenamiento y envío de información ambiental en el MMA ha sido la tarjeta Raspberry Pi Zero W (ver Figura 28), su relación calidad/precio la hace especial con características mencionadas en el cuadro 1 importantes para la ejecución del proyecto. Para que el sistema embebido realice dichas tareas, fue necesario instalar un sistema operativo a la tarjeta a través de una memoria SD para posteriormente crear un código en lenguaje Python 3 con el cual se tomó lectura de los sensores, se empaquetó la información y permita el monitoreo de los datos a través de una plataforma IOT.



Figura 28: Raspberry Pi Zero W del (MMA).
Fuente: Autor.

6.1.1. Instalación del Sistema Operativo (Raspberry Pi OS)

Hay diferentes maneras de realizar la instalación del sistema operativo y la opción por la que se optó para instalarlo a la memoria SD fue descargar el instalador de un gestor de sistemas operativos llamado Raspberry Pi Imager con múltiples opciones de instalación según el almacenamiento más conveniente para el usuario. La instalación del sistema operativo en la tarjeta de control se encuentra explicada por pasos en la Figura 29.

Para realizar la instalación del sistema operativo se puede optar por diferentes métodos como el de la Figura 29. Donde el primer paso (ver: Figura 29 (a)) es buscar en la sección de descargas de la página oficial de Raspberry Pi Foundation un archivo ejecutable que debe ser descargado e instalado en una computadora (ver: Figura 29 (b)), una vez instalado dicho ejecutable (ver: Figura 29 (c)) se procedió a determinar cuál sistema operativo deseamos instalar y en cuál memoria SD se realizará este proceso (ver: Figura 29 (d)), después de un tiempo prolongado este ejecutable muestra un aviso notificando que el sistema operativo seleccionado ya estaba instalado en la memoria SD (ver: Figura 29 (e)), con esto sólo quedaba extraer la memoria SD de nuestra computadora e insertarla en la tarjeta Raspberry Pi, una vez hecho esto la tarjeta ya queda lista para su total utilización (ver: Figura 29 (f)).

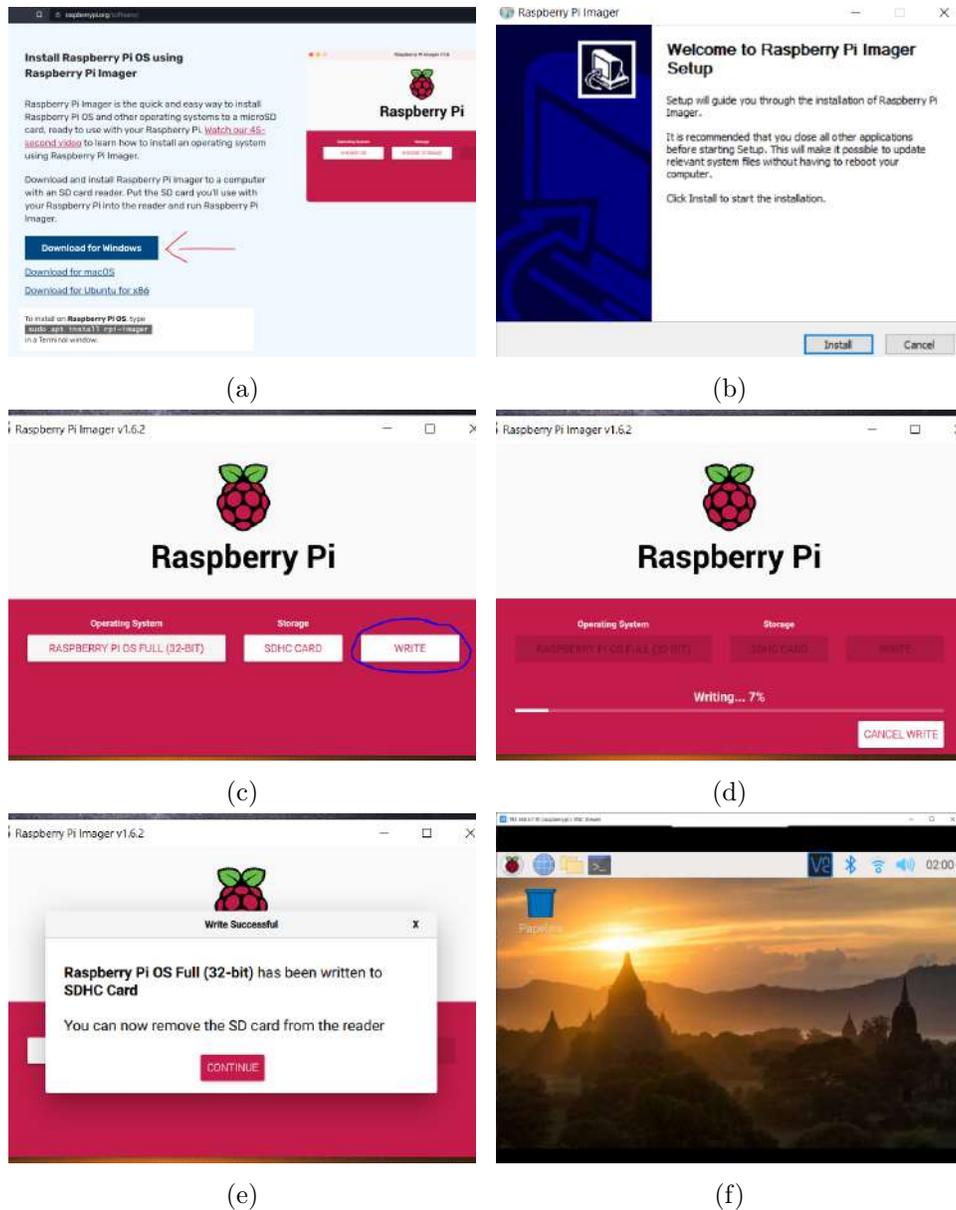


Figura 29: Paso a paso para instalación del sistema operativo Raspberry Pi OS en disco duro (memoria SD).

Fuente: Autor

6.2. Medición de Variables Climáticas

6.2.1. Velocidad de Viento

En este proyecto no se contaba con los recursos suficientes para adquirir un anemómetro comercial debido a su alto precio en el mercado de Colombia, por esta razón se optó por diseñar y construir un anemómetro propio fabricado por medio de impresión 3D y usando electrónica

de bajo costo.

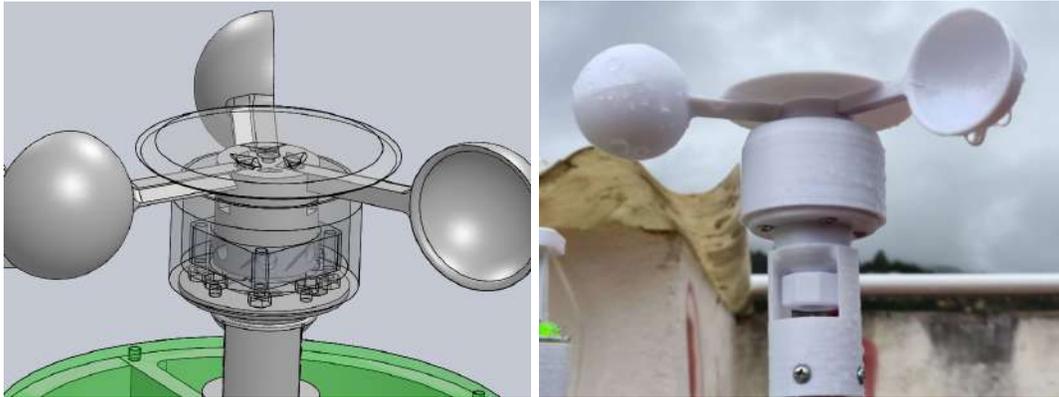


Figura 30: Anemómetro Rotativo Diseñado y Fabricado por Autor
Fuente: Autor

El anemómetro mostrado en la Figura 30 consta de dos partes principales en su estructura física estrictamente necesarias para su funcionamiento, una de ellas fija unida al MMA y la otra se mueve al ser impactada por corrientes de viento. Estas dos partes se muestran en la Figura 31.



Figura 31: Parte interna del Anemómetro Rotativo Fabricado por Autor
Fuente: Autor

La parte móvil consta de tres paletas hondonadas unidas a un rotor, este puede revolucionar con facilidad sin afectarse significativamente por la fricción, esto se logró al usar el rotor del mecanismo de un cooler de refrigeración tradicional para incrustarlo en su embobinado original el cual está sujeto en la parte fija, en esta parte fija hay un sensor magnético (REED Switch) que se acciona por el acercamiento del campo magnético producido por un imán pequeño ubicado a un costado del rotor en la parte móvil, de esta manera se toma lectura de cada señal enviada por el sensor hallando la diferencia de tiempo entre ellas (Ecuación 10) para calcular la velocidad angular (Ecuaciones 11 y (Ecuación 12)), siendo esta proporcional a la velocidad del viento que

hace mover las paletas en la parte móvil del anemómetro.

$$Dt = t2 - t1 \quad (10)$$

$$rps = 1/Dt \quad (11)$$

$$rpm = rps * 60 \quad (12)$$

En la Ecuación 10, 'Dt' es el intervalo de tiempo entre el último pulso leído y el anterior, donde 't2' es el tiempo del último pulso y 't1' corresponde al tiempo del pulso anterior. Contando con estos valores se procede a hallar las revoluciones por segundo con la Ecuación 11 consiguiendo fácilmente la magnitud de revoluciones por minuto hallada con la ecuación 12.

6.2.1.1. Caracterización del Anemómetro Fabricado por el Autor La caracterización del sensor de velocidad de viento se tuvo que realizar con datos ficticios supuestos por el autor debido a que no se pudo conseguir un anemómetro normalizado con el que se pudiera caracterizar de manera acertada la variable de velocidad de viento. Sin embargo, al medir la velocidad angular del anemómetro propio se observa que esta medición es directamente proporcional a la velocidad del viento presente en su localización, y se decidió relacionar ambas medidas a criterio del autor como se muestra en la Ecuación 13, para obtener un modelo de conversión como se muestra en la Ecuación 14.

$$100rpm = 8,333m/s \quad (13)$$

$$Vms = (Vrpm * 8,333m/s)/100 \quad (14)$$

Siendo "Vms" el valor de velocidad de viento en m/s y "Vrpm" es la velocidad angular medida por el MMA.

6.2.2. Radiación Solar (Rayos UV)

Por la misma razón económica por la que no se pudo acceder a un anemómetro comercial y normalizado para la investigación, se buscó optar por buscar alternativas de bajo costo, por esto se decidió usar un sensor de rayos UV llamado veml6070 el cual se muestra en la Figura 32, se escoge este sensor por ser utilizado comúnmente para medir el índice UV de un lugar determinado, este índice UV está ligado a la intensidad de los rayos UV emitidos por el sol, o sea que está proporcionalmente relacionado con la radiación solar.

La conexión del sensor veml6070 a la tarjeta de control (Raspberry Pi Zero W) es realiza a través de Inter-Integrated Circuit (I2C) por medio de la librería Adafruit CircuitPython VEML6070 obtenida libremente de la página web de Adafruit, con la inclusión de esta librería

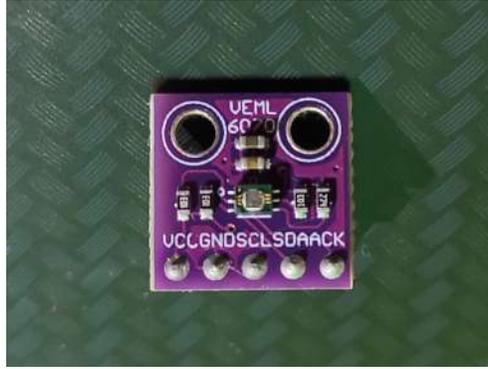


Figura 32: Sensor de Rayos UV veml6070.

Fuente: Autor

en el código fuente de adquisición, almacenamiento y envío de datos se facilitó la lectura del sensor UV requiriendo pocas líneas de código.

6.2.2.1. Caracterización del Sensor VEML6070 La caracterización del sensor VEML6070 se tuvo que realizar con datos ficticios supuestos por el autor debido a que no se pudo conseguir un piranómetro normalizado con el que se pudiera caracterizar de manera acertada la medida de radiación solar. Este sensor arroja valores de 0 - 1476 ligados al índice UV que está midiendo, esta medida se consideró proporcional a la radiación solar asumiendo estos valores como la radiación solar a la que está expuesta el sensor en las unidades W/m^2 .

6.2.3. Temperatura y Humedad Relativa

La lectura de temperatura con la tarjeta de control a través del sensor AM2301 se simplifica con la implementación de una librería de Adafruit CircuitPython que funciona para la serie de sensores de temperatura y humedad DHT, este sensor convierte la señal analógica de la temperatura y la humedad relativa en una señal digital que interpreta la Raspberry Pi Zero W permitiendo cuantificar las señales eléctricas. El sensor AM2301 se muestra en la Figura 33.



Figura 33: Sensor de temperatura y humedad relativa AM2301.

Fuente: Autor

6.3. Código de Adquisición, Almacenamiento y Envío de Datos

El sistema embebido (Raspberry Pi Zero W) cuenta con una característica propia en la familia de los ordenadores Raspberry Pi que son los pines GPIO usados para recibir la información ambiental leída por los sensores, estos pines son manipulados al ejecutar un código hecho por el autor en el lenguaje de programación Python 3 en la Raspberry Pi. Este código utilizado para la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos funciona de la siguiente manera: en la parte inicial se importan las librerías necesarias, se realiza la asignación y configuración de los pines GPIO, se hace un llamado a los datos anteriormente guardados (Antes del último reinicio de la Raspberry Pi) y se realiza la inicialización de variables. Luego, se entra en un bucle indefinido en el que realiza lectura de cada variable las cuales son velocidad de viento, luminosidad solar, temperatura, humedad relativa y ocurrencia de precipitaciones, con la lectura de todas las variables se prosigue a empaquetar toda esta información en un Dataframe y almacenándose en un archivo Comma-Separated Values (CSV), por último se envía cada dato a la plataforma ThingSpeak para poder realizar recepción remotamente de la información ambiental del lugar de estudio, y para terminar el bucle, el programa espera un tiempo de 3 minutos para realizar otra adquisición, almacenamiento y transmisión de información. Este código se explica en la figura 34 y puede ser consultado en el Anexo 1.

6.3.1. Archivo CSV Generado por el Código

Al estar ejecutando el código periódica e indefinidamente se va llenando un archivo Comma-Separate Values (CSV), este es un tipo de archivo con configuración abierta, con uso libre, y de manera sencilla permite distribuir los datos en forma de tabla, con filas y columnas [28]. La creación del archivo CSV facilita la manipulación de los datos de la información recolectada por el MMA manteniéndose ordenada con columnas independientes para las variables: número de orden de entrada, fecha y hora, velocidad de viento, radiación solar, Temperatura y humedad relativa. Un ejemplo de la forma en que el código organiza los datos durante 4 horas puede ser

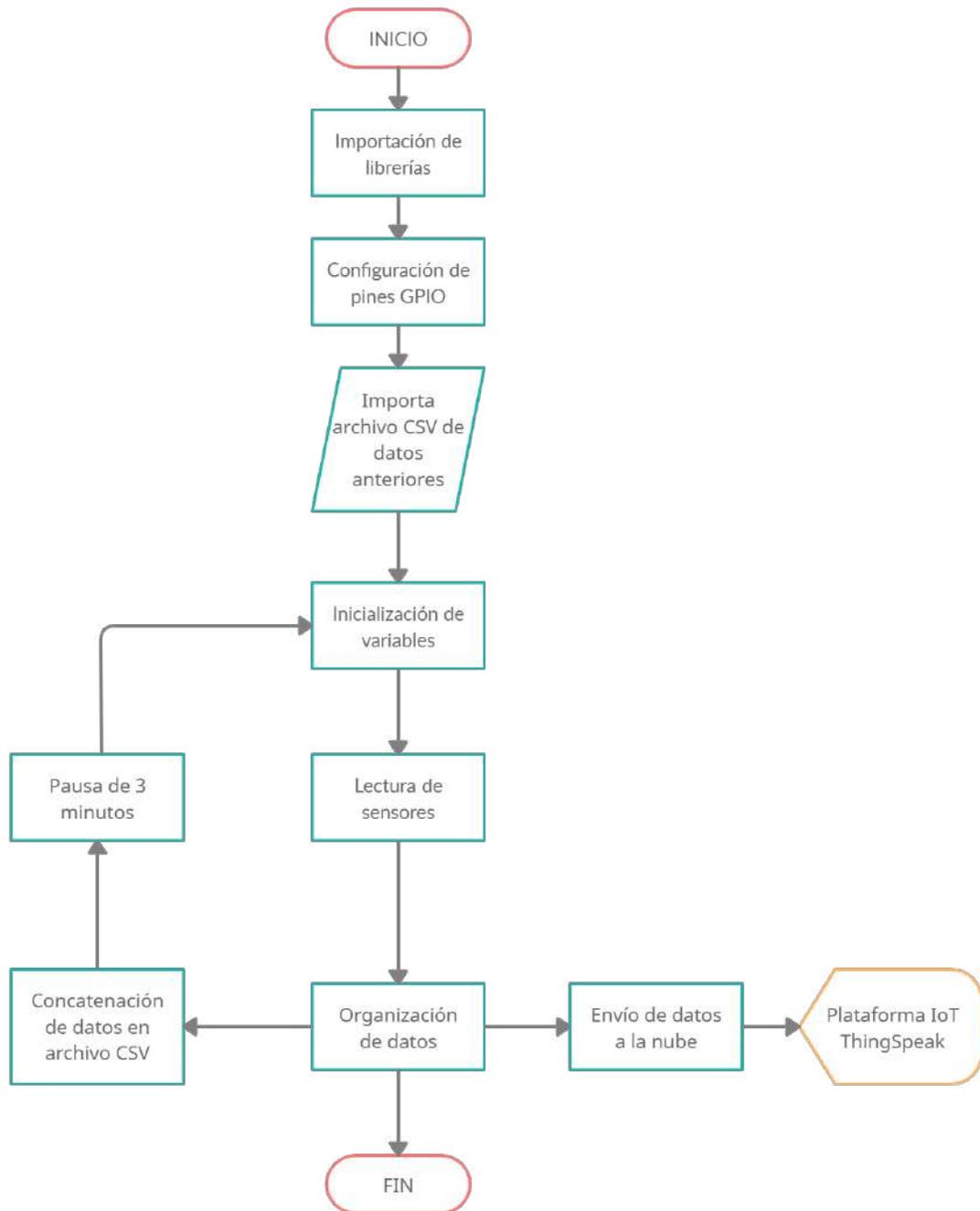


Figura 34: Diagrama de flujo del código para adquisición, almacenamiento y envío de datos.
Fuente: Autor

consultado en el Anexo 18.

6.4. Tareas Programadas en Cron

Para garantizar que la Random Access Memory (RAM) de la tarjeta no se sature y cause interrupciones en la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos, se realizan configuraciones desde la terminal de la Raspberry Pi usando Cron, una herramienta que permite asignar tareas programadas en sistemas Unix, y en este caso se asignaron algunas. La primera es que cada vez que la placa reinicie se ejecute el algoritmo de Python 3 representado en la Figura 34, y la segunda tarea es un reinicio del sistema cada hora.

6.5. Plataforma IOT ThingSpeak

La plataforma ThingSpeak usada en proyectos IOT facilita la visualización y almacenamiento de la información enviada por el MMA remotamente. La plataforma permite visualizar de manera instantánea los datos enviados por los dispositivos a ThingSpeak y por esto es muy usada en experimentos con sistemas basados en IOT que requieren analizar datos.

6.5.1. Uso de ThingSpeak

En esta investigación la plataforma ThingSpeak es utilizada para la visualización remota de las variables recolectadas por el MMA. Sin embargo, dicha plataforma también almacena todos los datos recepcionados y pueden ser descargados en un archivo CSV. La plataforma es una herramienta de gran importancia para lograr los objetivos del proyecto u otros proyectos futuros, no sólo por la facilidad en la visualización y transmisión remota de datos, sino que también permite testear el estado de la tarjeta de control, revisando desde cualquier lugar con conexión a internet el correcto y constante envío de datos provenientes del MMA.

La plataforma recibe los datos desde el MMA enviados de manera ordenada por un fragmento corto del código ejecutado por la Raspberry Pi y son visualizados como se muestra en la Figura 35. Los datos mostrados en la figura corresponden a una tarde del mes de junio entre las 14:00 y las 17:00 horas, y se observan los datos de velocidad de viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa recolectados en ese periodo de tiempo cada tres minutos.

6.6. Flujo de Información

En la Figura 36 se observa el flujo de la información ambiental mientras se realiza la labor de adquisición, almacenamiento y transmisión de la información ambiental con la tarjeta Raspberry Pi Zero W, la cual se encargada de recolectar las señales eléctricas enviadas por los sensores a través de señales digitales ON/OFF, bus digital y por comunicación I2C, para traducir en información ambiental almacenándola internamente y enviando a través de la plataforma ThingSpeak. Al cargar constantemente datos a dicha plataforma, pueden ser visualizados remotamente a través de un dispositivo con conexión a internet.

Channel Stats

Created: [8 months ago](#)

Last entry: [less than a minute ago](#)

Entries: 39055



Figura 35: Interfaz IoT de ThingSpeak para visualización de variables ambientales.

Fuente: Autor

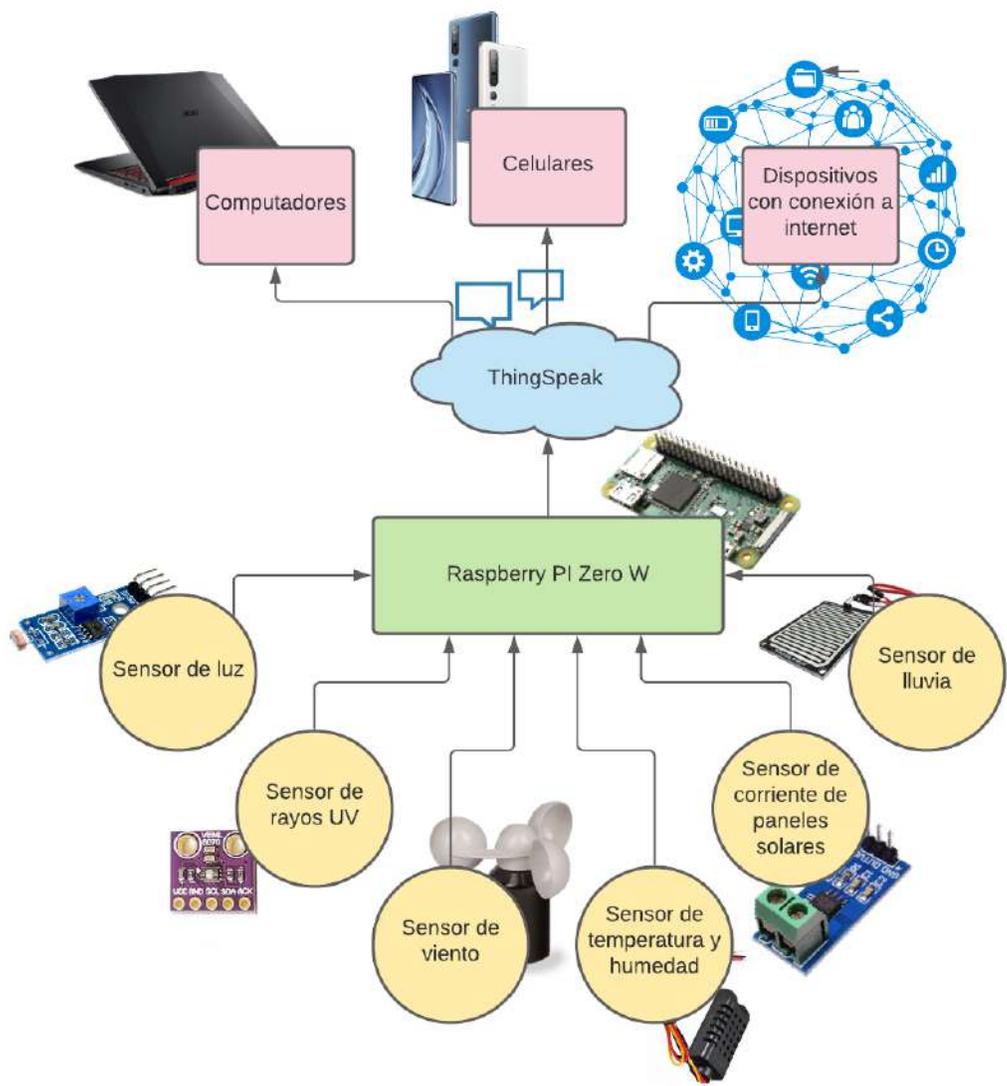


Figura 36: Diagrama de Flujo de la Información.
Fuente: Autor

7. Dimensionamiento del Sistema Híbrido de Energía Fotovoltaica-Eólica

Una vez culminada la adquisición de datos para caracterizar el comportamiento eléctrico de los recursos renovables en la localización de estudio se procedió al análisis matemático requerido para el dimensionamiento de un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica, se sintetiza el análisis matemático en un algoritmo de Python 3 que usa como entrada la información ambiental medida por el MMA y el consumo promedio diario de la vivienda de estudio para dar como salida el dimensionamiento de un sistema de energía fotovoltaico, uno eólico y otro híbrido (fotovoltaico-eólico).

7.1. Manipulación de Datos Recolectados

Como se pudo observar en el capítulo anterior, el MMA guarda la información recolectada en un archivo CSV, estos archivos enlistan y separan con comas ”,” las variables, por esto, se usó el software Excel el cual permite organizar los datos en columnas facilitando la visualización y manejo de información, los datos obtenidos son organizados por el software como se muestra en la Figura 37.

	Fecha y hora	Velocidad de viento	Radiación Solar (UV)	Temperatura
5806	Mon Jun 28 08:02:48 2021	1.66	310	19.6
5807	Mon Jun 28 08:05:51 2021	0	310	20.1
5808	Mon Jun 28 08:08:56 2021	1.24	337	22
5809	Mon Jun 28 08:11:59 2021	1.66	337	21.8
5810	Mon Jun 28 08:15:11 2021	0.94	411	21.5
5811	Mon Jun 28 08:18:14 2021	1.96	339	21.6
5812	Mon Jun 28 08:21:18 2021	2.16	377	21.2
5813	Mon Jun 28 08:24:21 2021	1.79	332	20.1
5814	Mon Jun 28 08:27:24 2021	1.01	319	19.9
5815	Mon Jun 28 08:30:28 2021	0.71	332	20.2
5816	Mon Jun 28 08:33:35 2021	2.01	361	20
5817	Mon Jun 28 08:36:43 2021	1.04	312	20.1
5818	Mon Jun 28 08:39:46 2021	0.92	403	20.2
5819	Mon Jun 28 08:42:51 2021	1.81	403	20.3
5820	Mon Jun 28 08:45:59 2021	2.34	429	20.6
5821	Mon Jun 28 08:49:02 2021	1.55	455	21.7
5822	Mon Jun 28 08:52:06 2021	1.08	1089	21.6
5823	Mon Jun 28 08:55:14 2021	1.47	726	23.5
5824	Mon Jun 28 08:58:18 2021	0.89	1036	24.6

Figura 37: Información organizada en Excel.

Fuente: Autor

7.1.1. Selección de Datos

Para la estimación de radiación promedio se tiene en cuenta sólo la radiación promedio medida entre las horas pico, durante estas horas es cuando hay mayor energía solar aprovechable y por esto los sistemas fotovoltaicos se dimensionan teniendo en cuenta sólo la radiación solar promedio presente en dichas horas. En esta investigación se utilizó los datos de radiación promedio en el intervalo de tiempo entre las 09:00 a 14:59 horas (6 horas) para realizar los cálculos de dimensionamiento. Sin embargo, esto no se hizo con los valores de velocidad de viento ya que este recurso se presenta aleatoriamente en cualquier hora del día produciendo energía en cualquier momento inesperado del día.

7.1.2. Calculo de Variables Promedio Diarias

La recolección de los datos de la información ambiental se realizó con una resolución de tres minutos y se organizó junto con su correspondiente hora y fecha exacta dentro de un archivo CSV, este tipo de archivos es compatible con los software de hoja de cálculo como Excel, entre otros. al contar con los datos empaquetados y organizados por columnas en Excel, se procede a calcular la radiación solar promedio durante las horas pico solares (entre 09:00 - 15:00, en este estudio), la velocidad de viento y la temperatura promedio durante el día, esto se realiza con los datos de todos los días que haya durado la fase de adquisición de datos (en este caso fueron 8 días, ver Cuadro 12). Al contar con los promedios diarios de las variables de estudio se procedió a hallar el peor de los casos de velocidad de viento y radiación solar para dimensionar los sistemas de energía respecto al peor de los escenarios registrados en el la localización de estudio.

Cuadro 12: Valores Diarios Promedio Medidos por el MMA

Día	Velocidad del Viento	Radiación Solar	Temperatura
20-jun	3.636	457.784	16
21-jun	4.430	810.548	17.898
22-jun	1.931	440.636	16.592
23-jun	2.780	647.592	17.388
24-jun	1.313	574.825	14.491
25-jun	2.957	897.835	17.162
26-jun	2.828	444.741	16.859
27-jun	2.934	551.660	15.301
Promedio	2.851	603.203	16.461

Fuente: Autor.

En el Cuadro 12 la velocidad de viento está expresada en m/s , la radiación solar en $W * h/m^2$ y la temperatura en C .

7.1.3. Visualización Gráfica de Variables Promedio Diarias

Los datos promedio recolectados por el MMA durante los 8 días de adquisición de datos arrojan las gráficas de la Figura 38.

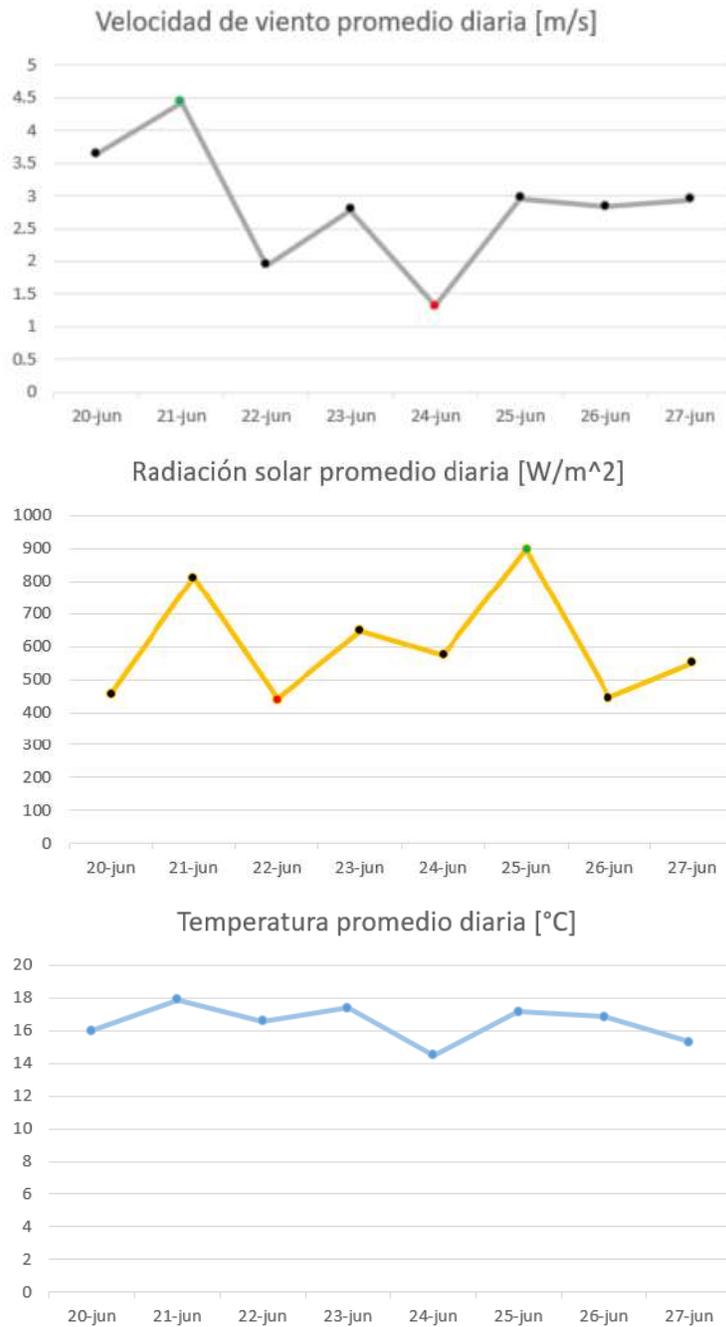


Figura 38: Variables Diarias Promedio Medidas por el MMA.

Fuente: Autor

7.2. Selección de Equipos

Previamente al dimensionamiento de los sistemas se debe realizar la selección de los principales equipos necesarios en la implementación de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica. En esta investigación se utilizaron de referencia equipos con los que cuenta la Universidad de Pamplona, los cuales se muestran en la tabla 13.

Cuadro 13: Equipos de Referencia para Dimensionamiento.

Nombre de Equipo	Referencia
Panel solar	Solutechnia YB-156M36-150
Aerogenerador	SOUTHWEST AIR 40
Batería	MTEK MT121050
Inversor	Cobra CPI 1000

Fuente: Autor.

7.3. Casos de Estudio para Dimensionamiento de Sistemas

Lo que busca esta investigación es realizar dimensionamiento de sistemas de energía renovable (fotovoltaica - eólica) con información específica del lugar donde se desea realizar la implementación de estos sistemas. Para esto se consideran tres casos de estudio para analizar los resultados arrojados por el algoritmo de dimensionamiento desarrollado.

7.3.1. Caso de Estudio 1: Villa Marina

El primer caso de estudio para realizar el dimensionamiento de un sistema de energía fue el plasmado en la investigación [25], de donde se extraen los datos con los que Carlos Beltrán realizó el dimensionamiento de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico con la información ambiental adquirida de la granja experimental Villa Marina de la Universidad de Pamplona.

Cuadro 14: Información Ambiental de Villa Marina (Caso de Estudio 1)

Variable ambiental	Magnitud
Consumo diario promedio de la vivienda	2276 [$W * h/dia$]
Altura sobre el nivel del mar	1100 [m]
Horas solares pico	4 [h]
Radiación Solar	875 [$W * h/m^2$]
Velocidad de viento	3.5 [m/s]
Temperatura promedio	19.85 [C]

Fuente: [25].

La información del Cuadro 14 se ingresó en el algoritmo de dimensionamiento de sistemas de energía (fotovoltaica-eólica) como se muestra en la Figura 39.

```
DATOS PARA REALIZAR EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS
-----FOTOVOLTAICOS, EOLICOS o HIBRIDOS-----
---      Información de consumo      ---
Consumo diario promedio [W*h/dia].....: 2276
---      Información ambiental      ---
Digite la peor radiación solar promedio diaria medida por el MMA.
Radiación solar [W/m^2].....: 875
Horas pico solares [h].....: 4
Digite la peor velocidad de viento promedio diaria medida por el MMA.
Velocidad de viento [m/s].....: 3.5
Digite la temperatura promedio medida por el MMA.
Digite temperatura [°C].....: 19.85
Digite la altura del lugar de estudio [msnm]: 1100
```

Figura 39: Datos de Entrada por Teclado del Algoritmo del Caso 1.

Fuente: Autor

7.3.1.1. Dimensionamiento de Sistemas de Energía (Caso de Estudio 1, equipos del Cuadro 13) Basado en los datos de entrada, el algoritmo arroja el dimensionamiento de tres configuraciones que se pueden llevar a cabo en la localización de estudio para dimensionar sistemas de generación energética a partir de la fuente solar y la eólica cumpliendo con los requerimientos de consumo energético, y se muestran en la Figura 40.

7.3.2. Caso de Estudio 2: Pamplona 1

El segundo caso de estudio es la residencia del autor en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. En donde se cuenta con acceso a una azotea, allí fue instalado el módulo para medir las variables ambientales que determinan el comportamiento eléctrico de las fuentes de energía renovable en el lugar de estudio. Para realizar este caso de estudio se seleccionó los peores datos registrados diarios de las variables de velocidad de viento y radiación solar registrados en el Cuadro 12 y visualizados en la Figura 38. Los datos seleccionados fueron usados como datos de entrada en el algoritmo de dimensionamiento y están registrados en el Cuadro 15.

La información del Cuadro 15 se ingresó en el algoritmo de dimensionamiento de sistemas de energía (fotovoltaica-eólica) de la misma forma como se muestra en la Figura 39.

7.3.2.1. Dimensionamiento de Sistemas de Energía (Caso de Estudio 2, equipos del Cuadro13) Basado en los datos de entrada, el algoritmo arroja el dimensionamiento de tres configuraciones que se pueden llevar a cabo en la localización de estudio para dimensionar

```

Demanda de consumo diaria real...: 3186.40 [W*h/dia]
Capacidad requerida de la bateria: 663.83 [A*h]

- Cantidad de baterías para sistemas de energía independientes (fotovoltaica o eólica) -
Se requieren 7 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistemas en 1 dia sin recursos.

- SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA -
Se requieren 8 paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150) para cumplir la demanda.

- SISTEMA DE ENERGÍA EOLICA -
Se requieren 10 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para cumplir la demanda.

- SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA-EOLICA -
Cantidad de paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150): 6
Cantidad de aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40).....: 3
Cantidad de baterías (MTEK MT121050).....: 4
Se requieren 4 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistema híbrido en 0.5 dia sin recursos.

```

Figura 40: Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 1.
Fuente: Autor

Cuadro 15: Información Ambiental de Pamplona (Caso de Estudio 2)

Variable ambiental	Magnitud
Consumo mensual promedio de la vivienda	62 [KW * h/mes]
Consumo diario promedio de la vivienda	2066.66 [W * h/dia]
Altura sobre el nivel del mar	2300 [m]
Horas solares pico	6 [h]
Radiación Solar promedio diaria medida por el MMA	440.636 [W * h/m ²]
Velocidad de viento promedio diaria medida por el MMA	1.313 [m/s]
Temperatura promedio medida por el MMA	16.461 [C]

Fuente: Autor.

sistemas de generación energética a partir de la fuente solar y la eólica cumpliendo con los requerimientos de consumo energético, y se muestran en la Figura 41.

7.3.3. Caso de Estudio 3: Pamplona 2

El tercer caso de estudio se realizó en la misma localización que en el Caso 2 en le municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Para realizar este caso de estudio se seleccionó los mejores datos registrados diarios de las variables de velocidad de viento y radiación solar registrados en el Cuadro 12 y visualizados en la Figura 38. Los datos seleccionados fueron usados como datos de entrada en el algoritmo de dimensionamiento y están registrados en el Cuadro 16.

```

Demanda de consumo diaria real...: 2893.32 [W*h/dia]
Capacidad requerida de la bateria: 602.78 [A*h]

- Cantidad de baterías para sistemas de energía independientes (fotovoltaica o eólica) -
Se requieren 6 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistemas en 1 dia sin recursos.

- SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA -
Se requieren 9 paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150) para cumplir la demanda.

- SISTEMA DE ENERGÍA EOLICA -
Se requieren 181 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para cumplir la demanda.

- SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA-EOLICA -
Cantidad de paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150): 7
Cantidad de aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40).....: 55
Cantidad de baterías (MTEK MT121050).....: 3
Se requieren 3 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistema híbrido en 0.5 dia sin recursos.

```

Figura 41: Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 2.
Fuente: Autor

Cuadro 16: Información Ambiental de Pamplona (Caso de Estudio 3, supuesto)

Variable ambiental	Magnitud
Consumo mensual promedio de la vivienda	62 [KW * h/mes]
Consumo diario promedio de la vivienda	2066.66 [W * h/dia]
Altura sobre el nivel del mar	2300 [m]
Horas solares pico	6 [h]
Radiación Solar promedio diaria medida por el MMA	897.835 [W * h/m ²]
Velocidad de viento promedio diaria medida por el MMA	4.430 [m/s]
Temperatura promedio medida por el MMA	16.461 [C]

Fuente: Autor.

La información del Cuadro 16 se ingresó en el algoritmo de dimensionamiento de sistemas de energía (fotovoltaica-eólica) de la misma forma como se muestra en la Figura 39.

7.3.3.1. Dimensionamiento de Sistemas de Energía (Caso de Estudio 3, equipos del Cuadro13) Basado en los datos de entrada, el algoritmo arroja el dimensionamiento de tres configuraciones que se pueden llevar a cabo en la localización de estudio para dimensionar sistemas de generación energética a partir de la fuente solar y la eólica cumpliendo con los requerimientos de consumo energético, y se muestran en la Figura 42.

```

Demanda de consumo diaria real...: 2893.32 [W*h/dia]
Capacidad requerida de la bateria: 602.78 [A*h]

- Cantidad de baterías para sistemas de energía independientes (fotovoltaica o eólica) -
Se requieren 6 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistemas en 1 dia sin recursos.

- SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA -
Se requieren 5 paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150) para cumplir la demanda.

- SISTEMA DE ENERGÍA EOLICA -
Se requieren 5 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para cumplir la demanda.

- SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA-EOLICA -
Cantidad de paneles solares (Solutechnia YB-156M36-150): 4
Cantidad de aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40).....: 2
Cantidad de baterías (MTEK MT121050).....: 3
Se requieren 3 baterías (MTEK MT121050) para mantener el sistema híbrido en 0.5 dia sin recursos.

```

Figura 42: Dimensionamientos de Sistemas de Energía Arrojadados por el Algoritmo del Caso 3.
Fuente: Autor

7.4. Resultados del Algoritmo de Dimensionamiento

Con el algoritmo de dimensionamiento de sistemas de energía encontramos que en los tres casos de estudio se puede satisfacer la demanda energética con diferentes configuraciones de cada caso presentadas a continuación.

7.5. Caso de Estudio 1

Teniendo como entrada del algoritmo los datos del Cuadro 14 el algoritmo dimensiona los siguientes sistemas de energía con fuentes renovables (fotovoltaica-eólica):

- **Sistema de Energía Fotovoltaica:** con 8 paneles solares (YB-156M36-150) para producir energía eléctrica y 7 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema de Energía Eólica:** con 10 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica y 7 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema Híbrido Fotovoltaica-Eólica:** con 6 paneles solares (YB-156M36-150) y 3 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica, con 4 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante medio día sin recursos solares o eólicos.

7.6. Caso de Estudio 2

Teniendo como entrada del algoritmo los datos del Cuadro 15 el algoritmo dimensiona los siguientes sistemas de energía con fuentes renovables (fotovoltaica-eólica):

- **Sistema de Energía Fotovoltaica:** con 9 paneles solares (YB-156M36-150) para producir energía eléctrica y 6 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema de Energía Eólica:** con 181 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica y 6 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema Híbrido Fotovoltaica-Eólica:** con 7 paneles solares (YB-156M36-150) y 55 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica, con 3 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante medio día sin recursos solares o eólicos.

7.7. Caso de Estudio 3

Teniendo como entrada del algoritmo los datos del Cuadro 16 el algoritmo dimensiona los siguientes sistemas de energía con fuentes renovables (fotovoltaica-eólica):

- **Sistema de Energía Fotovoltaica:** con 5 paneles solares (YB-156M36-150) para producir energía eléctrica y 6 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema de Energía Eólica:** con 5 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica y 6 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante un día sin recursos solares.
- **Sistema Híbrido Fotovoltaica-Eólica:** con 4 paneles solares (YB-156M36-150) y 2 aerogeneradores (SOUTHWEST AIR 40) para producir energía eléctrica, con 3 baterías (MTEK MT121050) que mantienen el sistemas durante medio día sin recursos solares o eólicos.

8. Conclusiones

En este estudio se desarrolló un módulo dotado de una serie de sensores que mide las variables ambientales: velocidad de viento, radiación solar y temperatura, las cuales son determinantes en el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica en la localización a implementar estos sistemas.

Se investigó en estudios previos afines que la velocidad promedio de viento, radiación solar y temperatura son las variables ambientales necesarias para caracterizar el comportamiento eléctrico de los recursos naturales (sol y viento) disponibles en la localización de estudio para dimensionar correctamente sistemas híbridos de energía fotovoltaica-eólica.

Se propuso y se optó por implementar una estrategia basada en el diseño y construcción de un módulo de medición ambiental (MMA) encargado de adquirir, almacenar y enviar la información propia del lugar donde se desea implementar un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica. Este módulo permite dimensionar de manera óptima dicho sistema híbrido con esta información recolectada en el lugar de estudio.

Se construyó el módulo de medición ambiental (MMA) previamente diseñado en un software CAD. Este fue fabricado a partir de manufactura aditiva (Impresión 3D) y sustractiva (Maquinado CNC), para la fabricación de piezas por medio de impresión 3D se utilizó el termoplástico PLA como materia prima en este proceso, este material se obtiene a base de recursos naturales renovables como almidón de maíz, caña de azúcar, entre otros. Dicho módulo cuenta con una tarjeta de control (Raspberry Pi Zero W) que manipula una serie de sensores para realizar lectura, almacenamiento y envío de las variables: velocidad de viento, radiación solar y temperatura, presentes en la localización de estudio.

Se desarrolló un algoritmo para dimensionar un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica a partir de la información específica y la información ambiental obtenida con el módulo de medición ambiental (MMA) de la localización de estudio. A partir de esto se consigue una configuración de paneles solares, aerogeneradores y baterías, basada en el comportamiento de las fuentes de energía dependiendo de la disponibilidad de estos recursos naturales y el consumo energético promedio en la vivienda a la que el sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica debe satisfacer de electricidad.

Se creó una estrategia para el dimensionamiento de un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica basada en un algoritmo que procesa la información recolectada por el módulo de medición ambiental (MMA) dimensionando sistemas de energía a partir de los recursos disponibles en el lugar de estudio, para realizar esto también es necesario conocer la información dada por el fabricante de los equipo que se desean implementar en el sistema de energía y datos específicos del lugar de estudio como la altura sobre el nivel del mar [msnm] y el consumo promedio diario [$W \cdot h / \text{día}$] de la vivienda. La salida de este algoritmo de dimensionamiento primero arroja la cantidad de baterías, paneles solares y aerogeneradores suficientes para sistemas con fuentes de energía independientes con configuraciones de paneles solares-baterías y/o aerogeneradores-baterías, la cantidad de baterías se calcula para respaldar el sistema por 1 día completo sin

recursos naturales. Por último, este algoritmo arroja una configuración de paneles solares, aerogeneradores y baterías dimensionando un sistema híbrido de energía fotovoltaica eólica, donde la cantidad de baterías se calcula para respaldar el sistema híbrido durante medio día sin presencia considerable de fuentes naturales.

Se observa que los datos ambientales de una localización específica son indispensables en el dimensionamiento de sistemas de energía híbridos al comparar las configuraciones arrojadas por el algoritmo según la información de entrada suministrada, obteniendo un dimensionamiento óptimo al realizarse con la información ambiental medida del lugar en cuestión.

8.1. Contribuciones de Tesis

En el desarrollo de esta investigación surgieron retos que debían ser superados por el autor para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos, al cumplir con estos objetivos resultan contribuciones importantes a la investigación, las contribuciones de esta tesis son mostradas en el Cuadro 17. Estas contribuciones son compartidas con la intención de incentivar la investigación y facilitar la replica del módulo de medición ambiental MMA.

Cuadro 17: Síntesis Contribuciones de Tesis

Contribución	Descripción	Referencia
Archivos de manufactura de piezas	Los archivos para fabricar las piezas a partir de impresión 3D y cortes CNC son compartidos en la comunidad GRABCAD y se puede acceder a ellos a través de una dirección web.	https://grabcad.com/library/modulo-de-medicion-ambiental-mma-1
Instalación de Raspberry Pi OS	La tarjeta de control requiere de la instalación de un sistema operativo para su funcionamiento y utilización, para la instalación se realiza un breve paso a paso mostrado en este documento.	Sección 6.1.1, Figura 29
Código de adquisición, almacenamiento y envío de datos	La tarjeta de control requiere de un código en lenguaje Python 3 para realizar lectura de las señales arrojadas por los sensores que miden las diferentes variables ambientales, al contar con esto datos el código los organiza en un archivo CSV y los envía a través de la web por medio de una plataforma IOT llamada ThingSpeak.	Sección 6.3, Figura 34, Anexo 1

Fuente: Autor.

8.2. Futuras Investigaciones

En el desarrollo de esta investigación se descubre que a partir de esta pueden surgir estudios en diferentes áreas de aplicación o realizando diferentes cambios en la metodología de esta investigación. Algunos de ellos son:

- El siguiente paso a esta investigación es la implementación de un sistema híbrido de energía fotovoltaica-eólica real que suministre eléctricamente las necesidades de una vivienda rural.
- Una inclusión interesante a esta línea de investigación es el análisis de consumo energético de la vivienda de estudio para relacionarse de alguna manera con el comportamiento de las variables ambientales medida por el MMA.
- La implementación de algoritmos inteligentes basados en redes neuronales para realizar un dimensionamiento basado en la información recolectada por el MMA.
- El uso del MMA en investigaciones de diferentes campos como: biología, meteorología, geología, agricultura, entre otros. Donde requieran realizar la medición de las diferentes variables ambientales de un lugar específico.
- En la agricultura se podrían realizar predicciones climáticas al medir con el MMA por tiempos prolongados logrando una estimación anual del comportamiento climático en la localización de estudio y con esto analizar cuáles cultivos son más favorables según las condiciones estimadas a presentarse.

Referencias

- [1] “Los poblados que aún no tienen energía eléctrica en Colombia - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM.” [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/los-poblados-que-aun-no-tienen-energia-electrica-en-colombia-324980>
- [2] CENS Grupo epm, “Diagnóstico de cobertura del servicio de energía eléctrica.” [Online]. Available: <https://www.cens.com.co/comunidad-y-medio-ambiente/participacion-ciudadana/diagnostico-de-cobertura-del-servicio-de-energia-electrica>
- [3] C. M. Arias and B. I. V. Villar, “Energía limpia para iluminación en los hogares de las zonas no interconectadas,” *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 2020.
- [4] D. L. Cadavid, K. G. Salazar Serna, A. Valencia Arias, and C. J. Franco, “Las ciudades y el sol: Paridad de red de la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos en los hogares en colombia,” 2020.
- [5] A. de Lange, M. Naidoo, R. M. Garland, and L. L. Dyson, “Sensitivity of meteorological variables on planetary boundary layer parameterization schemes in the WRF-ARW model,” *Atmospheric Research*, vol. 247, no. August 2020, p. 105214, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105214>
- [6] C. Rudas and T. Pázmándi, “Consequences of selecting different subsets of meteorological data to utilize in deterministic safety analysis,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 225, 2020.
- [7] P. Ma, S. Wang, J. Zhou, T. Li, X. Fan, J. Fan, and S. Wang, “Meteorological rhythms of respiratory and circulatory diseases revealed by Harmonic Analysis,” *Heliyon*, vol. 6, no. 5, p. e04034, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04034>
- [8] L. Merino, “Las energías renovables,” *Energías renovables*, vol. 1, no. 1, p. 20, 2012.
- [9] C. Ghenai, M. A. Rasheed, M. J. Alshamsi, M. A. Alkamali, F. F. Ahmad, and A. Inayat, “Design of Hybrid Solar Photovoltaics/Shrouded Wind Turbine Power System for Thermal Pyrolysis of Plastic Waste,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 22, no. September 2019, p. 100773, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100773>
- [10] Q. Hassan, “Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification,” *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 375–390, 2021.
- [11] S. Jamshidi, K. Pourhossein, and M. Asadi, “Size estimation of wind/solar hybrid renewable energy systems without detailed wind and irradiation data: A feasibility study,” *Energy Conversion and Management*, vol. 234, p. 113905, 2021.
- [12] P. Zheng, L. Qi, M. Sun, D. Luo, and Z. Zhang, “A novel wind energy harvesting system with hybrid mechanism for self-powered applications in subway tunnels,” *Energy*, vol. 227, p. 120446, 2021.

- [13] M. Khosravi, S. Afsharnia, and S. Farhangi, "Optimal sizing and technology selection of hybrid energy storage system with novel dispatching power for wind power integration," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 127, p. 106660, 2021.
- [14] Kenueone, url <https://pixabay.com/photos/electricity-sun-wind-1330214/>.
- [15] V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, "Solar–wind hybrid renewable energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, 2016.
- [16] Y. Oğuz and M. F. Özsoy, "Sizing, design, and installation of an isolated wind-photovoltaic hybrid power system with battery storage for laboratory general illumination in afyonkarahisar, turkey," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 26, no. 4, pp. 70–80, 2015.
- [17] opensource, "What is a Raspberry Pi?" [Online]. Available: <https://opensource.com/resources/raspberry-pi>
- [18] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry pi." [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>
- [19] D. E. GOMEZ ARAQUE and E. J. VELASQUEZ SOLANO, "Diseño de estacion meteorologica, para el estudio del clima en zonas de dificil acceso del catatumbo colombiano," Ph.D. dissertation, 2017.
- [20] K. J. Guinand Rodríguez and S. Quintero Santana, "Protocolo y procedimiento aplicado a instrumentación piranómetro para medición de radiación solar," 2020.
- [21] W. A. Z. Vinueza, A. P. Risquet, and A. S. Nagy, "Prototipo de mini estación meteorológica automática inalámbrica," *Revista Publicando*, vol. 3, no. 7, pp. 20–32, 2016.
- [22] Fernandez Alzate Oscar, "AM2301 datasheet." [Online]. Available: <http://codigoelectronica.com/blog/am2301-datasheet>
- [23] P. Gokhale, O. Bhat, and S. Bhat, "Introduction to iot," *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 41–44, 2018.
- [24] The MathWorks, Inc., "Learn More About ThingSpeak." [Online]. Available: https://thingspeak.com/pages/learn_more
- [25] C. A. Beltrán Zúñiga, "Caracterización del consumo energético para sistemas de baja potencia alimentados con energía renovable (solar-eólica)." 2014.
- [26] E. Akyuz, Z. Oktay, and I. Dincer, "Energetic, environmental and economic aspects of a hybrid renewable energy system: a case study," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 44–54, 2011.
- [27] A. G. Vera Dávila, J. C. Delgado Ariza, S. B. Sepúlveda Mora *et al.*, "Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta simulink de matlab," *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación; Volumen 8, número 2 (Enero-Junio 2018)*, 2018.

- [28] C. A. Ortega Arias, “Elaboración de una herramienta dinámica alimentada de archivos csv para la generación de gráficos estadísticos de uso libre en la web,” 2015.

Anexo A - Código de adquisición, almacenamiento y envío de datos.

```
1 ## Librerías necesarias:
2 import RPi.GPIO as GPIO    ## GPIO
3 import time                ## Tiempo
4 import busio               ## Conexión i2c
5 import board               ##
6 import adafruit_veml6070  ## Sensor VELM6070
7 import Adafruit_DHT       ## Sensor AM2301
8 import requests           ## Envío de datos por Thingspeak
9 import pandas as pd       ## Pandas
10
11 sensor = Adafruit_DHT.DHT22 ## Sensor de temperatura y humedad relativa
12     AM2301
13
14 ## Configuración de pines GPIO usados:
15 TH = 15    ## GPIO 15 sensor de temperatura y humedad relativa
16 LDR = 18   ## GPIO 18 sensor LDR
17 RAIN = 17  ## GPIO 17 sensor de lluvia
18 WIND = 27  ## Sensor de velocidad de viento
19
20 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
21 GPIO.setup(LDR, GPIO.IN)
22 GPIO.setup(RAIN, GPIO.IN)
23 GPIO.setup(WIND, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_DOWN)
24
25 ## Lectura de dataframe con datos pasados:
26
27 df_anterior = pd.read_csv('DATA_all.csv', skiprows=1, names = ['Fecha y hora', '
28     Velocidad de viento', 'Intensidad luz UV', 'Temperatura', 'Humedad relativa', '
29     Luz/oscuridad', 'Lluvia'])
30
31 ## Listas vacías de los datos de las variables:
32
33 hora_fecha_d = []
34 vel_viento_d = []
35 UV_d = []
36 temperatura_d = []
37 humedad_d = []
38 LDR_d = []
39 lluvia_d = []
40
41 ## Inicialización de variables:
42
43 humedad, temperatura = Adafruit_DHT.read_retry(sensor, TH)
44 temperatura_old = temperatura
45 humedad_old = humedad
46
47 ## Toma cíclica de datos:
48
49 while True:
```

```

48
49  ## Lectura velocidad de viento:
50
51  ## Inicializacion de variables:
52
53  count = 0
54  rps_sum = 0
55  rpm_sum = 0
56  rps_prom = 0
57  rpm_prom = 0
58  anterior_input = False
59  timeWind = 60          ## Tiempo de medicion de vel viento
60  timeOld = time.monotonic()
61  timeStart = timeOld
62  pulsos_vuelta = 1     ## Depende de la cantidad de imanes
63
64  while True:
65
66      inputValue = GPIO.input(WIND)
67
68      if(inputValue == True and anterior_input == False): ## condicion con
69  antirebote
70          count += 1
71          timeNew = time.monotonic()
72          Dtime = timeNew - timeOld
73
74          rps = 1/(pulsos_vuelta*Dtime)
75          rpm = rps*60
76
77          if rpm > 1000:
78              rpm = 0
79
80          rps_sum += rps
81          rpm_sum += rpm
82
83          timeOld = timeNew + 0.04
84
85          time.sleep(0.04)      ## tiempo para antirrebote
86
87          anterior_input = inputValue  ## Guardar valor de entrada actual como
88  anterior
89
90          timeBucle = time.monotonic() - timeStart
91
92          if timeBucle >= timeWind: ## Desborde por tiempo del While
93              if count > 2:
94                  rps_prom = rps_sum/count
95                  rpm_prom = rpm_sum/count
96              else:
97                  rps_prom = 0
98                  rpm_prom = 0

```

```

98         vel_viento_d.append('{: 0.2f}'. format (rpm_prom))  ## Agrega dato
a lista de la variable
99
100         break
101
102     ## Lectura del sensor de rayos UV:
103
104     with busio.I2C(board.SCL, board.SDA) as i2c:
105         uv = adafruit_veml6070.VEML6070(i2c)
106
107         uv_raw = uv.uv_raw
108         risk_level = uv.get_index(uv_raw)
109
110         UV_d.append(uv_raw)      ## Agrega dato a lista de la variable
111
112     ## Lectura temperatura y humedad relativa:
113
114     humedad, temperatura = Adafruit_DHT.read_retry(sensor, TH)
115
116     if humedad is not None and temperatura is not None and abs(temperatura_old
- temperatura) < 2: ## Ajuste de error de datos aleatorios
117         temperatura_old = temperatura
118         humedad_old = humedad
119
120     else:
121         humedad, temperatura = Adafruit_DHT.read_retry(sensor, TH)
122         temperatura_old = temperatura
123         humedad_old = humedad
124
125     temperatura_d.append('{: 0.2f}'. format (temperatura))  ## Agrega dato a
lista de la variable
126     humedad_d.append('{: 0.2f}'. format (humedad))          ## Agrega dato a
lista de la variable
127
128     ## Lectura LDR:
129
130     lectura = GPIO.input(LDR)
131     if lectura == 1:
132         info_ldr = 'Oscuro'
133         ldr = 0
134     else:
135         info_ldr = 'iluminado'
136         ldr = 1
137
138     LDR_d.append(info_ldr)      # Agrega dato a lista de la variable
139
140     ## Lectura Lluvia:
141
142     lectura = GPIO.input(RAIN)
143     if lectura == 1:
144         info_rain = 'Seco'
145         rain = 0

```

```

146 else:
147     info_rain = 'Precipitacion'
148     rain = 1
149
150     lluvia_d.append(info_rain)      ## Agrega dato a lista de la variable
151
152     ## Hora y fecha actual:
153
154     localtime = time.asctime( time.localtime(time.time()) )
155     hora_fecha_d.append(localtime) ## Agrega dato a lista de la variable
156
157     ## Almacenamiento interno en la Raspberry Pi:
158     ## Creacion de DataFrame con datos nuevos:
159
160     new_data = {'Fecha y hora':hora_fecha_d,
161                'Velocidad de viento':vel_viento_d,
162                'Intensidad luz UV':UV_d,
163                'Temperatura':temperatura_d,
164                'Humedad relativa':humedad_d,
165                'Luz/oscuridad':LDR_d,
166                'Lluvia':lluvia_d}
167     data = pd.DataFrame(new_data, columns = ['Fecha y hora','Velocidad de
168     viento','Intensidad luz UV','Temperatura','Humedad relativa','Luz/oscuridad',
169     'Lluvia'])
170
171     data_all = pd.concat([df_anterior, data], sort=False) ## Concatenacion a
172     Dataframe anterior
173     data_all.index = range(data_all.shape[0])
174     data_all.to_csv('DATA_all.csv')
175
176     ## Envio de datos a la plataforma ThingSpeak:
177
178     enviar = requests.get(f'https://api.thingspeak.com/update?api_key=
179     VEX7N395HLX3Z5RE&field1={rpm_prom:.2f}&field2={uv_raw:.2f}&field3={
180     temperatura:.2f}&field4={humedad:.2f}&field5={ldr}&field6={rain}')
181
182     time.sleep(120) ## Tiempo de esperar para siguiente toma de datos

```

Listing 1: Algoritmo Python para adquisición, almacenamiento y transmisión de datos en Raspberry Pi

Anexo B - Ejemplo de organización de datos en dataframe.

Cuadro 18: Dataset en el Almacenamiento Interno de la Raspberry Pi por un Periodo de Cuatro Horas, Aproximadamente.

N°	Fecha y hora	Vel. viento	UV	Temp	Humed	Lluvia
0	Tue Feb 16 04:30:14 2021	0	0	10.9	99.9	Seco
1	Tue Feb 16 04:33:16 2021	0	0	10.8	99.9	Precipitación
2	Tue Feb 16 04:36:18 2021	0	0	10.8	99.9	Precipitación
3	Tue Feb 16 04:39:20 2021	0	0	10.7	99.9	Seco

Continuación de Tabla 18						
N°	Fecha y hora	Vel. viento	UV	Temp	Humed	Lluvia
4	Tue Feb 16 04:42:22 2021	0	0	10.6	99.9	Precipitación
5	Tue Feb 16 04:45:24 2021	0	0	10.4	99.9	Precipitación
6	Tue Feb 16 04:48:27 2021	0	0	10.5	99.9	Precipitación
7	Tue Feb 16 04:51:29 2021	0	0	10.4	99.9	Precipitación
8	Tue Feb 16 04:54:31 2021	0	0	10.4	99.9	Precipitación
9	Tue Feb 16 04:57:33 2021	0	0	10.3	99.9	Precipitación
10	Tue Feb 16 05:02:50 2021	0	0	10.4	99.9	Precipitación
11	Tue Feb 16 05:05:53 2021	0	0	10.6	99.9	Precipitación
12	Tue Feb 16 05:08:55 2021	0	0	10.7	99.9	Precipitación
13	Tue Feb 16 05:11:57 2021	0	0	10.7	99.9	Precipitación
14	Tue Feb 16 05:14:59 2021	0	0	11	99.9	Precipitación
15	Tue Feb 16 05:18:04 2021	0	0	11	99.9	Precipitación
16	Tue Feb 16 05:21:06 2021	0	0	11	99.9	Precipitación
17	Tue Feb 16 05:24:08 2021	0	0	11.1	99.9	Precipitación
18	Tue Feb 16 05:27:10 2021	0	0	11.2	99.9	Precipitación
19	Tue Feb 16 05:30:12 2021	0	0	11	99.9	Precipitación
20	Tue Feb 16 05:33:14 2021	0	0	11.2	99.9	Precipitación
21	Tue Feb 16 05:36:17 2021	0	0	11.2	99.9	Precipitación
22	Tue Feb 16 05:39:19 2021	0	0	11	99.9	Precipitación
23	Tue Feb 16 05:42:21 2021	0	0	11.2	99.9	Precipitación
24	Tue Feb 16 05:45:23 2021	0	0	10.9	99.7	Precipitación
25	Tue Feb 16 05:48:25 2021	0	0	10.9	99.9	Precipitación
26	Tue Feb 16 05:51:27 2021	0	0	10.8	99.7	Precipitación
27	Tue Feb 16 05:54:29 2021	0	0	10.9	98.6	Precipitación
28	Tue Feb 16 05:57:32 2021	0	0	10.9	96	Precipitación
29	Tue Feb 16 06:02:52 2021	0	0	11	94.9	Precipitación
30	Tue Feb 16 06:05:54 2021	0	2	11	94.2	Precipitación
31	Tue Feb 16 06:08:56 2021	0	3	11.1	94.3	Precipitación
32	Tue Feb 16 06:11:59 2021	0	5	10.9	96.7	Precipitación
33	Tue Feb 16 06:15:01 2021	69.13	7	10.9	94.7	Precipitación
34	Tue Feb 16 06:18:06 2021	0	10	11.3	91.2	Precipitación
35	Tue Feb 16 06:21:08 2021	0	14	11.4	90.9	Precipitación
36	Tue Feb 16 06:24:13 2021	0	19	11.4	92.4	Precipitación
37	Tue Feb 16 06:27:18 2021	0	23	11.3	92.3	Precipitación
38	Tue Feb 16 06:30:20 2021	0	28	11.4	92.3	Precipitación
39	Tue Feb 16 06:33:22 2021	0	33	11.5	90.9	Precipitación
40	Tue Feb 16 06:36:24 2021	0	38	11.7	88.9	Precipitación
41	Tue Feb 16 06:39:26 2021	0	43	12	88.2	Precipitación
42	Tue Feb 16 06:42:29 2021	0	49	12	85.8	Seco
43	Tue Feb 16 06:45:31 2021	0	54	12.3	84.7	Seco

Continuación de Tabla 18						
N°	Fecha y hora	Vel. viento	UV	Temp	Humed	Lluvia
44	Tue Feb 16 06:48:33 2021	52.04	58	12.6	83.9	Seco
45	Tue Feb 16 06:51:36 2021	0	61	12.7	82.6	Seco
46	Tue Feb 16 06:54:38 2021	41.59	63	12.9	82.4	Seco
47	Tue Feb 16 06:57:40 2021	0	68	12.9	81.4	Seco
48	Tue Feb 16 07:02:51 2021	0	72	13.4	80.1	Seco
49	Tue Feb 16 07:05:54 2021	86.49	79	13.5	79.3	Seco
50	Tue Feb 16 07:08:56 2021	0	79	13.4	79	Seco
51	Tue Feb 16 07:11:58 2021	0	85	13.6	79.1	Seco
52	Tue Feb 16 07:15:01 2021	0	89	13.6	78.4	Seco
53	Tue Feb 16 07:18:03 2021	0	91	13.7	77.9	Seco
54	Tue Feb 16 07:21:12 2021	24.3	95	14.2	75.3	Seco
55	Tue Feb 16 07:24:15 2021	0	97	14.3	75.4	Seco
56	Tue Feb 16 07:27:17 2021	0	102	14.4	75.1	Seco
57	Tue Feb 16 07:30:19 2021	0	107	14.6	74.4	Seco
58	Tue Feb 16 07:33:21 2021	40.87	112	14.6	74.4	Seco
59	Tue Feb 16 07:36:23 2021	34.98	121	14.7	74.3	Seco
60	Tue Feb 16 07:39:25 2021	0	141	15.1	73.9	Seco
61	Tue Feb 16 07:42:28 2021	0	176	18.5	65.9	Seco
62	Tue Feb 16 07:45:30 2021	25.89	198	18.4	65.8	Seco
63	Tue Feb 16 07:48:33 2021	0	218	23.4	53.1	Seco
64	Tue Feb 16 07:51:35 2021	13.16	225	23.2	53	Seco
65	Tue Feb 16 07:54:37 2021	0	222	24.3	48.8	Seco
66	Tue Feb 16 07:57:40 2021	0	221	24.8	45.1	Seco
67	Tue Feb 16 08:02:49 2021	0	224	26.4	41.8	Seco
68	Tue Feb 16 08:05:52 2021	86.44	222	27	39.7	Seco
69	Tue Feb 16 08:08:54 2021	0	238	27.5	38.8	Seco
70	Tue Feb 16 08:11:56 2021	0	233	27.7	38.9	Seco
71	Tue Feb 16 08:14:59 2021	0	501	27.4	38.8	Seco
72	Tue Feb 16 08:18:01 2021	36.34	302	27.3	38.6	Seco
73	Tue Feb 16 08:21:03 2021	0	333	26.7	37.6	Seco
74	Tue Feb 16 08:24:05 2021	0	713	25.7	39.9	Seco
75	Tue Feb 16 08:27:08 2021	0	569	27.9	36.2	Seco
76	Tue Feb 16 08:30:10 2021	0	594	29.2	34.1	Seco