



Diseño e Implementación de un Prototipo Automatizado para la Limpieza de Módulos Fotovoltaicos

Mario José Callejas Cabarcas
José Fernando Salgado Comas

Universidad Magdalena

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

Santa Marta, Colombia

2021



Diseño e Implementación de un Prototipo Automatizado para la Limpieza de Módulos Fotovoltaicos

Mario José Callejas Cabarcas

José Fernando Salgado Comas

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Carlos Arturo Robles Algarín, PhD

Línea de Investigación:

Sistemas, Señales y Energía

Grupo de Investigación:

Magma Ingeniería

Universidad del Magdalena

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

Santa Marta, Colombia

2021

Nota de aceptación:

**Aprobado por el Consejo de Programa en
cumplimiento de los requisitos exigidos por el
Acuerdo Superior N° 11 de 2017 y Acuerdo
Académico N° 41 de 2017 para optar al título de
Ingeniero Electrónico.**

Victor Jose Olivero Ortiz

Jurado

Diego Andrés Restrepo Leal

Jurado

Santa Marta, 27 de mayo de 2021

Dedicatoria,

A mis padres Jesús y Florinda, a mis hermanos Junior y David, y a mí prometida Nachi por prestarme el tiempo con ellos para trabajar en este proyecto.

Mario Callejas Cabarcas.

A mis padres Gloria y José, a mi hermano Juan Carlos, y nuestro equipo de trabajo, el Dream Team.

José Salgado Comas.

AGRADECIMIENTOS

“Le agradezco a Dios, a mis padres por darme el apoyo y recursos para estudiar, a mis hermanos por aconsejarme en momentos necesarios, especialmente a David por ser la principal motivación para elegir este camino; le agradezco a mi pareja, Nachi, por apoyarme en todo el camino para llegar aquí, sobre todo cuando sentí que no podía más, al Dream Team porque juntos logramos grandes cosas, a cada docente de que me brindó la oportunidad de aprender de su experiencia, especialmente al Ingeniero Carlos Robles por el apoyo y la confianza, y finalmente mi compañero de esta investigación porque en este proceso se convirtió en un hermano.”

Mario Callejas Cabarcas.

“Ante todo, gracias a Dios por brindarme paciencia y sabiduría para llegar hasta aquí. A mis padres, Gloria y José, y hermano Juan Carlos, por apoyarme siempre en toda decisión. A nuestro equipo de trabajo, el Dream Team, queda claro que juntos hacemos de la magia una realidad. Al Ingeniero Carlos Robles por la paciencia, confianza y apoyo brindado. A cada uno de los profesores con los cuales crucé camino por sus enseñanzas. A mis amigos más cercanos que vivieron esta aventura conmigo. A Mario, mi compañero de investigación, por convertirse en mi amigo y hermano, y por su paciencia. Y, por último, un agradecimiento enorme a la familia de Mario, en especial a su madre, Florinda, gracias infinitas por abrirme las puertas de su hogar y gracias eternas por ser una segunda madre para mí estando lejos de casa.”

José Salgado Comas.

Resumen

El rendimiento de los paneles fotovoltaicos es un constante tema de estudio e investigación, en el que los procesos automatizados de monitoreo y limpieza juegan un rol fundamental. En ese sentido, en el presente trabajo se expone un prototipo automatizado de limpieza para módulos fotovoltaicos basado en el monitoreo y/o adquisición de las principales variables que influyen en el óptimo rendimiento un panel FV en tiempo real; las cuales son el voltaje, corriente, potencia, temperatura, polvo e irradiancia. Además, se implementó un sistema electromecánico, pequeño robot, para limpiar la superficie del panel FV. Para determinar la cantidad de polvo se propuso un método experimental de medición a través del procesamiento de imagen en escala de grises. El proceso del sistema consiste en medir estas variables durante un periodo de tiempo con una muestra de 50 gramos de suciedad esparcidos en tres sectores sobre la superficie del panel: Posteriormente se realizó un análisis de los datos obtenidos con el panel FV previamente afectado con el polvo versus un panel FV completamente limpio; para así generar la activación de un sistema electromecánico encargado de limpiar la superficie del panel. A su vez, todos los datos obtenidos son almacenados en la base de datos Ubidots. Con la implementación del sistema de monitoreo automatizado se logró establecer cómo afecta la suciedad sobre distintos sectores de la superficie del panel, así como el comportamiento del rendimiento de la potencia del módulo FV antes y después de la limpieza. Además, se pudo demostrar la utilidad del prototipo robótico implementado para la limpieza de los paneles FV.

Contenido

1	Introducción	1
2	Objetivos	5
2.1	Objetivo General	5
2.2	Objetivos Específicos.....	5
3	Materiales y Métodos	6
3.1	Sistema principal.....	6
3.1.1	Tareas	8
3.1.1.1	Vigilancia de conexión.....	8
3.1.1.2	Reloj	9
3.1.1.3	Envío WiFi	10
3.1.1.4	Envío módulo LoRa	10
3.1.2	Sensores.....	13
3.1.2.1	Sensor de temperatura DS18B20	13
3.1.2.2	Sensor de voltaje	15
3.1.2.3	Sensor de corriente WCS1800	16
3.1.2.4	Sensor de irradiancia MAX4009 GY-49.....	17
3.1.2.5	Polvo	18
3.2	Sistema de transmisión inalámbrica	20
3.2.1	Tareas	21
3.2.1.1	Receptor módulo LoRa	21
3.2.1.2	Led C.....	22
3.2.1.3	Led R.....	22
3.2.1.4	Envío WiFi	23
3.2.1.5	Vigilancia de conexión.....	23
3.3	Base de datos online-Ubidots	24
3.3.1	Ubidots	24

3.3.2	Funcionamiento de Ubidots.....	24
3.3.3	Protocolo TCP/UDP	26
3.3.4	Envío de datos	27
3.4	Sistema electromecánico	29
3.4.1	Chasis oruga	30
3.4.2	Puente H BTES7960	30
3.4.3	Sensor de ultrasonido HAC-SR04.....	31
3.4.4	Bomba de agua	32
3.4.5	Construcción de piezas 3D	32
3.5	Metodología	33
4	Resultados	35
4.1	Sistema principal	35
4.1.1	Calibración de sensores	36
4.1.1.1	Sensor de voltaje	36
4.1.1.2	Sensor de corriente	38
4.1.1.3	Sensor de irradiancia MAX44009 GY-49	39
4.1.1.4	Polvo	41
4.2	Sistema de transmisión inalámbrica	43
4.3	Base de datos online-Ubidots	44
4.4	Sistema electromecánico	46
4.5	Resultados generales del sistema de automatización de limpieza.....	48
5	Conclusiones	55
6	Anexo: Datos calibración sensor voltaje	56
7	Anexo: Datos sensor de voltaje calibrado	58
8	Anexo: Datos calibración sensor de corriente	60
9	Anexo: Datos calibración sensor de irradiancia	61
10	Bibliografía	65

Lista de figuras

Fig 1. Esquema del Sistema completo	6
Fig 2. Diagrama de bloques del Sistema principal.....	7
Fig 3. Real Time Clock (RTC).....	9
Fig 4. Módulo RF 433MHz LoRa Ra-02 SX1278	12
Fig 5. Sensor de Temperatura DS18B20.....	14
Fig 6. Configuración de Comunicación Protocolo 1-Wire.....	15
Fig 7. Sensor de Voltaje	16
Fig 8. Sensor de Corriente WCS1800	17
Fig 9. Sensor de Irradiancia MAX44009 GY-49	18
Fig 10. Diagrama de bloques adquisición de cantidad de polvo	19
Fig 11. Raspberry pi 3b. Fuente	19
Fig 12. Diagrama de bloques del Sistema de Conexión Inalámbrica o Conexión Alterna	20
Fig 13. Conexión Sistema Principal-Sistema de Transmisión Inalámbrica	21
Fig 14. Envío de información (Pérdida de conexión WiFi)	22
Fig 15. Confirmación de recepción	22
Fig 16. Envío de datos al servidor.....	23
Fig 17. Entorno "Devices" Ubidots.....	25
Fig 18. Variables monitoreadas.....	25
Fig 19. Obtener token.....	27
Fig 20. Diagrama de bloques del Sistema Electromecánico	29
Fig 21. Chasis oruga.....	30
Fig 22. Puente H BTS7960	30
Fig 23. Sensor Ultrasonido HC-SR04	31
Fig 24. Bomba de agua.....	32
Fig 25. Impresora Ultimaker2+	32
Fig 26. Piezas 3D	33
Fig 27. Sectores del panel FV	33
Fig 28. PCB Sistema Principal.....	35
Fig 29. Sistema Principal-Panel FV-Batería-Regulador	35
Fig 30. Dispersión valores de voltajes antes de calibrar	36

Fig 31. Voltaje con multímetro vs. ADC	37
Fig 32. Dispersión de voltajes después de calibrados	38
Fig 33. Curva calibración sensor WCS1800 a 5V.....	39
Fig 34. Relación corriente-voltaje.....	39
Fig 35. Medidor de energía solar	40
Fig 36. Medición, Medidor de energía solar vs. Sensor irradiancia sin calibrar	40
Fig 37. Sensor de cantidad LUX vs. Irradiancia tomada por medidor de energía solar.....	41
Fig 38. Módulo de medición de polvo	42
Fig 39. Nodo de conexión alterna..	43
Fig 40. Datos recibidos por nodo alterno	43
Fig 41. Base de datos implementada-Ubidots	44
Fig 42. Variables medidas-Ubidots	45
Fig 43. Variable de potencia	46
Fig 44. PCB circuito sistema electromecánico.....	46
Fig 45. Robot.....	47
Fig 46. Robot.....	47
Fig 47. Sectores panel FV	48
Fig 48. Sectores panel FV	49
Fig 49. Sectores panel FV	49
Fig 50. Voltaje.....	50
Fig 51. Corriente..	50
Fig 52. Potencia.....	51
Fig 53. Temperatura	51
Fig 54. Irradiancia	52
Fig 55. Polvo	52
Fig 56. Panel FV antes y durante limpieza.....	54
Fig 57. Panel FV luego de 3ra limpieza	54

Lista de tablas

Tabla 1. Trama de comunicación	11
Tabla 2. Especificaciones y Características Módulo RF 433 MHz LoRa Ra-02 SX1278	12
Tabla 3. Especificaciones y Características Sensor de Temperatura DS18B20	14
Tabla 4. Especificaciones y características sensor de voltaje	16
Tabla 5. Especificaciones y características sensor de corriente	17
Tabla 6. Especificaciones y características sensor de irradiancia	18
Tabla 7. URL de autenticación	27
Tabla 8. Especificaciones y características puente H	31
Tabla 9. Especificaciones y características sensor ultrasonido HC-SR04	31
Tabla 10. Comportamiento variable potencia antes de activar el sistema de limpieza	53
Tabla 11. Comportamiento variable potencia luego de 1ra activación del sistema de limpieza	53
Tabla 12. Datos-calibración sensor de voltaje	57
Tabla 13. Datos sensor de voltaje calibrado	59
Tabla 14. Datos-calibración sensor de corriente	60
Tabla 15. Datos-calibración sensor de irradiancia	64

Lista de símbolos

Símbolo	Significado
°C	Celsius
μA	Microamperio
A	Amperio
ADC	Conversor Analógico Digital
cm	Centímetro
FV	Fotovoltaico
Hz	Hertz
IoT	Internet of Things
kbps	Kilobits por segundo
km	Kilómetro
kΩ	Kiloohms
m	Metro
mA	Miliamperio
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
mV	Milivoltio
mW	Mili vatio
MPP	Máximo punto de potencia
V	Voltio
W	Vatio
W/m ²	Vatio por metro cuadrado

1. Introducción

Debido al impacto negativo que produce la crisis energética por la insolvencia en el sector hidroeléctrico para atender la demanda, los problemas ambientales como la contaminación y el calentamiento global, la mala calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, la energía FV se ha convertido en una solución muy atractiva para lugares con alta densidad solar. La energía fotovoltaica tiene un gran impacto para el medio ambiente puesto que no utiliza combustibles, no produce desechos contaminantes y proviene de una fuente de energía inagotable.

Lamentablemente, el costo de los módulos FV aún es elevado [1], [2]. Estos dispositivos con el tiempo pierden su eficiencia y con ella la captación de energía [3]–[5], dado que es muy poca la energía solar que se aprovecha y que logra convertirse en energía eléctrica [6]. Para solventar este problema (relación costo-beneficio), todos los elementos que hacen parte de una instalación FV deben ser optimizados y de esta forma obtener el máximo rendimiento posible.

Existen diferentes alternativas que optimizan el rendimiento de una instalación FV, entre las que se destacan los seguidores solares [7], sistemas híbridos [8], controladores del punto de máxima potencia [9] y sistemas de limpieza de los módulos FV como los basados en técnicas de enfriamiento mediante la pulverización de agua sobre el módulo [10] y en métodos electrostáticos con el fin de remover desechos presentes en dichos módulos [11]. Actualmente, para mantener los módulos FV en un rendimiento óptimo, se realiza una limpieza de éstos, utilizando generalmente, un método manual donde se debe observar el nivel de suciedad en el panel y se procede a limpiarlo. Este proceso se repite durante un periodo de tiempo estimado por la persona a cargo de los dispositivos; lo cual genera una problemática, especialmente cuando la instalación FV se encuentra en una zona rural o de difícil acceso. Por estas razones, el desarrollo de sistemas de limpieza para estas instalaciones se convierte en una necesidad.

A nivel nacional e internacional se han desarrollado diversas investigaciones teóricas y de implementación práctica, que de una u otra forma guardan relación con el tema objeto de estudio presentado.

En el presente año, la revista Solar Energy, publicó un artículo relacionado con los Avances en Enfoques y Métodos para autolimpieza de paneles solares fotovoltaicos [12], donde hacen énfasis en la pérdida de eficiencia que se presenta debido a las acumulaciones de polvo y los desechos que

conduce el aire por sí mismo. Este trabajo resalta como factor importante realizar una limpieza regular de los paneles FV; teniendo como objetivo principal la necesidad de evitar un proceso de limpieza manual, centrándose en las grietas que ocasiona en la superficie de los módulos dicho proceso, consecuencia del posible cepillado ejercido por las personas a cargo de la limpieza.

En 2017, Abderrezek, Mahfoud, y Mohamed Fathi realizaron una investigación denominada “Estudio Experimental Del Efecto Del Polvo Sobre El Rendimiento Energético De Los Paneles Fotovoltaicos”, donde, se trataron factores puntuales como, el efecto que ejerce el polvo sobre el rendimiento y comportamiento tanto eléctrico como térmico en los módulos y las consecuencias que genera el depósito de suciedad presente, viéndose afectado en términos de efectos térmicos y ópticos eléctricos, por último, el sobrecalentamiento del módulo a causa de la presencia de polvo dependiendo de la naturaleza de este y de la densidad que posea. Para la investigación, se toma en cuenta y se consideraron varios tipos de polvo y cómo afecta el grado de inclinación sobre el módulo. Mediante los diferentes tipos de polvo se observaron diversas respuestas, con respecto a aspectos ópticos, térmicos y eléctricos. Por otra parte, también se observó que la transmisión de luz varía de acuerdo con el tipo de polvo presente en el módulo, incluyendo, a su vez, la densidad de este. Posteriormente, mediante pruebas realizadas en laboratorio e instrumentos especializados los resultados obtenidos dan muestra de las variaciones en el nivel de transmisión de luz y como la temperatura de acristalamiento conlleva a una variación en el rendimiento del panel FV [13].

En 2016, Motasem Saidan, Abdul Ghani, et al, en la investigación realizada sobre el “Estudio Experimental Sobre el Efecto de la Deposición de Polvo en Paneles Solares Fotovoltaicos en Entornos Desérticos”, investiga el deterioro de las celdas de los módulos fotovoltaicos y su producción de energía, a causa de la acumulación de polvo y efectos de la dispersión de radiación solar sobre la superficie del módulo. Para el estudio se realizaron pruebas sobre un módulo limpio y tres módulos FV, los cuales fueron expuestos a condiciones climáticas naturales en el exterior (outdoor) y monitoreados diariamente, semanalmente y mensualmente, respectivamente. Además, mediante un simulador solar se observó el efecto de la dispersión de radiación solar y temperatura. El proceso se llevó a cabo exponiendo un módulo totalmente limpio a radiación y temperatura constante. La investigación mostró una disminución en la potencia de los módulos expuestos a las condiciones ambientales en comparación con mismos parámetros observados en el módulo limpio. También, se observó la degradación promedio de las celdas de los módulos expuestos al ambiente exterior, al polvo; dicha degradación expone un promedio de 6.24%, 11.8% y 18.74%, respectivamente [14].

Bai, Attila, et al, en el año 2016 realizaron un estudio acerca de los “Efectos Técnicos y Económicos del Enfriamiento de Módulos Fotovoltaicos Monocristalinos en Condiciones Húngaras” [15], específicamente, utilizando métodos de refrigeración basados en rociadores, aspersores y enfriamiento en base a refrigerantes. El estudio analizó la rapidez de enfriamiento de los módulos fotovoltaicos en comparación con módulos monocristalinos no expuestos a estos métodos de refrigeración. Se observó que el impacto del enfriamiento afecta tanto el rendimiento de los paneles a la hora de producir energía como a la conservación de su vida útil. Un aumento en la temperatura de operación, en caso de épocas soleadas o calurosas, no es ideal y genera pérdidas al momento de producir energía, asimismo, conlleva a un deterioro de los módulos fotovoltaicos. Los resultados arrojados por las técnicas de rociadores, enfriamiento en base a refrigerantes y aspersión confirmaron que en todos los casos existe una disminución en la temperatura del panel, es decir, hubo una mejora en el rendimiento de estos, pero, en un grado diferente de operación para cada caso. Se concluyó que a pesar de que el método de rociado genera una mayor mejora en el rendimiento frente al método de enfriamiento a base de refrigerantes y aspersión, este último consume menos energía y agua en promedio a la hora de ser implementado [15], siendo este la solución más viable desde el punto de vista energético, mas no desde lo económico.

Otra solución implementada implica un estudio realizado por Nižetić, Sandro, et al, presentado en 2016, llamado “Técnica de enfriamiento por pulverización de agua aplicada en un panel fotovoltaico: la respuesta de rendimiento”, donde, a través del rociado de agua en la superficie trasera y delantera del panel, de forma simultánea, se logra estudiar el enfriamiento de estos mediante la pulverización de agua. Dicho estudio fue realizado en un clima mediterráneo típico. Los resultados obtenidos del experimento presentan que la producción de la energía eléctrica puede llegar a aumentar hasta un 16.3% y, a su vez, la eficiencia eléctrica aumenta alrededor del 14.1% [16]; esto cuando la radiación solar se encuentra en un punto máximo. Mediante la implementación de este sistema refrigerante se consiguió la reducción de la temperatura del panel fotovoltaico en 30°C en promedio. Además, la investigación presentó una comparación respecto a la mejora de producción de energía eléctrica frente a otros estudios y demostró que dicha producción se encuentra entre las más altas. Finalmente, respecto a la viabilidad económica de la implementación de la técnica de enfriamiento se determinó que aún no estaba totalmente definida puesto que sugieren el anexo de una técnica de seguimiento de máximo punto de potencia (MPP).

A raíz de los estudios realizados a través de los años se observa un patrón a partir de las condiciones ambientales del módulo fotovoltaico y en las que se encuentra; nacen más interrogantes, tales como: ¿Cómo saber si la eficiencia del módulo fotovoltaico disminuye a causa de su condición ambiental?

¿Cómo se pueden medir las cantidades de polvo y suciedades en la superficie del módulo fotovoltaico? ¿Cómo se puede aplicar la lógica difusa en la limpieza del módulo? ¿Qué tan eficiente es el sistema de limpieza?

Teniendo en cuenta la importancia de mantener los sistemas fotovoltaicos funcionando de forma eficiente, este proyecto de investigación propone la automatización del proceso de limpieza y cuidado de los módulos fotovoltaicos ubicados en la Universidad del Magdalena. Particularmente, se implementará un prototipo de prueba en un módulo FV, donde el mecanismo de limpieza actuará de forma automática con respecto a la medición de parámetros ambientales medidos, como el nivel de polvo en la superficie del panel, temperatura de operación y velocidad del viento.

Con la optimización y automatización de limpieza de los módulos fotovoltaicos, se busca una reducción en el uso de personal para su mantenimiento y un mejor aprovechamiento de las propiedades de los módulos en uso; generando así la máxima potencia disponible para condiciones de operación dinámicas.

Además, el proyecto se enmarca dentro la política “Smart University” de la Universidad del Magdalena, presentada en el actual plan de gobierno (periodo 2016-2020), la cual está orientada a promover y desarrollar un campus más sostenible y ambientalmente comprometido, en aras de lograr una universidad más incluyente e innovadora. La implementación de un sistema autónomo de limpieza para un módulo fotovoltaico en la Universidad del Magdalena promueve “la evolución de las nuevas tecnologías de la información (TIC) y las comunicaciones con un enfoque sostenible, desarrolla el uso de la tecnología para generar optimización de las fuentes alternativas de recursos ya existentes” [17] y hace participación a varias de las iniciativas propuestas en el desarrollo del concepto Smart University, como lo son el “despliegue de una red de sensores para lograr un monitoreo de variables ambientales (No. 10) y la implementación de alternativas de generación de energía solar (No. 12)” [17], aportando en esta última la limpieza, y por ende una mejora en cuanto a rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

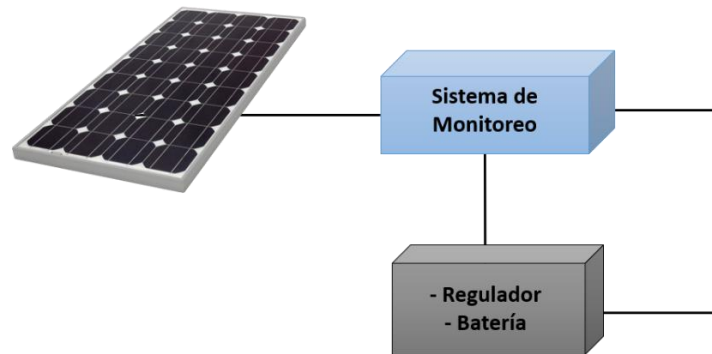
Diseñar e implementar un prototipo automatizado para optimizar el proceso de limpieza de módulos fotovoltaicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de adquisición y procesamiento en tiempo real de las condiciones ambientales y parámetros de operación del módulo FV.
- Implementar un sistema de transmisión inalámbrica de los datos provenientes de los sensores instalados en el sistema FV.
- Realizar una base de datos en línea utilizando la herramienta Ubidots con el fin procesar los datos adquiridos por los sensores.
- Desarrollar un sistema electromecánico con el fin de realizar la limpieza automática de un módulo FV teniendo en cuenta el estado de las variables de operación del sistema.

3. Materiales y Métodos

El proyecto está conformado por un panel fotovoltaico de 65W y un sistema de monitoreo, el cual, a su vez, está dividido en un sistema principal, un sistema de conexión alterna y un sistema electromecánico.

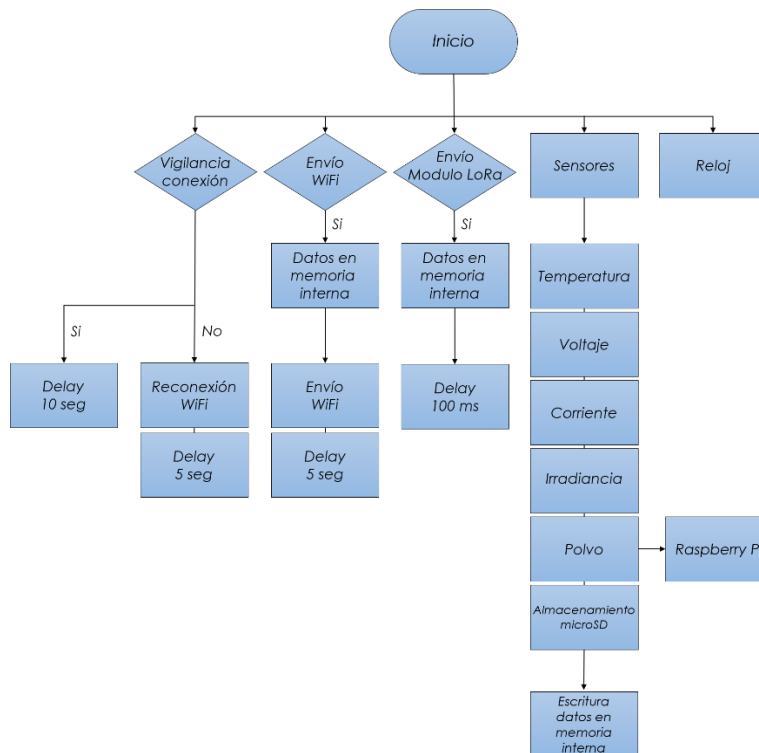


*Fig 1. Esquema del Sistema completo
Fuente propia*

Como se observa en la Fig 1, el sistema de monitoreo, incluyendo todos los subsistemas en los que se encuentra dividido; están energizado por el mismo panel FV, por tal motivo, se utiliza el lazo de realimentación de la batería para el sistema de monitoreo.

3.1 Sistema principal

El sistema principal es el lugar donde se encuentran las tareas primordiales del sistema de limpieza. Aquí, están ubicados todos los sensores encargados de captar y tratar las variables, así mismo, como las configuraciones de los periféricos destinados al envío de datos al servidor y funcionamiento de los demás sistemas secundarios.



*Fig 2. Diagrama de bloques del Sistema principal
Fuente propia*

Antes de entrar en funcionamiento cada una de las tareas, Fig 2, es necesario realizar todas las configuraciones de los periféricos. Los periféricos están compuestos por los módulos SPI, I2C, Radio WiFi y WatchDog. A partir de estas configuraciones se pueden utilizar los dispositivos asociados con el sistema, como lo son el módulo de reloj y el sensor de irradiancia, cuya comunicación es por I2C; mientras, el módulo LoRa y la tarjeta microSD se comunican por SPI. No obstante, otros sensores trabajan con otro tipo de protocolos, tal es el caso del sensor de temperatura, que trabaja bajo el protocolo 1-Wire. Cabe resaltar, el sensor de temperatura no es un periférico del microcontrolador; está diseñado por software y sólo necesita un pin digital, configurable como entrada y salida.

Una vez realizadas las configuraciones e inicialización de los módulos necesarios, se procede con la configuración de las características del Radio WiFi, las cuales permiten establecer una conexión con un punto de acceso a la red configurada por código.

El Watchdog (WD), también llamado perro guardián, se configura de forma general. Es decir, se habilitan las interrupciones para este periférico en el núcleo uno (1) del microcontrolador, espacio destinado para ejecutar las tareas. Una vez habilitadas las interrupciones de este periférico en el

núcleo, al iniciar cada tarea se iniciará el WD para cada una de estas. En caso de no iniciarse en alguna tarea, esta no contará con la vigilancia del periférico.

Con todas las configuraciones establecidas, es tiempo de que se inicien las comunicaciones con los módulos necesarios para arrancar el sistema de monitoreo, dichos módulos son en elementos críticos para el funcionamiento adecuado del sistema. Estos elementos son el módulo de reloj (RTC) y el Radio LoRa.

La importancia del módulo de reloj radica en la dependencia que posee el sistema al momento de la obtención de las muestras. Esto se presenta debido al enlace que tiene este módulo con la tarea que contiene todos los sensores; dicha tarea no iniciará hasta que el módulo de reloj haya entregado la hora al instante de iniciar el sistema. Por otro lado, el módulo de Radio LoRa es la alternativa que contiene el sistema para poder enviar un dato al servidor en caso de no contar con una conexión WiFi. Una vez completadas las configuraciones mencionadas anteriormente, el sistema procede con la inicialización de las tareas descritas en el diagrama de flujo, Fig 2.

Por último, es importante resaltar que el funcionamiento del sistema se encuentra basado en FreeRTOS. Un sistema basado en RTOS brinda funciones a bajo nivel, básica y principalmente de programación, creación de tareas y administración de los recursos de dichas tareas [18]. Debido a esto es posible trabajar con multitareas, donde cada tarea es independiente de la otra y se encuentran comunicadas entre ellas con el fin de tener acceso de una forma ordenada a los recursos compartidos; permitiendo así el funcionamiento de este como un sistema operativo en tiempo real, simulando trabajar en paralelo cada una de las tareas expuestas en el anterior diagrama de flujo, Fig 2.

3.1.1 Tareas

3.1.1.1 Vigilancia de conexión

La tarea de vigilancia de conexión, como su nombre lo indica, se dedica exclusivamente a conectar el módulo ESP32 a internet, las veces necesarias hasta conseguirlo. Se encuentra todo el tiempo vigilando si el módulo ha recibido una notificación de pérdida de acceso a la red. En caso de ser así, intentará reconectarse.

Para lograr su objetivo, la tarea hace de uso de un semáforo y el manejador de eventos de la Radio WiFi. Los semáforos son formas de interconectar tareas en programas que utilizan FreeRTOS. El manejador de eventos es una función especial, asignada en la configuración del Radio que le permite al microcontrolador ser notificado de los estados de este. Entre estos estados se encuentran el estar conectado al punto de acceso, desconectado del mismo, con IP asignada por el router y la pérdida de la IP. Con estas notificaciones o eventos, se puede filtrar y conocer cuál de ellos ha ocurrido.

Al ocurrir el evento de desconexión, el manejador de eventos libera el semáforo, dándole la señal a la tarea de vigilancia para que intente conectarse a la red configurada, una vez logrado este objetivo, la tarea libera el semáforo nuevamente y al recibir el evento de asignación de IP, el manejador de eventos vuelve a tomar el semáforo, impidiendo que la tarea intente ejecutar la función de conexión sin ser necesario, ya que el acceso a internet se ha dado.

3.1.1.2 Reloj

Esta tarea es la más sencilla y a la vez una de las más importantes. Su función es aumentar las variables globales de los segundos, minutos y horas. Con el aumento de estas variables cada segundo, se logra un desfase con la hora real de dos a cinco minutos (2 min a 5 min), durante veinticuatro horas (24 horas), por ende, a las 00:00:00 de cada día, se vuelve a tomar una lectura del módulo de reloj, entrando así en fase con la hora real. Una función extra de esta tarea se presenta cuando se obtienen los datos del módulo de reloj. En ese momento se libera un semáforo encargado de habilitar la tarea de los sensores, por consiguiente, si la hora no se ha tomado del reloj el sistema no comenzará a tomar muestras a través de los sensores. El módulo de reloj utilizado en el sistema de monitoreo se observa en Fig 3.



Fig 3. Real Time Clock (RTC)

Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/ds3231-real-time-clock-rtc-module-22328039191>

3.1.1.3 Envío WiFi

La tarea de envío por WiFi al servidor inicia con la creación y configuración de un socket, el cual tiene como objetivo conectarse al servidor de Ubidots mediante el protocolo TCP/IP, protocolo descrito en la sección de las características del servidor, en el puerto 9012 con la dirección IP pública del servidor 50.23.124.68.

Al establecer la configuración del socket y verificar que se ha dado correctamente, la tarea entra en el modo de espera para enviar un dato, este tiempo de espera es de sesenta segundos (60 seg), es decir, cada minuto la tarea realiza una lectura de la memoria de almacenamiento de datos para confirmar si en ella se aloja alguna muestra. En caso de encontrar un dato procede con el intento de conexión con el servidor por medio del socket configurado previamente. Si recibe confirmación de la conexión, enviará el dato, del que espera respuesta positiva (“OK”) y elimina el dato enviado de la memoria. Por otro lado, en caso de recibir una respuesta negativa en la recepción del dato o en el intento de conexión al servidor, la tarea está configurada para intentar conectarse y enviar el dato hasta recibir una respuesta positiva del servidor.

Los datos escritos en la memoria interna nunca serán eliminados sin una previa confirmación de recepción por parte del servidor; aun si el microcontrolador llegase a apagarse y vuelva a iniciar, los datos que se encuentran almacenados se conservarán, debido a que fueron escritos en un archivo virtual tipo .txt en la memoria del dispositivo. Esto se debe a la capacidad de la ESP32 de implementar un espacio de memoria para almacenar diferentes tipos de archivos con la librería Virtual File System (VFS), entregada por el fabricante.

3.1.1.4 Envío módulo LoRa

La tarea de envío a través del módulo de Radio Frecuencia es la alternativa que posee el sistema para lograr acceder al servidor y enviar los datos que obtiene de los sensores. Esta tarea comparte, con la tarea de los sensores y del envío por WiFi, el acceso a la memoria interna, debido que al desconectarse de internet esta se habilitará con el fin de buscar el sistema de envío alternativo (radiofrecuencia), transmitiendo los datos que se encuentren en la memoria y que este pueda enviar al servidor.

El modo en que estas tareas pueden ser habilitadas y deshabilitadas es mediante el manejo de tareas. Al iniciar cada tarea, esta lleva consigo una opción de manejador, que puede describirse como un ID asignado a la tarea, el cual permitirá manipularla bajo las condiciones permitidas por el sistema operativo. Estas condiciones pueden ser la suspensión de la tarea, reanudarla, destruirla, crearla, entre otras cosas. Al habilitar este manejador, los efectos de las opciones mencionadas sobre la tarea se pueden ejecutar desde cualquier tarea o función, siempre y cuando la declaración del manejador se encuentre declarada de manera global.

Las tareas de envío por LoRa y WiFi tienen un manejador configurado y declarado de manera global. Gracias a este y al manejador de eventos de la radio WiFi, se puede habilitar la tarea de WiFi y deshabilitar la tarea de LoRa cuando el dispositivo tenga conexión a internet y, en caso de perder la conexión, se deshabilitará los envíos por la red WiFi y la función habilitará la tarea del LoRa. Por ello, estas tareas tendrán interferencia, enviando datos desde la radio WiFi y el módulo de radiofrecuencia.

▪ Trama de comunicación LoRa

La trama para la comunicación de los módulos LoRa está conformada por n cantidad de bytes, Tabla 1. Los tres primeros bytes corresponden a una cabecera de mensaje, un identificador del nodo al que se dirige el mensaje (IDD, id destino), en este caso, al módulo LoRa ubicado en el sistema de conexión alterna; un identificador del nodo que transmite el mensaje (IDF, id fuente); por último, los bytes restantes son de información, bien sean datos obtenidos por el nodo de monitoreo o mensajes de confirmación de envío de información.

*Tabla 1. Trama de comunicación.
Fuente propia.*

<i>Byte 0</i>	<i>Byte 1</i>	<i>Byte 2</i>	<i>Byte 3</i>	<i>...</i>	<i>Byte n-1</i>	<i>Byte n</i>
<i>0x06</i>	<i>IDD</i>	<i>IDF</i>	<i>Byte Inf 1</i>	<i>...</i>	<i>Byte Inf n-1</i>	<i>Byte Inf n</i>

En caso de que cualquier nodo reciba un mensaje que no le corresponda, o sea enviado por un nodo que no reconozca, no se procesará este mensaje. Además, con esta metodología de trama se permite

filtrar mensajes externos, evitando interferencias, filtraciones por parte de otros nodos. y procesamiento de señales externas diferentes a las de importancia.

▪ Módulo de radiofrecuencia LoRa

LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en modulación en radiofrecuencia. Esta tecnología posee ventajas de comunicación a largas distancias y alta tolerancia a las interferencias, siguiendo los parámetros específicos. Los módulos LoRa son esenciales en redes IoT (Internet of Things), lugares con poca cobertura WiFi y/o móvil, y redes de sensores donde no sea posible una conexión a la red eléctrica, gracias a su bajo consumo. El módulo utilizado es el RF 433 MHz LoRa Ra-02 SX1278, Fig 4, las especificaciones y características se observan en la Tabla 2.



Fig 4. Módulo RF 433MHz LoRa Ra-02 SX1278

Fuente: <https://www.mactronica.com.co/modulo-rf-433mhz-lora-ra02-sx1278-516973974xJM>

Tabla 2. Especificaciones y Características Módulo RF 433 MHz LoRa Ra-02 SX1278
Fuente propia.

Especificaciones	Valores
Estándar Inalámbrico	433MHz
Rango de Frecuencia	420 - 450MHz
Rango de Onda (RSSI)	127dBi
Comunicación SPI	Half-duplex
Tensión de Funcionamiento	1,8 - 3,7V (3,3V por defecto)
Potencia Salida	+20dBm - 100mW
Alcance	3km (línea de vista)

3.1.2 Sensores

La tarea sensores inicia una vez la tarea del reloj libere el semáforo. Las variables globales del tiempo son usadas por esta tarea para saber en qué momentos se debe tomar cada muestra; por criterio propio se decide tomar una muestra por hora, a razón de que los cambios que se presentan en las variables son suaves con respecto al tiempo. Las muestras son tomadas en el minuto cinco (5) de cada hora.

Una vez llegado al minuto indicado, se procede a tomar las muestras. El primer dato que se adquiere es el de temperatura, donde se llama mediante una función al protocolo (1-Wire) por software que se comunica con el sensor y se adquiere la primera medición. Luego, a través del conversor analógico digital (ADC) del microcontrolador, se adquieren las señales de corriente y voltaje. El sensor de irradiancia es el próximo con el que se comunica; en este se aplican una serie de comandos por medio del periférico I2C, con el fin de lograr que el sensor pueda devolver el valor medido, que, posteriormente, de multiplicarse con una constante, se convierte en unidades de irradiancia [19]; vatios por metro cuadrado (W/m²). Por último, se procede con la toma de muestra de polvo a través de procesamiento de imagen. Para esta muestra el sistema de monitoreo se comunica con la Raspberry mediante una trama específica que se encarga de solicitarle a este dispositivo el tomar una captura (foto) de la superficie del panel, procesarla y devolver un valor de la cantidad de suciedad encontrada según el algoritmo desarrollado.

Teniendo todas las muestras, el dispositivo procede a realizar una copia de seguridad en la tarjeta de almacenamiento externo o también llamada microSD. Una vez realizada la copia de seguridad, los datos son concatenados en una trama específica que debe enviarse al servidor. Además, la trama completa es almacenada en la memoria interna del dispositivo para su posterior envío en caso de cualquier emergencia, como podría ser un problema de envío de los datos.

Al cumplir este ciclo, la tarea entra en modo de espera, vigilando el valor de la variable minuto para proceder con la siguiente muestra.

3.1.2.1 Sensor de temperatura DS18B20

Es un sensor de temperatura digital, caracterizado por su gran precisión al proveer mediciones de temperatura de 9 a 12 bits y una función de alarma no volátil programable por el usuario al momento que se requiera indicar puntos altos y bajos de mediciones. El sensor se comunica a través de

protocolo 1-Wire y, además, trae consigo una programación interna de un ID único de 64 bits, Tabla 3.



Fig 5. Sensor de Temperatura DS18B20

Fuente: <https://www.tiendatec.es/arduino/sensores/899-sensor-ds18b20-temperatura-para-liquidos-sumergible-8472496014533.html>

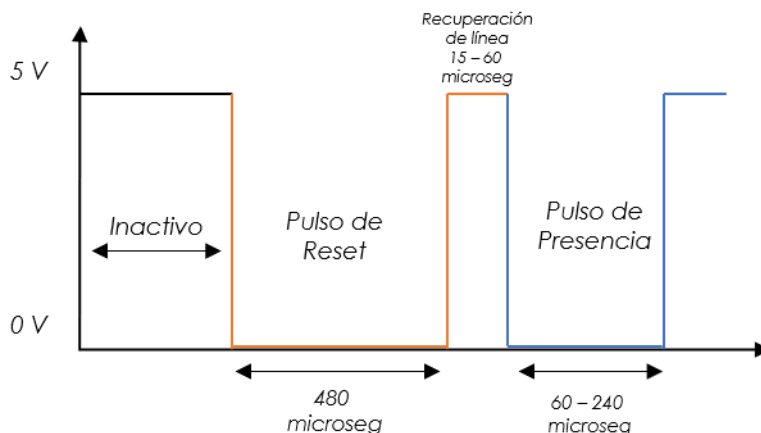
Tabla 3. Especificaciones y Características Sensor de Temperatura DS18B20
Fuente Propia

Especificaciones	Valores
Tensión de Funcionamiento	3,0 – 5,0V
Rango de Medición	-55°C a 125°C
Rango de Error	+/- 0,5°C
Dirección Única (ID)	64 bits
Protocolo de Funcionamiento	1-Wire
Comunicación Serial	9 a 12 bits
Interface	Digital

1-Wire es un protocolo de señal serial asíncrono bidireccional (pero una dirección a la vez) fundamentado en un bus, donde existe un maestro y uno o varios esclavos. Funciona con una resistencia de pull-up y hace uso únicamente de una línea de datos y un retorno a tierra, tanto para la comunicación con el microcontrolador como para la alimentación de los esclavos. Posee dos velocidades de comunicación, estándar de 15,4 kbps y overdrive de 125 kbps.

Los dispositivos que trabajan con este protocolo cuentan con un ID único de 64 bits, lo que permite la conexión de múltiples dispositivos al mismo bus de datos. Además, 1-Wire utiliza instrucciones,

llamadas comandos ROM, para leer o escribir en la memoria interna y los registros de los dispositivos. No obstante, los comandos son específicos para cada tipo de sensor utilizado [20].



*Fig 6. Configuración de Comunicación Protocolo 1-Wire.
Fuente Propia.*

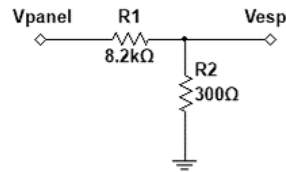
En el protocolo 1-Wire el maestro se encarga de controlar la comunicación, por lo tanto, es quien la inicia, a través de un reset en la señal del bus. Generalmente, la comunicación ocurre (reset) cuando se establecen espacios de tiempo de 480 microsegundos. Posterior al envío del reset, los esclavos responden al maestro enviando una señal (un pulso con tiempo entre 60 - 240 microsegundos) que indica la presencia del esclavo. Por último, al momento de darse la recepción del pulso de presencia en el maestro, significa que este finaliza su iniciación y se encuentra disponible para el envío o comunicación con los esclavos, dicha comunicación se presenta mediante slots de tiempos donde se establecen los comandos ROM, utilizados para control y acceso a la memoria de los dispositivos [20].

3.1.2.2 Sensor de voltaje

El sensor de voltaje está conformado por 2 resistencias, una de $8,2k\Omega$ y otra de 300Ω , formando un divisor de tensión con el cual es posible reducir el voltaje medido a una razón de 28,3333. El voltaje entregado por el divisor de tensión está dado por la ecuación:

$$V_{esp} = V_{panel} * \frac{300\Omega}{300\Omega + 8,2k\Omega}$$

Donde, V_{esp} es el voltaje atenuado por las resistencias y el dirigido al pin del microcontrolador.



*Fig 7. Sensor de Voltaje
Fuente propia*

*Tabla 4. Especificaciones y características sensor de voltaje
Fuente propia.*

Especificaciones	Valores
Voltaje Máximo (V_{panel})	32V
Voltaje Mínimo (V_{panel})	0V
R_1	8.2kΩ
R_2	300Ω

3.1.2.3 Sensor de corriente WCS1800

El sensor WCS1800, es caracterizado por brindar gran precisión en medida de corrientes DC y AC en casi cualquier tipo de aplicación, desde sistemas de comunicaciones hasta industriales. Cuenta con un orificio de 9 mm de diámetro por donde es cruzado el cable eléctrico y así efectuar la medición de la corriente, evitando así realizar cambios en el sistema para la instalación del sensor. En este orificio toda corriente que fluya a través de este sensor generará un campo magnético que será detectado por efecto Hall [20]. Además, los cables del sensor están eléctricamente aislados de los terminales de la ruta conductiva.

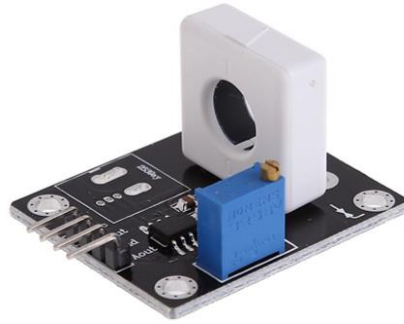


Fig 8. Sensor de Corriente WCS1800

Fuente: <https://www.joom.com/es/products/5d5ae3e428fc7101019076b0>

Tabla 5. Especificaciones y características sensor de corriente.
Fuente propia.

Especificaciones	Valores
Tensión de Funcionamiento	3,0 – 5,0V
Rango de Detección (a 5V)	0 – 35A
Sensibilidad	66mV/A
Corriente de Funcionamiento	3mA
Tensión de Aislamiento	4000V
Ancho de Banda	23kHz
Voltaje de Salida	Proporcional a la corriente AC/DC
Tipo de Salida	Digital/Análoga

3.1.2.4 Sensor de irradiancia MAX4009 GY-49

Es propiamente un sensor de luz, que, su valor al ser multiplicado por una constante arroja la irradiancia captada [19]. Este sensor funciona bajo el protocolo I2C, es de bajo costo y contiene un gran rango de medición. Posee un chip fotodiodo optimizado con el fin de imitar la percepción del ojo respecto a la luz ambiental, incorporando una capacidad para el bloqueo de radiación UV (ultravioleta) e IR (infrarroja). Además, contiene un bloque dispuesto a la selección automática del rango de lux correcto para optimizar los conteos/lux, llamado bloque de ganancia adaptativa.

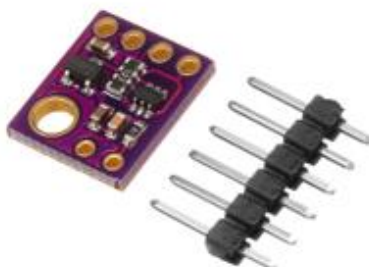


Fig 9. Sensor de Irradiancia MAX44009 GY-49

Fuente: https://es.banggood.com/GY-49-MAX44009-Digital-Optical-Intensity-Flow-Sensor-Module-with-I2C-Interface-p-1416438.html?cur_warehouse=CN

Tabla 6. Especificaciones y características sensor de irradiancia.
Fuente propia

Especificaciones	Valores
Tensión de Funcionamiento	1,7 – 3,6V
Corriente de Funcionamiento	0,65μA
Rango de Temperatura	-40°C a 85°C
Rango dinámico	22 bits (0,045 – 188,000 lux)
Direcciones del Sensor	1001 010x - 1001 011x

3.1.2.5 Polvo

El polvo es un caso particular, debido a que no se hace uso de un sensor específico que efectúe la medición de esta variable. Por ello, la medición de la cantidad de polvo presente sobre la superficie del panel se realiza a través de procesamiento de imagen. El proceso realizado es tal como se muestra en el diagrama de la Fig 10.

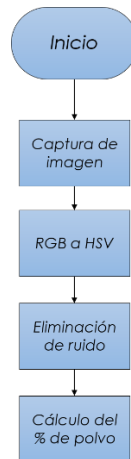


Fig 10. Diagrama de bloques adquisición de cantidad de polvo
Fuente propia

Capturada la foto, en la Raspberry, haciendo uso de la librería OpenCV, en Python, se realiza el procesamiento a la imagen captada. Para iniciar el procesamiento se efectúa inicialmente una conversión de los niveles de colores RGB a HSV, la cual es una escala que facilita la detección de colores. El modelo HSV maneja valores que controlan mejor el color a causa de ser una modificación no lineal del modelo de colores RGB en coordenadas cilíndricas. Este modelo está definido por tres dimensiones: saturación, matiz y brillo [21].



Fig 11. Raspberry pi 3b.

Fuente: <https://www.amazon.com/-/es/4328498196-Frambuesa-Pi-Modelo-Junta/dp/B01LPLPBS8>

Establecida la conversión del modelo a HSV, el procesamiento de la imagen continua con la aplicación de escala de grises a la imagen, donde los pixeles que conforman la imagen toman rangos de colores de blancos y negros. El envío de estos datos procesados se efectúa como se mencionó anteriormente en la sección introductoria de los sensores.

3.2 Sistema de transmisión inalámbrica

El sistema de transmisión inalámbrica o sistema de conexión alterna se desarrolla con el objetivo de actuar como respaldo en el envío de datos hacia el servidor, en caso de perder la conexión a internet con el sistema de monitoreo principal. El sistema está compuesto por diferentes tareas, como se observa en el diagrama de bloques, Fig 12.

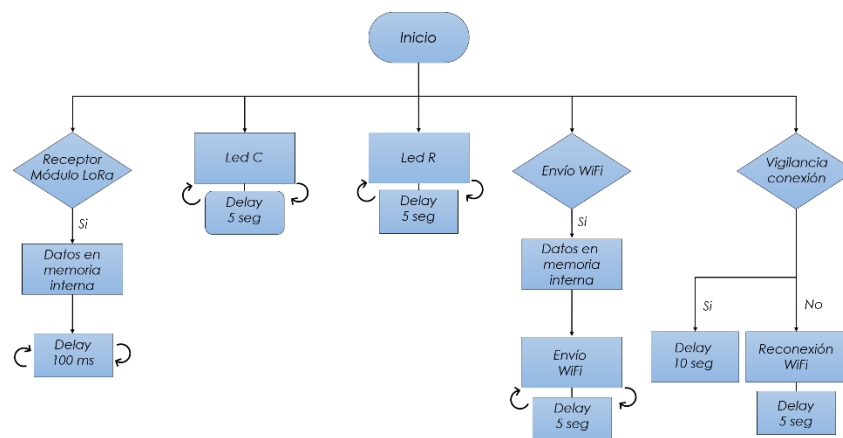


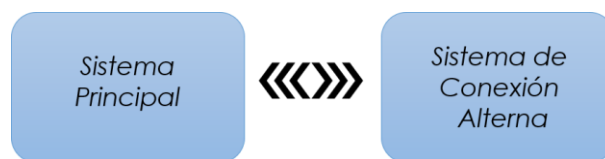
Fig 12. Diagrama de bloques del Sistema de Conexión Inalámbrica o Conexión Alterna
Fuente propia

El sistema de conexión alterna, al igual que el sistema principal, está basado en FreeRTOS, permitiendo el funcionamiento como un sistema operativo en tiempo real, simulando trabajar en paralelo cada una de las tareas que se muestran en la Fig 12, haciendo uso también del ESP32.

El funcionamiento del sistema se presenta con la condición de solo si el sistema de monitoreo principal pierde conexión WiFi al momento de enviar los datos al servidor. Si este es el caso, la conexión mediante LoRa se activa para generar el envío de la información al sistema de conexión alterna. Si los datos no son recibidos, el sistema toma un tiempo de espera de 100 milisegundos, hasta que sean recibidos. Una vez los datos son recibidos correctamente, son almacenados en un espacio

de memoria interna del microcontrolador, designado para guardarlos, con el fin de evitar la pérdida de estos en casos como pérdida de energía en el sistema.

Con los datos almacenados en la memoria interna se procede a verificar la conexión a internet, con un intervalo de tiempo de 100 milisegundos, si no se llega a establecer. Establecida la conexión a internet, el sistema corrobora la existencia de los datos en la memoria interna del controlador y los envía al servidor. El sistema de monitoreo y el sistema de conexión alterna se encuentran comunicados mediante tecnología LoRa, a través de una configuración punto a punto, utilizando los módulos de radiofrecuencia, Fig 13. Además, la conexión entre los dos sistemas tiene comunicación full-dúplex, permitiendo al sistema de monitoreo confirmar el correcto envío de los datos al sistema de conexión alterna. Asimismo, el sistema de conexión alterna retorna un mensaje de confirmación una vez la información sea recibida.



*Fig 13. Conexión Sistema Principal-Sistema de Transmisión Inalámbrica
Fuente propia*

3.2.1 Tareas

3.2.1.1 Receptor módulo LoRa

Al momento de perder la conexión a internet en el sistema de monitoreo, se activa la transmisión al nodo de conexión alterna, y el sistema principal envía la información que se encuentra en la memoria interna del microcontrolador al nodo alterno, Fig 14.

El módulo de radiofrecuencia receptor se encarga de tomar de los datos enviados por parte del sistema de monitoreo. Los datos recibidos son provenientes de la memoria interna del microcontrolador que se encuentra en el sistema de monitoreo; si no se encuentran datos en dicha memoria no se recibirá ningún dato. Una vez recibidos los datos, son escritos en la memoria interna del microcontrolador (del sistema de conexión alterna), donde son guardados por seguridad, como ya se mencionó.

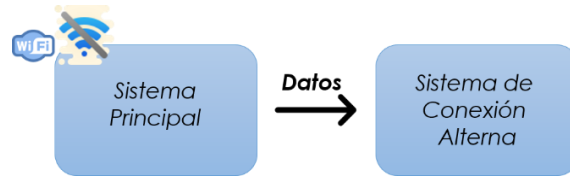


Fig 14. Envío de información (Pérdida de conexión WiFi)
Fuente propia

Con los datos ya recibidos, el sistema de conexión alterna retorna un mensaje “OK” como confirmación de la recepción de la información, Fig 15. En caso de no retornarse el mensaje de confirmación, el nodo de monitoreo intentará enviar el mensaje cinco veces, con intervalos de 5 segundos entre cada mensaje enviado. No obstante, estos intervalos de tiempo y cantidad de mensajes son configurables. Tanto el módulo receptor LoRa como la trama de comunicación son los mismos utilizados en el sistema principal, Fig 4, Tabla 1.

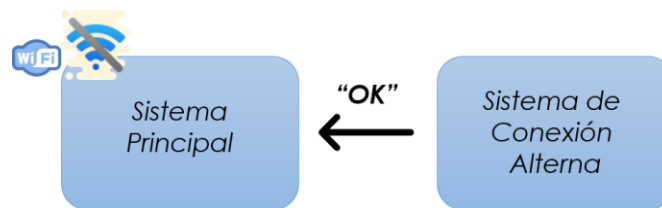


Fig 15. Confirmación de recepción
Fuente propia

3.2.1.2 Led C

Esta tarea brinda una forma de confirmación visual al usuario sobre el correcto estado de funcionamiento del microcontrolador, emitiendo una luz cada 5 segundos.

3.2.1.3 Led R

Se encarga únicamente de brindar una confirmación visual acerca la correcta recepción de la información en el módulo receptor LoRa.

3.2.1.4 Envío WiFi

Aquí se ejecuta el envío de datos provenientes del sistema de principal a través de WiFi, bajo protocolo TCP/IP, al servidor Ubidots. Todo dato proveniente del nodo de monitoreo que sea correcto es procesado por esta tarea y enviado al servidor. A su vez, esta tarea funciona en relación con las tareas de Vigilancia de Conexión y Receptor módulo LoRa.



*Fig 16. Envío de datos al servidor
Fuente propia*

Debido a que la condición principal para el envío de los datos al servidor es la ubicación de estos en la memoria interna del microcontrolador, primero se verifica la presencia de datos en esta y si se cumple se procede con el envío de la información. El envío de los paquetes de datos al servidor se da en un intervalo de tiempo de 5 segundos.

3.2.1.5 Vigilancia de conexión

Esta tarea se dedica exclusivamente a intentar reconectar la conexión a internet hasta que lo consiga. Se encuentra todo el tiempo vigilando la conexión a internet para mantener siempre la conexión con el servidor.

Para lograr revisar y fijar la conexión a internet la tarea hace de uso de un semáforo. Se toma el semáforo, se intenta reconectar hasta que lo consiga y se entrega cuando se conecte. Los semáforos son formas de interconectar tareas en programas que utilizan FreeRTOS. Con el semáforo se busca brindar accionamiento a las subtarefas que poseen las condiciones necesarias para lograr la reconexión a internet.

Las subtarear hacen uso de un controlador de eventos de WiFi, encargado de notificar al programa de lo que sucede con el driver WiFi. A su vez, el programa necesita de funciones que controlen dichos eventos notificados por el driver. Para establecer la conexión a internet la condición principal es lograr asignar una IP y con los eventos se indica o notifica al programa en qué etapa del proceso se encuentra en ese momento. En el semáforo implementado se hace uso de estos eventos con fin de usar sus notificaciones para indicar cuando tomar o entregar un semáforo.

3.3 Base de datos online-Ubidots

Es necesario el uso de una base de datos donde se almacenan los datos recolectados por el sistema de monitoreo, para posteriormente estos puedan ser procesados y utilizados para la creación del estudio que arrojará los valores y parámetros que determinarán la toma de decisiones en la ejecución de la limpieza de los módulos FV. La base de datos implementada para el almacenamiento y procesamiento de los datos se realiza utilizando la herramienta Ubidots.

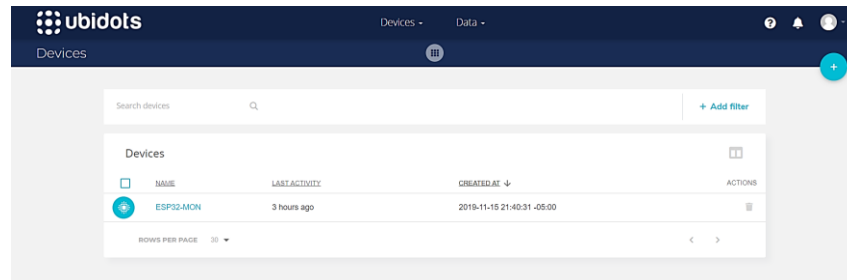
3.3.1 Ubidots

Es una plataforma e interfaz de almacenamiento y visualización de datos que opera de forma gratuita y no gratuita; empleada para proyectos y/o investigaciones educativas y profesionales (industriales) que conllevan recolección, manejo y organización de datos. Además, entrega soluciones de IoT para monitoreo, control y automatización remota de procesos en diferentes áreas del conocimiento, básicamente donde exista la posibilidad de implementar IoT [22].

3.3.2 Funcionamiento de Ubidots

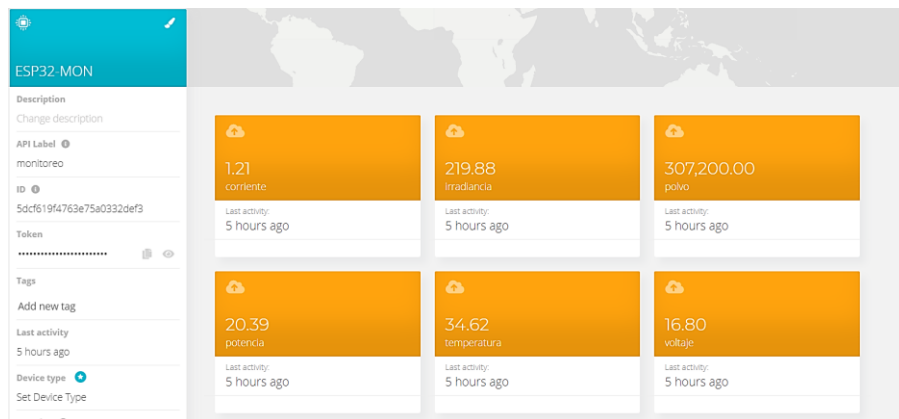
Ubidots trabaja bajo diversos protocolos, lo que la convierte en una plataforma inherente al dispositivo hardware con el que se esté trabajando. Para la recepción de datos en la plataforma, cuenta

con una interfaz llamada “Devices” donde se muestran los dispositivos que se encuentren conectados a Ubidots, cada dispositivo debe ser creado con un usuario.



*Fig 17. Entorno "Devices" Ubidots
Fuente propia*

A este dispositivo son anexadas los parámetros/variables a monitorear por los sensores; los cuales son voltaje, corriente, potencia, temperatura, irradiancia y polvo. Cuando un dispositivo actualiza el valor que capta un sensor en una de las variables creadas, se crea un punto de datos. Estos puntos de datos son almacenados con su tiempo o marca de tiempo en el cual es recibido.



*Fig 18. Variables monitoreadas
Fuente propia*

Cada punto almacenado está compuesto por una misma estructura que proporcionan, y organizan la información brindada por los sensores [22].

punto = {timestamp, value, context}

- *Timestamp*: Hace referencia al tiempo Unix (sistema de descripción de instantes de tiempo más usado en sistemas operativo, brinda cantidad de segundos transcurridos desde la fecha 1 de enero de 1970 por la medianoche) en milisegundos, en otras palabras, es el número de milisegundos entre la fecha actual de recepción del dato y la época Unix. Su presencia en la estructura no es obligatoria, pero en caso de no ser especificado, los servidores de Ubidots brindan una hora y fecha de recepción.
- *Context*: Utilizado mayormente para especificar las coordenadas de los dispositivos GPS (latitud y longitud). Además, permite almacenar datos tipo cadena (char). No es obligatorio su escritura en la estructura del punto.
- *Value*: Es el valor numérico captado por los sensores. La plataforma brinda capacidad hasta un máximo de 16 números de longitud y es de tipo flotante.

Estos puntos que contienen la información de cada uno de los datos enviados al servidor en conjunto en una trama, cuya estructura se muestra más adelante. El envío de datos a través de la trama proporciona la capacidad de lograr el envío de múltiples valores a diferentes variables.

3.3.3 Protocolo TCP/UDP

Ubidots cuenta con tres protocolos de comunicación para la transmisión de la información: HTTP, MQTT y TCP/UDP. El protocolo implementado para la comunicación tanto del sistema de principal de monitoreo como la del sistema de conexión inalámbrica para el envío de datos al servidor Ubidots, es el protocolo TCP/UDP.

TCP se encuentra orientado a la conexión, razón por la cual utiliza métodos de confirmación como medio para garantizar la correcta recepción de los datos por parte del destinatario. Este protocolo posee su principal gran ventaja en el tamaño del paquete de mensaje, con respecto a MQTT, pero no a HTTP, a consecuencia de que HTTP implementa TCP como capa de transporte de datos.

Para la autenticación con el protocolo TCP, Ubidots hace uso del puerto 9012 para URL según el tipo de cuenta, educativa o industrial. La cuenta utilizada, para este caso, es Industrial.

Tabla 7. URL de autenticación.

Fuente: <https://ubidots.com/docs/hw/#tcp--udp>

Tipo de Cuenta	URL
Educativa	things.ubidots.com
Industrial	industrial.api.ubidots.com

Sin embargo, se necesita de un token para permitir enviar datos al servidor Ubidots a través del bróker TCP. Para obtener el token, se procede desde las credenciales de API, que se encuentran en la pestaña del perfil de la cuenta.

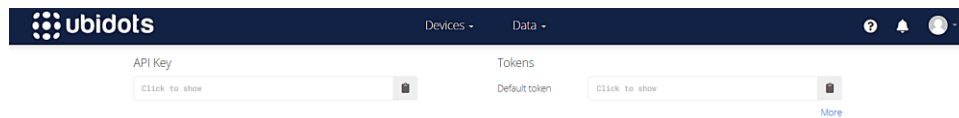


Fig 19. Obtener token

Fuente: https://es.banggood.com/GY-49-MAX44009-Digital-Optical-Intensity-Flow-Sensor-Module-with-I2C-Interface-p-1416438.html?cur_warehouse=CN

3.3.4 Envío de datos

El envío de datos al servidor está establecido por una estructura predefinida, con el fin de lograr comprender el contenido de los paquetes TCP. La estructura está definida de la siguiente forma:

```
{USER_AGENT}|POST|{TOKEN}|{DEVICE_LABEL}:{DEVICE_NAME}@{GLOBAL_TIMESTAMP}=>{VARIABLE_LABEL}:{VALUE}${CONTEXT_KEY_1}={CONTEXT_VALUE}${CONTEXT_KEY_2}={CONTEXT_VALUE}@{VARIABLE_TIMESTAMP}|end
```

Cada parámetro de la estructura expone las siguientes características [22]:

- *{USER_AGENT}*: Es un parámetro de carácter obligatorio, donde se encuentra contenida una cadena que identifica el tipo de aplicación, sistema operativo, versión o proveedor de software del agente de usuario de software solicitante.
- *{TOKEN}*: Lugar donde se especifica el token obtenido anteriormente.

- *{DEVICE_LABEL}*: Parámetro de carácter obligatorio. Permite especificar la etiqueta del dispositivo para la publicación de los valores de las variables. En caso de no ser especificada, Ubidots creará una.
- *{DEVICE_NAME}*: Parámetro de carácter opcional. Aquí se especifica el nombre del dispositivo donde se publican los valores. En caso donde no se configure el nombre, Ubidots asumirá el nombre del dispositivo para publicar como el nombre de la etiqueta del dispositivo. Generalmente, es usado para mostrar un nombre descriptivo en los usuarios finales.
- *{GLOBAL_TIMESTAMP}*: Parámetro de carácter opcional. Lugar donde se especifica el tiempo Unix, mencionado anteriormente. Si el parámetro es especificado se debe hacer en milisegundos y todos los valores de las variables, sin *timestamp*, tomará dicho valor. En caso de que no sea especificado este parámetro, Ubidots asignará automáticamente un timestamp de tiempo real en UTC automáticamente.
- *{VARIABLE_LABEL}*: Parámetro de carácter obligatorio. Aquí se especifica la etiqueta variable o nombre de la variable que almacenará el valor o dato. En caso de no ser especificado, el propio Ubidots creará un nombre para esta.
- *{VALUE}*: Parámetro de carácter obligatorio. Se utiliza para especificar el valor del punto o valor de la variable.
- *{CONTEX_KEY}*: Parámetro de carácter opcional. Permite agregar una o varias “*context key*” o claves de contexto. En caso en agregar más de una se procede a separarlas con un ‘\$’ (char).
- *{CONTEXT_VALUE}*: Parámetro especificado solo si se especifica el parámetro anterior a este. Este posee el valor del *context key*.
- *{VARIABLE_TIMESTAMP}*: Parámetro de carácter opcional. Este parámetro especifica la marca o sello del tiempo Unix. Esta marca de tiempo tiene precedencia entre el parámetro anterior *global_timestamp*. Igualmente, el tiempo debe estar determinado en milisegundos; en caso de no ser especificado el parámetro, Ubidots asignará un tiempo con la marca de tiempo real en UTC.

La trama para el envío de datos del sistema de monitoreo o el sistema de conexión alterna a Ubidots está establecida de la siguiente forma:

```
ESP32-MON|POST|A1E-
CdFYC8ufokkaHSWSzOZWlIxy2DEpRS|monitoreo=>Temperatura:%.2f,Corriente:%.2f,voltaje:
%.2f,Potencia:%.2f,Polvo:%s$hora=%d:%d:%d$fecha=%s|end
```


Luego de realizado el envío de los datos, Ubidots genera una respuesta para el caso en que la solicitud, la estructura enviada, es correcta. En caso de ser correcta la solicitud, el servidor responderá 'OK'. Si se encuentra una anomalía en la solicitud enviada la respuesta por parte del servidor será 'ERROR'.

3.4 Sistema electromecánico

El sistema electromecánico es el encargado de llevar a cabo la limpieza del módulo FV. Está compuesto por un chasis oruga, motores, una pequeña motobomba y una serie de sensores encargados de obtener datos relevantes a la hora de no permitir la caída del chasis. La limpieza se realiza a través de una plumilla limpiaparabrisas (de automóvil), que está acompañada de dos boquillas o aspersores limpiaparabrisas que traen el agua de una bomba ubicada a un costado del módulo FV.

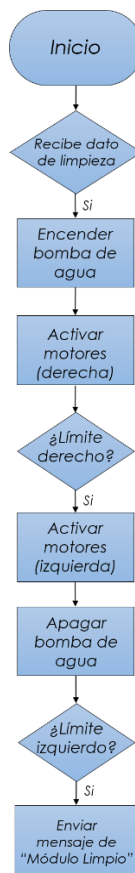


Fig 20. Diagrama de bloques del Sistema Electromecánico
Fuente propia

3.4.1 Chasis oruga

Para la base del robot se hizo uso del Chasis Oruga Aluminio 4, Fig 21. Sobre esta estructura se encontrará ubicado el módulo que controla todo el sistema electromecánico.

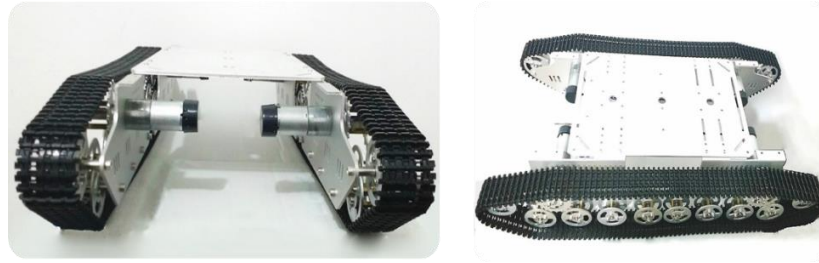


Fig 21. Chasis oruga

Fuente: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/robotica/robot/chassis/chasis-oruga-aluminio-4-carro-chassis-chasis-tanque-tank-plataforma-robotica-chasis-oruga-met%C3%A1lico-rob%C3%B3tico-detail>

3.4.2 Puente H BTES7960

El puente H brinda el control de los motores, encargándose de ejecutar el accionamiento del sentido o direccionamiento del movimiento. El chasis cuenta con una adaptación de cuatro motores; sin embargo, se hace uso solamente de un puente H, debido a que solo se quiere brindar movimiento en un eje; izquierda y derecha. Este puente H cuenta con un protector contra sobre corriente y sobrecalentamiento. A su vez, posee un aislador que separa la parte de control con la parte de potencia del circuito.



Fig 22. Puente H BTS7960

Fuente: <https://www.rcextremo.co/producto/duino>

Tabla 8. Especificaciones y características puente H.
Fuente propia.

Especificaciones	Valores
Voltaje de Operación	5,5 – 27V
Corriente Máxima	43A
Frecuencia Máxima de Operación	25kHz
Corriente en Reposo	7 μ A

3.4.3 Sensor de ultrasonido HAC-SR04

El sensor de ultrasonido o distancia es utilizado para establecer los límites izquierdo y derecho, hasta donde llegará el movimiento del robot, evitando la caída de este del módulo FV. Estos límites son modificables, en caso de requerirlo. Este sensor hace uso de pulsos de ultrasonido para la detección de obstáculos a cierto rango de distancia que puede ser configurable. A su vez, este sensor posee un bajo costo, una gran precisión y un bajo consumo.



Fig 23. Sensor Ultrasonido HC-SR04

Fuente: <https://www.rcextremo.co/producto/modulo-ranging-detector-modulo-ultrasonico-hc-sr04>

Tabla 9. Especificaciones y características sensor ultrasonido HC-SR04
Fuente propia.

Especificaciones	Valores
Voltaje de Alimentación	5V
Corriente de Operación	1 mA
Frecuencia de Trabajo	40kHz
Precisión	3mm
Rango de Operación	2cm – 400cm

3.4.4 Bomba de agua

La bomba de agua utilizada es similar a la que se encuentra en los carros para llevar el agua del parabrisas cuando necesita ser limpiado. En el sistema de limpieza se encarga de llevar el agua hasta el módulo FV para iniciar la limpieza una vez esta sea solicitada.



Fig 24. Bomba de agua.

Fuente: https://www.vveninserin.com/index.php?main_page=product_info&products_id=139051

3.4.5 Construcción de piezas 3D

Se hizo necesario la creación de ciertas piezas en 3D, las cuales son adaptadas al chasis. Se realiza la construcción de cierto tipo de guardafangos, para cada lugar donde se encuentran los motores, con el objetivo de evitar que cualquier posible suciedad adquirida por las orugas al desplazarse por el módulo no llegase a la parte superior del chasis e interfiera con los sensores, como por ejemplo el de ultrasonido. También, se realizan piezas para la cámara, que funcionan como protección y soporte.



Fig 25. Impresora Ultimaker2+

Fuente: <https://www.mangologic.org/product-page/ultimaker-2-series>

Las piezas son impresas en la impresora 3D Ultimaker2, Fig 25. Los modelos para las piezas de la cámara son tomadas del sitio web llamado Thingiverse, que ofrece diseños creados por cualquier usuario. Mientras, las piezas utilizadas como guardafangos fueron creadas desde cero en el software FreeCad.

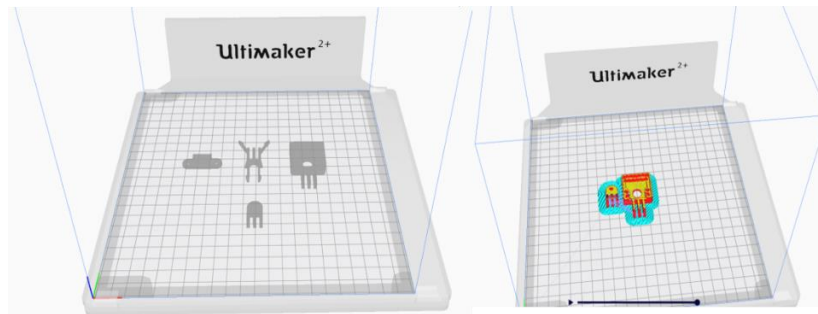


Fig 26. Piezas 3D
Fuente propia

3.5 Metodología

El experimento planteado como método a desarrollar consta de monitorear las variables medidas, cuando el panel se encuentra limpio (ausencia de polvo) y cuando se esparcen 50 gramos de polvo sobre 3 zonas o sectores establecidos del panel FV, Fig 27.

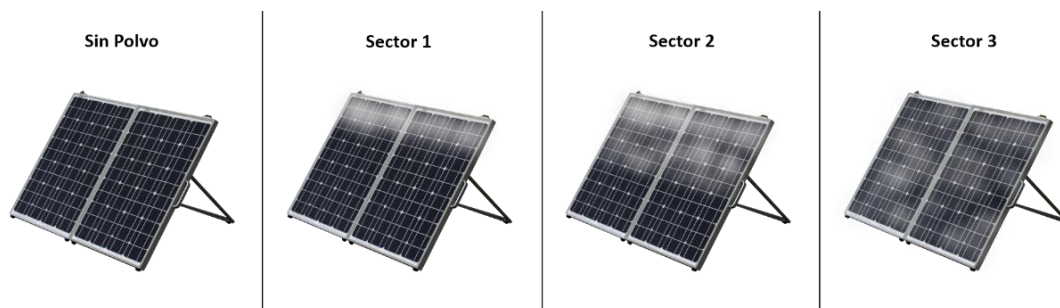


Fig 27. Sectores del panel FV
Fuente propia

- Para el caso de 0 gramos iniciales de polvo sobre la superficie del panel, se entiende que la superficie del panel se encuentra inicialmente limpia, y que en esta prueba no es necesario la división del panel en los sectores mencionados.
- Para el caso de 50 gramos, consiste en añadir la cantidad inicial de gramos de polvo sobre cada uno de los sectores establecidos del panel.

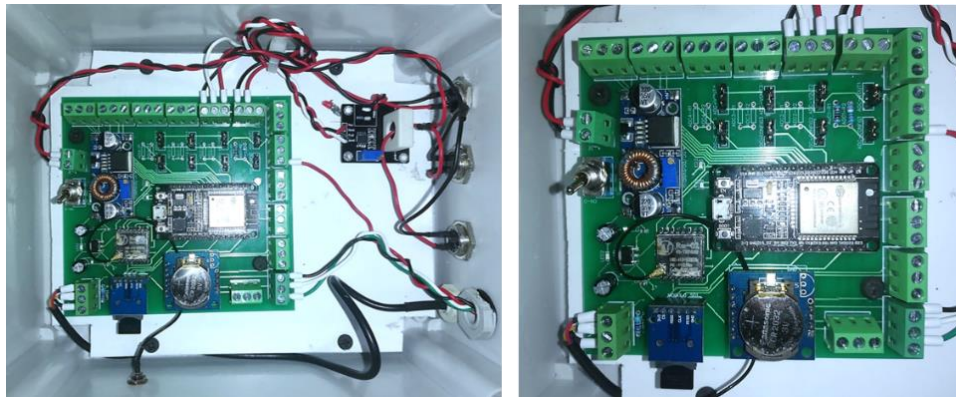
En cada uno de los casos expuestos para el experimento, la cantidad de muestras se toman en un intervalo de tiempo durante el día y se almacenan en la base de datos. Una vez realizados todos los casos, los datos almacenados serán los utilizados para encontrar la relación entre ellos que afecta el funcionamiento óptimo del panel FV.

La limpieza del panel FV se realiza a través del robot que recibirá la orden de limpieza del módulo principal y este activará la bomba de agua y los aspersores que se encargarán de rociar agua sobre la superficie del panel FV mientras este avanza sobre este. A su vez, una plumilla irá limpiando la suciedad depositada sobre dicha superficie.

4. Resultados

4.1 Sistema principal

Los elementos que hacen parte sistema principal del monitoreo, donde se encuentra todo el funcionamiento fundamental, como son los sensores y elementos necesarios para la correcta circuitería, se muestran en las Fig 28, Fig 29.



*Fig 28. PCB Sistema Principal
Fuente propia*



*Fig 29. Sistema Principal-Panel FV-Batería-Regulador
Fuente propia*

4.1.1 Calibración de sensores

4.1.1.1 Sensor de voltaje

Para digitalizar la señal proveniente del sensor de voltaje, se hace necesario agregar un ADC al momento de implementar en código la conversión de la señal analógica a digital, con el fin de lograr el manejo de esta señal en el microcontrolador. Así, establecido el valor de resistencias, según el voltaje al cual se quiere reducir para trabajar la señal dentro del microcontrolador, se realizan pruebas de medición de tensión con un multímetro, para establecer el valor real de la medición y compararlo con el valor que arroja el sensor en ese mismo tiempo (Tabla 12). También, se analizan que valores arroja el ADC para esos mismos tiempos; con el fin de lograr establecer una relación y calibrar el ADC para una respuesta más correcta y cercana a la de los valores entregados por el multímetro.

Se observa que a medida que el valor real de tensión, medida por el multímetro, los valores del ADC aumentan y los valores entregados por el sensor también crecen, pero, cada vez que el valor de tensión se eleva, los intervalos de valores entre el multímetro y el sensor se hacen más grandes, existe un desfase entre ellos. Esto implica un error porcentual del 13,01% en la medición de la tensión entre los valores mostrados por el multímetro y el entregado por el sensor establecido.

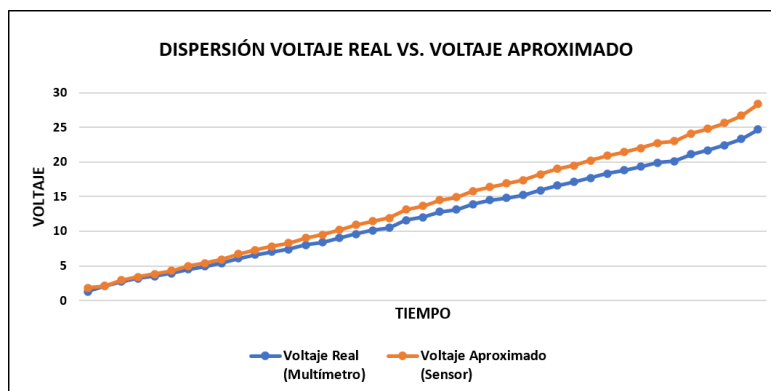


Fig 30. Dispersión valores de voltajes antes de calibrar.
Fuente propia.

El error porcentual es calculado a partir de la propia sumatoria de cada uno de los errores relativos de los datos presentados.

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$\text{Error porcentual} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{Error relativo}}{n} * 100\%$$

Por consiguiente, como método para reducir este error entre el valor verdadero (medición del multímetro) y el valor aproximado (medición del sensor), se crea una relación entre los valores de ADC captados y los valores obtenidos por la lectura del multímetro.

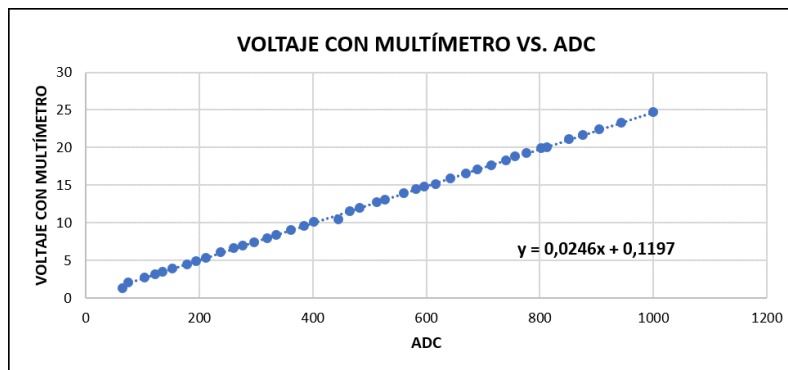


Fig 31. Voltaje con multímetro vs. ADC*
Fuente propia

En la Fig 31 se observa como el diagrama de dispersión evidencia la relación lineal entre los dos conjuntos de datos. Por lo tanto, aplicando una regresión lineal entre estas dos variables es posible obtener el factor de conversión, dado por la expresión

$$y = mx + b$$

donde, $m = 0,0246$ arroja dicho factor de conversión, que, para este caso, es el valor correcto del ADC, con el que el sensor es calibrado. Una vez establecido el valor del ADC, hallado a través de la regresión lineal, se realizan nuevas mediciones de la tensión obtenida por el multímetro vs. sensor de voltaje, Tabla 13.

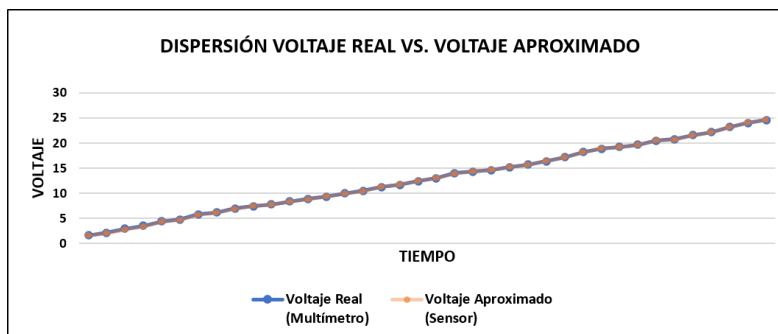


Fig 32. Dispersión de voltajes después de calibrados.
Fuente propia.

Se observa como ahora el valor verdadero es muy cercano al valor aproximado, con un error porcentual entre ellos del 0,0713%; igualmente calculado con el procedimiento mostrado anteriormente, con lo que se puede decir que el sensor se encuentra calibrado, con dicho porcentaje de error en la medición.

4.1.1.2 Sensor de corriente

El funcionamiento del sensor de corriente está ajustado a los valores que entrega el fabricante en su datasheet, presentes en la curva de calibración. Este se encuentra alimentado con 5,5V.

Como en su datasheet se exponen las relaciones que debe tener en cuanto a la relación del voltaje de este con el valor de corriente que entrega, se realizan pruebas con un multímetro para corroborar que los valores entregados por el sensor se encuentran en un rango permitido, rango entregado por el fabricante.

Sin embargo, los valores que entregaba esta relación no coincidían con una medición real de la corriente por medio de un multímetro, ni con valores dentro de lo espera. Debido a esto, se hizo necesario la calibración del sensor a través de encontrar una regresión que generase una aproximación tanto como sea posible a los valores esperados, dados por el fabricante, a través de una nueva ecuación con su respectivo factor de corrección, Tabla 14.

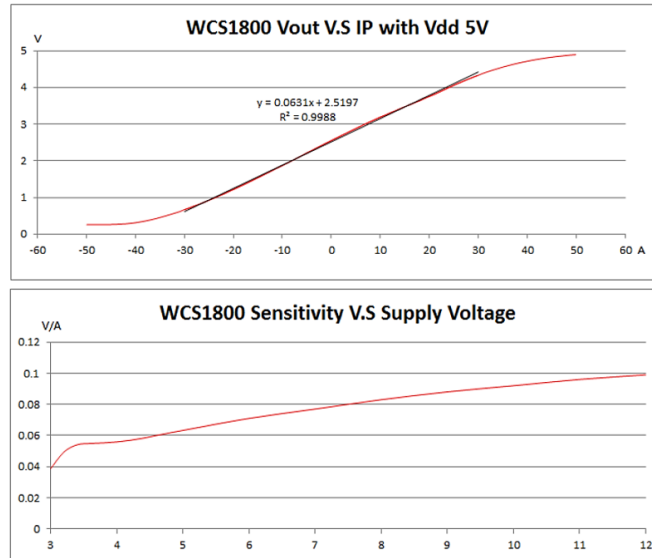


Fig 33. Curva calibración sensor WCS1800 a 5V

Fuente: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/714494/WINSON/WCS1800>

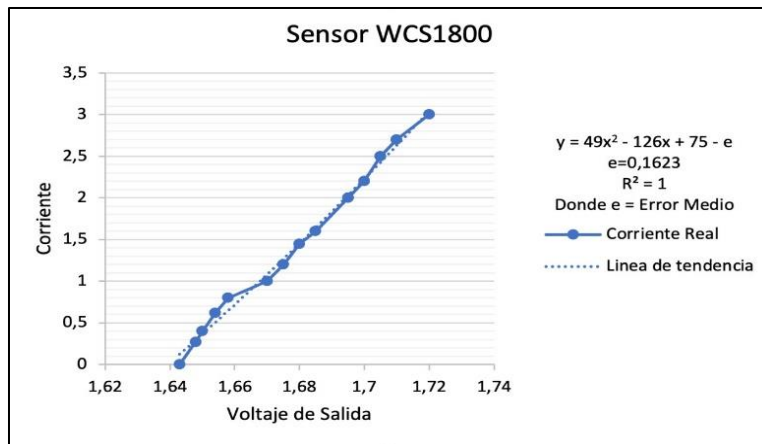


Fig 34. Relación corriente-voltaje.

Fuente propia.

4.1.1.3 Sensor de irradiancia MAX44009 GY-49

Como es un sensor de luz propiamente, en la revisión bibliográfica de la presente investigación se encontró un estudio donde se trabaja con este sensor y brindan como resultado un factor o constante de conversión que al multiplicarse con el valor de cantidades lux, que entrega el sensor, es posible determinar la irradiancia [19].



Fig 35. Medidor de energía solar

Fuente: <https://proconsamexico.com/productos/luxometros/solarimetro/solarimetro/>

Sin embargo, al momento de realizar pruebas con el factor de conversión mencionado implementado y comparar el resultado con los valores de irradiancia captados por un medidor de energía solar profesional, Fig 35, se observa que los valores arrojados por el sensor, con ese factor de conversión, están muy por debajo que los valores de irradiancia captados por el medidor profesional, Fig 36.



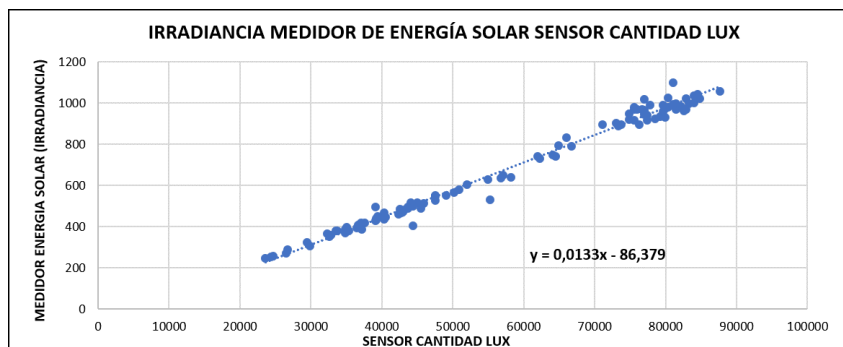
Fig 36. Medición, Medidor de energía solar vs. Sensor irradiancia sin calibrar
Fuente propia

Por consiguiente, se hizo necesario el establecer una nueva relación entre la cantidad de valores lux que entrega el sensor en sí, sin el factor de conversión implementado, y los valores arrojados por el medidor de energía solar, para lograr hallar un nuevo factor de conversión y llegar a una correcta calibración del sensor.

Para ello, se realiza la toma de 105 muestras entre los valores de cantidades de lux vs. la irradiancia captada por el medidor de energía solar en el mismo instante de tiempo. Los datos recopilados se observan en la Tabla 15. Obtenidos los datos, la relación entre las dos variables mencionadas se encuentra, inicialmente, a través de implementar un diagrama de dispersión de los datos el cual permite establecer una relación (comparar) entre dos conjuntos de datos, luego, observar si los datos a simple vista siguen un orden lineal y, por último, aplicar una línea de tendencia lineal que, a través de la ecuación de la pendiente dada, la cual está dada por,

$$y = mx + b$$

Lo cual arroja el factor de conversión (dado por el valor m) necesario para la calibración del sensor.

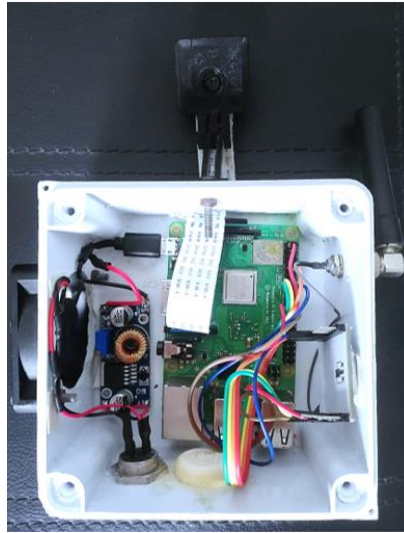


*Fig 37. Sensor de cantidad LUX vs. Irradiancia tomada por medidor de energía solar
Fuente propia*

En la Fig 37 se observa relación entre los dos conjuntos de valores expuestos al estudio. El factor de relación se establece en 0,0133, como es dado por la ecuación lineal.

4.1.1.4 Polvo

El módulo para la medición de polvo que consta de una Raspberry y una cámara, principalmente, estos se encuentran dentro de una pequeña caja independiente con el fin ubicarla, a través de un tubo, a cierta altura para obtener una foto completa del panel FV.



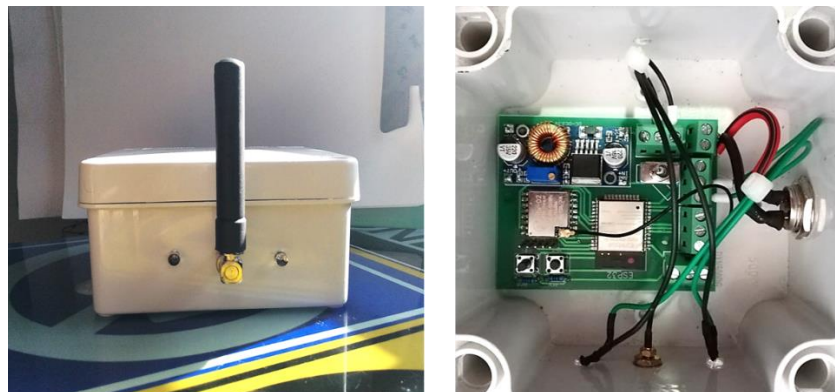
*Fig 38. Módulo de medición de polvo.
Fuente propia.*

El método propuesto para dicha medición está basado en procesamiento de imagen, como se estableció anteriormente. No obstante, con este método se presentaron inconvenientes a la hora de la captura de una imagen apta/adecuada para el procesamiento de esta. Realizadas las pruebas, una vez capturada la foto, se hizo evidente el inconveniente de que la imagen o foto resulta muy luminosa, con mucho brillo, debido al reflejo que causan los rayos del sol sobre la superficie de panel FV. Se intentó capturar una foto en diversos ángulos, con el fin de disminuir de cierta manera los estos reflejos, pero no fue posible.

Por consiguiente, al momento de realizar el procesamiento de imagen a la foto los resultados no son los esperados. Los brillos causados por el reflejo son muchos; inclusive después de aplicados diversos filtros a la imagen causando que los valores del procesamiento se vayan a los extremos. Es decir, como se aplicó la escala de grises al procesamiento de la imagen, los resultados arrojaban o demasiados pixeles blancos o demasiados pixeles negros sobre un 80% - 90% aproximadamente de la superficie del panel, aunque este estuviera completamente limpio.

4.2 Sistema de transmisión inalámbrica

Las PCB se diseñaron de doble capa por optimización de espacio y complejidad de la placa. Además, se encontraron errores de diseño y fue necesario modificarlas después de soldar los componentes.



*Fig 39. Nodo de conexión alterna.
Fuente propia.*

En las pruebas realizadas, lo primero en verificarse es la recepción de los datos correctamente al nodo del sistema de conexión alterna, y que puedan ser filtrados. Se observa como los datos se reciben correctamente en el nodo y sin interferencia alguna. También, se aprecian los niveles de RSSI, potencia de señal recibida, entre -31 y -37, a distancias de un metro; valores aceptables para la distancia establecida.

```
Task
Task
Received: ESP32-MON|POST|BFF-7DfuM0taRHS0g1Hza18H7JLuTV5Iw|monitoreo->Temperatura:21.56,Corriente:8.26,voltaje:0.40,Potencia:3.33,Irradiancia:0.06,Polvo:$hora=14:3:31$fecha=2020-12-13|end
rssi = -32 and rs=0.500000
Enviando respuesta
Creando SD Virtual
Memoria Virtual Creada
Error al crear el archivo
Task
```

*Fig 40. Datos recibidos por nodo alterno.
Fuente propia.*

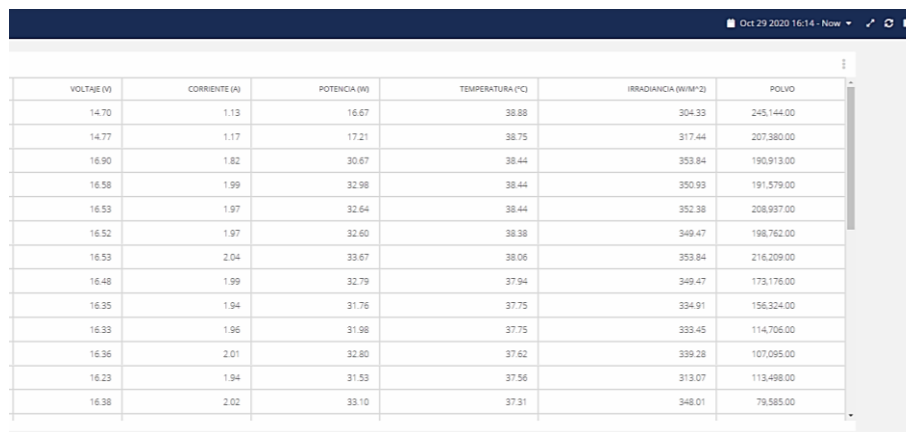
Según las especificaciones del proveedor del módulo LoRa, puede alcanzar distancias hasta de 2,5 km en zonas urbanas y hasta 5 km en zonas rurales, esto, siempre y cuando cumpla con condiciones específicas de configuración, altura y antena adecuada.

Para este sistema se utilizó una antena de 433 MHz con ganancia de 2.4 dBi, una configuración como lo recomienda el fabricante, pero no con suficiente altura, por ello, el alcance no supera, aproximadamente 300 metros con línea de vista [23]. Una vez obtenido y verificado los datos, se cargan y son enviados al servidor de Ubidots.

4.3 Base de datos online-Ubidots

La base de datos encargada de almacenar los datos de las variables medidas recibe el paquete de datos una vez el sistema principal o sistema alternativo, en su defecto, cuente con conexión a internet para lograr enviar los datos a la base de datos online.

Luego de ser recibidos, el paquete de datos de las variables es almacenado en la base de datos con la hora y fecha en la cual fueron captados por los sensores. Así, en caso de ocurrir una falla de conexión con internet, los paquetes de datos serán registrados, al reestablecerse la conexión, con la hora y fecha en que fueron medidos. Además, con esta forma de registrar los datos se busca el monitoreo de los datos en tiempo real.

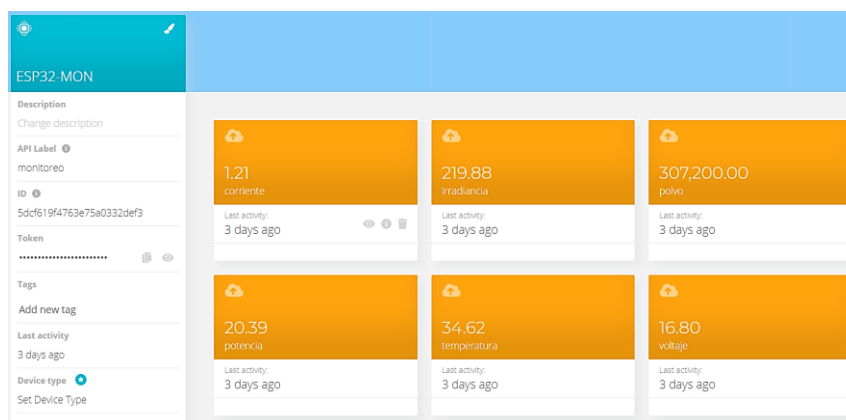


VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA (W)	TEMPERATURA (°C)	IRRADIANCIA (W/M²)	POLVO
14.70	1.13	16.67	38.88	304.33	245,144.00
14.77	1.17	17.21	38.75	317.44	207,380.00
16.90	1.82	30.67	38.44	353.84	190,913.00
16.58	1.99	32.98	38.44	350.93	191,579.00
16.53	1.97	32.64	38.44	352.38	208,937.00
16.52	1.97	32.60	38.38	349.47	198,762.00
16.53	2.04	33.67	38.06	353.84	216,209.00
16.48	1.99	32.79	37.94	349.47	173,176.00
16.35	1.94	31.76	37.75	334.91	156,324.00
16.33	1.96	31.98	37.75	333.45	114,706.00
16.36	2.01	32.80	37.62	339.28	107,095.00
16.23	1.94	31.53	37.56	313.07	113,498.00
16.38	2.02	33.10	37.31	348.01	79,585.00

*Fig 41. Base de datos implementada-Ubidots
Fuente propia*

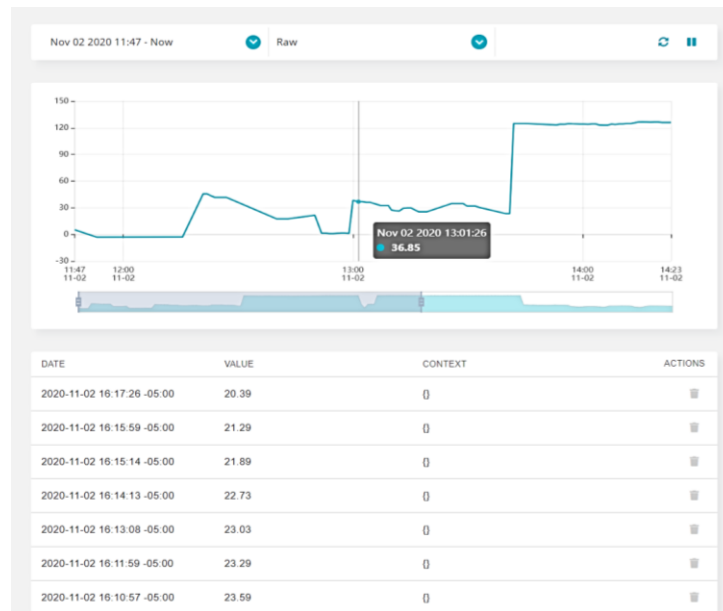
En la Fig 41, se observan los datos almacenados de cada una de sus variables con fecha y hora en la cual son captados por los sensores, en una tabla de datos. La tabla expuesta es una de múltiples

opciones que brinda Ubidots para dar una representación visual; mejor a la que brinda al momento de agregar un dispositivo y variables de este a la plataforma de la base de datos. La Fig 42 muestra en su tablero de datos (dashboard), las variables registradas y almacenadas en la base de datos.



*Fig 42. Variables medidas-Ubidots
Fuente propia*

Cada variable cuenta con una tabla individual con los datos, donde, a su vez se puede observar una gráfica del comportamiento en el tiempo. En la Fig 43 se muestra el registro individual en tiempo real de los datos de la variable Potencia y su gráfica de comportamiento en el tiempo. También, es posible adecuar y elegir intervalos del tiempo en cada uno de estos registros individuales que tiene cada variable, con el fin de lograr analizar mejor el comportamiento de estas si se es necesario.



*Fig 43. Variable de potencia
Fuente propia*

4.4 Sistema electromecánico

El circuito encargado de todo el manejo del robot se ubica en una caja independiente, la cual, estará ubicada sobre la estructura principal de robot, como se mostrará más adelante.



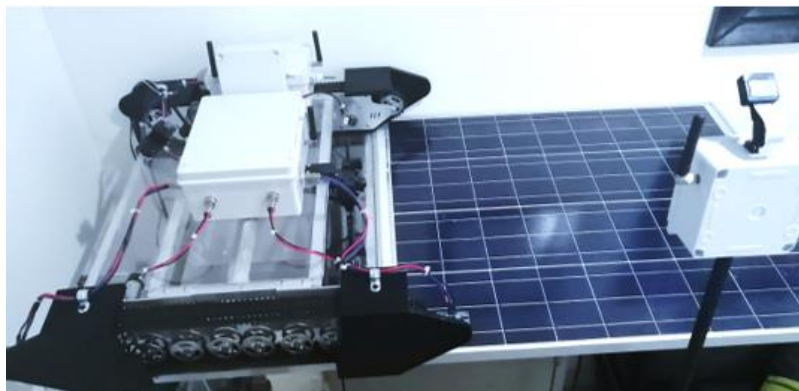
*Fig 44. PCB circuito sistema electromecánico.
Fuente propia.*

Al momento del ensamble del chasis oruga se tuvo la necesidad de adaptarlo, en cuanto a dimensiones y anexar componentes. Referente a las dimensiones, el chasis fue ajustado al tamaño del módulo FV utilizado debido a que sus dimensiones originales sobrepasaban al módulo. Por otro lado, se agregaron motores con el fin de establecer dos ejes (delantero y trasero) y lograr controlar la velocidad con la que se mueve la oruga. Además, se anexaron al chasis unas piezas impresas en 3D; se hizo uso de un puente H y sensores de distancia.

Una vez ensamblado el chasis con sus respectivos motores e instalados tanto los sensores de distancia como la plumilla y aspersores, el sistema electromecánico resulta como se observa a continuación.



*Fig 45. Robot.
Fuente propia.*



*Fig 46. Robot.
Fuente propia.*

En la base de la estructura que sostiene el módulo FV, a un costado, es añadida una extensión de un tipo de acrílico, como objeto de tener un lugar donde ubicar el robot cuando no se encuentre limpiando; puesto que si este permanece sobre la superficie del módulo FV se verá afectada la captación de energía solar y también buscando evitar la interacción del usuario cambiando de ubicación el robot. Además, es agregado un segmento de tubo a la estructura que soporta al módulo FV, encargado de ubicar la cámara a una altura determinada necesaria para capturar una imagen adecuada de la superficie del panel.

4.5 Resultados generales del sistema de automatización de limpieza

Expuesto el funcionamiento de cada uno de los módulos o sistemas por separado, el sistema completo unido, desarrollando la metodología planteada, presenta los siguientes resultados.

Como ya se observó, se divide el panel FV en tres sectores, con 50 gramos iniciales de polvo en cada uno de estos sectores y, también se estableció una prueba donde el panel FV se encontrará totalmente limpio, es decir, 0 gramos iniciales sobre su superficie.



*Fig 47. Sectores panel FV.
Fuente propia.*



*Fig 48. Sectores panel FV.
Fuente propia.*



*Fig 49. Sectores panel FV.
Fuente propia.*

En los escenarios de presencia de cantidad de polvo sobre la superficie del panel se analiza cada uno de los rendimientos de las variables, y se realiza una comparación de estos con respecto al rendimiento del panel sin gramos de polvo alguno sobre su superficie (sin suciedad alguna).

- Voltaje**

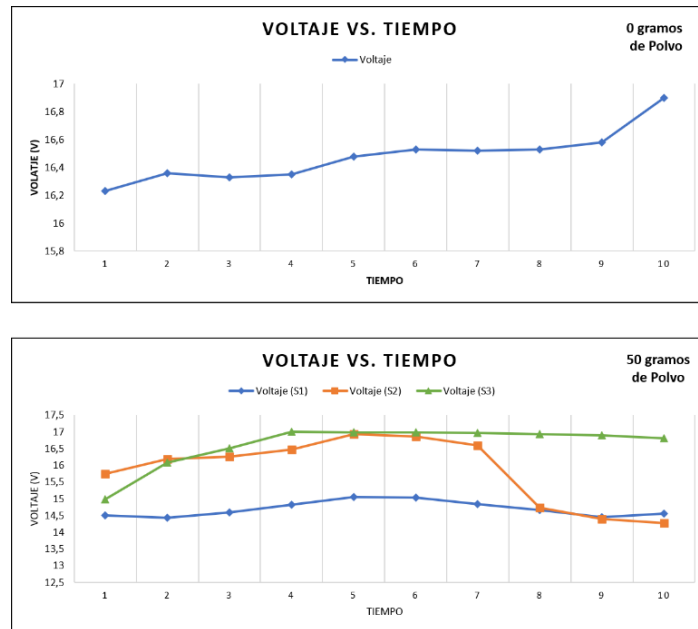


Fig 50. Voltaje.
Fuente propia.

- Corriente**

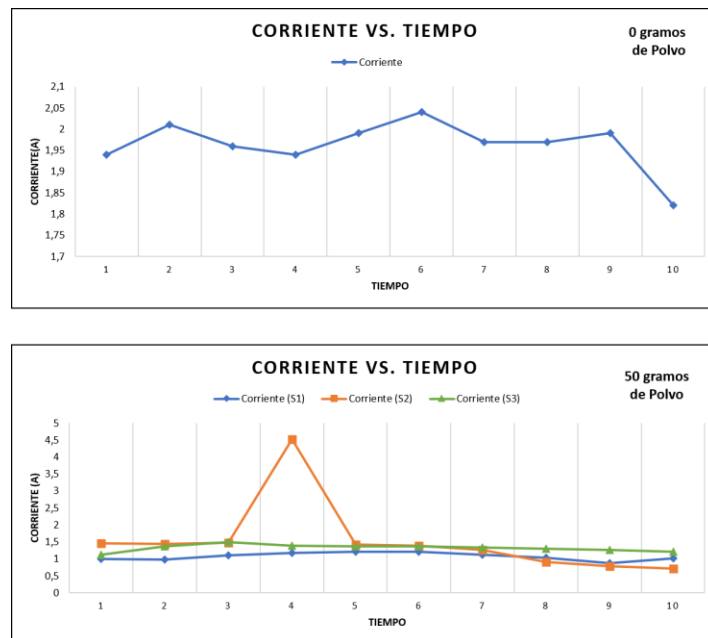


Fig 51. Corriente.
Fuente propia.

- Potencia**

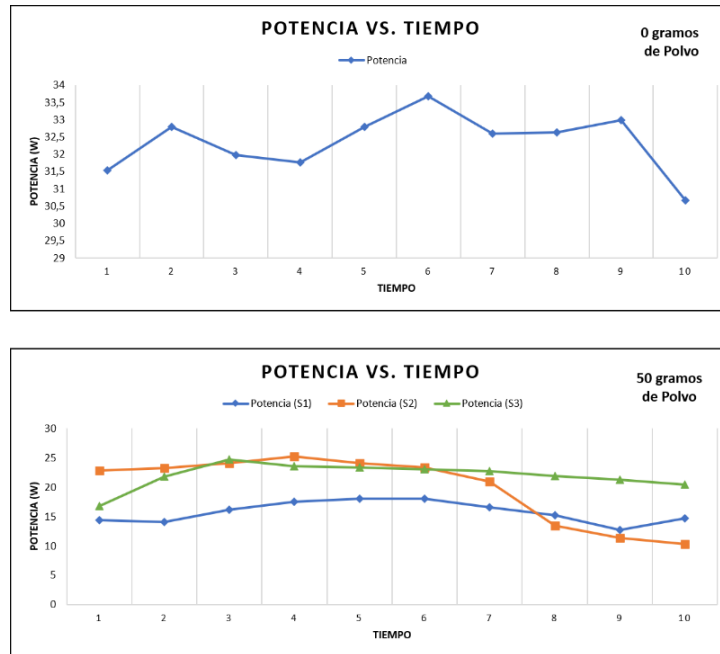


Fig 52. Potencia.
Fuente propia.

- Temperatura**

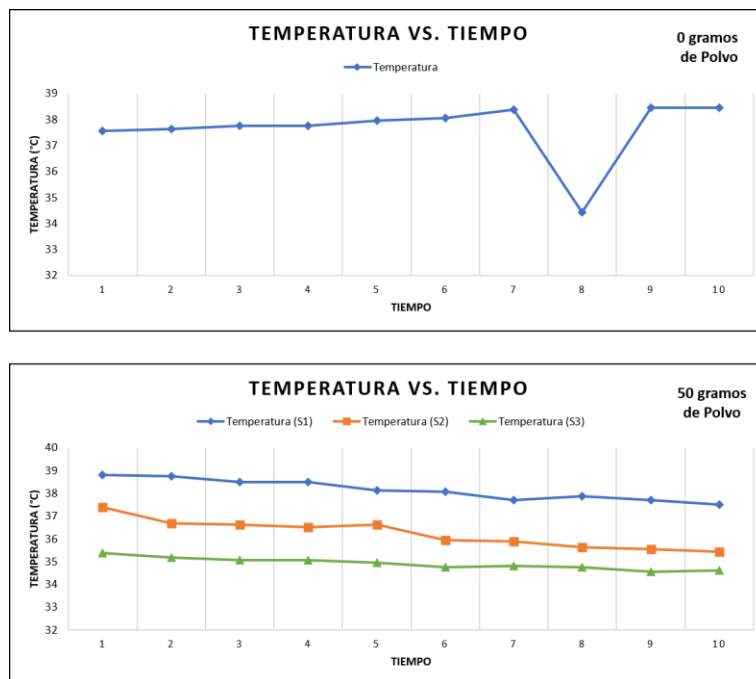


Fig 53. Temperatura.
Fuente propia.

■ Irradiancia

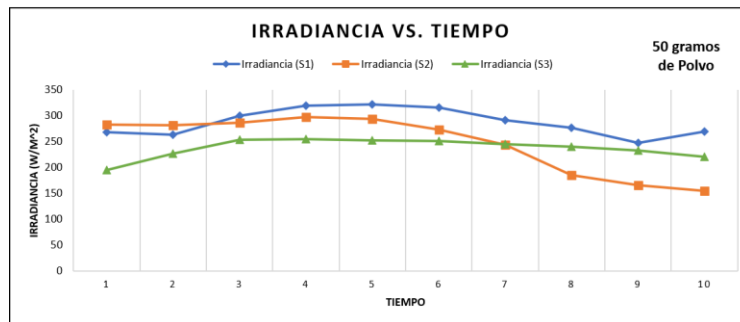
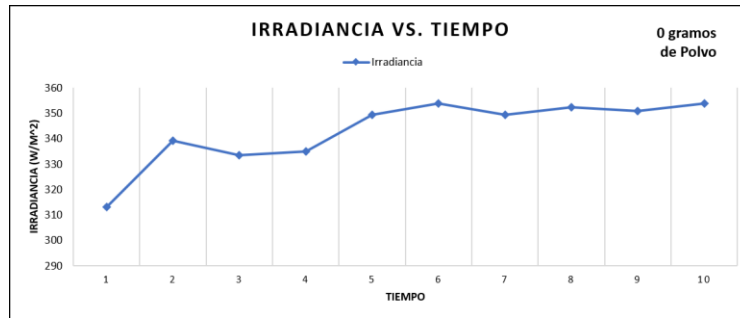


Fig 54. Irradiancia.
Fuente propia.

■ Polvo

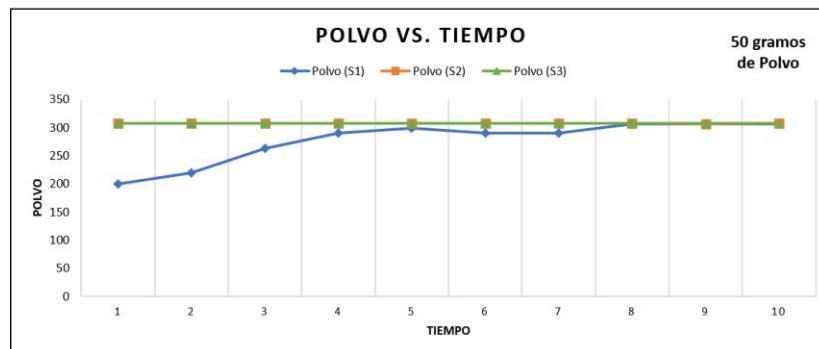
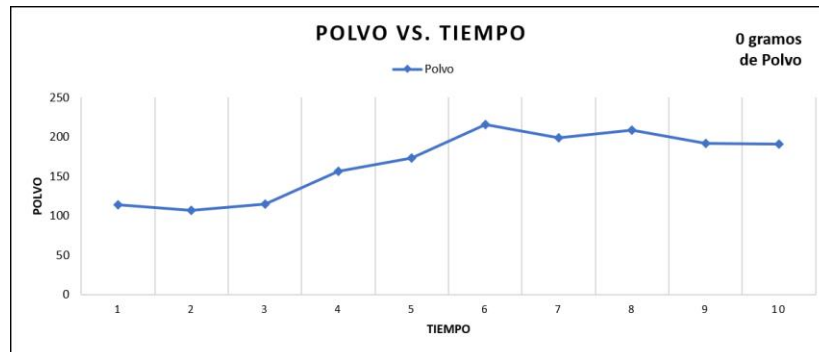


Fig 55. Polvo.
Fuente propia.

Tomando 2 puntos como datos de prueba para analizar cómo se comporta la potencia en todos los sectores propuestos antes de activar el sistema electromecánico, se obtienen los datos de la Tabla 10.

*Tabla 10. Comportamiento variable potencia antes de activar el sistema de limpieza.
Fuente propia.*

	Sin suciedad	Sector 1 (50 gramos)	Sector 2 (50 gramos)	Sector 3 (50 gramos)
1	32,64 W	15,23 W	13,45 W	21,89 W
2	32,98 W	12,73 W	11,34 W	21,29 W

Se observó que los niveles de potencia disminuyeron claramente a causa de la suciedad presente sobre la superficie del panel FV.

Luego de observar el comportamiento que causó la suciedad en la potencial del módulo FV, se procedió con una primera activación del sistema electromecánico e igualmente se tomaron 2 puntos como representación los datos obtenidos, Tabla 11.

*Tabla 11. Comportamiento variable potencia luego de 1ra activación del sistema de limpieza.
Fuente propia*

	Sin suciedad	Sector 1 (50 gramos)	Sector 2 (50 gramos)	Sector 3 (50 gramos)
1	31,98 W	16,10 W	24,21 W	24,74 W
2	31,76 W	17,51 W	25,20 W	23,59 W

Posterior a la activación del sistema electromecánico, se llegó a concluir que luego de un primer intento o activación de la limpieza, la superficie del panel no se encontraba totalmente limpia. Los valores de la potencia mejoraron, pero aún era necesario realizar activar nuevamente el sistema electromecánico para lograr una limpieza aceptable. La superficie del panel FV llega a estar casi totalmente limpia, como se dijo, una limpieza aceptable, luego de tres activaciones del sistema.



*Fig 56. Panel FV antes y durante limpieza.
Fuente propia.*



*Fig 57. Panel FV luego de 3ra limpieza.
Fuente propia.*

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos y expuestos en el anterior escrito brindan una certeza de cómo afecta la presencia de suciedad sobre la superficie del panel en variables influyentes para su óptimo desempeño, como lo son el voltaje, corriente, potencia, temperatura e irradiancia. En el experimento presentado se utilizaron de 50 gramos de polvo (arena) para simular una cantidad de suciedad acumulada sobre la superficie del panel FV. A su vez, fraccionar el depósito de polvo en tres sectores específicos de la superficie, permite tener una idea más clara de en qué lugares de la superficie del panel causa un menor rendimiento la ubicación o depósito del polvo.

Para el sensor de temperatura utilizado, se constató que no brinda lecturas correctas si se encuentra expuesto directamente a los rayos del sol puesto que los valores entregados por este comienzan a desfasarse luego de un tiempo. Es óptimo ubicarlo en una zona cerca del módulo FV donde no se encuentre directamente expuesto a los rayos del sol.

Por otro lado, el sensor de irradiancia, de luz ciertamente, en la investigación previamente realizada se expone el uso de una constante que convierte los valores lux brindados por el sensor en el valor de irradiancia, pero al momento de comparar estos valores con los entregados con un medidor de energía solar, se apreció que el valor de dicha constante genera mediciones errores, motivo por el cual se realizó una posterior recalibración al sensor.

Además, en la metodología planteada para lograr un tipo de medición de la cantidad de polvo existente sobre la superficie del panel FV, no resultó exitosa. El método de procesamiento de imagen arrojó problemas en el momento de lograr capturar una foto de la superficie de panel adecuada para su posterior procesamiento. Los rayos del sol al reflejarse con la superficie del panel causan muchos brillos en la imagen captada, haciendo que esta se vea muy luminosa, lo cual conlleva que al aplicarle los filtros de escala de grises los valores tienden a los extremos; es decir, si se toman los píxeles blancos como suciedad, el resultado arroja entre un 80% y 90% de suciedad en el panel, incluso estando este totalmente limpio; motivo por el cual, este método, aplicado de dicha manera, no lo consideramos efectivo.

Por último, una vez el robot ha recibido la orden para iniciar la limpieza del panel, se comprobó que a la potencia entregada por el módulo FV disminuye, con 50 gramos de suciedad la superficie, es necesario realizar alrededor 3 limpiezas, o tres accionamientos del sistema electromecánico, como mínimo, para obtener una limpieza adecuada del panel FV y su potencia total entregada por este sea muy cercana a las mediciones realizadas cuando este se encontraba completamente limpio.

6. Anexo: Datos calibración sensor voltaje

Multímetro (V)	Voltaje Sensor (V)	ADC	Error absoluto
1,3	1,8	64	0,38461538
2,1	2,1	75	0
2,7	2,9	103	0,07407407
3,2	3,4	123	0,0625
3,5	3,8	136	0,08571429
3,9	4,3	153	0,1025641
4,5	5	178	0,11111111
4,9	5,4	194	0,10204082
5,4	5,9	211	0,09259259
6,1	6,7	238	0,09836066
6,6	7,3	260	0,10606061
7	7,8	277	0,11428571
7,4	8,3	296	0,12162162
8	9	320	0,125
8,4	9,5	336	0,13095238
9	10,2	361	0,13333333
9,6	10,9	385	0,13541667
10,1	11,44	402	0,13267327
10,5	11,9	445	0,13333333
11,6	13,1	465	0,12931034
12	13,65	482	0,1375
12,8	14,5	513	0,1328125
13,1	14,9	527	0,13740458
13,9	15,8	560	0,13669065
14,5	16,4	582	0,13103448
14,8	16,9	597	0,14189189
15,2	17,4	617	0,14473684
15,9	18,2	643	0,14465409
16,6	19	670	0,14457831

17,1	19,5	690	0,14035088
17,7	20,2	714	0,14124294
18,3	20,9	741	0,1420765
18,8	21,4	757	0,13829787
19,3	22	777	0,13989637
19,9	22,72	803	0,14170854
20,1	23	812	0,14427861
21,1	24,1	851	0,14218009
21,7	24,8	876	0,14285714
22,4	25,6	905	0,14285714
23,3	26,7	944	0,14592275
24,7	28,33	1000	0,14696356

*Tabla 12. Datos-calibración sensor de voltaje.
Fuente propia*

7. Anexo: Datos sensor de voltaje calibrado

Multímetro (V)	Voltaje Sensor (V)	Error absoluto
1,6	1,6	0
2,1	2	0,04761905
2,9	2,8	0,03448276
3,5	3,4	0,02857143
4,4	4,4	0
4,8	4,7	0,02083333
5,8	5,7	0,01724138
6,2	6,1	0,01612903
7	6,9	0,01428571
7,4	7,4	0
7,8	7,7	0,01282051
8,4	8,3	0,01190476
8,9	8,8	0,01123596
9,3	9,3	0
10	9,9	0,01
10,5	10,4	0,00952381
11,2	11,2	0
11,7	11,7	0
12,4	12,4	0
13	13	0
14	13,9	0,00714286
14,3	14,3	0
14,6	14,6	0
15,2	15,2	0
15,7	15,7	0
16,4	16,4	0
17,2	17,1	0,00581395
18,2	18,1	0,00549451
18,9	18,9	0

19,2	19,2	0
19,7	19,6	0,00507614
20,5	20,5	0
20,8	20,7	0,00480769
21,6	21,6	0
22,2	22,2	0
23,2	23,2	0
24	24,1	0,00416667
24,6	24,7	0,00406504

*Tabla 13. Datos sensor de voltaje calibrado.
Fuente propia*

8. Anexo: Datos calibración sensor de corriente

Voltaje (V)	Corriente Real (A)
1,643	0
1,648	0,27
1,65	0,4
1,654	0,62
1,658	0,8
1,67	1
1,675	1,2
1,68	1,45
1,685	1,6
1,695	2
1,7	2,2
1,705	2,5
1,71	2,7
1,72	3

*Tabla 14. Datos-calibración sensor de corriente.
Fuente propia*

9. Anexo: Datos calibración sensor de irradiancia

Sensor LUX	Medidor de Energía Solar
81100	1100
82944	1023
33730	378
32808	360
34836	385
40366	466
45895	512
32256	364
77045	1020
77045	960
77783	990
75571	970
75571	980
75939	970
76677	969
74833	950
77414	940
44974	516
39075	497
29491	324
26726	287
24698	257
23592	246
24330	252
26542	270
29859	306
34836	370
87657	1058
83312	996
81469	998

84049	1000
84787	1021
84524	1043
84049	1037
81469	970
77414	916
82206	982
81469	995
81100	994
82575	962
82944	970
80363	979
79257	935
79994	973
79626	991
78520	925
79626	960
79994	932
76308	896
64512	740
58245	640
71147	896
72990	904
47554	550
47554	547
61932	742
55296	531
50872	581
39075	430
40366	436
36495	392
35020	397
36679	408
37601	419

40550	446
49029	553
64880	794
80363	1025
77045	967
73359	890
74833	920
75571	917
77045	945
65986	833
42762	466
32624	350
35389	380
43683	490
54927	630
66723	790
56770	635
62300	730
45527	490
44421	405
44421	500
42577	484
51978	606
50135	566
39444	450
42946	470
44052	515
37061	411
33546	381
37177	387
37048	417
39260	433
39260	439
42393	462

43130	480
43683	495
47544	526
57139	649
64143	749
73722	896

*Tabla 15. Datos-calibración sensor de irradiancia.
Fuente propia*

10. Bibliografía

- [1] W. Liu, J. Tian, L. Chen, and Y. Guo, “Temporal and spatial characteristics of lead emissions from the lead-acid battery manufacturing industry in China,” *Environ. Pollut.*, vol. 220, 2017.
- [2] M. H. Cho *et al.*, “The effects of moisture contamination in the Li-O₂ battery,” *J. Power Sources*, vol. 268, 2014.
- [3] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, “Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel’s efficiency: Why and how,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016.
- [4] S. Brunner, T. Stahl, and K. Ghazi Wakili, “An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building façade,” *Energy Build.*, vol. 54, 2012.
- [5] J. M. Fernández, *Compendio de Energía Solar*, Mundi Pren. Madrid, 2008.
- [6] I. Hector and L. Gasquet, “Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica Manual Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos.”
- [7] L. M. Fernández-Ahumada, F. J. Casares, J. Ramírez-Faz, and R. López-Luque, “Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models,” *Sol. Energy*, vol. 150, 2017.
- [8] S. Soltani, A. Kasaeian, H. Sarrafha, and D. Wen, “An experimental investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system with nanofluid application,” *Sol. Energy*, vol. 155, 2017.
- [9] Q. Li, S. Zhao, M. Wang, Z. Zou, B. Wang, and Q. Chen, “An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm based on a PV module four-parameter model for higher efficiency,” *Appl. Energy*, vol. 195, 2017.
- [10] H. Kawamoto and T. Shibata, “Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels,” *J. Electrostat.*, vol. 73, 2015.
- [11] M. D. Kempe *et al.*, “Field testing of thermoplastic encapsulants in high-temperature installations,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 3, no. 6, 2015.
- [12] A. Syafiq, A. K. Pandey, N. N. Adzman, and N. A. Rahim, “Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels,” *Solar Energy*, vol. 162. 2018.
- [13] M. Abderrezek and M. Fathi, “Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels’

energy yield,” *Sol. Energy*, 2017.

- [14] M. Saidan, A. G. Albaali, E. Alasis, and J. K. Kaldellis, “Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment,” *Renew. Energy*, vol. 92, 2016.
- [15] A. Bai *et al.*, “Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, 2016.
- [16] S. Nižetić, D. Čoko, A. Yadav, and F. Grubišić-Čabo, “Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response,” *Energy Convers. Manag.*, 2016.
- [17] “Plan de Gobierno 2016-2020.” [Online]. Available: https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/RendicionCuentas/2017/Plan_de_Gobierno_2016-2020.pdf. [Accessed: 14-Nov-2020].
- [18] D. Ibrahim, “ μ RTOS: Simple multitasking with microcontrollers,” *Electron. World*, vol. 116, no. 1890, 2010.
- [19] K. Y. Chou, S. T. Yang, and Y. P. Chen, “Maximum power point tracking of photovoltaic system based on reinforcement learning,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 22, 2019.
- [20] “WCS1800 Hall Effect Base Linear Current Sensor.”
- [21] V. Chernov, J. Alander, and V. Bochko, “Integer-based accurate conversion between RGB and HSV color spaces,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 46, 2015.
- [22] “Ubidots Doc.” [Online]. Available: <https://ubidots.com/docs/hw/>. [Accessed: 14-Nov-2020].
- [23] N. H. Mahalin, H. S. Sharifah, S. K. Syed Yusof, N. Fisal, and R. A. Rashid, “RSSI measurements for enabling IEEE 802.15.4 coexistence with IEEE 802.11b/g,” in *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 2009.