



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

Facultad de Ingeniería  
y Ciencias  
Ingeniería Electrónica

# SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y COLOR PARA PLANTAS DE ARROZ (ORYZA SATIVA L)

**CRISTIAN DAVID ORTIZ CORTÉS  
EDISON SEBASTIAN ARTEAGA SEGOVIA**

TRABAJO DE GRADO

*Director:*

Luis Eduardo Tobón Llano

SANTIAGO DE CALI  
Abril 2021

Santiago de Cali 09/04/2021

Señores  
Pontificia Universidad Javeriana - Cali  
Dr. Hernán Camilo Rocha  
Decano  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Santiago de Cali

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz (*Oryza Sativa* L)”.

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

Atentamente,



---

Cristian David Ortiz Cortés



---

Edison Sebastian Arteaga Segovia

Santiago de Cali, 09/04/2021

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana Cali**

Dr. Hernán Camilo Rocha

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz (*Oryza Sativa* L)”, realizado por Cristian David Ortiz Cortés y Edison Sebastian Arteaga Segovia, estudiantes de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



---

Luis Eduardo Tobón Llano  
Director Trabajo de Grado



**Acta de Correcciones al Proyecto de Grado**  
**Ingeniería Electrónica**

**Fecha: 30 de abril del 2021**

**Autores: Edison Sebastian Arteaga**  
**Cristian David Ortiz Cortés**

**Nombre del Proyecto de Grado: Sistema de Monitoreo de Temperatura y Color para Planta de Arroz (Oryza Sativa L)**

**Director: Dr. Luis Eduardo Tobón Llano**

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

---

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

Nota de Aceptación

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



**Dr. Hernán Camilo Rocha**

Decano de la Facultad de Ingeniería y  
Ciencias



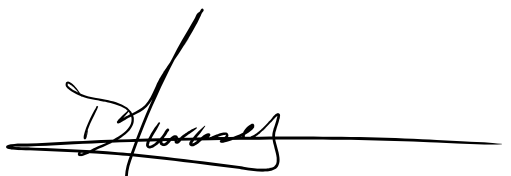
**Dr. Luis Eduardo Tobón Llano**

Director Carrera Ingeniería Electrónica.



**Dr. Luis Eduardo Tobón Llano**

Director Trabajo de Grado



**Dr. Dimas Mavares Terán**

Jurado 1



**Dr. Alexander Martínez Álvarez**

Jurado 2

A nuestros padres, quienes han sido el motor para superar cada reto presente en el camino de la vida.

A un gran amigo y compañero, Daniel Muñoz, quien inició la travesía para cumplir el sueño de ser profesional al mismo tiempo que nosotros y que, debido a su deceso, no pudo terminarla; dejando un vacío en nuestros corazones.

---

# AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Dios por las oportunidades que se han presentado a lo largo de nuestras vidas; también a nuestros padres por su esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional, que nos permitió culminar con éxito esta etapa tan significativa. Especial agradecimiento al profesor, Luis Eduardo Tobón y demás profesores, por ofrecernos sus conocimientos y experiencias para guiarnos durante este proceso.

---

# RESUMEN

La caracterización fenotípica de la planta de arroz (*Oriza Sativa L*), permite a pequeños y grandes agricultores tener información relevante sobre el estado de su cultivo, con el fin de mejorar sus variables agrícolas y su productividad. Los cambios sutiles en el color de la planta, pueden indicar deficiencia en la concentración de nutrientes, además muestra el estado de salud de los tejidos vegetales. Por otra parte, es importante conocer su temperatura, debido a que el aumento de esta, afecta los procesos fisiológicos y por ende la formación del grano.

En este trabajo de grado se diseña e implementa un sistema capaz de medir sin contacto y sistemáticamente la temperatura y el color de una planta de arroz, mediante dispositivos de bajo costo. Estas variables son enviadas a un microcontrolador que procesa y almacena la información en una memoria microSD, con registro de hora y fecha de cada medición. Para los sensores de color (TCS3200) y temperatura (MLX90614), se lleva a cabo métodos de calibración, adecuándolos para medir datos exclusivamente en plantas, esto se hace con la ayuda de sistemas certificados, que permiten validar cada calibración.

Se usa un sistema fotovoltaico para generar y suministrar correctamente la energía requerida por el sistema, brindando una mayor autonomía. Asimismo, se diseña un encapsulado impreso en 3D, que protege a todos los dispositivos de las condiciones ambientales del lugar de instalación. Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo en un cultivo de arroz (*Oriza Sativa L*), ubicado a las afueras del municipio de Jamundí, Valle del Cauca. Las mediciones realizadas permitieron corroborar las calibraciones de los sensores, y el correcto desempeño del sistema fotovoltaico durante los días de prueba. Igualmente el diseño 3D implementado, permitió proteger los dispositivos de las condiciones ambientales a las que fue expuesto.

Palabras claves: Fenotipado, Espacio RGB, Radiación térmica, Medición infrarroja, Calibración, Sistema fotovoltaico.

---

# ABSTRACT

The phenotypic characterization of the rice plant (*Oriza Sativa L*), allows small and large farmers to have relevant information on the status of their cultivation, in order to improve their agricultural variables and productivity. Subtle changes in the color of the plant, can indicate deficiency in the concentration of nutrients, also shows the state of health of plant tissues. On the other hand, it is important to know its temperature, because the increase in this affects the physiological processes and therefore the formation of the grain.

In this degree project, a system is designed and implemented, capable of non-contact and systematically measuring the temperature and color of a rice plant, using low-cost devices. These variables are sent to a microcontroller that processes and stores the information in a microSD memory, with the time and date of each measurement. For color (TCS3200) and temperature (MLX90614) sensors, calibration methods are carried out, adapting them to measure data exclusively in plants, this is done with the help of certified systems, which allow validating each calibration.

A photovoltaic system is used to correctly generate and supply the energy required by the system, providing greater autonomy. Likewise, a 3D printed capsule is designed, which protects all devices from the ambient conditions of the installation site. The performance tests were carried out in a rice crop (*Oriza Sativa L*), located on the outskirts of the municipality of Jamundí, Valle del Cauca. The measurements carried out allowed to corroborate the calibrations of the sensors, and the correct performance of the photovoltaic system during the test days. Likewise, the 3D design implemented allowed the devices to be protected from the environmental conditions to which they were exposed.

Keywords: phenotyping, RGB space, Thermal radiation, Infrared measurement, Calibration, Photovoltaic system.

---

# ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>Índice de figuras</b>	<b>11</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>14</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	17
1.2. Objetivos . . . . .	18
1.2.1. Objetivo General . . . . .	18
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	18
1.3. Requerimientos del proyecto . . . . .	18
<b>2. Marco teórico</b>	<b>19</b>
2.1. Contexto . . . . .	19
2.2. Temperatura - Radiación térmica . . . . .	20
2.2.1. Medición de la temperatura-termómetros infrarrojos . . . . .	21
2.2.2. Antecedente - Medición del temperatura . . . . .	22
2.3. Color - Teoría del color y Espacio RGB[11]. . . . .	23
2.3.1. Medición del color [33] . . . . .	25
2.3.2. Antecedente - Medición del color . . . . .	26
2.4. Protocolos de comunicación de los dispositivos . . . . .	28
2.4.1. Protocolo de comunicación I2C [26][27] . . . . .	28
2.4.2. Protocolo de comunicación SPI [28] . . . . .	30
2.5. Trabajo relacionado . . . . .	31
2.6. Definición de términos . . . . .	33
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>35</b>
3.1. Sistema general . . . . .	35

---

3.1.1. Entradas . . . . .	36
3.1.2. Salidas . . . . .	36
3.2. Subsistemas . . . . .	37
3.2.1. Recepción . . . . .	38
3.2.2. Procesamiento de datos . . . . .	56
3.2.3. Interfaz . . . . .	62
3.2.4. Alimentación . . . . .	65
3.3. Diagrama sistema general con componentes . . . . .	75
3.3.1. Boceto de conexiones . . . . .	76
3.4. Diseño estructural . . . . .	76
3.5. Manual de uso . . . . .	81
<b>4. Pruebas y análisis de resultados</b>	<b>82</b>
4.1. Plan de Pruebas . . . . .	82
4.2. Análisis de resultados . . . . .	83
4.3. Análisis de costos . . . . .	87
<b>5. Conclusiones</b>	<b>90</b>
<b>6. Trabajos futuros</b>	<b>92</b>
6.1. Diseño estructural . . . . .	92
6.2. Sistema embebido . . . . .	93
6.3. Consulta de datos de manera inalámbrica . . . . .	93
6.4. Sensor de color y espacio de color . . . . .	94
6.5. Uso de herramientas y software . . . . .	95
<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>99</b>
7.1. Anexo A: Códigos . . . . .	99
7.2. Anexo B: Bocetos de diseño estructural . . . . .	110
7.3. Anexo C: Manual de usuario . . . . .	116
7.4. Anexo D: Plan de pruebas . . . . .	125

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Funcionamiento sensor termoelectrico. D. Xu, B. Xiong and Y. Wang, "Micro-machined Thermopile IR Detector Module With High Performance, in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 3, pp. 149-151, Feb.1, 2011. . . .	21
2.2.	Espacio de color RGB. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes). . . . .	23
2.3.	Propiedades del color. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes). . . . .	24
2.4.	Relación entre propiedades del color. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes). . . . .	24
2.5.	División del espectro electromagnético. Fontal, B., Suárez, T., y Reyes, M. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Escuela de la Ingeniería, 1, 24. . . . .	25
2.6.	Luz absorbida por TCS3200 en todo el espectro de luz LED blanca cuando el sensor se coloca en 6 alturas diferentes. . . . .	27
2.7.	Resultado visuales que muestran el color RGB interpretado por el sensor TCS3200 y el espectrofotómetro CM-700D, antes y después de la calibración (RHS 141C). . . . .	28
2.8.	Comunicación I2C, maestro-esclavo. Fuente: <a href="http://www.luisllamas.es/arduino-i2c/">www.luisllamas.es/arduino-i2c/</a> .	28
2.9.	Trama de la comunicación I2C. Carletti, E. J. (2007). Comunicación-Bus I2C. Robots Argentina. . . . .	29
2.10.	Trama de la Comunicación SPI. Fuente: <a href="https://www.luisllamas.es/arduino-spi/">https://www.luisllamas.es/arduino-spi/</a>	31
2.11.	Mapa del índice topográfico de humedad base en el mapa. arrero Mendoza et al. (2020). Guía práctica para la generación de alertas tempranas en cultivos de arroz usando drones. . . . .	32
3.1.	Diagrama sistema general . . . . .	36
3.2.	Diagrama subsistemas . . . . .	38
3.3.	Sensor de color TCS3200 . . . . .	39

---

3.4.	Diagrama de funcionamiento sensor TC3200. Tomado directamente de la hoja de datos . . . . .	40
3.5.	Escala de opciones de selección entradas. Tomado directamente de la hoja de datos . . . . .	40
3.6.	Tabla de color ColorChecker Classic con valores RGB . . . . .	42
3.7.	Resultados de cada componente del espacio RGB del TCS3200 calibrado y sin calibrar en comparación con la ColorChecker . . . . .	43
3.8.	Muestras de color verde usadas para la calibración específica del sensor TCS3200	44
3.9.	Resultados de cada componente del espacio RGB en comparación de las muestras de color verde con TCS3200 sin factor y con factor . . . . .	44
3.10.	Sensor temperatura mlx90614 . . . . .	45
3.11.	Diagrama de captación radiación infrarroja . . . . .	46
3.12.	Ejemplo del FOV del sensor MLX90614 . . . . .	47
3.13.	Cámara térmica y sensor infrarrojo en laboratorio . . . . .	48
3.14.	Gráfica de puntos muestreados . . . . .	51
3.15.	Ajuste de curva de los puntos muestreados . . . . .	52
3.16.	Módulo de reloj RTC DS3231 . . . . .	54
3.17.	Diagrama de flujo módulo de reloj . . . . .	56
3.18.	Microcontrolador ESP32 . . . . .	58
3.19.	Diagrama de flujo de microcontrolador . . . . .	61
3.20.	Modulo de memoria micro SD . . . . .	63
3.21.	Diagrama de flujo módulo de memoria microSD . . . . .	64
3.22.	Módulo convertidor Step-Down y Step-Up de 2 en 1 DC-DC . . . . .	66
3.23.	Panel solar de 5V, 100mA . . . . .	69
3.24.	Batería recargable de Litio 18650 3.7V . . . . .	72
3.25.	Controlador de carga TP4056 . . . . .	74
3.26.	Diagrama sistema general con sus respectivos componentes . . . . .	75
3.27.	Boceto de conexiones del sistema general . . . . .	76
3.28.	Diseño estructural del cuerpo vista de un costado y desde abajo . . . . .	78
3.29.	Dimensiones del diseño estructural exterior . . . . .	79
3.30.	Dimensiones de la tapa donde se encuentran los paneles solares . . . . .	79
3.31.	Diseño estructural parte interior . . . . .	80
3.32.	Dimensiones internas del cuerpo y la tapa . . . . .	81
4.1.	Cultivos de arroz en distintas fases fenológicas . . . . .	83
4.2.	Prueba de paneles solares en ambiente real . . . . .	84
4.3.	Datos .csv tomados por el sistema en los tres días de prueba . . . . .	85
4.4.	Temperatura de los cultivos de arroz en distintas fases fenológicas . . . . .	85
4.5.	Temperatura de los cultivos de arroz en distintas fases fenológicas . . . . .	86
7.1.	Bocetos desarrollados diseño estructural . . . . .	111
7.2.	Presentación del diseño estructural exterior desde abajo . . . . .	119
7.3.	Presentación del diseño estructural exterior . . . . .	119

7.4. Presentación del diseño estructural interior . . . . . 120

---

# ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Error promedio, error porcentual y desviación estándar para los filtros de color del sensor, calibrado y sin calibrar, en comparación con la tabla ColorChecker	43
3.2. Error promedio, error porcentual y desviación estándar para los filtros de color del sensor TCS320, con factor y sin factor, en comparación con los resultados de la las muestras de tono verde. . . . .	45
3.3. Puntos para correlación. . . . .	51
3.4. Prueba de calibración sensor temperatura. . . . .	53
3.5. Criterios de selección módulo de reloj. . . . .	53
3.6. Evaluación criterios de selección módulo de reloj. . . . .	54
3.7. Criterios de selección microcontrolador. . . . .	57
3.8. Evaluación de criterios de selección microcontrolador. . . . .	57
3.9. Conexión de pines entre dispositivos y microcontrolador . . . . .	59
3.10. Notificación de fallos. . . . .	65
3.11. Consumo de los dispositivos en modo Activo . . . . .	67
3.12. Consumo de los dispositivos en modo Sleep . . . . .	67
3.13. Criterios de selección paneles solares . . . . .	68
3.14. Evaluación de criterios de selección paneles solares. . . . .	68
3.15. Criterios de selección batería. . . . .	71
3.16. Evaluación de criterios de selección batería. . . . .	71
3.17. Criterios de selección controlador de carga . . . . .	73
3.18. Evaluación de criterios de selección controlador de carga. . . . .	73
4.1. Comparación temperatura con cámara térmica y sensor infrarrojo . . . . .	86
4.2. Comparación del color del sensor TCS3200 y fotografía calibrada. . . . .	87
4.3. Costo mano de obra del proyecto . . . . .	87
4.4. Precio de los componentes implementados . . . . .	88
7.1. Comparación de bocetos para el diseño estructural. . . . .	114

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

El sector agrícola tiene una importancia vital para todos los países del mundo, el aumento de la productividad agrícola es una fuerza impulsora del desarrollo económico y social de un país [1]. Las tecnologías actuales, la mejora de las plantas, el perfeccionamiento de las prácticas de gestión de los suelos y el agua, no sólo combaten la inseguridad alimentaria, sino que también son importantes para lograr prácticas de agricultura sostenible, fundamentales para mantener un equilibrio apropiado entre la conservación y el uso de los recursos naturales[2].

En las últimas décadas, el cambio climático ha causado un incremento de la temperatura a niveles alarmantes en todo el mundo, lo que ha causado que los cultivos se vean perjudicados por cambios en el ambiente, esto pone en riesgo la seguridad alimentaria de los países[3], por ende, en la actualidad existen diferentes instituciones y empresas que buscan estrategias, métodos y herramientas para aumentar la productividad, fomentando una agricultura sostenible.

En Colombia el arroz es uno de los cultivos más consumidos, con un promedio anual de 41 kilos por colombiano[4]. Debido a esto, se deben buscar estrategias para aumentar la productividad y competitividad del cultivo, buscando convertirlo en un producto sostenible. Actualmente, existen proyectos de investigación que aplican estrategias científicas y tecnológicas, con el fin de encontrar variedades de plantas resistentes a estreses bióticos y abióticos. Para llevar esto a cabo, se requiere obtener información sobre las diferentes variables que influyen en el rendimiento agrícola, de esta forma se podrá encontrar variedades de semillas que cumplan con los objetivos de la investigación; en este proyecto trabajaremos con la temperatura de la planta y su color.

La temperatura tiene influencia sobre el rendimiento de la planta de arroz, ya que afecta el crecimiento y los procesos fisiológicos relacionados con la formación del grano. Las temperaturas por debajo o por encima del rango normal, afectan negativamente las fases vegetativas

y reproductivas de la planta [5]. Por otra parte, la identificación del color de la planta ayuda a conocer su estado nutricional; esta descripción fenotípica es de relevancia para los desarrolladores y agrónomos, debido a que brinda una descripción más detallada sobre el rendimiento del genotipo de la planta. Esto permite sintetizar de manera eficiente las nuevas variedades de cultivos[6].

En este trabajo se busca implementar un sistema de bajo costo, para la fenotipificación de las variables de temperatura y el color de la planta de arroz, basado en el proyecto P4 del programa OMICAS (Optimización Multiescala In-silico de Cultivos Agrícolas Sostenibles). Este programa tiene como objetivo desarrollar una plataforma multinodal para el fenotipado de cultivos, con el fin de obtener información relevante de las variables que inciden en la respuesta de cultivos al ambiente. Contribuyendo a la sostenibilidad de cultivos de arroz, a partir de la generación de variedades que toleren limitantes bióticas y abióticas [17].

## 1.1. Planteamiento del problema

Se estima que en los próximos años el crecimiento de la población mundial afecte directamente al incremento de la producción de alimentos, entre ellos el arroz, que es uno de los alimentos más producidos en el mundo, en dónde más de la mitad de la población mundial lo considera un alimento básico e importante, debido a la cantidad calorífica y proteica que aporta[4].

En Colombia, el arroz se considera como el tercer alimento de importancia con base en su volumen de producción, generación de empleo y área cultivada, pero en los últimos años, la baja productividad ha disminuido su competitividad en el mercado internacional dentro del Tratado de Libre Comercio (TLC) [12]. Esta falta de productividad por parte del cultivo se ha visto afectada por la reducción del rendimiento de las plantas de arroz, causado principalmente por las condiciones climáticas cada vez más extremas y variables en el país, por ejemplo, en las regiones de Tolima y el Valle del Cauca [13].

Según estudio de FEDEARROZ y el CIAT en la región de Saldaña (Tolima), las altas temperaturas nocturnas y baja radiación, reducen el rendimiento de la producción de arroz entre el 15 % y 40 %, ya que éstas causan estrés térmico en la planta dependiendo de su estado de desarrollo; según trabajos realizados por Yoshida, las temperaturas elevadas causan problemas en la reducción del número de granos y de su calidad, aumentando la esterilidad, que se refiere a la cantidad de granos que maduran[14].

Por otra parte, la tonalidad de verde en la planta varía de acuerdo a su cantidad de clorofila[16]. La clorofila presente en las plantas, brinda información sobre su estado nutricional en base a su cantidad de nitrógeno, que se relaciona con el rendimiento de la planta bajo condiciones de estrés bióticos y abióticos[15].

Actualmente, se buscan estrategias como la modificación genética, usada para encontrar variedades de plantas de arroz, que generen cultivos eco sostenibles, por este motivo, es necesario obtener información cuantitativa de sus variaciones, entre ellas la temperatura y color. Los dispositivos que son usados para llevar esto a cabo pueden ser muy costosos y pocos asequibles, por lo cual no cumplen con los requerimientos para el desarrollo de proyectos a gran escala, que buscan replicar estos sistemas con el fin de distribuirlos geográficamente en el área sembrada. El reto actual es obtener información relevante, precisa y de alta resolución con dispositivos de bajo costo, para la medición de variables que inciden en el rendimiento de la plantación, mediante métodos no invasivos que permitan la recolección automática y sistemática de datos.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema, para medir y almacenar los datos obtenidos sobre la temperatura y color para plantas de arroz, con dispositivos de bajo costo.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar los requerimientos del sistema para la cuantificación de la temperatura y color para plantas de arroz, mediante búsqueda de información literaria y antecedentes.
- Diseñar un sistema para la cuantificación de la temperatura y color para plantas de arroz con dispositivos de bajo costo.
- Implementar el sistema diseñado para la cuantificación de la temperatura y color para plantas de arroz.
- Validar los datos obtenidos por el sistema final mediante la comparación con dispositivos certificados.

## 1.3. Requerimientos del proyecto

Los requerimientos del proyecto se realizan con base en la necesidad del programa Omicas de fenotipar la temperatura y el color de la planta de arroz (*Oriza Sativa L*).

El sistema debe ser económicamente viable para su replicación en masa.

El sistema debe medir la temperatura y el color de una zona específica de la planta.

El sistema debe ser calibrado según el contexto de uso.

El sistema debe ser capaz de medir la temperatura y el color continuamente durante todas las fases fenológicas de la planta.

El dispositivo debe ser reconocible en el área de instalación.

El dispositivo debe ser capaz de almacenar la temperatura y el color de la planta.

El dispositivo no debe afectar el crecimiento de la planta ni influir en su entorno.

El dispositivo debe ser portátil para su traslado por el cultivo.

El dispositivo debe ser instalado en un espacio húmedo y con temperaturas elevadas.

El dispositivo contar con un diseño simple y modular para su replicación y facilidad de mantenimiento.

El sistema debe almacenar los instantes de medición de la temperatura y el color.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. Contexto

En Colombia la tasa de crecimiento demográfico aumenta 0.8% anual según datos del banco mundial; la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), dice que la disponibilidad alimentaria y de servicios se deben incrementar más rápido que la población[18]. Esto implica un reto para la agricultura colombiana, ya que en la actualidad, la producción de alimentos como el arroz ha disminuido, debido a la falta de competitividad en el mercado internacional, a causa de los bajos rendimientos de este cultivo [12].

El arroz es el alimento más consumido por la mayoría de los colombianos, especialmente por las personas de bajos recursos, aporta entre el 20% y el 80% de las calorías necesarias en el día[19]. Este cultivo está presente en 23 departamentos y 211 municipios del territorio nacional, con aproximadamente 570.000 hectáreas sembradas, de las cuales dependen más de 16.000 agricultores[20], además este cultivo es una opción de empleo en el pos-conflicto, gracias a su amplia distribución en la geografía nacional.

En este trabajo de grado, nos enfocaremos en la medición de la temperatura de la planta de arroz, así como la identificación de su color, lo cual puede contribuir al desarrollo del proyecto OMICAS. Cuantificar la temperatura y el color de la planta de arroz, contribuye a la validación de la relación entre estas variables y el rendimiento de la planta; estos datos son relevantes ya que pueden influir en la toma de decisiones, que guiarán el proyecto a obtener soluciones que cumplan con sus objetivos, por lo que se debe garantizar que estas mediciones sean válidas y precisas.

El valor de este trabajo radica en realizar mediciones con sensores de bajo costo, para obtener datos acordes con los esperados. Se busca obtener un producto asequible y que se pueda replicar, que ayude a acelerar el proceso y precisión en la generación de nuevas variedades.

des agrícolas de la planta. Se propone diseñar mediante metodologías y prácticas, un sistema en el cual se tienen en cuenta parámetros como posición, calibración, protección, ángulos, distancias, entre otros requerimientos que deben cumplir los dispositivos usados para el sentido, además de criterios de selección rigurosos que nos permitan cumplir con los objetivos planteados.

## 2.2. Temperatura - Radiación térmica

La radiación térmica es la emanación y propagación de un flujo de partículas u ondas, debido a la agitación térmica de las cargas contenidas en su interior. Este movimiento de partículas produce una pérdida o transferencia de energía que se da por conducción, convección y radiación y que se conoce como temperatura [7]. Los dos primeros modos necesitan de un medio en contacto con el cuerpo. Si el cuerpo está aislado también emite energía en forma de ondas electromagnéticas y en este caso se le da el nombre de radiación térmica.

La radiación térmica tiene carácter de onda electromagnética, por lo que viaja a la velocidad de luz en espacio vacío y se encuentra determinada para un rango de frecuencias. Concretamente para bandas de longitud de onda entre  $10^{-7} \text{ m} \leq \lambda \leq 10^{-4} \text{ m}$  (ultravioleta, visible e infrarrojo) [8].

Las ecuaciones para medir la radiación térmica, se basan en el uso de un cuerpo negro, definido como un objeto que en el cual toda la radiación incidente es absorbida y no hay reflexión ni transmisión. No obstante, dado que los cuerpos reales no se comportan como un cuerpo negro, es necesario establecer la relación entre estos cuerpos. La emisividad  $\beta$  permite encontrar esta relación, que se calcula del cociente entre la potencia emitida por un cuerpo real y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura en la misma longitud de onda:

$$\beta(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{e_b(\lambda, T)} \quad (2.1)$$

De esta manera, la ley de Stefan-Boltzmann vista en la ecuación 2.2, establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total, proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, por lo que un aumento de la temperatura representa un aumento en la emisión de radiación. Sigma  $\sigma$  se define como la constante de Stefan-Boltzmann [10].

$$E = \beta\sigma T^4 \quad (2.2)$$

Esta ecuación es utilizada por los sensores infrarrojos, para relacionar la radiación térmica percibida por la termopila con el voltaje suministrado por dicha termopila.

### 2.2.1. Medición de la temperatura-termómetros infrarrojos

Los termómetros infrarrojos, son sensores de temperatura sin contacto que utilizan la ley Stefan-Boltzmann para relacionar la cantidad incidente de radiación en el sensor, con la temperatura del objeto que emite dicha radiación. Esta ley, junto con dispositivos electrónicos adecuados, se pueden utilizar para relacionar el voltaje leído de un sensor, con la temperatura aproximada de un objeto que emite radiación.[34].

En un detector térmico la radiación incidente es absorbida para cambiar la temperatura del material del detector, y el cambio en alguna propiedad física se utiliza para generar una señal eléctrica. Dicha señal no depende de la naturaleza de la radiación incidente, por lo que los efectos térmicos son generalmente independientes de la longitud de onda, es decir, la señal depende de la potencia radiante pero no de su contenido espectral. Dentro de este grupo se encuentra los detectores de bolómetro, piroeléctrico y de termopila como lo es el sensor MLX90614.[35]

La termopila, está formada por un conjunto de termopares interconectados entre ellos en serie, para aumentar la sensibilidad del dispositivo [36]. Cada termopar está formado por dos materiales termoeléctricos diferentes. Una de las uniones A (fría) se mantiene a una temperatura de referencia conocida, que normalmente suele ser 0 °C, y en la otra unión B (caliente) hay un cuerpo negro que absorbe la radiación IR que le llega, incrementando la temperatura acorde con dicha radiación, denominado este componente termopar de radiación.

De tal forma que, al incidir un flujo de radiación IR  $\phi_{rad}$  sobre la unión, se va a crear una diferencia de potencial que es proporcional a la temperatura a la que se encuentra el cuerpo de medida. En la Figura 2.1 se muestra la conexión entre la absorción y los dos materiales diferentes.

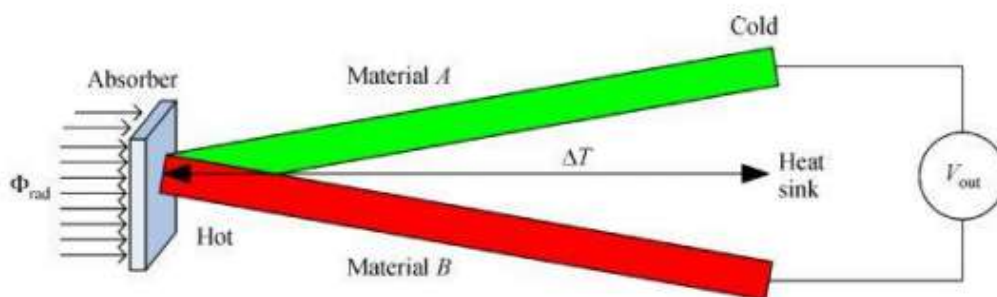


Figura 2.1: Funcionamiento sensor termoelectrico. D. Xu, B. Xiong and Y. Wang, "Micro-machined Thermopile IR Detector Module With High Performance, in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 3, pp. 149-151, Feb.1, 2011.

El efecto Seebeck genera una diferencia de potencial entre ambas uniones (la fría y la caliente), y viene dado por la ecuación 2.3 .

$$V_{out} = (\alpha_a - \alpha_b) * \Delta T \quad (2.3)$$

Donde  $\alpha_a$  y  $\alpha_b$  son los coeficientes de Seebeck para los materiales termoeléctricos A y B respectivamente, expresados comúnmente en  $\mu\text{V}/\text{K}$ .

Como la termopila es un conjunto de termopares conectados en serie, el voltaje generado por el detector IR de la termopila, es directamente proporcional al número de termopares, N.

$$V_{out} = N * (\alpha_a - \alpha_b) * \Delta T = (\alpha_a - \alpha_b) * \Delta T_{total} \quad (2.4)$$

Donde  $\Delta T_{total}$  es la suma de las diferencias de temperatura entre los diferentes termopares, por lo que  $V_{out}$  es el voltaje total entregado por los termopares.

### 2.2.2. Antecedente - Medición del temperatura

**J. Martínez. August (2016). A cost-effective canopy temperature measurement system for precision agriculture: a case study on sugar beet[23].**

En este documento, se estudia la relación de los incrementos en la temperatura del dosel de las plantas, con su estrés térmico. La medición de temperatura se realiza con el sensor infrarrojo MLX90614 y los datos se procesan con un microcontrolador Arduino.

El sensor consta de un filtro de onda larga que permite el paso de la radiación infrarroja (con longitudes de onda de 5,5 a 14  $\mu\text{m}$ ), un chip detector de termopila y un chip acondicionador de señal exclusivo y patentado por el fabricante. Los voltajes  $V_s$  y  $V_o$ , corresponden a la temperatura del cuerpo del sensor respectivo ( $T_a$ ) y la temperatura del objeto ( $T_o$ ), que se compensa internamente con  $T_a$ . Las salidas de voltaje se convirtieron a temperaturas usando la siguiente expresión:

$$T_i(K) = V_j * 0,02 \quad (2.5)$$

donde  $T_i$  representa  $T_o$  o  $T_a$  en grados Kelvin, que luego se convierte a grados Celsius y  $V_j$  (medido en voltios) que es  $V_o$  o  $V_s$ .

Teniendo en cuenta que la medición se realiza en plantas, la emisividad se establece en 0,98 para mejorar la precisión en la medición. Además se utilizó un pirómetro sin contacto, modelo FLUKE 62 mini (FLUKE Europa, Eindhoven, Países Bajos), para comparar las mediciones del sensor de infrarrojo y el termómetro en pruebas de laboratorio.

Se realiza pruebas en contexto real, en donde el sensor infrarrojo se instaló verticalmente en un UAV(vehículo aéreo no tripulado) en una posición de vista nadir. Los datos adquiridos por el sensor se recopilaron utilizando una placa Arduino Leonardo, debido a las amplias posibilidades de adaptación ambiental que ofrece este dispositivo. Además, se utilizó una

memoria MicroSD como registrador de datos en formato de texto, para su análisis en una computadora en un momento posterior.

Asimismo, se instala en el UAV una cámara térmica FLIR, para recibir imágenes térmicas del dosel del cultivo, y así poder comparar los datos de temperatura con los datos capturados por el sensor infrarrojo. El proyecto busca utilizar la temperatura del dosel como herramienta de toma de decisiones en el manejo del riego de las plantas. Finalmente se comparan los datos obtenidos en laboratorio y en contexto real, y se obtiene una alternativa estable y prometedora de bajo costo respecto a las tecnologías térmicas más costosas.

## 2.3. Color - Teoría del color y Espacio RGB[11].

La teoría del color es un grupo de reglas en la mezcla de tonos para conseguir el efecto deseado combinando colores. En este caso, se expone la teoría de Wilhelm Ostwald, que expone cuatro sensaciones cromáticas elementales (amarillo, rojo, azul y verde), y dos sensaciones acromáticas (blanco, negro) las cuales son intermedias. La mezcla de colores luz, normalmente rojo, verde y azul (RGB, iniciales en inglés de los colores primarios), hacen referencia al modelo RGB o el espacio de color RGB.

El espacio RGB define la composición del color. En este caso se define con tres vectores: Rojo, Verde y Azul. Entonces, un color se especifica usando la combinación lineal de tres coordenadas, o atributos, que representan su posición dentro del modelo RGB. Estas coordenadas no dicen cuál es el color, sino que lo posicionan dentro del espacio RGB visto en la figura 2.2.

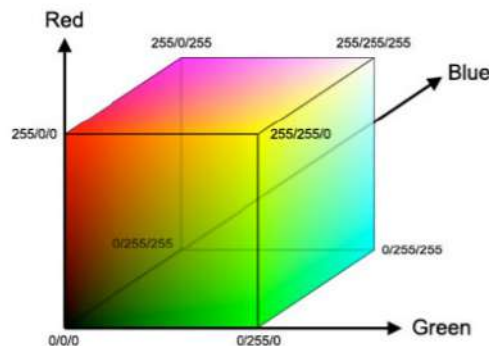


Figura 2.2: Espacio de color RGB. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes).

El color es una experiencia visual que percibimos de los objetos cuando hay luz. La luz es constituida por ondas electromagnéticas que se propagan a unos 300.000 kilómetros por segundo. Esto significa que nuestros ojos reaccionan a la incidencia de la energía y no a la

materia en sí. Los objetos devuelven la luz que no absorben hacia su entorno. Nuestro campo visual interpreta estas radiaciones electromagnéticas que el entorno emite o refleja, como la palabra COLOR.



Figura 2.3: Propiedades del color. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes).

En la figura 2.3 se puede observar las características principales del color, que se definen como tono, brillo y saturación respectivamente.

**Tono (hue):** Matiz o croma es el atributo que diferencia el color, y por lo cual designamos los colores rojo, verde, azul, violeta y anaranjado.

**Brillo:** Es la cantidad de luz emitida por una fuente lumínica o reflejada por una superficie.

**Saturación (value):** Es la intensidad cromática o pureza de un color (claridad u oscuridad de un color). Está determinado por la cantidad de luz que tiene un color, en este sentido se refiere a que tan luminoso es el color.

Finalmente en la figura 2.4 se puede observar la relación entre las propiedades o características del color. El valor (value) es el mayor grado de claridad u oscuridad de un color. Un azul, por ejemplo, mezclado con blanco, da como resultado un azul más claro, es decir, de valor (value) más alto. La matiz o tono, es distinto al color, ya que se obtiene de agregar blanco o negro a un color base.



Figura 2.4: Relación entre propiedades del color. González, W. U. P. et al. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Uniandes).

La descripción clásica de los valores de brillo o luminosidad, corresponde a claro (cuando contiene cantidades de blanco), medio (cuando contiene cantidades de gris) y oscuro (cuando contiene cantidades de negro).

### 2.3.1. Medición del color [33]

Es necesario entender que la luz visible se compone de distintas longitudes de onda, que van aproximadamente entre 350 a 760 nanómetros, presentes en el espectro electromagnético como se observa en la figura 2.5. En este sentido, cuando se habla del color de un objeto, en realidad, se refiere a que la luz de un rango particular de longitudes de onda, se refleja con mayor intensidad que la luz de otras longitudes de onda.

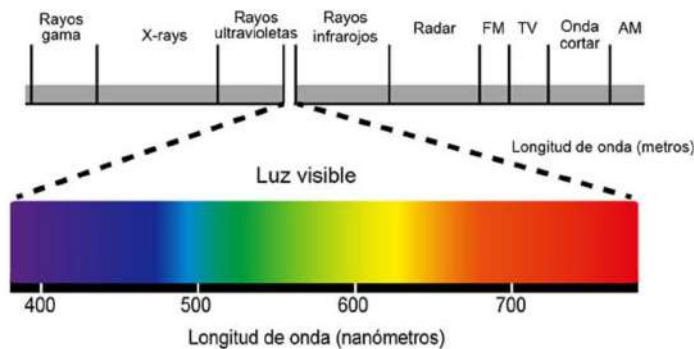


Figura 2.5: División del espectro electromagnético. Fontal, B., Suárez, T., y Reyes, M. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Escuela de la Ingeniería, 1, 24.

De esta manera, para medir el color es necesario medir la intensidad de luz o intensidad lumínica reflejada por la materia. La intensidad luminosa da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente. Esta se define como la cantidad de flujo luminoso en una determinada dirección, que emite una fuente por unidad de ángulo sólido, y su unidad de medida es la candela (cd). La relación entre intensidad lumínica, flujo luminoso y ángulo sólido se observa en la ecuación 2.6. Donde  $I$  es la intensidad lumínica,  $F$  es el flujo luminoso en lúmenes (lm) y  $\alpha$  es el ángulo sólido, que hace referencia al ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado.

$$I(cd) = \frac{F(lm)}{\alpha} \quad (2.6)$$

Ahora bien, la intensidad lumínica reflejada por cada rango de longitud de onda, es interpretada por nuestro cerebro principalmente por la estimulación de tres colores principales: rojo, verde y azul. En este sentido, el método utilizado por la visión y medidores de color se denomina método triestímulo, que indica que todas las combinaciones de color se basan en la estimulación de tres receptores dedicados a cada uno de los colores mencionados. Los colorímetros que emplean este método, están diseñados para medir la luz aproximadamente,

del mismo modo en el que el ojo humano percibe la luz.

En conclusión, se puede decir que para medir el color, se mide inicialmente la intensidad lumínica reflejada por cada uno de los rangos de longitud de onda que componen el color rojo, verde y azul. En este sentido, el sensor TCS3200 es un instrumento a base de tres filtros que aíslan la luz roja, azul y verde. La intensidad lumínica pasa a través de estos filtros y cuando llega al sensor, los valores de los tres colores igualan lo que el ojo humano percibe con la aplicación del espacio RGB.

### **2.3.2. Antecedente - Medición del color**

**Bailey et al. June (2011). Low Cost Colour Sensors for Monitoring Plant Growth in a Laboratory[21].**

En este documento se desarrolla un sistema automático para la medición del color de las hojas de una planta. Se usa un brazo robótico para mover los sensores a lo largo de la planta, monitorizando de forma constante su crecimiento. Los sensores incluyen una cámara compacta con zoom de color, con sensores RGB y con leds, usados para la captación del color. La medición constante del color de la planta puede informar indicaciones de estrés por concentraciones inadecuadas de nutrientes, entre otros. En este artículo se detalla la técnica de calibración para un sensor RGB TCS3200 y se compara con un espectrofotómetro de alta gama.

Se puede encontrar el área de medición que el sensor permite captar, el cual se estima es de  $3.5 \text{ mm}^2$ , por lo que lo que ha esto se refiere será un punto de medición fijo. De esta manera también se puede encontrar la distancia óptima a la que el sensor capta la mayor intensidad lumínica, estas pruebas fueron realizadas con ayuda de un espectrofotómetro. Se pueden observar en la figura 2.6 que la altura ideal se da a 20 mm de la muestra.

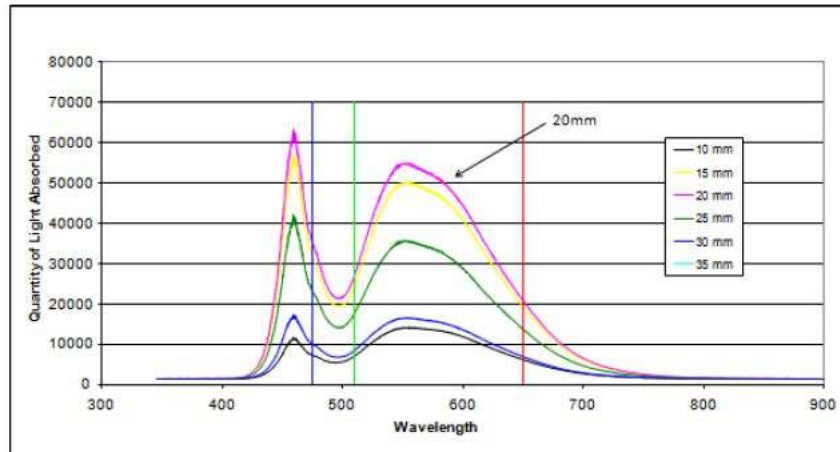


Figura 2.6: Luz absorbida por TCS3200 en todo el espectro de luz LED blanca cuando el sensor se coloca en 6 alturas diferentes.

Por otra parte, podemos encontrar las fórmulas aplicadas al sensor TCS3200 que permiten su calibración. Como primera instancia se debe tener en cuenta que la calibración realizada en este documento se basa en comparación, en la que se usan los valores del sensor y del espectrofotómetro. El ajuste de los valores del TCS3200 hacia los resultados del espectrofotómetro se realiza con un factor de calibración.

Para cada muestra de color medida se obtiene el valor del factor de calibración a partir de la ecuación 2.7. El factor de calibración se calculó y promedió utilizando una media geométrica (en oposición a la función de media aritmética más general), proporcionando así el factor  $\gamma$  para R, G y B individualmente. Los valores calibrados (deseados) se obtuvieron luego usando la ecuación 2.8.

$$\gamma_R = \frac{\log\left(\frac{R_N'}{255}\right)}{\log\left(\frac{R_N}{255}\right)}$$

$$\gamma_G = \frac{\log\left(\frac{G_N'}{255}\right)}{\log\left(\frac{G_N}{255}\right)} \quad (2.7)$$

$$\gamma_B = \frac{\log\left(\frac{B_N'}{255}\right)}{\log\left(\frac{B_N}{255}\right)}$$

$$R_N' = \left(\frac{R_N}{255}\right)^\gamma \times 255 \quad (2.8)$$

Hay que tener en cuenta  $R_N$  equivalen al valor del sensor sin calibrar y  $R_N'$  equivale al valor del sensor calibrado. Primeramente se ajustan los valores de brillo usando distintos valores de negro, blanco, verde, azul y rojo. Después de esto se realiza una calibración más

específica para la tonalidad de verdes, usando una paleta con distintos tonos entre el amarillo y el azul. Finalmente como resultado, podemos observar en la figura 2.7 la comparación visual de la calibración hecha.




TCS3200 (uncalibrated)	TCS3200 (calibrated)	CM-700D Spectrophotometer
RGB = 57,81,40	RGB = 121,161,90	RGB = 129,164,87
		

Figura 2.7: Resultado visuales que muestran el color RGB interpretado por el sensor TCS3200 y el espectrofotómetro CM-700D, antes y después de la calibración (RHS 141C).

## 2.4. Protocolos de comunicación de los dispositivos

### 2.4.1. Protocolo de comunicación I2C [26][27]

El bus I2C(inter integrated circuits), es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos. Diseñado por Philips, como un sistema bidireccional del tipo maestro/esclavo, para la conexión de periféricos a distancias relativamente cortas y velocidades de unos cientos de Kbps.

Esta comunicación es en serie y sincrónica, y sólo se requiere de dos líneas de señal que son manejadas por el dispositivo maestro(figura 2.8), una línea de reloj que sincroniza el sistema (SCL: Serial Clock) y otra para la transferencia de datos (SDA: Serial Data).

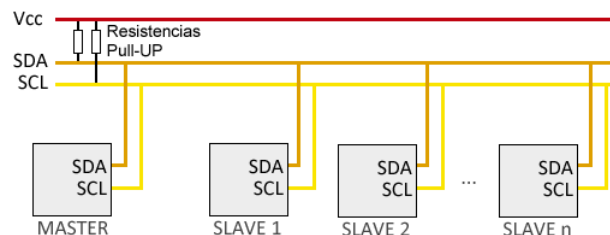


Figura 2.8: Comunicación I2C, maestro-esclavo. Fuente:[www.luisllamas.es/arduino-i2c/](http://www.luisllamas.es/arduino-i2c/)

En dispositivo maestro se comunica con cada esclavo mediante la dirección única de entre 7 a 10 bits que tiene cada uno, no puede haber una dirección repetida. Las resistencias de

Pull-UP son utilizadas para mejorar la velocidad o distancia de transmisión.

La figura 2.9 muestra una trama, para la transmisión de datos en 8 bits (también existe en 10 bits). En la trama se puede apreciar que el protocolo requiere una condición de inicio, que se produce mediante un flanco descendente de la señal SDA, seguido por los bits de datos que se transmiten comenzando por el bit más significativo (MSb). El cambio de bit se debe realizar durante el estado bajo de la línea de clock o durante el flanco ascendente del mismo.

Después se presenta un bit de comando (R/W), que establece la acción de lectura (nivel alto) o escritura (nivel bajo) entre el maestro y esclavo, seguido por el bit de reconocimiento (ACK) que en bajo confirma la solicitud realizada por el maestro, y finalmente la condición de stop que se produce cuando SCL esta en alto y se presenta un flanco de subida de la señal SDA.

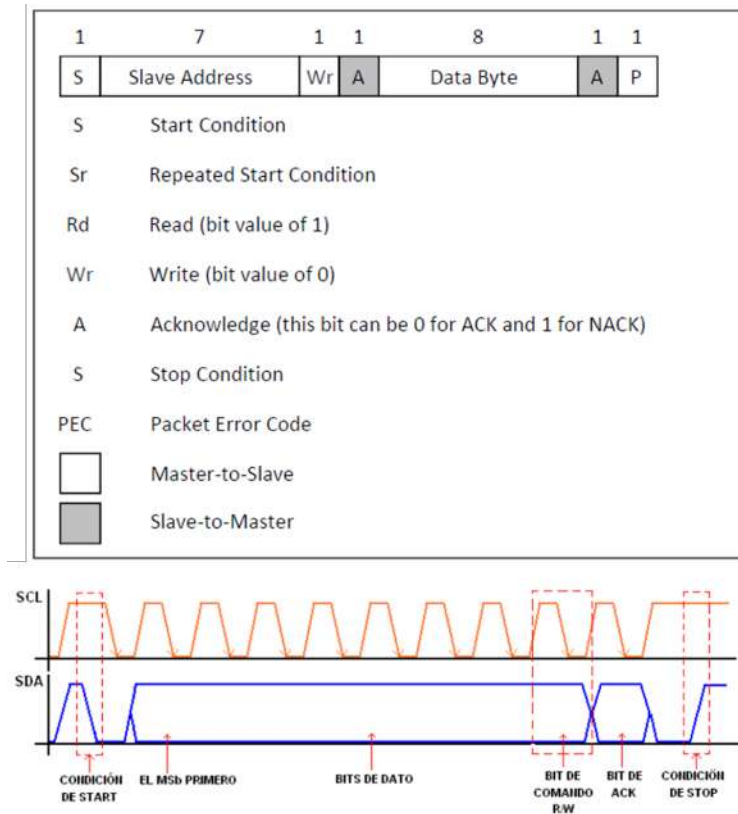


Figura 2.9: Trama de la comunicación I2C. Carletti, E. J. (2007). Comunicación-Bus I2C. Robots Argentina.

Para escribir datos en un dispositivo, primero se envía una trama con la dirección (en 7 bits) del dispositivo esclavo con quien se realiza la comunicación, el octavo bit indica si queremos enviar o recibir datos. Para enviar datos este bit debe estar en bajo, seguido del

bit de reconocimiento (ACK) que debe estar en bajo para ser verdadero, mientras este bit sea verdadero, se pueden escribir datos en paquetes de 8 bits, hasta que se de la señal de stop.

Para leer datos de un esclavo, primero se empieza con una acción de escritura, enviando una trama con la dirección del dispositivo a leer mediante 7 bits, el bit restante estará en bajo mostrando escritura, y el bit de accionamiento en bajo para ser verdadero. Seguido a esto, se envía la dirección interna del registro a leer en el dispositivo mediante 7 bits, el octavo estará en alto mostrando lectura, y el bit de accionamiento nuevamente en bajo para ser verdadero y así poder seguir leyendo datos en paquetes de 8 bits hasta que se llegue la señal de stop.

### 2.4.2. Protocolo de comunicación SPI [28]

El bus SPI (Serial Peripheral Interface), es un protocolo de comunicación usado para la transferencia de información entre dispositivos electrónicos, fue desarrollado por Motorola, y se ha convertido en un estándar en este tipo de comunicaciones.

La comunicación SPI tiene una arquitectura tipo maestro-esclavo, llevada a cabo mediante una interfaz sincrónica, basada en el desplazamiento de 8 bits. El dispositivo maestro genera una señal de clock (SCK), para coordinar la transferencia de datos con los demás dispositivos esclavos. La comunicación SPI es Full Duplex y se realiza mediante dos líneas que son MO-SI (Master-Out,Slave-In) para la comunicación del maestro al esclavo, y MISO(Master-In, Slave-Out) para la comunicación del esclavo al maestro.

Para realizar la comunicación SPI se requiere de otra línea adicional llamada SS (Slave Select), que se usa para seleccionar el dispositivo esclavo con el que se va a realizar la comunicación. Por defecto el maestro mantiene en alto todas las líneas SS.

Cuando se requiere hacer comunicación con el esclavo se pone en bajo la línea SS correspondiente, lo que le indica al esclavo iniciar la comunicación. En cada pulso de reloj, normalmente en el flanco de subida, el dispositivo maestro envía un bit al esclavo, o el maestro recibe un bit del esclavo seleccionado, como se puede ver en la figura 2.10.

La trama de datos enviados no sigue ninguna regla, es decir se puede enviar una secuencia arbitraria de bits, para esto los dispositivos conectados necesitan tener preestablecida la longitud y el significado de los datos que van a enviar o recibir.

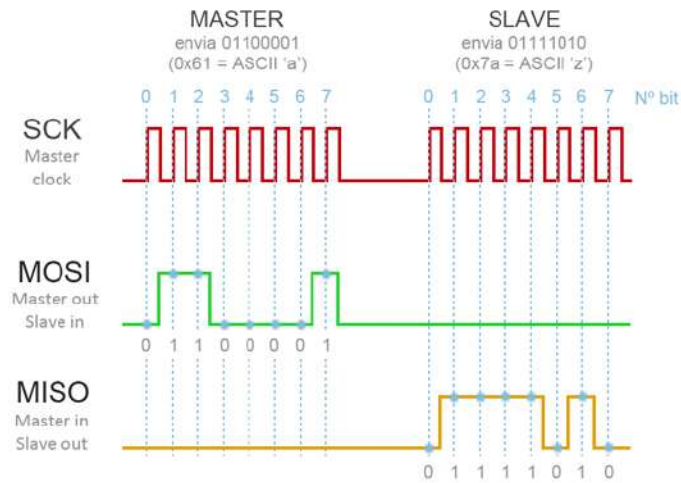


Figura 2.10: Trama de la Comunicación SPI. Fuente: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>

## 2.5. Trabajo relacionado

**Guía práctica para la generación de alertas tempranas en cultivos de arroz usando drones[37].**

Como objetivo principal, este proyecto define una metodología que permite establecer criterios para generar alertas tempranas, cuando se presenten problemas en el sistema de irrigación, zonas con malezas y zonas con problemas de estrés nutricional e hídrico en un cultivo de arroz. Esto se realiza con base al procesamiento de la información que un dron de agricultura, adecuado con cámaras RGB, multispectral y termográfica pueda recolectar.

El protocolo de alerta temprana en el sistema de irrigación, se hace con el fin de aumentar la productividad del cultivo de arroz, al darle un mejor manejo al agua con un menor consumo. Para ello es necesario identificar en los lotes que van a ser sembrados, los sitios con dificultades en el riego y con menor retención de humedad. Por lo que se analiza la altimetría del lote usando un dron multirrotor con cámara RGB de por lo menos 20 MP, un sistema de georreferenciación, y un smartphone para programar el vuelo del dron.

Se realiza el procesamiento de las imágenes obtenidas, con el fin de obtener modelos digitales de superficie (DMS), elevación (DEM) y terreno (DMT). En la Figura 2.11 se muestra un mapa de la simulación de acumulación de agua, de acuerdo con el DTM y los caballones instalados. En este mapa aparece el índice topográfico de humedad, el cual muestra una simulación de la humedad que tendría el suelo en el lote.

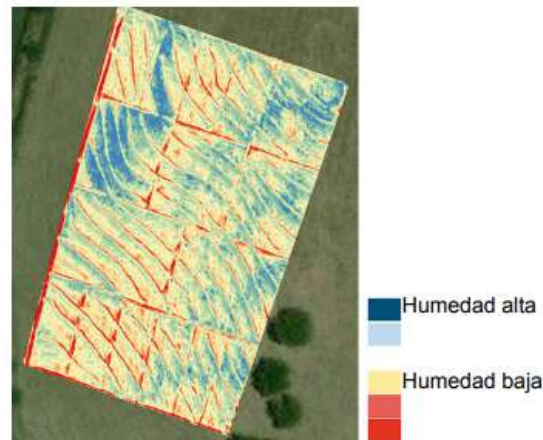


Figura 2.11: Mapa del índice topográfico de humedad base en el mapa. arrero Mendoza et al. (2020). Guía práctica para la generación de alertas tempranas en cultivos de arroz usando drones.

Por otra parte, para el protocolo que genera alertas tempranas en la detección de zonas con malezas, se tiene como objetivo determinar el porcentaje de cobertura de malezas en un lote, una semana antes de la siembra y después de la siembra, entre los 15 y 30 días después de emergidas las plantas de arroz. Se hace uso del dron con cámara RGB y una cámara multiespectral.

Con las imágenes obtenidas, se generar un mapa ortomosaico RGB y otro del índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Índice de vegetación de diferencia normalizado), que se calcula con base en las imágenes de reflectancia de las bandas roja (red) e infrarrojo (NIR). Para la detección de las zonas con malezas, se entrenó un algoritmo basado en la técnica de aprendizaje, este se alimenta con las características de forma, textura y NDVI obtenidas.

Finalmente, para el protocolo de alertas tempranas, para la detección de zonas con problemas de estrés hídrico y nutricional, se hace uso del dron, la cámara RGB, cámara multiespectral y una cámara térmica FLIR. Se toman imágenes entre los 50 y 60 días después de emergidas las plantas de arroz.

Para obtener el estrés hídrico y nutricional se deben crear y procesar los mapas ortomosaicos de los siguientes índices de vegetación (IV): NDVI, GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), SR (Single Ratio Index) y termográfico superficial del cultivo, que son obtenidos de las imágenes que toman las cámaras ubicadas en el dron que sobrevuela el cultivo.

## 2.6. Definición de términos

- **Eficiencia:** Se refiere al cumplimiento adecuado de una acción determinada. En este caso se mide la eficiencia en porcentaje, representando que a mayor valor, la tarea fue realizada satisfactoriamente. La aplicación de este concepto se aplica a los paneles solares, denotando que a mayor eficiencia, mayor porción de la energía fotovoltaica es transformada en energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema.
- **Tolerancia de potencia:** Se refiere al porcentaje de potencia (+/- 5%) que puede diferir de la potencia real que suministra el panel solar. Este depende en gran medida del material de fabricación. Cuanto menor sea la tolerancia de potencia, la potencia real será más aproximada a los valores especificados por el fabricante.
- **Coefficiente de temperatura:** El coeficiente de temperatura (- % / °C) se refiere al porcentaje de pérdida de potencia que se genera en el panel solar. Esta pérdida de potencia se da por cada grado centígrado superior a los 25 °C. De esta manera, a medida que la temperatura de un panel fotovoltaico aumenta, la potencia generada por el panel disminuye.
- **Vida útil:** Es el tiempo que un sistema o dispositivo se encontrará en servicio y generará beneficios para el usuario. De esta manera la vida útil del un dispositivo se dará hasta que sea necesario cambiarlo, ya sea por el deterioro causado por las condiciones externas, tiempo o frecuencia de uso.
- **Termopila:** La termopila es un dispositivo electrónico formado por la unión de metales distintos que producen una diferencia de potencial en función de la diferencia de temperatura entre dos puntos. La termopila proporciona un voltaje de salida en respuesta a la diferencia de temperatura captada.
- **Emisividad:** Es la proporción de radiación térmica o capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja. El valor de la emisividad se calcula en proporción a la radiación térmica emitida por una superficie u objeto, debido a una diferencia de temperatura con su entorno. La emisividad puede tener un valor entre 0 (espejo brillante) y 1.0 (cuerpo negro), pero la mayoría de las superficies orgánicas tienen valores de emisividad cercanos a 0.95.
- **Cromático:** Se refiere a los colores que tienen una tonalidad o matiz distintos de aquellos valores neutros como el blanco, negro o gris.

- 
- **Acromático:** Que transmite la luz blanca sin descomponerla en las demás gamas de color. Aquí se encuentra la escala de grises que se comprenden entre las tonalidades de blanco y negro.
  
  - **Fases fenológicas:** Hace referencias a los cambios externos, que son visibles durante el crecimiento de una planta. En cuanto al cultivo de arroz, se presentan las siguientes fases: Germinación, macollamiento, primordio final, floración y maduración. Un cultivo de arroz se encuentra listo en su etapa de maduración, la cual llega aproximadamente 120 días después de su plantación.
  
  - **Fenotipo:** Corresponde a las características físicas y bioquímicas que se pueden visualizar de una planta. El fenotipo depende de los genes de esta, y de algunos factores del medio ambiente y de la nutrición.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

### 3.1. Sistema general

El sistema general SMTC (Sistema de Monitoreo de Temperatura y Color) se encarga de monitorear las variables de entrada de color y temperatura de la planta de arroz *Oriza Sativa* L. Estas variables son captadas mediante el subsistema de recepción, en donde se encuentran los sensores de color y temperatura. Los datos entregados por cada sensor son enviados al subsistema de procesamiento de datos, el cual contiene el microcontrolador que transforma los valores monitoreados a valores representativos para el usuario. Asimismo, el subsistema de recepción se encarga de registrar la fecha y hora en la que se toma cada medición.

Finalmente, mediante el subsistema de interfaz se almacenan los datos procesados en formato .csv en una memoria microSD, con unidad de medición en grados centígrados (°C) para la variable temperatura, y en espacio RGB para la variable del color. Además de esto, el usuario puede visualizar el estado en el que se encuentra el sistema, mediante los diferentes colores de un led, y podrá encender y apagar el sistema mediante un interruptor ON/OFF.

Por otra parte, la fuente de energía que alimenta al sistema es una fuente renovable, captada por un sistema fotovoltaico, presente en el subsistema de alimentación que a su vez contiene una batería que almacena la energía suministrada por los paneles solares, lo que brinda autonomía al sistema.

En la figura 3.1, se puede observar el diagrama general del sistema, donde se detalla la conexión entre los distintos subsistemas y las variables de entrada y salida.

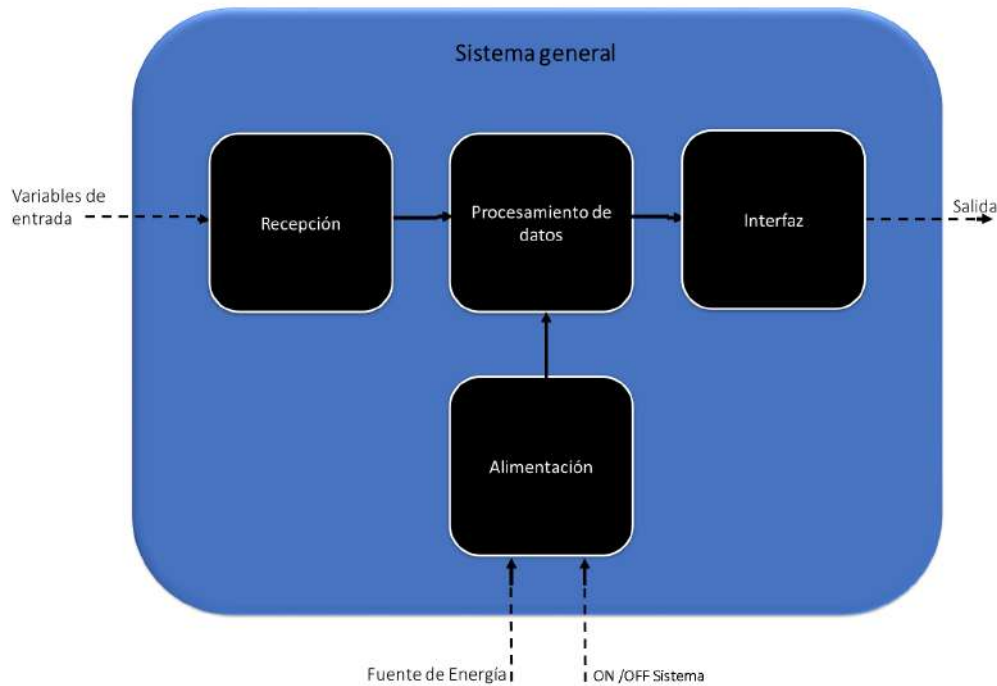


Figura 3.1: Diagrama sistema general

### 3.1.1. Entradas

Las entradas del sistema son las variables de temperatura y color de la planta, las cuales son medidas de forma no invasiva. El sistema capta la temperatura en forma de radiación en el espectro infrarrojo emitido por la planta, esta temperatura será captada al medio día, que es donde los rayos del sol caen de manera mas pronunciada sobre la planta. En el caso de color se capta la intensidad lumínica de la luz reflejada sobre la planta, estos datos serán captados en la media noche, para que las luz ambiente del día no interfiera con las mediciones. Ambas variables son señales electromagnéticas que emite la planta, las cuales serán captadas por sensores electrónicos.

### 3.1.2. Salidas

Las salidas del sistema son de dos tipos: Señal visual de información de estado del sistema, y los datos de temperatura y color de la planta almacenados. La señal de información se da mediante un led multicolor que notifica al usuario el estado de funcionamiento del sistema según su color.

Por otra parte, el usuario podrá visualizar la información de las variables medidas con su hora y fecha de medición, en sistema horario de 24 horas. Esta información sera alma-

cenada en formato .csv en las unidades de °C para la temperatura y en el espacio RGB para el color, dentro del rango de 0 a 255 para cada componente de dicho espacio. Los datos pueden ser observados desde algún dispositivo capaz de leer la memoria y ejecutar el formato.

## 3.2. Subsistemas

Según los requerimientos del proyecto, se necesitan seleccionar los dispositivos electrónicos que mejor se adapten al sistema, con el fin de cumplir las necesidades de uso por parte del usuario. En esta sección, se explica el por qué se usa cada dispositivo electrónico, teniendo en cuenta la metodología de diseño e implementación, que permitieron la integración de cada subsistema a un sistema general capaz de cumplir con los objetivos propuestos para el proyecto.

Los criterios de selección nos permiten definir los dispositivos a usar en el desarrollo de este proyecto, basados en distintos parámetros como costo, compatibilidad, tamaño y especificaciones técnicas de los elementos electrónicos. Estos criterios se apoyan en los requerimientos del proyecto y el contexto de uso. Los criterios tendrán una evaluación de 0 a 10 puntos, donde 0 significa que no cumple con los requerimientos, y 10 que si cumple con los requerimientos. Los criterios y la evaluación se evidencian en las tablas de selección de cada componente electrónico.

Asimismo, cada criterio de selección tienen un peso de importancia diferente que varía de manera porcentual, dando el mayor porcentaje al criterio con mayor relevancia, cabe mencionar que la suma de porcentaje de los criterios da 100%. Estos pesos de importancia se encuentran al frente de cada criterio enumerado y se multiplicarán por la evaluación que se le da a cada criterio. Los resultados de las evaluaciones vistas en la columna **total**, de las tablas de criterios de cada dispositivo, permitieron seleccionar los componentes que mejor se adaptan los requerimientos planteados.

Para medir el color se usará el sensor TCS3200, mientras que para medir la temperatura se usará el sensor infrarrojo MLX90614. Estos dispositivos no son tomados en cuenta en la calificación de los criterios de selección, ya que son los sensores que estaban disponibles en la facultad al momento de iniciar este proyecto. Además de esto, la pandemia causada por el covid-19 imposibilitó la adquisición de otras referencias debido al cierre internacional y nacional del transporte comercial.

Se debe tener en cuenta que por el tiempo que estuvieron cerradas las fronteras, fue pertinente iniciar con la calibración de estos sensores mencionados. Adicionalmente, estos dispositivos cumplen con los requerimientos del programa OMICAS en el cual está enfocado el proyecto, y satisfacen los requisitos de bajo costo para el uso de este dispositivo por parte de pequeños agricultores.

A continuación, se detalla cada subsistema, donde se presenta los diagramas de flujo y una descripción de su funcionamiento, teniendo en cuenta la relación con los dispositivos seleccionados y los algoritmos que permiten la comunicación entre los subsistemas del sistema general. En la figura 3.2, se representa cada subsistema con sus respectivos elementos que conforman al sistema.

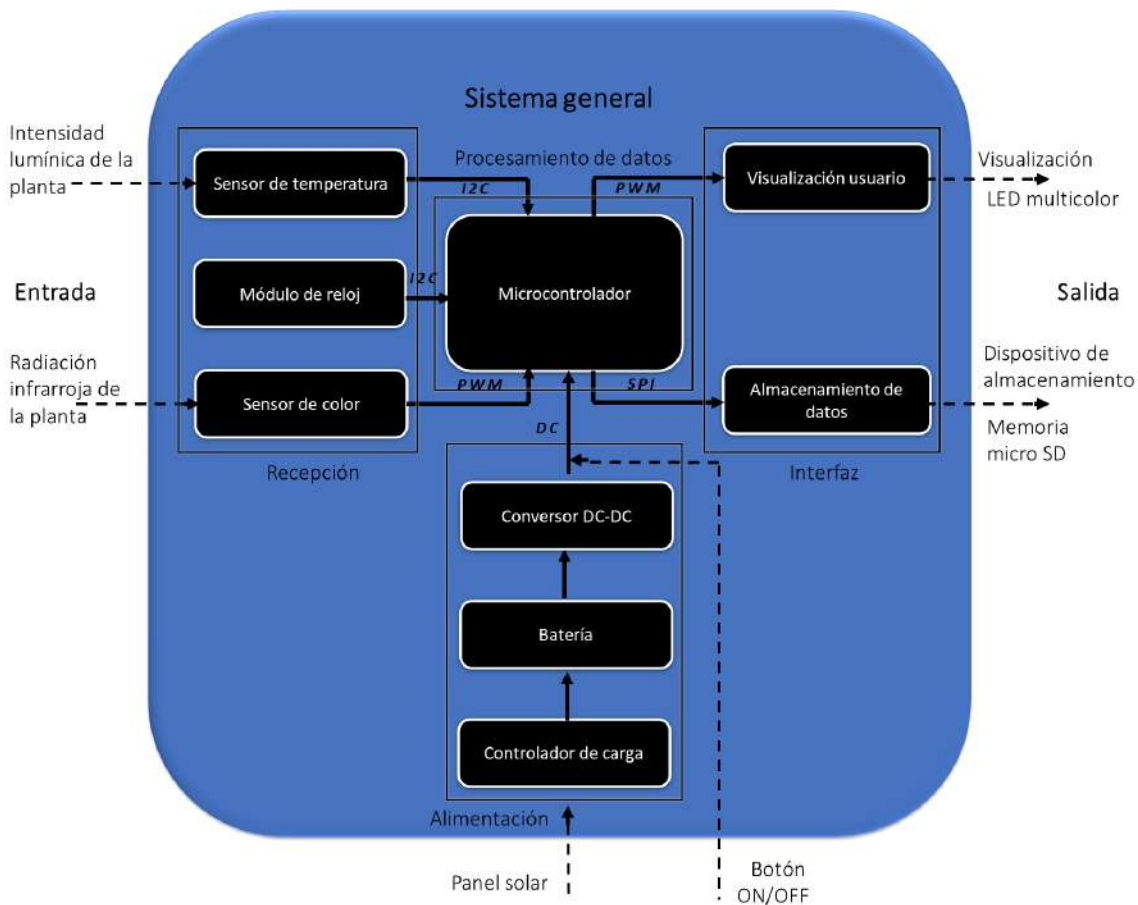


Figura 3.2: Diagrama subsistemas

### 3.2.1. Recepción

Este subsistema se encarga de recibir las señales de entrada y procesar la información captada por el sensor infrarrojo de temperatura MLX90614 y el sensor de color TCS3200. Además, este subsistema contiene un módulo de reloj que se encarga de registrar la fecha y

hora en que se toma cada muestra.

### Sensor de Color

El sensor TCS3200 (figura 3.3) es un circuito integrado compuesto por una matriz de 64 fotodiodos configurables y un convertidor de corriente a frecuencia. En el fotodiodo se genera una corriente que varía de manera proporcional con los cambios de intensidad lumínica al que es expuesto. Este sensor cuenta con cuatro grupos de 16 fotodiodos con un filtro específico para cada uno (rojo, verde, azul, sin filtro).

Las entradas o pines señalados como S2 y S3 permiten seleccionar que grupo de fotodiodos están activos, en la figura 3.4 se observa un diagrama de su funcionamiento. Cabe mencionar que estos grupos no se pueden activar de manera simultánea. La intensidad recibida de luz por parte de cada grupo de diodos, es un porcentaje de la cantidad de componente de ese color presente en la muestra.



Figura 3.3: Sensor de color TCS3200

La corriente que circula por los fotodiodos es convertida a frecuencia en forma de onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50%. Esta salida de frecuencia es directamente proporcional a la irradiancia o intensidad de luz. El sensor permite escalar la salida de frecuencia con valores relativos al 100%, 20% y 2%, que se refieren al porcentaje de corriente que es convertido a frecuencia. El escalador de frecuencia es controlado por las entradas o pines S0 y S1. La escala de frecuencia permite optimizar el rango de salida en base a la técnica de medición (medición período de la señal o medición directa del evento cambio de flanco).

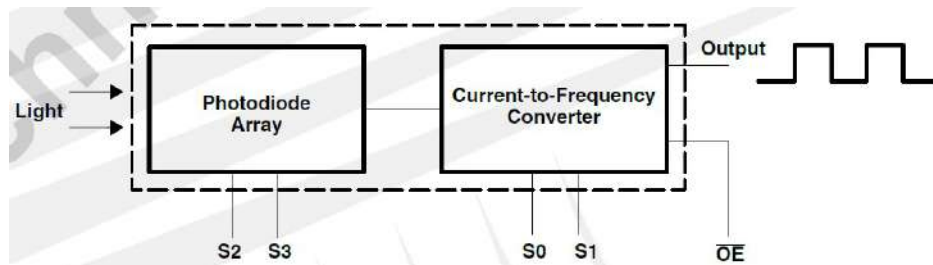


Figura 3.4: Diagrama de funcionamiento sensor TC3200. Tomado directamente de la hoja de datos

Las salidas de frecuencia a escala del 20% y 2%, son usadas para técnicas de medición de período, o en caso de usar un controlador que tiene un contador de frecuencia lento, y no permite los rangos de frecuencia en escala 100%. Por otra parte, el sensor cuenta con cuatro diodos led que facilitan la lectura de la intensidad lumínica en espacios oscuros. Estos diodos pueden ser activados o desactivados según el estado de la entrada o pin OE. Cabe resaltar que las entradas (S0,S1,S2,S3) deben ser modificadas con los estados lógicos Low y High como se indica en las tablas de la figura 3.5.

S0	S1	OUTPUT FREQUENCY SCALING ( $f_0$ )
L	L	Power down
L	H	2%
H	L	20%
H	H	100%

S2	S3	PHOTODIODE TYPE
L	L	Red
L	H	Blue
H	L	Clear (no filter)
H	H	Green

Figura 3.5: Escala de opciones de selección entradas. Tomado directamente de la hoja de datos

### Especificaciones del sensor de color

- **Tamaño sensor:** 28.4 mm (Alto) x 28.4 mm (Ancho) x 22 mm (Alto)
- **Tamaño matriz diodos:** 11 mm (Alto) x 1mm (Ancho), diodos: 110  $\mu m$ .
- **Voltaje de operación:** 2.7 V a 5.5 V.
- **Corriente de operación:** Encendido: Max 2 mA, Bajo consumo: Max 0.1 mA.
- **Temperatura de operación:** -40 °C a 85 °C.

#### Frecuencia de salida:

- **SO H, S1 = H:** 500 Khz a 600 Khz.
- **SO H, S1 = L:** 100 Khz a 120 Khz.

- **SO L, S1 = H:** 10 Khz a 12 Khz.

### Calibración del sensor TCS3200

En este caso se utiliza la escala de frecuencia del 100 %, por lo que los valores de frecuencia que suministra el sensor están entre el rango de los 500 y 600 Khz. Después de esto, se define la distancia del lente del sensor de color y la muestra, que según los experimentos realizados en el artículo [21] debe ser de 2 cm. Allí se usa el espectrofotómetro USB4000 para encontrar la altura donde se produjo la mayor intensidad de la luz, cuando el sensor de color se colocó sobre una muestra.

Para medir la frecuencia de cada filtro de color (rojo, azul, verde), se uso una caja que permitió que el sensor se ubicará a 2 cm de la muestra. Esta caja cuenta con un orificio en la parte superior donde se encuentra el sensor recubierto por cinta adhesiva para evitar su movimiento. En la parte inferior de la caja se pone la muestra. Cabe mencionar que todas las pruebas se hicieron aislando al sensor de la luz ambiente, para asegurar que está no interfiera con la medición del sensor; también se usaron los cuatro leds encendidos que hacen parte del sensor TCS3200.

La intensidad de luz captada por el sensor se puede cuantificar midiendo el periodo del pulso de la señal cuadrada que nos entrega el TCS3200. En este caso se usa la función `PulseIn()` de arduino, la cual no requiere de una librería. Esta función devuelve la longitud del pulso de la señal cuadrada en microsegundos, cada vez que detecta un flanco de subida o de bajada. De esta manera al obtener el tiempo, se puede obtener la frecuencia.

Se midió el tiempo de pulso para ambos casos, es decir, para el flanco de bajada y subida. También se tomaron varias muestras las cuales fueron promediadas antes de entregar el verdadero tiempo de pulso de la señal cuadrada dada por el sensor TCS3200. Posteriormente se normalizó el valor de la frecuencia.

Una vez se obtiene la frecuencia, esta debe transformarse a valores del espacio RGB, que varían de 0 a 255 para cada filtro de color. Para llevar esto a cabo, se utilizó la tabla `ColorChecker Classic` que se puede observar en la figura 3.6. Esta herramienta fue diseñada para ofrecer una reproducción realista del color, para que los fotógrafos puedan predecir y controlar cómo lucirá el color en cualquier tipo de iluminación. La tabla incluye una gama patentada de 24 cuadros naturales, cromáticos, primarios y de escala de grises científicamente preparados.

Esta tabla cuenta con los valores de color en el espacio RGB, que pueden ser consultados en la web, y que se observan en la figura 3.6, para cada cuadro específicamente. Por otra parte, incluye el software de calibración de imágenes 'ColorChecker camera calibration' que permite crear perfiles de color para calibrar fotografías tomadas.

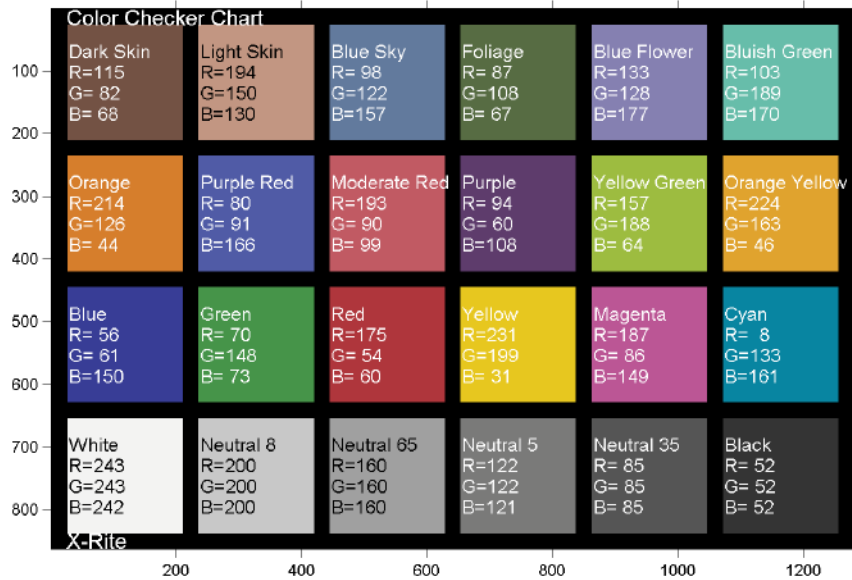


Figura 3.6: Tabla de color ColorChecker Classic con valores RGB

Como podemos observar en la parte inferior de la figura 3.6, se encuentra la escala de grises. Esta escala cuenta con los mismos valores para cada vector del espacio RGB, debido a que la única diferencia entre ellos es el brillo o luminosidad. De esta manera, se entiende que el cambio de valor entre el cuadro blanco y el cuadro negro, se da en forma lineal para cada vector de espacio, por lo que dicha escala permitirá calibrar la intensidad lumínica que capta el sensor. La calibración se puede realizar por ajuste de factor, vista en los antecedentes (Seelye, M., Gupta, G. S., Bailey, D., y Seelye, J. (2011, May)), o el ajuste de curva por regresión lineal.

### Calibración por regresión lineal

En este caso se hace uso de la función `map`, que se encarga de realizar una aproximación lineal entre dos valores, el color blanco y el color negro de la escala de grises. Esto se hace con el fin de encajar los valores del sensor entre 0 (negro) y 255 (blanco). Posteriormente, se usa la función de interpolación lineal para encontrar una aproximación entre los seis colores de la escala de grises, incluyendo los tonos rojo, verde y azul, debido a que estos corresponden a los filtros RGB. Se puede evidenciar en la figura 3.7 que al aplicar la interpolación entre más de dos puntos, el error disminuye. Cabe mencionar que estos errores se obtienen comparando el TCS3200 sin calibración con los valores de la Colorchecker, y el TCS3200 calibrado con la misma tarjeta. En la tabla 3.1, se puede observar el error absoluto medio, el error estándar porcentual y la desviación estándar de residuos.

Color	ColorChecker Classic			TCS3200 Sin calibración			TCS3200 Calibrado		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Blanco	243	243	242	243	255	255	243	244	243
Neutral 8	200	200	200	177	175	180	199	198	198
Neutral 65	160	160	160	188	185	182	165	163	165
Neutral 5	122	122	121	111	135	135	125	123	123
Neutral 35	85	85	85	157	127	116	94	88	88
Negro	52	52	52	114	107	98	60	59	62
Rojo	175	54	60	230	101	97	186	88	94
Verde	70	148	73	117	188	120	101	138	92
Amarillo	231	199	31	246	240	140	240	175	77
Azul	56	61	150	99	121	210	88	71	145

Figura 3.7: Resultados de cada componente del espacio RGB del TCS3200 calibrado y sin calibrar en comparación con la ColorChecker

Tabla 3.1: Error promedio, error porcentual y desviación estándar para los filtros de color del sensor, calibrado y sin calibrar, en comparación con la tabla ColorChecker

Color	TCS3200 Sin calibración			TCS3200 Calibrado		
	R	G	B	R	G	B
Error medio	35.56	36.00	39.90	10.90	9.50	12.70
Error %	7.25	5.21	9.10	3.61	3.50	4.93
s	23.79	16.60	28.80	11.44	11.06	15.59

### Calibración por factor

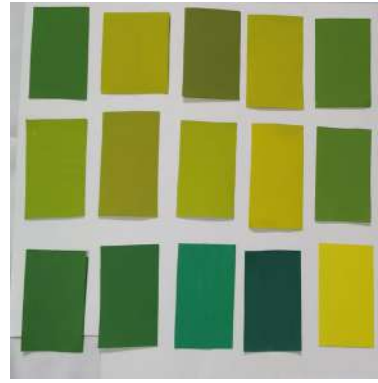
Dado que el sensor se usará específicamente para la medición de cultivos de arroz, es necesario realizar una calibración específica de los tonos de verde. De esta manera, se plantea usar el método de calibración por factores vista en [21]. Cabe resaltar, que en este caso no se utiliza la calibración por regresión lineal, debido a que su implementación resultaría ineficiente debido a que no existirá un cambio de tonalidades (solo colores verdes).

En este sentido se recomienda usar regresión lineal o algún otro método de ajuste de curvas, cuando se requiera calibrar el sensor para distintos tonos que varíen en una gama completa de valores, es decir que se calibre para la detección de rojos, verdes, azules, naranjas etc. En el caso de la sesión de calibración lineal, esta se lleva a cabo debido a las distintas tonalidades que se usan para esta calibración inicial.

El factor de calibración para cada componente del espacio RGB se obtiene aplicando la ecuación 2.7. Posteriormente se aplica la fórmula 2.8, con el fin de obtener el sensor calibrado para la tonalidad de verde. Ahora bien, dichos colores verdes se obtienen pintando trozos de cartulina con distintas combinaciones de los colores azul, rojo y amarillo. Esto se puede observar en la figura 3.8.



(a) Combinación de tonos amarillo y azul



(b) Combinación de tonos amarillo, azul y rojo

Figura 3.8: Muestras de color verde usadas para la calibración específica del sensor TCS3200

Para saber el color preciso de estas muestras, es necesario crear un perfil de color que permita calibrar la fotografía con los valores reales en el espacio RGB. De esta forma, se utilizó el software ColorChecker cámara calibración, que con una fotografía de las muestras junto a dicha tabla, permite crear el perfil de color calibrado. Posteriormente se utilizó la aplicación PhotoShop para obtener el valor en RGB de cada muestra. Los valores obtenidos y el factor de calibración por cada valor se puede observar en la figura 3.9. En la figura tabla 3.2 se puede observar los errores de cada componente, estos errores del TCS3200 con factor y sin factor, son en relación con las muestras de tono verde.

Color	Muestras de color			TCS3200 Sin factor			Factor de calibración			TCS3200 con factor		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Leaf green	43	93	55	24	77	28	0,753	0,842	0,694	59	114	51
Pine green	38	90	68	17	45	35	0,703	0,600	0,666	47	80	60
Leaf green	44	92	50	35	46	37	0,885	0,595	0,844	74	81	63
Antique	108	107	40	77	65	27	0,717	0,635	0,825	121	102	50
Olive	115	139	27	85	124	12	0,725	0,842	0,735	129	157	28
Green	94	178	67	59	152	44	0,682	0,695	0,761	102	180	71
Maximun G	82	158	37	54	101	14	0,731	0,517	0,665	97	130	31
Acid	197	187	12	165	123	3	0,593	0,425	0,688	194	156	10
Dark moss	59	105	41	40	78	23	0,790	0,749	0,760	80	115	44
Curry	156	149	16	102	102	4	0,536	0,586	0,666	144	138	12
Dark olive	97	107	38	54	66	17	0,623	0,643	0,703	97	103	36
Olive drab	126	146	23	88	78	12	0,663	0,471	0,787	131	115	28
Bistre	139	137	28	99	68	16	0,641	0,470	0,798	141	105	34
Citron	175	161	13	93	87	5	0,373	0,428	0,757	136	124	15
Sap Green	81	116	36	53	135	13	0,730	1,239	0,658	96	166	29
Green	70	148	73	46	124	25	0,755	0,755	0,539	88	157	47
Yellow G	157	188	64	112	166	28	0,589	0,710	0,626	153	191	51
Foliage	87	108	67	61	92	29	0,752	0,843	0,615	105	129	53
White	243	243	242	188	245	245	0,158	1,205	1,308	211	248	248
Black	52	52	52	23	33	24	0,661	0,778	0,673	57	65	46
<b>M.Geometrica</b>							<b>0,623</b>	<b>0,671</b>	<b>0,726</b>			

Figura 3.9: Resultados de cada componente del espacio RGB en comparación de las muestras de color verde con TCS3200 sin factor y con factor

Tabla 3.2: Error promedio, error porcentual y desviación estándar para los filtros de color del sensor TCS320, con factor y sin factor, en comparación con los resultados de las muestras de tono verde.

Color	TCS3200 Sin factor			TCS3200 con factor		
	R	G	B	R	G	B
Error medio	34.40	36.95	20.70	13.96	17.67	7.01
Error %	3.61	4.76	2.59	2.33	2.97	1.31
s	16.11	21.30	11.59	10.42	13.30	5.86

Hay que tener en cuenta que dicha calibración se realizó con una distancia establecida entre el sensor y la muestra, y que en ningún momento se modificó. Los errores vistos en la tabla 3.2, son aceptados debido a que un cambio en la saturación de las hojas de la planta, sería captada por el sensor TCS3200 con la aplicación de dicha calibración.

### Sensor de temperatura

El sensor MLX90614 es un termómetro infrarrojo sin contacto, fabricado por la empresa Melexis (figura 3.10). La temperatura de un objeto se puede estimar conociendo su potencia emisiva, basado en la ley Stefan-Boltzmann, que habla sobre la radiación de cuerpos calientes y su relación directa con su temperatura.



Figura 3.10: Sensor temperatura mlx90614

El sensor esta compuesto por una termopila que reacciona a la radiación infrarroja que emite un objeto. La superficie de la termopila que capta esta radiación, se calienta respecto a otro punto, esta diferencia de temperatura por efecto termoelectrico, se convierte en voltaje eléctrico, el cual es procesado por un circuito integrado que posee el sensor. Con el fin de realizar una estimación correcta, el sensor cuenta con un termómetro de referencia que mide la temperatura ambiente, la cual sirve para compensar la medida de la temperatura objeto (figura 3.11).

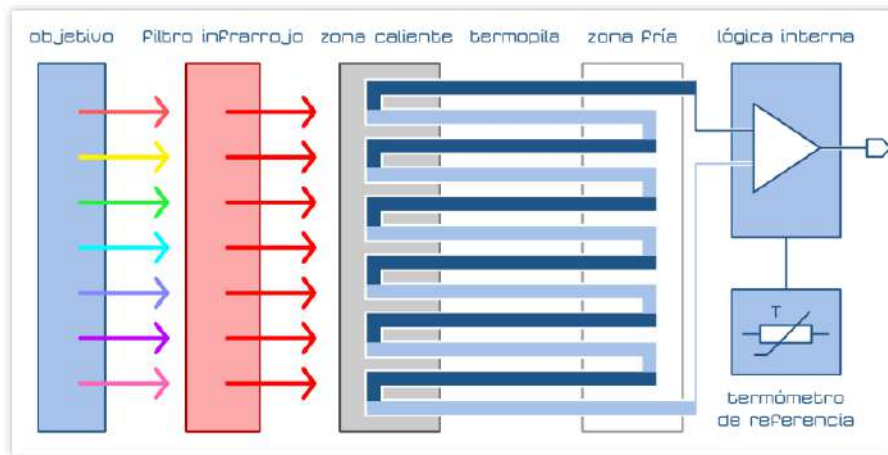


Figura 3.11: Diagrama de captación radiación infrarroja

El circuito integrado que posee el sensor, cuenta con la electrónica necesaria para amplificar, digitalizar la señal y calcular la temperatura de un objeto a distancia. El conjunto incluye un amplificador de bajo ruido, un conversor ADC de 17 bits y un DSP (procesador digital de señal).

La comunicación del sensor infrarrojo con el microcontrolador se realiza a través de SMBus, que es un subconjunto de bus I2C. Esta comunicación se establece mediante el pin SDA que se usa para enviar o recibir datos, y el pin SCL se usa para la sincronización de reloj entre el sensor y el microcontrolador. La alimentación se realiza mediante el pin VIN a 3.3V, o 5V gracias al regulador de tensión que tiene incorporado, y el pin GND se conecta a tierra o 0V.

El sensor cuenta con una memoria EEPROM donde guarda principalmente sus configuraciones, además, de la dirección del MLX90614 ubicada en la dirección 0x0E de esta memoria. La dirección por defecto para este sensor es la 0x5A. Así mismo, el sensor posee una memoria RAM de solo lectura para el usuario, en la cual se guardan los datos de la temperatura objeto en la dirección 0x07, y la temperatura ambiente en la 0x06. Para acceder a estas memorias se utiliza la librería Wire.h la cual contiene las funciones necesarias para realizar la comunicación I2C.

Por otra parte, el MLX90614 viene calibrado de fábrica en un amplio rango de temperaturas: -40 a 85 °C para la temperatura ambiente y -70 a 382 °C para la temperatura de objetos. La precisión estándar, es de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  referente a la temperatura ambiente de 0 a 50°C y temperatura objetivo de 0 a 60°C. Para mayores o menores temperaturas la precisión del sensor disminuye.

La precisión también se ve afectada por el campo de visión (FOV) del sensor, que para la versión MLX90614BAA es de 90° según su datasheet. En este ángulo de visión el sensor

capta el mayor porcentaje de la radiación térmica emitida por un objeto.

Por ejemplo, como se observa en la figura 3.12, el objeto A, esta ocupando toda el área de visión del sensor, y la única temperatura que ve es la de ese objeto, por lo que se realiza una medición con más precisión. Mientras el objeto B, al tener un área menor y estar más lejos del sensor, su temperatura se promedia con la captada del objeto B y la pared de fondo, ya que los dos comparten el mismo FOV del sensor, por lo que la temperatura de B no será precisa.

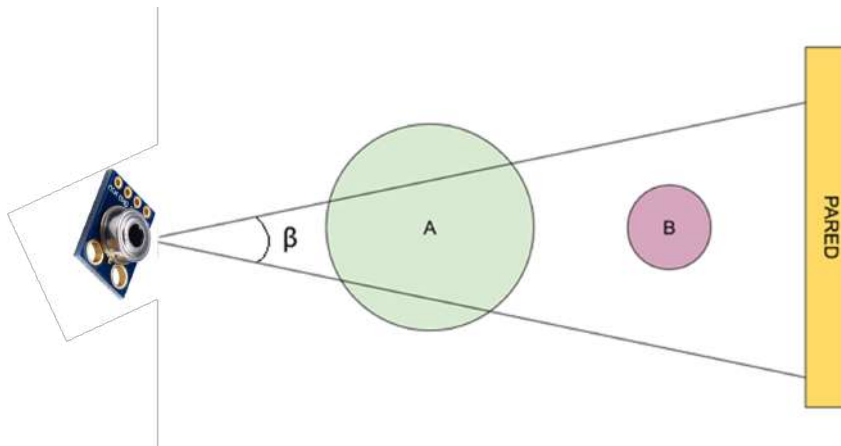


Figura 3.12: Ejemplo del FOV del sensor MLX90614

Al tener un FOV de 90°, quiere decir que por cada centímetro que se aleje un objeto del sensor, el área de visión aumenta 2cm. Por ejemplo, al tener un objeto a 50 cm, el campo de visión sera de 100 cm. Teniendo en cuenta que el área a medir de la planta de arroz es de 2 cm, el sensor se ubicará a 1 cm de la planta, esto con el fin de mejorar la precisión, y que el sensor no capte temperaturas diferentes que se encuentren detrás de la planta.

### Especificaciones técnicas del sensor de temperatura

- **Tamaño sensor:** 16 mm (Largo) x 13 mm (Ancho) x 5 mm (Alto)
- **Resolución de medición:** 0.02°C
- **Voltaje de operación:** 3V a 5V.
- **Corriente de operación:** Encendido: Max 2 mA, Bajo consumo: Max 0.5  $\mu$ A.
- **Rango de temperatura objeto:** -70°C hasta +380°C .
- **Rango de temperatura ambiente:** -40°C hasta +125°C .
- **Precisión:**  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .
- **Protocolo de comunicación:** SMBUS (I2C).

### Calibración sensor de temperatura

Al realizar mediciones en plantas de arroz, se debe tener en cuenta la emisividad de las plantas, la cual es de aproximadamente 0.98. El sensor viene calibrado de fábrica con una emisividad de 1, por ello es necesario reescribir este valor que se encuentra en la dirección 0x04 de la EEPROM del sensor. Esto se hace mediante la comunicación I2C en modo escritura mediante las funciones de la librería Wire.h a utilizar.

Para realizar la calibración del sensor, se hace uso de una cámara infrarroja FIR-T62101 (figura 3.13), la cual es facilitada por el laboratorio de electrónica de la Universidad Javeriana de Cali. Esta cámara es un dispositivo certificado para medir temperaturas mediante imágenes infrarrojas, por lo que los valores medidos de las temperatura con esta cámara, serán tomados como valores reales al momento de compararlos con los medidos por el sensor. Cabe mencionar que a la cámara térmica, se le puede configurar el valor de emisividad del objeto a medir, por lo que se establece en 0.98 que es la emisividad en plantas.



Figura 3.13: Cámara térmica y sensor infrarrojo en laboratorio

En laboratorio se registran la variaciones de temperatura de una planta, con la cámara térmica y el sensor infrarrojo al mismo tiempo. Estas variaciones van desde los 23°C a los 40°C, aplicando agua fría para bajar la temperatura de la planta y usando una pistola de calor para aumentarla. Cabe mencionar que tanto la cámara como el sensor miden el mismo punto objetivo.

Con los datos obtenidos de la temperatura entre la cámara térmica y el sensor infrarrojo, se procede a interpolar los datos mediante un trazador cúbico o spline cúbico, que permite un excelente ajuste de curva. Este método se explica a continuación.

### Interpolación de datos por spline cúbico [25]

Con esta interpolación se busca una función que ajuste un número de puntos obtenidos por muestreo de las temperaturas de una planta, medidas con una cámara térmica y el sensor infrarrojo. Al aplicar el spline se obtendrá una curva suave definida en porciones de polinomios cúbicos. El spline cúbico es el más empleado, debido a que proporciona un excelente ajuste a los puntos tabulados y su cálculo no es excesivamente complejo.

Matemáticamente es posible construir una función cúbica  $S_j(x)$  (ecuación 3.1) en cada intervalo  $[x_j, x_{j+1}]$  de manera que la curva definida a trozos  $y=S(x)$  que resulta, es dos veces derivable y la segunda derivada es continua en el intervalo completo  $[x_0, x_n]$ , en donde los valores de  $[x]$  son los puntos obtenidos por el sensor infrarrojo y los valores de  $[y]$  son los medidos con la cámara térmica.

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x), & \text{si } x_0 \leq x \leq x_1 \\ S_1(x), & \text{si } x_1 \leq x \leq x_2 \\ \vdots \\ S_j(x), & \text{si } x_j \leq x \leq x_{j+1} \\ \vdots \\ S_{n-1}(x), & \text{si } x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (3.1)$$

Por lo tanto los polinomios cúbicos son de la forma:

$$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3$$

Para  $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , donde  $n$  es el número de puntos utilizados. Si se tiene  $n$  puntos, se obtendrán  $n-1$  polinomios cúbicos.

Para encontrar los coeficientes  $a_j$  se tiene que  $a_j = y_j$ . Donde  $y_j$  son los puntos que se desean interpolar y  $j=0,1,2,\dots,n-2$ .

Para Calcular los coeficientes  $b_j$  se hace uso de las siguiente ecuación:

$$b_j = \frac{a_{j+1} - a_j}{h_j} - (2c_j + c_{j+1}) \frac{h_j}{3} \quad (3.2)$$

En donde los valores de  $h_j$  se los encuentran de la siguiente forma:  $h_j = x_{j+1} - x_j$ .

Para encontrar los coeficientes  $c_j$  se tiene que solucionar el siguiente sistema de ecuaciones visto en forma matricial de la forma  $A(x)=b$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_0 & 2(h_0 + h_1) & h_1 & \dots & 0 \\ 0 & h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & \vdots \\ 0 & & \ddots & \ddots & \\ \vdots & & & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & \dots & & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$x = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_{n-1} \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{3}{h_1}(a_2 - a_1) - \frac{3}{h_0}(a_1 - a_0) \\ \vdots \\ \frac{3}{h_{n-1}}(a_n - a_{n-1}) - \frac{3}{h_{n-2}}(a_{n-1} - a_{n-2}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

(3.5)

Finalmente para encontrar los valores de los coeficientes  $d_j$ , necesitamos los valores antes encontrados de los coeficientes  $c_j$  y los valores de  $h_j$ , para ello se hace uso de la siguiente ecuación:

$$d_j = \frac{c_{j+1} - c_j}{3h_j} \quad (3.6)$$

De esta manera se encuentran todos los coeficientes requeridos ( $a_j, b_j, c_j, d_j$ ) para crear la función a trozos  $y = S_j(x)$ , que ajusta los puntos dados.

### Aplicación spline cúbico

Para calcular los coeficientes necesarios para crear la función a trozos cúbica, que ajusta la curva por los puntos muestreados, se realiza un algoritmo en el software de MATLAB que se puede ver en el anexo de la sección 7.1, el cual es capaz de solucionar las ecuaciones requeridas, con el fin de encontrar los coeficientes que definen dicha función. El software también entrega la gráfica de la función creada.

Para realizar el ajuste de curva mediante el spline creado en MATLAB, se toman 7 puntos de temperatura medidos con la cámara térmica y el sensor infrarrojo entre 20°C a los 40°C, los cuales se pueden observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Puntos para correlación.

Número de muestra		1	2	3	4	5	6	7
Cámara térmica	$X_j$ (°C)	23	26	29	31	34	37	40
Sensor infrarrojo	$f(X_j)$ (°C)	23	28.5	31.5	34	36	39	42
Porcentaje de error (%)		0	9.6	8.6	9.7	5.8	5.4	5

Al graficar los anteriores puntos como se observa en la figura 3.14, la línea de color azul describe la trayectoria de los puntos muestreados por el sensor infrarrojo, mientras que la línea de color naranja describe los puntos que se muestrearon al mismo tiempo con la cámara térmica. Se nota que los valores tomados por el sensor, son menores que los tomados por la cámara, la mayor diferencia se da cuando la cámara térmica registra 31°C y el sensor 34°C, en donde la diferencia es de 3°C con un error del 9.7%.

Cabe mencionar, que no se tuvieron en cuenta temperaturas inferiores a 20°C, ya que las mediciones entre los dos dispositivos son iguales, por lo que no se requiere calibración para ese rango (inferiores a 20°C). Tampoco se calibró el sensor temperaturas mayores de 40°C debido a que la planta no superará estas temperaturas.

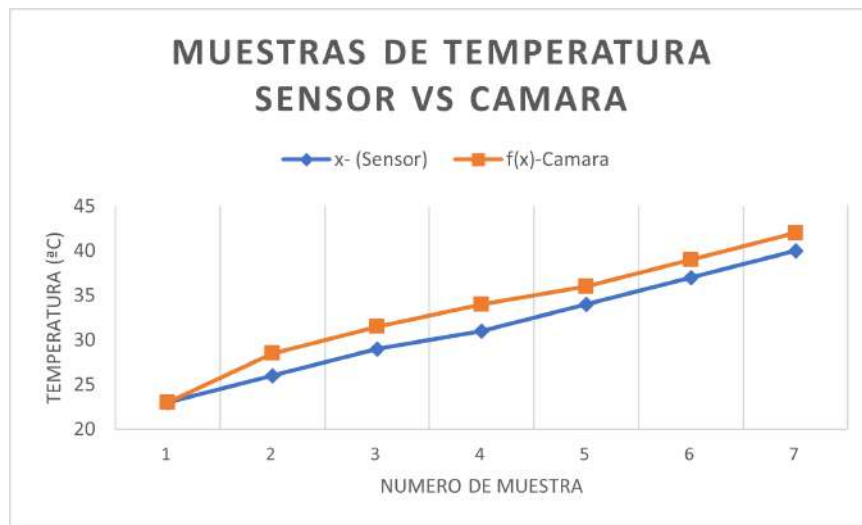


Figura 3.14: Gráfica de puntos muestreados

Al aplicar el algoritmo creado en MATLAB, se puede obtener los coeficientes de cada polinomio cúbico que une cada punto a interpolar, de los cuales obtenemos los siguiente vectores:

$$a = [23, 28.5, 31.5, 34, 36, 39, 42]$$

$$b = [2.0931, 1.3138, 1.1517, 1.0352, 7.2128e-01, 1.0796]$$

$$c = [0, -2.5976e-01, 2.0571e-01, -2.6392e-01, 1.5927e-01, -3.9817e-02, 0]$$

$$d = [-2.8862e-02, 5.1719e-02, -7.8273e-02, 4.7021e-02, -2.2121e-02, 4.4241e-03]$$

Al usar 7 puntos tendremos 6 funciones cúbicas que interpolan cada punto. Con los coeficientes obtenidos se puede crear cada función cúbica, para así poder crear la curva definida a trozos que interpola los puntos dados. Al graficar cada polinomio cúbico, tenemos una curva que se ajusta perfectamente a los puntos como se observa en la gráfica 3.15, en donde la línea roja es la curva definida a trozos y los círculos en naranja indican los puntos a interpolar, que son obtenidos con la cámara térmica.

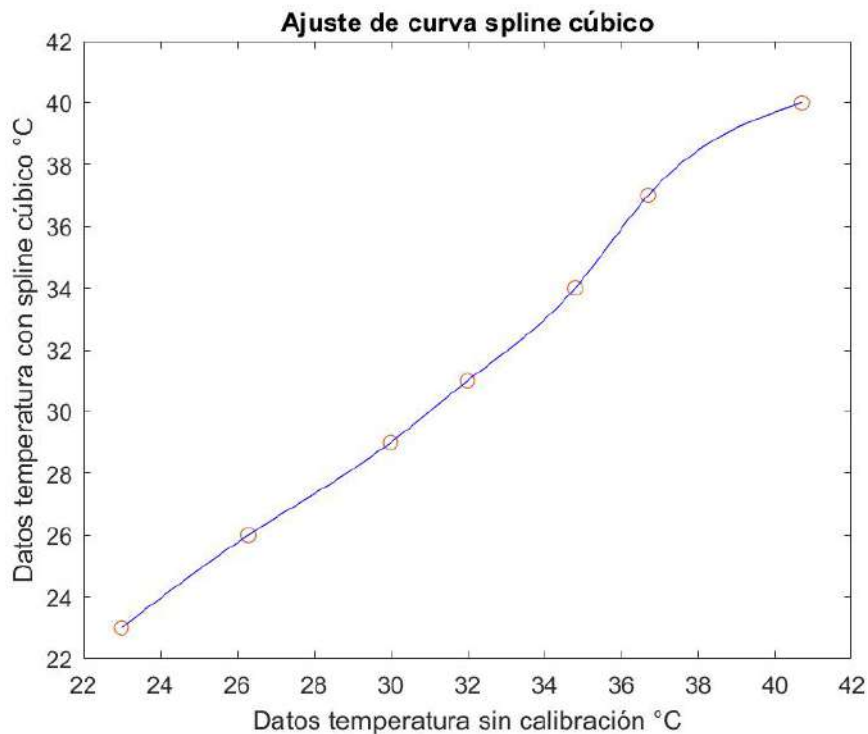


Figura 3.15: Ajuste de curva de los puntos muestreados

Después de encontrar cada coeficiente, se procede a calibrar el sensor agregando al microcontrolador las ecuaciones correspondientes, y así aproximar los datos que capta el sensor con los datos reales tomados con la cámara térmica. Estos datos se los puede observar en la tabla 3.4, en donde como resultado se obtiene un error medio de calibración de 0.58 °C, con este valor se confirma una buena calibración del sensor.

Tabla 3.4: Prueba de calibración sensor temperatura.

Número de muestra	1	2	3	4	5	6	7
Cámara térmica (°C)	23	26	29	31	34	37	40
Sensor infrarrojo calibrado (°C)	23	26.3	30	32	34.8	36.7	40.7
Media error de calibración(°C)	0.58						

### Módulo de reloj

Es necesario usar un módulo de reloj, que permita saber los instantes de tiempo en que se registran las mediciones de las variables. Esta información es relevante para el usuario, ya que permite observar el comportamiento de variables a lo largo del tiempo. Además, permite determinar los momentos en que se deben realizar las mediciones.

Para seleccionar el módulo de reloj adecuado, se tuvieron en cuenta los criterios de selección que se observan en la tablas 3.5 y 3.6. En esta última tabla se puede observar el peso o ponderado que se le dio a cada criterio.

Tabla 3.5: Criterios de selección módulo de reloj.

Dispositivos			
Criterios	DS3231	DS1307	DS1302
Costo	10.000\$	8.000\$	7.000\$
Tamaño	38mmx22mm	28mmx27mm	45mmx23mm
Memoria	32 Kb	32 Kb	32 Kb
Consumo	0.2 mA	1.5 mA	1.25 mA
Disponibilidad	Alta	Alta	Alta
Uso de alarmas	Si	No	No
Precisión	$\pm 2.5$ ppm	$\pm 3.5$ ppm	$\pm 3.5$ ppm

Tabla 3.6: Evaluación criterios de selección módulo de reloj.

Criterios	Dispositivos			
	Peso global (%)	DS3231	DS1307	DS1302
Costo	20 %	8	9	10
Tamaño	15 %	8	10	6
Memoria	10 %	10	9	10
Consumo	15 %	10	6	7
Disponibilidad	5 %	10	10	10
Uso de alarmas	20 %	10	10	10
Precisión	15 %	10	7	7
Total	100 %	9.3	8.65	8.5

**Justificación selección DS3231:** El DS3231 es un dispositivo de bajo costo, que cuenta con una alta precisión utilizando un oscilador de cristal con compensación de temperatura para mantener dicha precisión durante un largo tiempo. Además es un dispositivo con bajo consumo, tamaño reducido y una alta disponibilidad en el mercado local, algo útil en caso de requerir fabricar más prototipos o de cambiar el módulo implementado. De esta manera se optó por usar el DS3231 (figura3.16), ya que satisface en mejor medida con los requerimientos propuestos.



Figura 3.16: Módulo de reloj RTC DS3231

**Implementación del DS3231:** El microcontrolador obtiene la hora y fecha del DS3231 cada vez que se registren las variables a medir. La hora es extraída en formato de 24 horas en el orden hora/minuto/segundo con dos decimales, y la fecha se extrae de la forma día/-mes/año con dos decimales. Además, tiene una vigencia de fecha hasta el año 2100. Este módulo contiene una batería de 3.6 V que se encarga de mantener el funcionamiento de su memoria RAM integrada, que actualiza el registro de la fecha y hora cuando el módulo es

desconectado de la fuente de alimentación principal.

Los datos se transfieren hacia el microcontrolador usando el protocolo de comunicación serial I2C, mediante los pines SDA y SLC conectados a los pines A4 y A5 en el microcontrolador respectivamente. Para el funcionamiento del módulo de reloj se usan los pines Vin Y GND, que irán a los puertos de 3.3 voltios y al pin GND del microcontrolador de manera respectiva.

Para dar uso al módulo de reloj es necesario usar la librería Wire.h, ya que esta permite establecer el protocolo de comunicación I2C entre el módulo de reloj y el microcontrolador ESP32. Adicional a esto, se usa la librería RTCLib.h que permite leer los datos entregados por el módulo en un formato de fecha y hora preestablecidos. Estos datos son almacenados en una variable `DateTime now` y leídos por medio de la función `RTC.now()`.

Una vez el sistema este en funcionamiento, se compara el año leído del DS3231, con el fin de saber el funcionamiento del módulo, si el año es 2000 o 2165 quiere decir que el reloj se reinició o dejó de funcionar respectivamente, por lo que se encenderá el LED en color rojo para mostrar el fallo. Si el año es correcto se procede a comparar la hora y los minutos con el fin de saber si esta en el rango de tiempo de medición, que se da entre 11:59 a 12:01 am y pm. En este rango de tiempo, el sistema registra los datos de las variables y los guarda con la hora y fecha de medición, de lo contrario se calcula el tiempo restante para entrar al rango de tiempo de medición y se dormirá el sistema el tiempo calculado.

El proceso que realiza el módulo de reloj se puede observar en la figura 3.17. Cabe mencionar, que esta acción se lleva a cabo cada 12 horas, en el caso de las 12 de la media noche solo se registra el color de la planta, y a las 12 de medio día solo se registra el valor de temperatura.

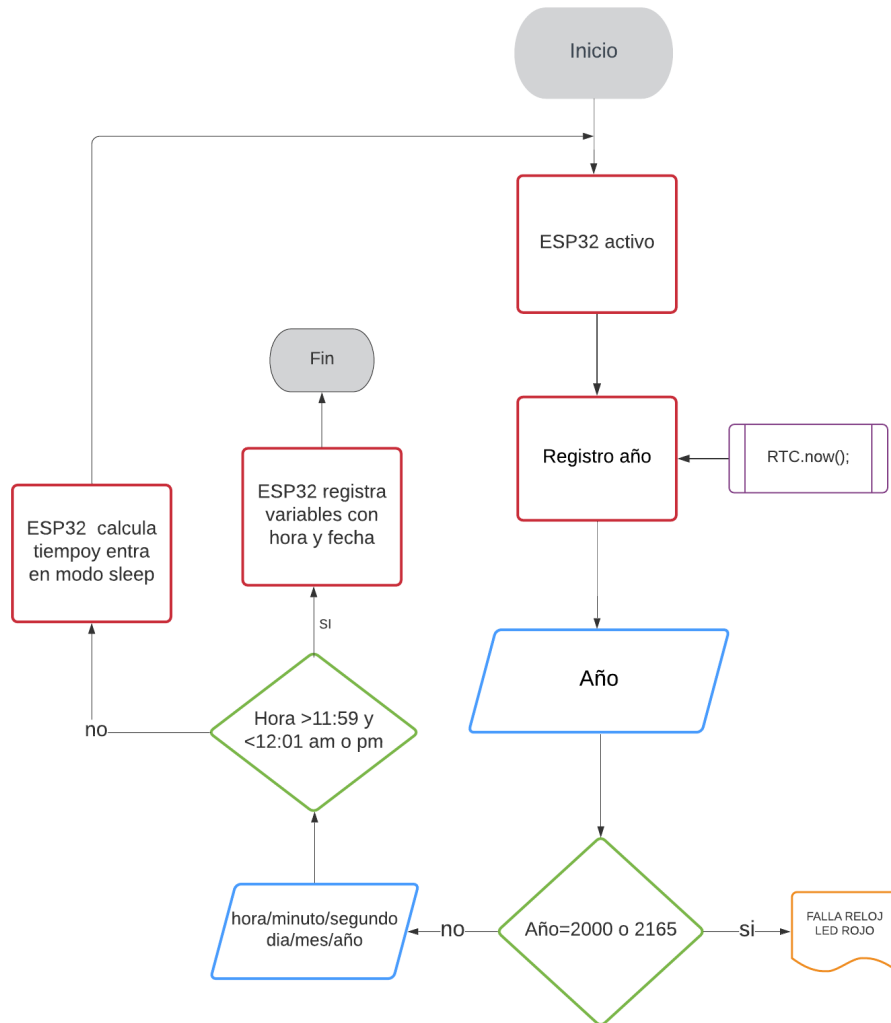


Figura 3.17: Diagrama de flujo módulo de reloj

### 3.2.2. Procesamiento de datos

La etapa de procesamiento de datos se lleva a cabo a través de un microcontrolador que se comunica mediante los distintos protocolos como SPI, I2C o PWM, aplicando las diferentes librerías y algoritmos creados. Además, se encargará de realizar los cálculos de la calibración de los datos que envía cada sensor, siendo este el que da la orden de cuando recibirlos y guardarlos en la memoria, de una forma que puedan ser entendidos por el usuario.

Para seleccionar el microcontrolador que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto, se tiene en cuenta los siguientes criterios, que se evalúan en la tabla 3.8.

Tabla 3.7: Criterios de selección microcontrolador.

Dispositivos			
Criterios	Arduino nano	ESP32	STM32
Costo	27.410\$	28.000\$	22.000\$
Tamaño	45mmx18mm	51mmx23mm	53mmx22mm
Memoria flash	32 Kb	4 MB	520 Kb
Puertos	26	38	45
Consumo	15mA	35 mA	15 mA
Consumo reposo	0.36 mA	7 uA	2 uA
Frecuencia reloj	16 Mhz	240 Mhz	72 Mhz
Documentación	Excelente	Excelente	Regular

Tabla 3.8: Evaluación de criterios de selección microcontrolador.

Dispositivos				
Criterios	Peso global (%)	Arduino nano	ESP32	STM32
Costo	20%	9	8	10
Tamaño	10%	10	8	8
Memoria	5%	6	10	7
Puertos	5%	7	9	10
Consumo	15%	10	7	10
Consumo reposo	15%	6	9	10
Frecuencia reloj	15%	5	10	7
Documentación	20%	10	10	6
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>8.6</b>	<b>9.25</b>	<b>8.9</b>

### Justificación de selección ESP32

Este dispositivo, cuenta con una velocidad de reloj lo suficientemente alta para usar la escala de 100% del sensor de color. Además, el consumo en reposo es bastante bajo para asegurar las mediciones de las variables durante el tiempo deseado. Por otra parte, cuenta con un RTC interno que se mantiene activo cuando este entra en modo sleep.

Hay que tener en cuenta, que aunque el SMT32 cumple en mejor medida el bajo consumo en reposo y en modo activo, este dispositivo no cuenta con una extensa documentación y es necesario usar un emulador para su programación. En este sentido, resulta más sencillo y práctico programar el ESP32, debido a que este usa la GUI de Arduino, una plataforma de la cual se tiene una mayor experiencia y conocimiento.

En otro sentido, este dispositivo cumple con las expectativas futuras de una comunicación inalámbrica, ya que el ESP32 cuenta con comunicación Wifi y bluetooth. Por lo que, a

diferencia de los otros microcontroladores, no es necesario un módulo RF extra.



Figura 3.18: Microcontrolador ESP32

### Especificaciones microcontrolador ESP32

- **Tamaño:** 51 mm (Alto) x 23 mm (Ancho)
- **Frecuencia máxima:** Tensilica Xtensa 32-bit LX6 Hasta 240 Mhz
- **Memoria Flash:** 4 Mbytes
- **Memoria SRAM:** 520 Kbytes
- **Conectividad:**CAN, I2C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB
- **Voltaje de alimentación:**3.3V - 12V
- **Numero de Puertos I/O:** 38 pines.
- **Temperatura de operación:**-40 a +85°C
- **Lenguaje de programación:** Arduino
- **Comunicación Wifi:** 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s)
- **Comunicación Bluetooth:** v4.2 BR/EDR and Bluetooth Low Energy (BLE)

### Implementación del ESP32

La definición de pines, para comunicar el microcontrolador con los sensores y los módulos, se encuentra en la tabla 3.9. El sensor de temperatura se comunica mediante el protocolo I2C, usando librerías `wire.h` y `Adafruit_MLX90614.h`. Estas se encargan de identificar el sensor, y leer el registro de temperatura objetivo y temperatura ambiente que se encuentran en la memoria interna del `mlx90614`.

En cuanto al sensor de color no se requieren librerías, por lo que el microcontrolador recibe las señales directamente del sensor usando la función PulseIn para filtro RGB. Cabe mencionar que estos sensores tomaran mediciones y se guardaran los datos cada 12 horas.

Tabla 3.9: Conexión de pines entre dispositivos y microcontrolador

Dispositivo	Pin	Pin ESP32
MLX90614 y DS3231	SDA	21
	SCL	22
TCS3200	S0	32
	S1	33
	S2	25
	S3	26
	OUT	27
	VCC	15
Módulo memoria	MISO	19
	MOSI	23
	CLK	18
	CS	5
Led RGB	Rojo	12
	Verde	14
	Azul	4

Cuando el usuario enciende el dispositivo, el microcontrolador obtiene la hora del DS3231 y valida que el módulo este funcionando correctamente, esto lo hace verificando que el año no sea el 2000 ni el 2165, que se presentan cuando se reinicia la fecha o existe un error de conexión respectivamente. Por otra parte, el ESP32 revisa si existe una conexión con el módulo de memoria, inicializando dicho módulo, y creando el archivo csv en caso de que no exista.

Para comprobar los estados de los sensores, el microcontrolador toma una medida inicial de ambos y valida si dichas mediciones se encuentran dentro del rango establecido, menor a 100 °C para la temperatura, y para el color en RGB entre 50 y 250. Una vez el ESP32 verifica el funcionamiento correcto de los módulos y sensores, este encenderá el led de notificaciones con el color verde por 10 segundos. En caso de que se presente algún fallo con los componentes electrónicos, el microcontrolador lo notificará al usuario por medio de diferentes colores del led.

Con el tiempo inicial tomado del DS3231, se calcula la diferencia de tiempo que existe al momento de encender el dispositivo y el tiempo propuesto para tomar los datos, que es de 2 minutos, y se da entre las 11:59 am a 12:01 am y entre 11:59 pm a 12:01 pm. De esta manera, en caso de estar fuera de estas horas se utiliza la función deep sleep para reducir el consumo, mientras el microcontrolador no esté en funcionamiento durante el tiempo calculado.

La función deep sleep recibe como parámetro el tiempo en microsegundos que permanecerá en el modo reposo. Hay que recordar que en este modo en el microcontrolador solo funcionará su RTC interno, quien se encarga de llevar el conteo del tiempo que estará en reposo. Es importante destacar, que la variable contadora para llevar este tiempo, se define como un entero de 64 bits, que permite llevar el conteo de las horas que estará dormido, ya que una variable de 32 bits solo permite llevar un conteo de 71 minutos.

En los 2 minutos de modo activo, se toman datos cada segundo hasta completar 100 muestras, después de esto el microcontrolador calcula el promedio de dicho datos y los almacena en la memoria micro SD con la hora y fecha de medición. En la figura 3.19 se observa el diagrama de flujo del funcionamiento del microcontrolador, y su interacción con los demás componentes. Como anexo en la sección 7.1, se puede observar el código implementado en el microcontrolador para el funcionamiento del sistema.

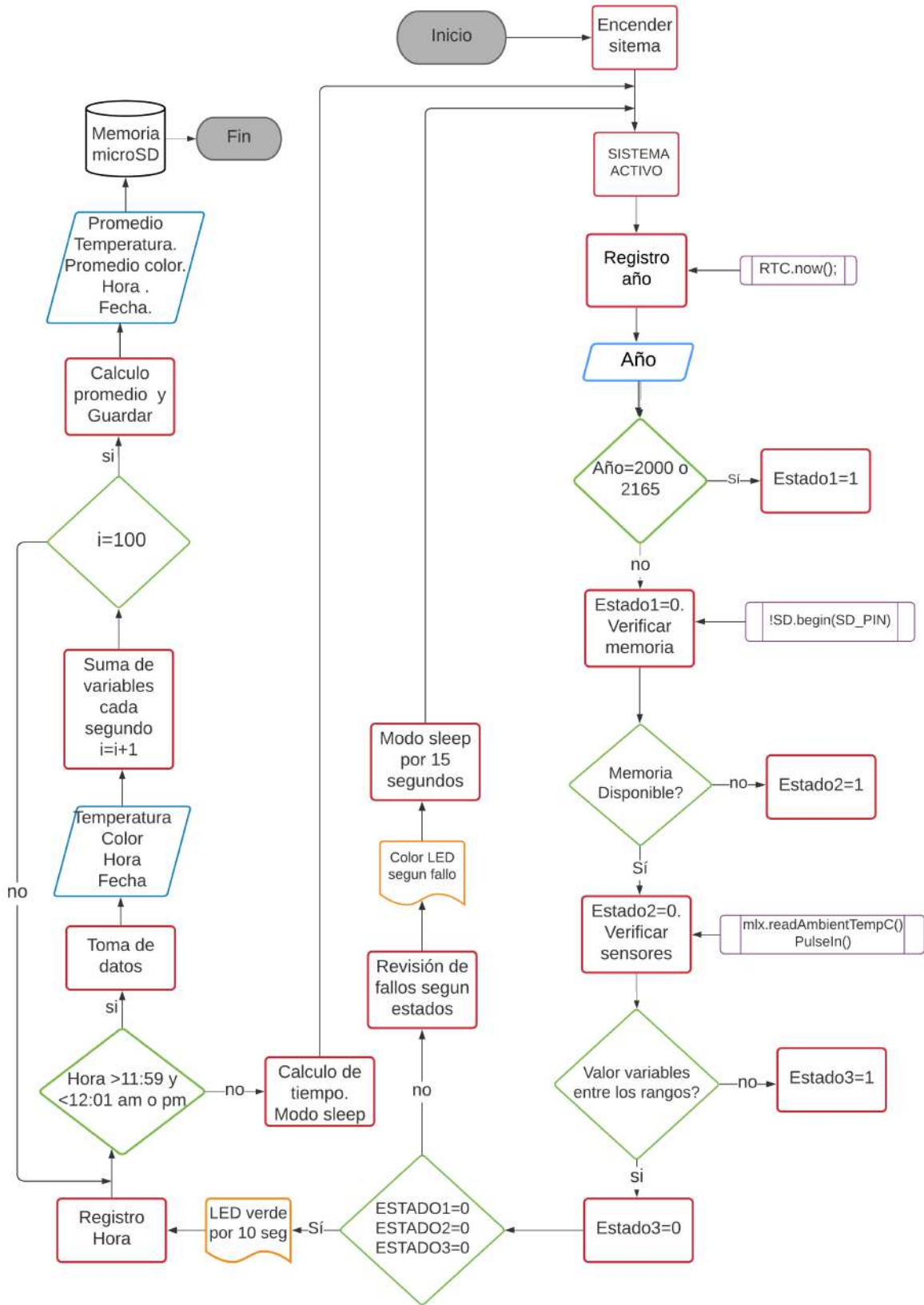


Figura 3.19: Diagrama de flujo de microcontrolador

### 3.2.3. Interfaz

Esta etapa permite al usuario obtener los datos medidos de la temperatura, color, hora y fecha en que se toma cada muestra, en formato .csv que se pueden visualizar en la aplicación de Microsoft Excel. Los datos son guardados mediante un módulo de memoria micro SD extraíble, compatible con el microcontrolador.

Por otra parte el usuario puede visualizar los estados en el que se encuentra el sistema, según el color del led, que se activará después de encender el sistema con el botón ON/OFF.

#### Almacenamiento de datos

Para que el usuario pueda interpretar de manera correcta el comportamiento de la variables medidas en la planta, es necesario disponer de una memoria que permita almacenar los datos de temperatura y color, así como los instantes de tiempo en que se realizaron las medidas. En la memoria se guarda el valor de la variable medida, su carácter de unidad correspondiente y el instante de tiempo de la medición. Cada registro almacenado tiene un peso aproximado de 30 Bytes, dado que se tomaran 2 registros diarios, se almacenarán 60 Bytes de información cada 24 horas.

Es preciso mencionar que la selección de usar una memoria es debido a que el envío de datos vía Wifi o Bluetooth supondría una infraestructura de red de telecomunicaciones. Hay que recordar que aunque el desarrollo de este trabajo esta inspirado en el programa de OMICAS, el resultado final del sistema es brindar utilidad a medianos y pequeños agricultores, que en su mayoría no cuentan con red de nodos que permita consultar los datos de manera inalámbrica.

Por consiguiente, la implementación de la comunicación inalámbrica también supondría el desarrollo de un sistema receptor ya sea para adquirir los datos de manera inalámbrica, lo que supondría una mayor disponibilidad de tiempo y de recursos con los que no se cuentan en el desarrollo de este proyecto. Además, el uso de la transmisión de datos requiere un mayor consumo energético para el sistema, por lo que la alimentación fotovoltaica debe ser recalculada.

Así mismo, el usuario no requiere consultar los datos medidos en tiempo real, si no que estos, hacen parte de un estudio de toda la etapa de crecimiento de la planta de arroz, que comprende aproximadamente 3 meses. Una vez finalizada la etapa de crecimiento de la planta, el usuario podrá hacer uso de los datos almacenados, para su respectivo análisis.

De esta manera, se eligió una memoria microSD que puede ser leída por medio de un dispositivo celular o un computador. Esta memoria cuenta con una capacidad de 2 Gb para que el sistema pueda almacenar la información de las variables, La vida útil de la memoria microSD es de aproximadamente 100 mil ciclos de escritura/lectura que aseguran como mínimo 5 años de uso.

Para comunicar la memoria con el microcontrolador se usa el módulo de memoria microSD que se ve en la figura 3.20. Este módulo cumple con los requerimientos del proyecto ya que es de bajo costo, de tamaño reducido, es de bajo consumo y cuenta con alta disponibilidad en el mercado local.

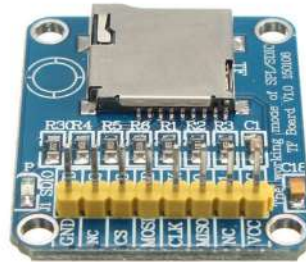


Figura 3.20: Modulo de memoria micro SD

El adaptador de memoria microSD es un módulo utilizado para la lectura y escritura de datos, esto se realiza mediante la interfaz SPI en base al modelo de protocolo maestro esclavo, donde el microcontrolador es el maestro, y el módulo microSD el esclavo. El pin MISO es el encargado de transferir los datos del microcontrolador al módulo de memoria (escritura), mientras que el pin MOSI transfiere datos del módulo de memoria a el microcontrolador(lectura). El pin SC se utiliza para seleccionar el dispositivo esclavo con el cual se va a realizar la comunicación, mientras que el pin SCK, es la señal de reloj que permite la sincronización. El pin VCC es la alimentación de 3.3V, y el pin GND es la tierra común del sistema.

Los pines de la comunicación SPI en el microcontrolador están definidos en los pines D11 para MOSI, pin D12 para MISO, pin D13 para SCK, pin D8 para DS. El IDE de Arduino proporciona la librería SPI.h que contiene las funciones necesarias para controlar el hardware integrado de los pines SPI, y la librería SD.h que incorpora funciones para el manejo de ficheros y directorios, bajo el objeto SD.

A continuación, se muestra en la figura 3.21 el funcionamiento del algoritmo programado, que establece la comunicación entre el microcontrolador y el módulo de memoria, mediante un diagrama de flujo.

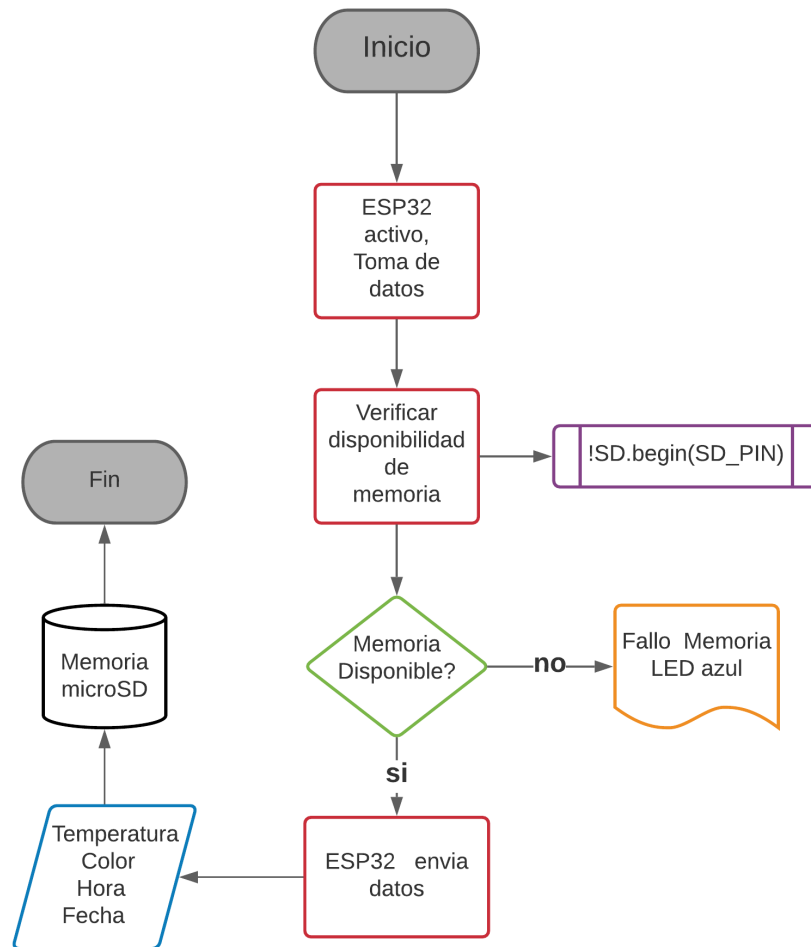


Figura 3.21: Diagrama de flujo módulo de memoria microSD

**Explicación diagrama de flujo:** Mientras el microcontrolador está en modo activo, se procede a comprobar si existe conexión con el módulo de memoria, mediante la función `!SD.begin()`, si el módulo o la memoria no se encuentran disponibles, se encenderá el led en color azul mostrando el fallo, de lo contrario el sistema registrará las variables con la hora y fecha, y enviará los datos a la memoria microSD para su almacenamiento, en el archivo llamado 'datos' con formato .csv.

### Visualización usuario

Es necesario informar al usuario sobre el estado de funcionamiento del sistema, para esto se utiliza un led multicolor de 3.3 V el cual permite notificar por medio de distintos colores, si se presenta algún fallo relacionado con las mediciones de los sensores y el funcionamiento del módulo de memoria y reloj, además, permite visualizar si el sistema encendió correctamente.

En caso de que el led no se encienda, esto puede representar un problema con el subsistema de alimentación.

En la tabla 3.10 se evidencian los diferentes estados del sistema, según el color del led de notificación. Para conocer el estado de funcionamiento, el sistema guardará un registro de las variables en el momento en que se enciende el dispositivo. En caso de que el sistema este funcionando correctamente, se encenderá el led verde por 10 segundos. En caso de que el sistema presente algún problema con el funcionamiento de los sensores o módulos, el led de notificación se encenderá cada 15 segundos, y permanecerá encendido 5 segundos de color rojo, blanco o azul según el fallo (ver tabla 3.10). Cabe mencionar, que en caso de que se presente algún fallo ya descrito, el sistema entrará en modo sleep los 15 segundos antes de encender el led que indica el fallo.

Tabla 3.10: Notificación de fallos.

Estados de notificación led		
Color	Estado	Descripción
Verde	Activo	El sistema funciona correctamente
Azul	Fallo memoria	El sistema no reconoce la memoria y/o el almacenamiento es insuficiente
Rojo	Fallo módulo de reloj	El módulo de reloj se reinicio, o existe un problema de conexión
Blanco	Fallo sensores	Los valores registrados por los sensores están por fuera del rango establecido(fallo de conexión)
Sin color	Inactivo	El sistema se encuentra apagado, no tiene suficiente batería y/o es inoperante

### 3.2.4. Alimentación

Teniendo en cuenta que se requiere registrar los datos de las variables de la planta durante sus fases fenológicas, se requiere que el sistema este en constante funcionamiento, además, debe cumplir con los requerimientos de autonomía propuestos, por lo que se plantea el uso de una fuente constante de energía. Considerando el contexto de uso del sistema, se descarta una alimentación por cable AC, por lo que se propone la alimentación DC de una batería. Esta debe ser recargable para evitar el constante cambio. Adicional a esto, para dar una mayor autonomía al sistema y cumplir con el requerimiento de portabilidad, se propone recargar la batería con una fuente de energía renovable como es la que provee el sol.

Esta energía es captada por paneles solares que se encargan de transformar la energía de

la radiación solar en energía eléctrica. La batería recargable se encarga de almacenar esta energía fotovoltaica con el fin de alimentar directamente al sistema, además, brinda los días de autonomía (3) requeridos cuando haya poca radiación solar, en la zona donde se instale el sistema.

Igualmente, se hace uso de un controlador de carga que gestiona el flujo de corriente entre el panel y la batería, regulando las cargas con el fin de evitar alguna sobrecarga que afecte a la batería, a los paneles o al funcionamiento del sistema en general. De esta manera, se procede a diseñar el sistema de alimentación fotovoltaico, definiendo el consumo de energía total del sistema, por lo que se calcula el consumo diario del dispositivo, en unidades en KWh/día (kilovatios-hora en un día).

Es preciso mencionar que todos los componentes electrónicos del sistema se alimentan con un voltaje de 3.3 V, por lo que se usó el regulador de carga que se observa en la figura 3.22, el cual recibe entre 1.8 y 5 V como voltaje de entrada y a su salida presenta un voltaje fijo de 3.3 V.

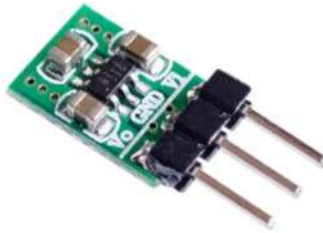


Figura 3.22: Módulo convertidor Step-Down y Step-Up de 2 en 1 DC-DC

### Consumo del sistema

Para obtener el consumo total del sistema, se procede a sumar la cantidad de energía que consume cada dispositivo electrónico que lo compone. Para encontrar el consumo de cada dispositivo ( $E$ ) se multiplica la potencia ( $P$ ) de cada uno que es voltaje ( $V$ ) de operación que para todos es 3.3V, por la corriente (mA) que consumen, por el total de horas al día (Horas/día) que estará en funcionamiento, como se puede ver en la ecuación 3.7. Cabe mencionar que el sistema tiene dos modos de funcionamiento, uno en modo activo, que es cuando se están registran los datos (activa todos los componentes del sistema), y el modo sleep que se ejecuta cuando no se registre ningún dato.

El modo activo estará en operación 2 veces al día, y tendrá una duración de 2 minutos mientras los sensores capturan las variables. El módulo de memoria y de reloj se pondrán en funcionamiento por 10 segundos para guardar los datos obtenidos con la hora y fecha. El sensor de color solo se activará una vez al día a las 12 de la noche por 2 minutos, mientras que el sensor de temperatura lo hará las 12 del medio día por los 2 minutos.

$$P(mW) = I(mA) * V$$

$$E\left(\frac{mWh}{d}\right) = P(mW) * (Horas/día) \quad (3.7)$$

El modo sleep se usa cuando no se mide ninguna variable, este modo desactiva los sensores y módulos, además de algunas funciones internas del microcontrolador. Esto influye significativamente en reducir el consumo general del sistema, teniendo en cuenta que la mayor parte del tiempo el sistema se encontrará en este modo. En la tabla 3.11 se encuentra el cálculo de consumo de cada dispositivo en modo activo, mientras que en la tabla 3.12 se puede encontrar el consumo en modo sleep de cada dispositivo.

Tabla 3.11: Consumo de los dispositivos en modo Activo

Dispositivo	I(mA)	P(mW)	Horas/día	E(mWh/d)
Microcon- trolador	5	16,5	0.0666667	<b>1,1</b>
Sensor Temperatura	1,95	6,4	0.0333333	<b>0,21</b>
Sensor color	6,2	20,5	0.0333333	<b>0,68</b>
Módulo de reloj	2,9	9,57	0.00277778	<b>0,026</b>
Módulo de memoria	10	33	0.00277778	<b>0,091</b>
Módulo de carga	0,15	0,75	0.0666667	<b>0,05</b>
LED multicolor	3,8	12,54	0.00277778	<b>0,034</b>
<b>Energía total</b>				<b>2,05</b>

Tabla 3.12: Consumo de los dispositivos en modo Sleep

Dispositivo	I(mA)	P(mW)	Hora/dia	E(mWh/d)
Microcon- trolador	1	3,3	23,933	<b>78,98</b>
Sensor Temperatura	1.5	4.95	23,966	<b>118,6</b>
Sensor color	1.3	4,3	23,966	<b>103,1</b>
Módulo de reloj	0,8	2,69	23,9997	<b>64,6</b>
Módulo de memoria	1,7	5,6	23,997	<b>134</b>
Módulo de carga	0,15	0,75	23,933	<b>17,94</b>
LED multicolor	0	0	23,997	<b>0</b>
<b>Energía total</b>				<b>517,22</b>

Al tener el consumo del sistema en modo activo y modo sleep, tenemos un consumo total de 519,27 mWh/d o 0,51927Wh/d. Cabe mencionar que el consumo en modo sleep es mayor, ya que el sistema estará en este modo la mayor parte del tiempo.

### Paneles solares

Para producir la energía necesaria para que el sistema funcione, se hará uso de la energía solar, la cual mediante paneles solares fotovoltaicos transforma los fotones provenientes del sol en electrones que producen energía eléctrica, mediante el efecto fotoeléctrico. En el mercado existen diferentes tipos de paneles solares fotovoltaicos, diseñados con distintas características como el tamaño, la eficiencia o la potencia, por ello para seleccionar el panel adecuado a las especificaciones del proyecto se hace uso de los siguientes criterios de selección:

Tabla 3.13: Criterios de selección paneles solares

Dispositivos		
Criterios	P. policristalino	P. monocristalino
Costo	6.000\$ x2	25.000\$
Tamaño	58mmx70mm x2	108mmx125mm
Tolerancia de potencia	$\pm 5$	$\pm 5$
Eficiencia	14 %	17 %
Potencia pico	0.5W x 2	1W
Coefficiente de temperatura	0.41 %/°c	0.5 %/°c
Tipo de material	Policristalino	Monocristalino
Corriente	100mA x2	200 mA

Tabla 3.14: Evaluación de criterios de selección paneles solares.

Dispositivos			
Criterios	Peso global (%)	P. policristalino	P.monocristalino
Costo	15 %	10	6
Tamaño	20 %	10	6
Tolerancia potencia	5 %	10	10
Eficiencia	10 %	7	10
Potencia pico	20 %	5	10
Coefficiente temperatura	5 %	10	8
Tipo material	15 %	10	7
Voltaje	10 %	5V	5V
Total	100 %	8.7	7.9

**Justificación de selección:** Se elije el panel solar de policristalino (figura 3.23), ya que este material es recomendado para climas cálidos porque le afecta en menor medida el sobrecalentamiento, además, presenta un menor coeficiente de temperatura respecto a al panel solar monocristalino. Este coeficiente indica que porcentaje de potencia empieza a perder por cada cada grado superior 25 grados centígrados. Por otra parte, la fabricación de los paneles solares de policristalino es más económica, y su tamaño es más reducido.



Figura 3.23: Panel solar de 5V, 100mA

La corriente y la potencia de un panel solar resulta ser insuficiente para el funcionamiento del sistema, sin embargo se optó por utilizar dos paneles solares en paralelo para obtener el doble de corriente. Igualmente en comparación con el panel solar monocristalino, su eficiencia resulta ser casi parecida, asimismo que su tolerancia de potencia. De esta manera el panel solar en fabricación de policristalino se adapta de mejor manera a los objetivos del proyecto.

**Implementación panel solar:** Una vez seleccionado el tipo de panel a utilizar, y teniendo el consumo total del sistema se procede a calcular el número de paneles solares necesarios para suplir el consumo. Para esto se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$N_T = \frac{E_T}{(HSP * P_G * P_P)} \quad (3.8)$$

En donde  $N_T$  es el número de paneles a utilizar,  $E_T$  la energía necesaria del sistema. HSP es la cantidad de horas solar pico en el peor mes, esto es el total de horas de radiación solar incidente en el peor mes, en el lugar de trabajo (Valle-Cali).  $P_p$  hace referencia a la potencia pico suministrada por el panel y  $P_G$  es el factor de pérdidas del panel solar (de 0 a 1), que tiene en cuenta pérdidas por obstrucción de partículas de polvo o deterioro del recubrimiento del panel.

Para calcular el HSP, se necesita encontrar la radiación incidente en el área de trabajo (Cali-Valle), estos datos se puede estimar mediante la aplicación online PVGIS. Se obtuvieron como referencia los valores de radiación en plano horizontal desde el año 2005 hasta el 2015. Según los datos, el peor mes de radiación se registró en septiembre del 2012, con una irradiancia de 99.86 kWh/m<sup>2</sup>/mo (Kilovatio hora por metro cuadrado por mes). Este valor se divide en los 30 días de un mes y obtenemos 3.33 kWh/m<sup>2</sup>/día (Kilovatio metro cuadrado diario). Como el valor de 1 HSP es 1 kWh/m<sup>2</sup>/día, tenemos como resultado que HSP en el

peor mes entre 2005 y 2015 en Cali es de 3.33 horas.

El factor de perdidas del panel  $P_G$  se define en 0.7, teniendo en cuenta que el dispositivo estará ubicado a la intemperie, cerca del suelo y en un lugar con presencia de partículas de polvo.

En consecuencia de lo anteriormente con un consumo de 519,27 mWh, y aplicando la fórmula 3.9 del cálculo de número de paneles solares, se obtiene que la cantidad de paneles  $N_T$  necesarios para suplir el consumo energético del sistema es:

$$N_T = \frac{0,51927Wh}{(3,33 * 0,7 * 0,5Wh)} \approx 0,45 \quad (3.9)$$

El valor obtenido es el número de paneles necesarios para el sistema. En este proyecto se usaran dos paneles conectados en paralelo para suplir el consumo total de energía y cumplir con los 3 días de autonomía propuestos.

### Especificaciones panel solar

- **Tamaño** 58 mm (Alto) x 70 mm (Ancho) x 2 mm (Grosor)
- **Corriente cortocircuito (Isc):** 13.6 uA
- **Voltaje cortocircuito (Voc):** 0.4 V
- **Corriente máxima (Imp):** 100mA
- **Tensión máxima (Vmp):** 5V
- **Potencia máxima (Pmáx):** 500mW
- **Eficiencia:** 14 %
- **Caída de Tensión de Voc (por cada °C superior a 25 °C):** 0.00164 V
- **Caída total de Voc (en 40°C):** 0.0656 V
- **Coeficiente de perdida de potencia (Temperatura ambiente 40°C a las 12:00 pm):** 40°C x -0.41 % = 16.4 %
- **Pérdida de potencia (16.4 % x 0.5W a 40°C):** 0.082 W

## Batería

Para que el sistema sea autónomo se necesita guardar la energía entregada por los paneles solares, para ello se hace uso de una batería capaz de almacenar esta energía, así como suplir el consumo del sistema. Esta batería también es capaz de dar funcionamiento al sistema en condiciones de poca radiación solar, dando energía al sistema por al menos 3 días en estas condiciones, siendo estos los días de autonomía del sistema.

Para seleccionar el tipo de batería que cumpla con los requerimientos del proyecto, se tienen en cuenta los siguientes criterios de selección:

Tabla 3.15: Criterios de selección batería.

Dispositivos			
Criterios	Batería 18650	Batería Li-po	Batería Zippy
Costo	7.000\$	40.000\$	75.000\$
Tamaño	65mmx18mm	90mmx63mm	110mmx35mm
Voltaje	3.7V	3.7V	7.4V
Corriente	4800mAh	3000mAh	2000mAh
Material	Iones litio	Polímero	Nano lico
Ciclos	1800	1000	2000
Disponibilidad	Alta	Alta	Regular

Tabla 3.16: Evaluación de criterios de selección batería.

Dispositivos				
Criterios	Peso global (%)	Batería 18650	Batería Li-po	Batería Zippy
Costo	20 %	10	6	3
Tamaño	15 %	10	4	4
Voltaje	15 %	10	10	5
Corriente	20 %	10	8	6
Material	15 %	5	8	10
Ciclos	10 %	8	7	10
Disponibilidad	5 %	10	10	8
Total	100 %	9.05	7.3	5.85

**Justificación de selección:** Se requiere que el sistema cumpla con tres días de autonomía propuestos, por lo que se busca una batería, capaz de suministrar la energía necesaria cuando no haya suficiente radiación solar en el lugar de instalación. De esta manera, se optó por la batería 18650 (figura 3.24) ya que contiene mayor potencia, además, es la batería de menor costo y tamaño, con una alta disponibilidad en el mercado local y tiene una vida útil de 1800 ciclos.



Figura 3.24: Batería recargable de Litio 18650 3.7V

**Implementación:** Una vez seleccionada la batería, se procede a comprobar si es capaz generar la suficiente energía para cumplir con los tres días de autonomía, para esto se hace uso de la siguiente ecuación:

$$C_n = \frac{N.C_s}{P_d} \quad (3.10)$$

En donde  $C_n$  es la corriente nominal de la batería en Amperios hora. Esta se calcula con los  $N=3$  días de autonomía propuestos.  $C_s$  es la corriente nominal del sistema, que es el consumo total del sistema sobre el voltaje de la batería ( $C_s = E_t / V_{bat}$ ), equivalente = 120,4 mAh, y  $P_d$  es la profundidad de descarga de la batería, este valor se define en de 70%. Aplicando los valores anteriores a la fórmula 3.11, obtenemos el siguiente valor:

$$C_n = \frac{3 \times 768,8 \text{mAh}}{0,7} = 516,1 \text{mAh} \quad (3.11)$$

Esto quiere decir que se necesita una batería con capacidad superior a 516,1mAh, y teniendo en cuenta que la batería es de 4800mAh, quiere decir que la batería si puede entregar la energía necesaria del sistema para cumplir con los días de autonomía requeridos.

Al poner a prueba el sistema sin el uso de paneles solares, se logró mantener el funcionamiento por 18 horas antes de descargarse la batería, este es el tiempo de descarga de la batería con una profundidad de descarga del 70%.

#### Especificaciones de batería

- **Dimensiones:** 65mm x 18 mm
- **Vida útil:** 1800 ciclos
- **Voltaje:** 3.7 V
- **Corriente almacenada:** 4800 mAh

### Controlador de carga

Con el fin de proteger la batería y el sistema de sobrecargas no deseadas, se implementa un controlador de carga que gestione la energía entre el panel solar y la batería, y de la batería al sistema. Para decidir que controlador se adapta mejor a requerimientos del proyecto, se tiene en cuenta los criterios de selección que se observan en la tabla 3.18, mientras que en la tabla 3.17 se encuentran las evaluaciones para cada criterio.

Tabla 3.17: Criterios de selección controlador de carga

Dispositivos		
Criterios	TP4056	CN3065
Costo	5.000\$	18.000\$
Tamaño	26mmx17mm	25mmx15mm
Consumo	0.15mA	0.20mA
Voltaje de entrada	5V	4.4-6V
Voltaje de salida	2.5-4.2V	2.5-4.2V
Disponibilidad	Alta	Regular

Tabla 3.18: Evaluación de criterios de selección controlador de carga.

Dispositivos			
Criterios	Peso global (%)	TP4056	CN3065
Costo	20 %	10	6
Tamaño	15 %	9	10
Consumo	20 %	10	9
Voltaje entrada	20 %	7	10
Voltaje salida	20 %	10	10
Disponibilidad	5 %	10	8
Total	100 %	9.25	8.9

**Justificación de selección:** Con el fin de proteger la vida útil de la batería se necesita un controlador, que permita gestionar la energía del sistema. Mientras la batería es cargada por los paneles solares y descargada por los demás dispositivos. El controlador de carga TP4056 (figura 3.25) tiene un costo y un tamaño reducido, además proporciona un bajo consumo y tiene una alta disponibilidad en el mercado local. Por otra parte, cumple con requerimientos de voltaje de entrada proveniente de los paneles (5V) así como su voltaje de carga con un rango entre 2.5 y 4.2 V ideal para la batería de 3.7 V.



Figura 3.25: Controlador de carga TP4056

**Implementación controlador de carga:** El módulo cuenta con una entrada mini USB de 5 V y una entrada de pines para los paneles solares, que permiten cargar la batería. Además cuenta dos salida, una hacia la batería y otra hacia la carga. Este controla la entrada de energía proveniente de los paneles solares a la batería, dependiendo del nivel de carga en que esta se encuentre. A medida que el voltaje de los paneles solares se eleva, el controlador regula la carga de las baterías para evitar alguna sobrecarga. Esto evita que la tensión excesiva dañe las batería o el sistema.

Por otra parte, también evita que la corriente de la batería fluya hacia los paneles y asimismo previene que la batería se descargue por completo prolongando su vida útil. Cuando la batería se descarga hasta 2.4 V el chip de protección desconectará el sistema, para proteger al panel de funcionar a una tensión demasiado baja. Igualmente protege de polaridad inversa.

#### Especificaciones controlador de carga

- **Tamaño de placa:** 17,16 x 26,17 mm
- **Voltaje de entrada:** 5 V
- **Voltaje de salida máxima:** 4.2 V
- **Corriente de carga máxima:** 1000 mA
- **Voltaje de protección:** 2.4 V
- **Temperatura de trabajo:** -10 a 85°C

## 3.3. Diagrama sistema general con componentes

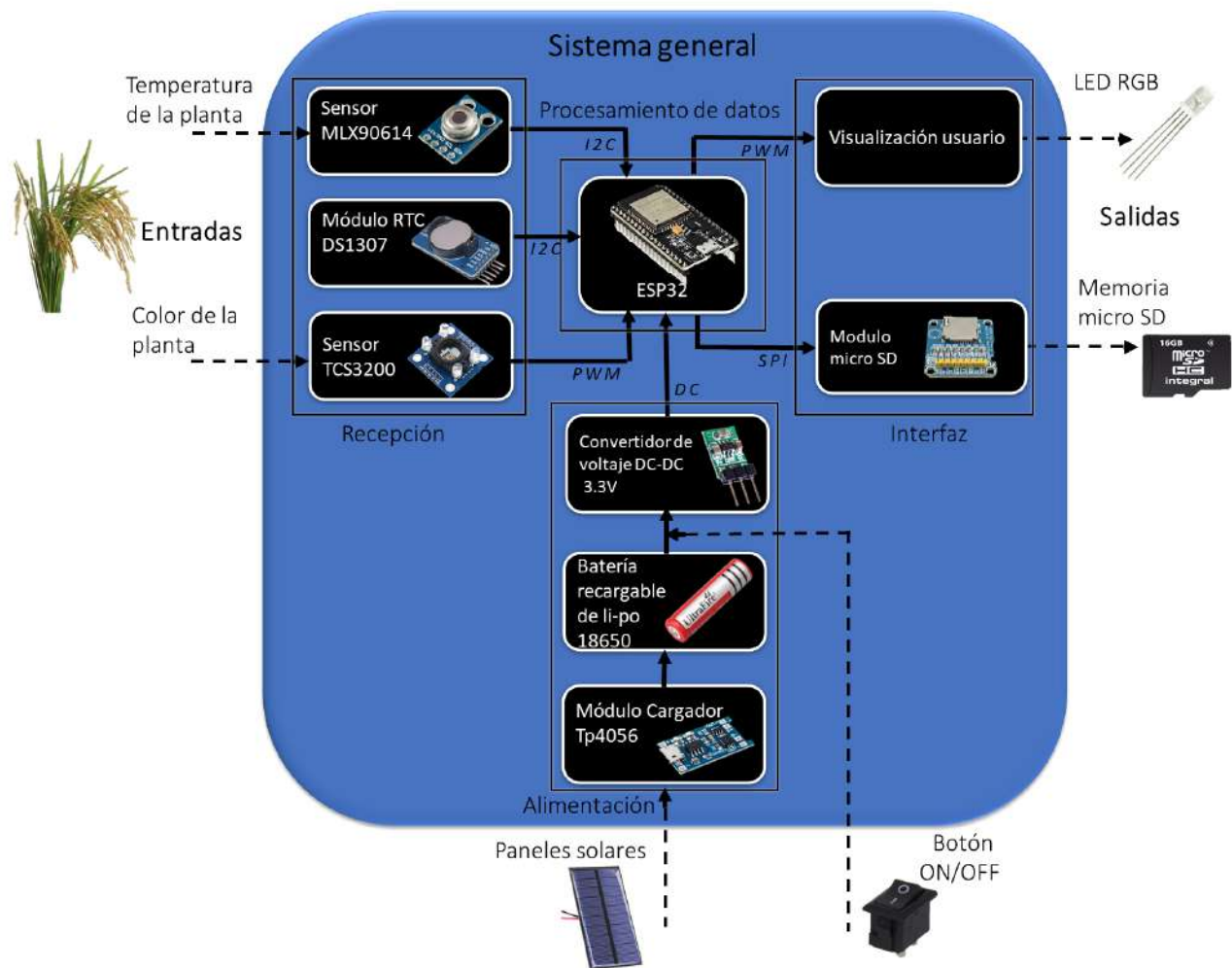


Figura 3.26: Diagrama sistema general con sus respectivos componentes

### 3.3.1. Boceto de conexiones

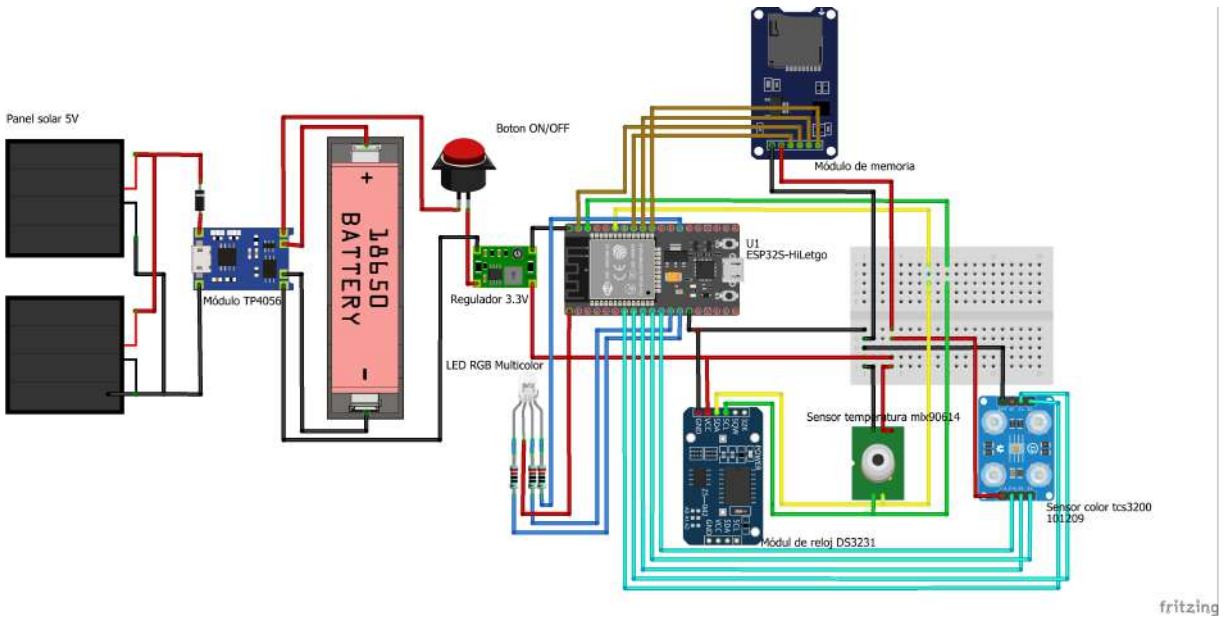


Figura 3.27: Boceto de conexiones del sistema general

## 3.4. Diseño estructural

Dado que el sistema se encontrará en el exterior bajo condiciones de humedad y temperatura elevadas, se busca diseñar una estructura que resguarde los dispositivos electrónicos de las condiciones ambientales al que será expuesto. En este caso se plantean dos alternativas generales; una alternativa es el uso de cajas de registro y otra opción es hacer uso de la impresión 3D.

Las cajas de registro permiten proteger los dispositivos de factores como la humedad y el polvo, éstas vienen con diseño y tamaños estandarizados y ofrecen diferentes niveles de protección IPX. En el desarrollo de este trabajo de grado se descartó el uso de cajas de registro, ya que las unidades encontradas en el comercio local, no favorecían el uso de los dispositivos que se usan, algunas cajas son muy grandes, otras muy pequeñas o simplemente las perforaciones donde van ubicados los sensores estaban muy separados entre sí. Hay que tener en cuenta que ambos sensores deben medir un punto cercano entre sí, y deben estar ubicados de manera lineal a la planta.

De igual forma, estos productos vienen con un color estandarizado que no satisfacían las necesidades del usuario sobre el reconocimiento y la diferenciación a distancia respecto al entorno. Por otra parte, es necesario diseñar componentes estructurales auxiliares para el soporte de los paneles solares, soporte de los componente electrónicos internos, y soportes para

el anclaje en la superficie del suelo. De igual forma es requerido el uso agregado de prensa estopas para los sensores. Por estas razones se descartó la idea del usar cajas de registro y se optó por el uso de la impresión 3D.

La impresión 3D abrió un amplio abanico de posibilidades en cuanto al tamaño, diseño, color, material, entre otros aspectos con el que se puede desarrollar el diseño estructural. Para esto, se hizo uso de la herramienta Stormboard donde se plantearon los diferentes requerimientos que debían cumplir los bocetos propuestos y que se presentan en el anexo llamado bocetos de diseño estructural en la sección 7.2. Cabe mencionar que también se desarrolló una tabla de selección, en donde se plantearon los criterios más relevantes que se tuvieron en cuenta a la hora de elegir el diseño para la impresión 3D. Cada boceto tiene en una letra del abecedario presente en esquema, la cual permite su reconocimiento frente a los demás diseños propuestos.

### **Diseño estructural exterior**

Como podemos observar en la figura 3.28, el diseño del boceto visto en el anexo C (boceto D) está inspirado en una forma elipsoide. Este se compone principalmente por su cuerpo, donde se encontrarán todos los dispositivos, y que a su vez cuenta con una tapa superior donde se ubicarán los paneles solares. Se debe tener en cuenta que como requisito, el dispositivo debe ser de fácil reconocimiento, por lo que se realizó el diseño con un color naranja.

El croquis de este prototipo se encuentra diseñado en unidades milimétricas con filamentos de PLA, debido a que es un material económico, maleable en comparación con otros filamentos, y presenta la resistencia necesaria para un prototipo. Además de esto, el PLA es un material más sostenible y más seguro que otros materiales, debido a que está hecho a base de maíz y es un material compostaje.

Cabe mencionar que en cuanto a producción en masa de este prototipo o réplicas para clientes de la agroindustria, se recomienda el uso del material ASA, el cual es un filamento de mayor durabilidad ideal para condiciones ambientales de exterior, como humedad y altas temperaturas. Las razones de porque el material ASA es más viable, se puede ver en la sección de trabajos futuros.

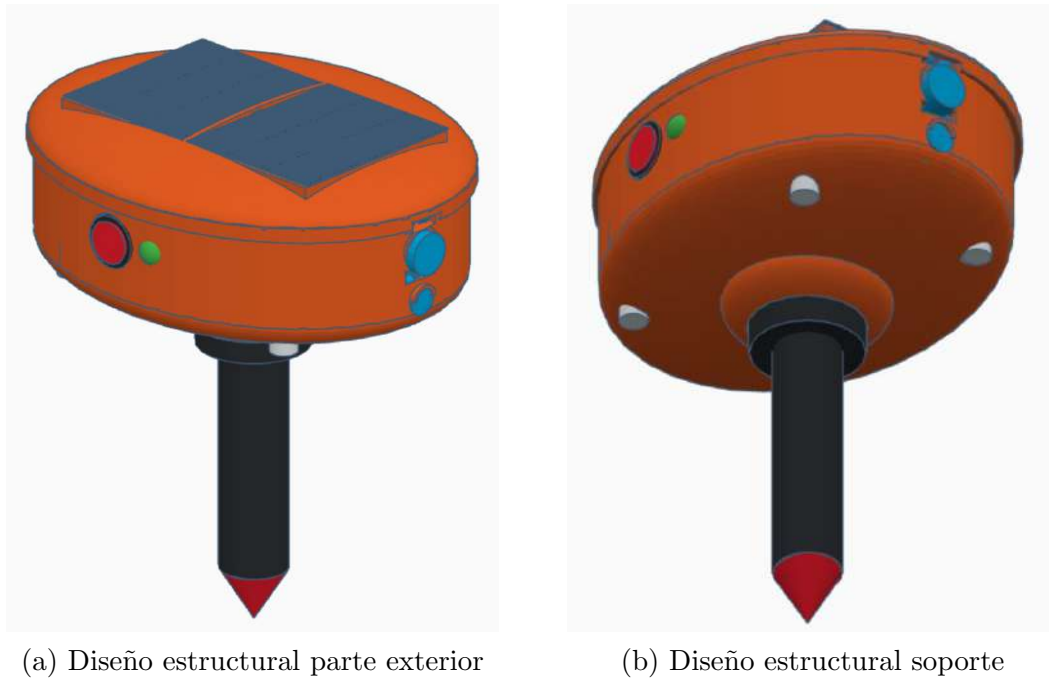


Figura 3.28: Diseño estructural del cuerpo vista de un costado y desde abajo

En la figura 3.28 se puede observar principalmente el cuerpo y la base del sistema, la base es un tubo de PVC y el cuerpo se compone de la tapa superior, la cual incluye los paneles solares y su parte inferior donde se encuentran todos los elementos electrónicos. Es preciso destacar que tanto el cuerpo como la base presentan una capa de anticorrosivo de poliuretano para brindar una mayor vida útil al prototipo.

En la parte frontal de este diseño podemos observar de color azul la abertura de los sensores. En cuanto a la abertura del sensor de color, se tiene en cuenta el uso de un acrílico que protege el sensor de las condiciones de la intemperie. El sensor de temperatura no presenta una protección de este tipo, debido a que el uso de algún material entre el sensor y la planta, afectaría las mediciones de temperatura por causa de la reflexión. En el costado derecho, se puede observar de color rojo el interruptor impermeable que permite el encendido y apagado del dispositivo. A su lado derecho se encuentra de color verde el led de notificaciones.

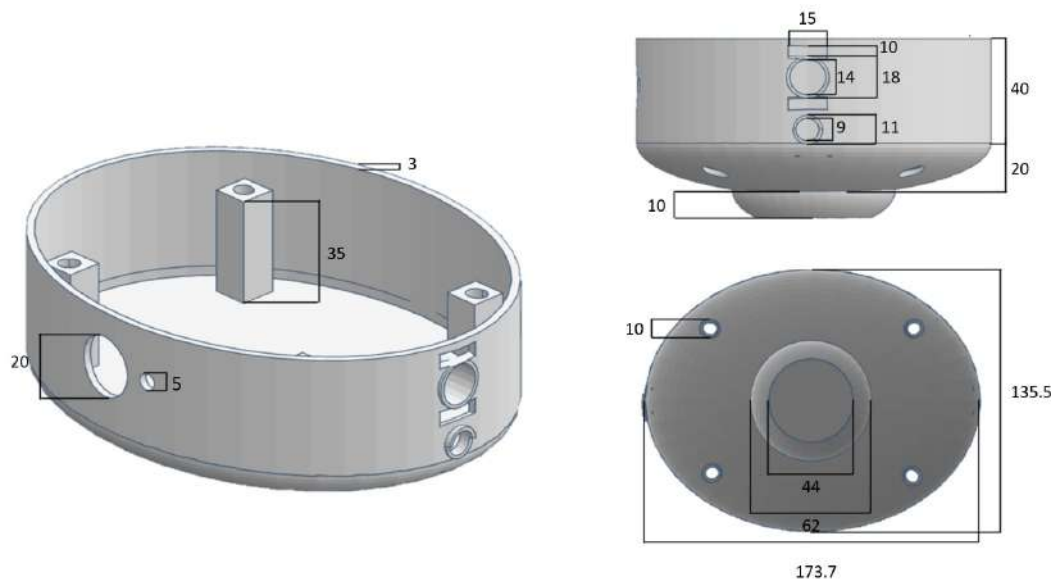


Figura 3.29: Dimensiones del diseño estructural exterior

En la figura 3.28 podemos observar el acople del cuerpo con la tapa superior, el cual se da con el uso de cuatro tornillos a sus extremos, y que el usuario deberá retirar en caso de que desee acceder a los componentes internos del sistema. Las dimensiones de la tapa superior, donde se ubican los paneles solares se pueden observar en la figura 3.30. Por otra parte, se puede visualizar la base o tubo de soporte, el cual cuenta en su parte inferior un cono, implementado con el fin de facilitar la instalación del sistema en la superficie donde estará ubicado. Las dimensiones del cuerpo del diseño estructural se pueden observar en la figura 3.29.

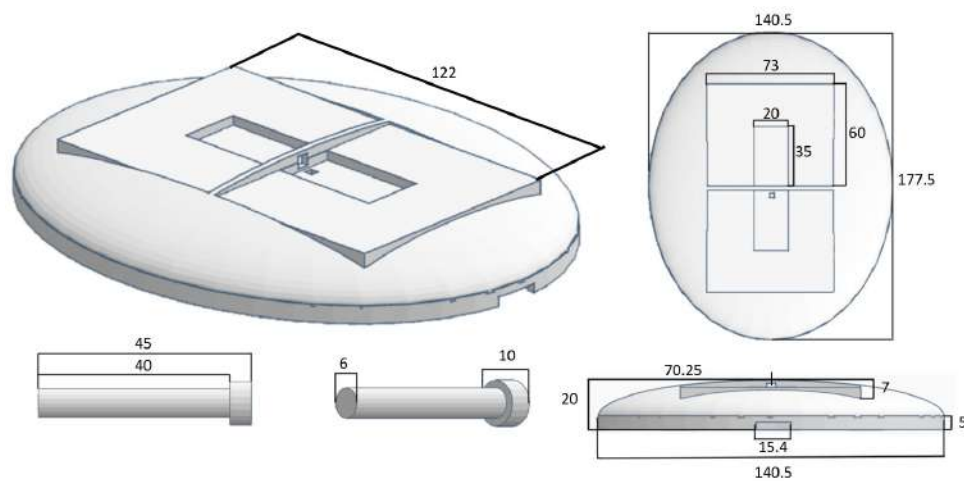


Figura 3.30: Dimensiones de la tapa donde se encuentran los paneles solares

### Diseño estructural interior

En la figura 3.31 podemos observar de color azul los distintos dispositivos modelados en 3D. Bajo estos, se encuentran de color rojo las bases donde irán acoplados los distintos componentes electrónicos. Algunos de estos módulos cuentan con la opción de ajustarlos por medio del uso de tornillos, sin embargo se optó por el acoplamiento o encaje de estos módulos en las bases, para evitar fracturar a la estructura diseñada.

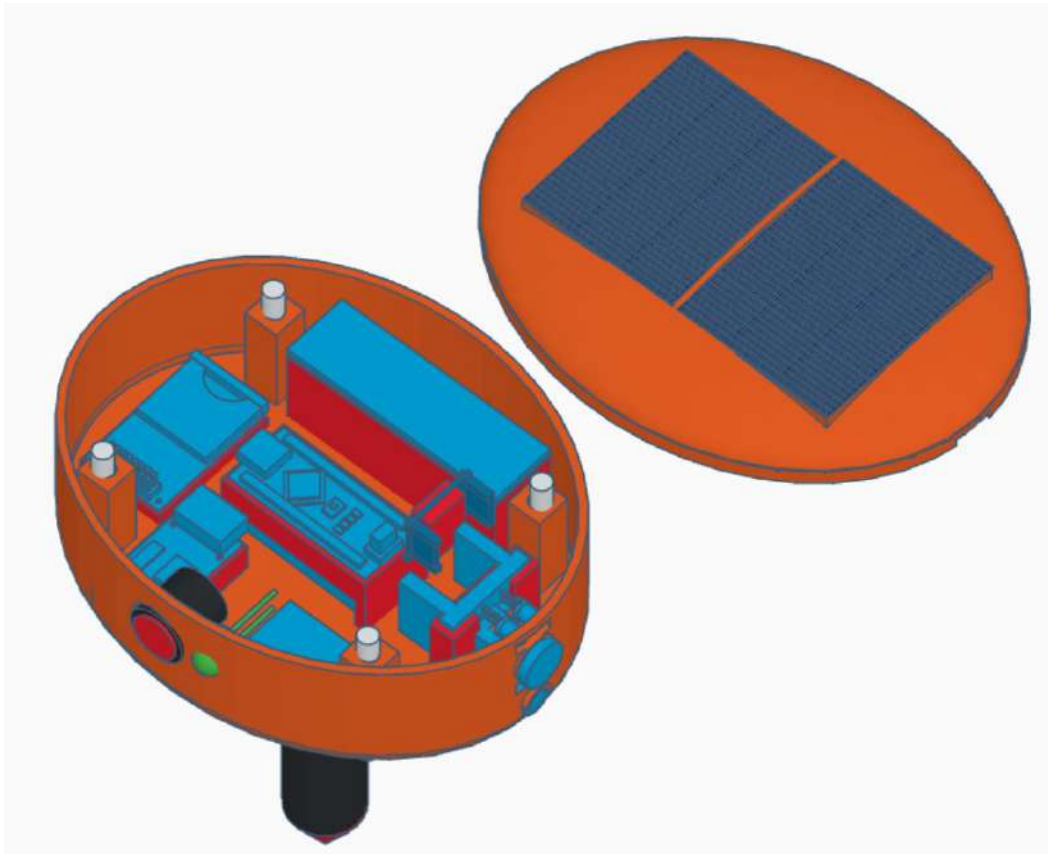
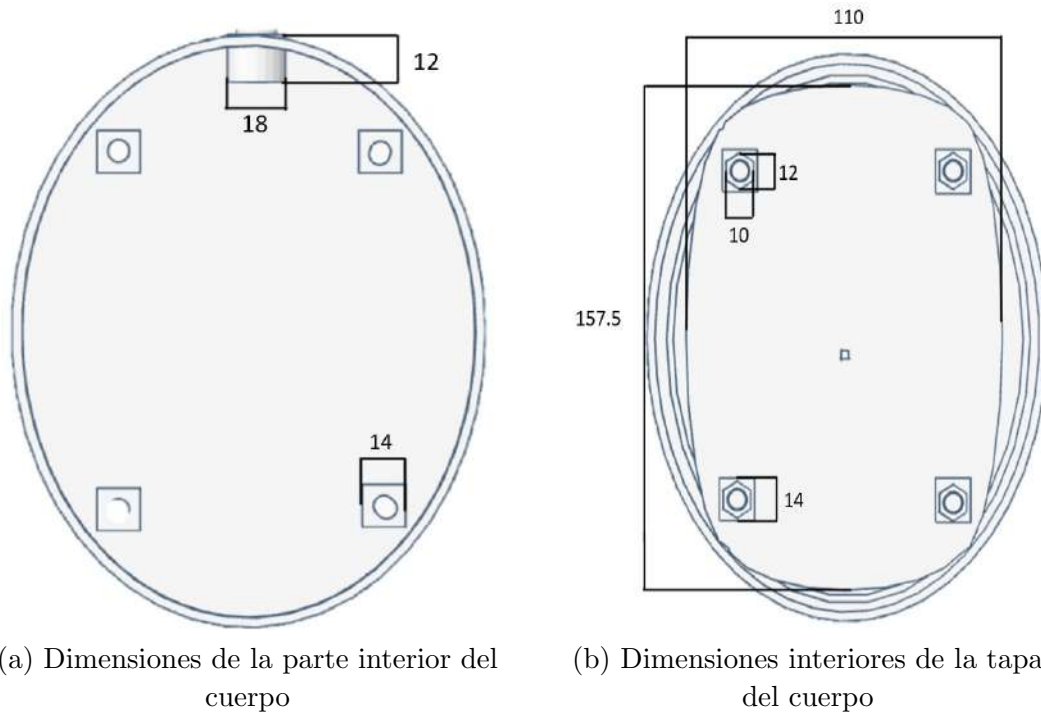


Figura 3.31: Diseño estructural parte interior

Se puede observar en la figura 3.31, de manera central la base del microcontrolador, la cual se encuentra a una altura de 2 cm, y a sus extremos cuenta con una abertura que permite la conexión con los cables de comunicación. En la parte inferior de esta figura, se visualizan los sensores de color y temperatura con sus respectivas aberturas hacia el exterior, los cuales se encuentran a la distancia recomendada para su funcionamiento. Para conocer la correspondencia de cada módulo en el diseño estructural se recomienda mirar el manual de uso, donde se detalla cada parte de dicho diseño. En la figura 3.32 podemos observar las dimensiones internas de la tapa y el cuerpo del diseño 3D realizado.



(a) Dimensiones de la parte interior del cuerpo

(b) Dimensiones interiores de la tapa del cuerpo

Figura 3.32: Dimensiones internas del cuerpo y la tapa

### 3.5. Manual de uso

El manual de uso se encuentra como anexo a este documento en la sección 7.3. En este se puede encontrar las precauciones importantes que se deben tener en cuenta antes de usar el sistema, así como las advertencias y consejos de uso. Por otra parte, también se encuentra la presentación detallada del sistema, con la señalización de sus partes y las especificaciones de este. Por último, se encuentra los pasos de instalación, uso del sistema y la lectura de los datos, junto con la detección de problemas y consejos de limpieza.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Plan de Pruebas

El plan de pruebas se encuentra como anexo a este documento en la sección 7.4. El desarrollo de esta plan de pruebas se realizó con el fin de verificar que el sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz (*Oryza Sativa* L), cumple correctamente con las pruebas de instalación, operación y desempeño, y que funcionan conforme a los requerimientos de usuario. Estos protocolos contienen una descripción de la prueba realizada, un resultado esperado y una opción para los comentarios, en donde se plantean los análisis hechos para cada prueba, así como el registro de si cumple o no cumple dicha evaluación.

Las pruebas del protocolo de instalación, se realizan con el fin de corroborar que el dispositivo pueda ser instalado en el área donde funcionará continuamente. Estas pruebas buscan que el sistema cumpla de manera eficiente con las especificaciones de diseño, tales como el acople de los dispositivos dentro del diseño estructural, que cumpla con las condiciones de temperatura y humedad al que será expuesto, asimismo como el acople que tendrá en la superficie en donde se ubicará.

Las pruebas de operación se desarrollan para validar que los elementos electrónicos funcionen correctamente, y que el sistema opera sin ningún problema. Estas pruebas buscan constatar de que los dispositivos operan al voltaje requerido y que cumplen con las especificaciones según sus hojas de datos. Igualmente en estas pruebas se registran los datos de consumo del dispositivo, la comunicación entre estos y el microcontrolador, así como la conversión de datos y su almacenamiento.

Las pruebas de desempeño se realizan para validar que el dispositivo funciona de manera correcta en las condiciones reales de operación. Estas se realizan durante un tiempo prudente (3 días) en la finca el Edén de Jamundí, Valle del Cauca. En este protocolo, se encuentran

pruebas de instalación y operación, en el caso de instalación se verifica que el dispositivo se mantenga en su posición original, y que cumpla las condiciones de temperatura a lo largo de los días de prueba, además, de la verificación del funcionamiento de los dispositivos, como consumo energético, almacenamiento de datos y la permanencia de la calibración de los sensores.

## 4.2. Análisis de resultados

La base de soporte implementada en el diseño estructural, permitió que el sistema permaneciera ajustado en el mismo punto de instalación, durante los tres días de prueba. Se recomienda utilizar distintos tubos de soporte, para las distintas alturas de la planta según el estado fenológico en que se encuentre como se observa en la figura 4.1. De otra forma, se podría utilizar un sistema mecánico para moverse de forma autónoma según la altura de la planta.



(a) Macollamiento (40 días)



(b) Floración (75 días)

Figura 4.1: Cultivos de arroz en distintas fases fenológicas

Este diseño recubierto con capas de poliuretano permitió resguardar los componentes electrónicos del sistema. Los datos entregados por el sensor DHT11, ubicado dentro del encapsulado, mostraron que la temperatura y humedad interior se mantiene menor a la temperatura y humedad del exterior. Con una diferencia aproximada de  $2^{\circ}\text{C}$  y 20 % respectivamente. El color anaranjado usado en el diseño, permite reconocer el dispositivo a distancia de hasta 20 metros.

El sistema fotovoltaico permitió que el sistema se mantuviera en funcionamiento durante los días de pruebas. El voltaje suministrado por los paneles solares durante las horas de medio día, se mantuvo aproximadamente en 5.3 V como se evidencia en la figura 4.2, este voltaje es suficiente para cargar las baterías. La batería de 4800 mAh, permitió tomar las mediciones de color durante las noches de prueba.



Figura 4.2: Prueba de paneles solares en ambiente real

La implementación de la función deep sleep en el microcontrolador, redujo el consumo de corriente a 5 mA y un consumo energético de 517.22 mWh/d. Esta potencia se calculó con el tiempo que el sistema estará en este modo, que es de cerca de 11 horas y 58 minutos, cada 12 horas. Asimismo, se obtuvo un tiempo de descarga de la batería de aproximadamente 18 horas, cuando el sistema se encuentra en funcionamiento y no cuenta con la alimentación de los paneles solares.

Los resultados de las mediciones realizadas cada 12 horas, durante los tres días de prueba, muestran que el módulo de reloj permitió activar de manera precisa el microcontrolador, registrando los instantes de medición y las variables monitorizadas. Estas medidas se realizaron cada segundo durante 2 minutos, empezando a las 11:59:00 y terminando a las 12:00:59 para el horario diurno y nocturno. Cabe mencionar que se toman 100 mediciones y el dato guardado es el valor promediado de dichas mediciones, los resultados se guardan en la memoria microSD en formato .csv con su hora y fecha. Estos valores se pudieron visualizar por medio del software Excel y se pueden observar en la figura 4.3.

TempOb(°C)	TempAm(°C)	Rojo(R)	Verde(G)	Azul(B)	Hora(H:M:S)	Fecha(D/M/A)
27.73	28.93	0	0	0	12:00:50	29/03/2021
0	0	90	131	53	0:00:50	30/03/2021
30.71	33.53	0	0	0	12:00:50	30/03/2021
0	0	85	134	55	0:00:50	31/03/2021
31.23	34.76	0	0	0	12:00:50	31/03/2021
0	0	92	133	57	0:00:50	01/04/2021

Figura 4.3: Datos .csv tomados por el sistema en los tres días de prueba

Los resultados de desempeño que se realizaron en campo real, permitieron validar la calibración de ambos sensores. En el caso de la temperatura, se utilizó la cámara infrarroja FLIR modelo T420, para registrar los valores de la temperatura de los distintos cultivos de arroz presentes en la finca el Edén. En la figura 4.4 se observan las temperaturas registradas por la cámara.

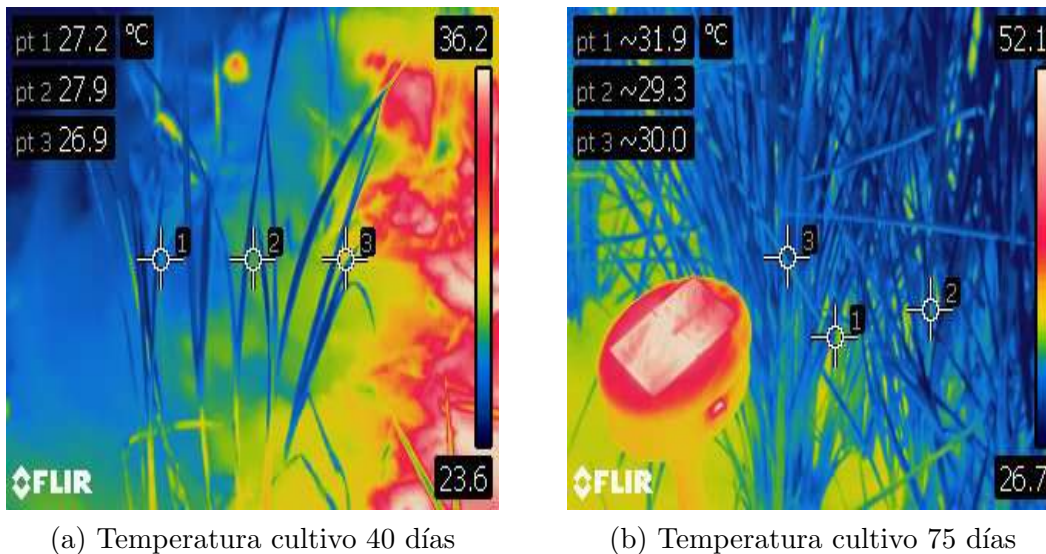


Figura 4.4: Temperatura de los cultivos de arroz en distintas fases fenológicas

Se midió el valor de la temperatura de la planta con la cámara termográfica, a la misma hora que el sensor infrarrojo realiza su medición (medio día). Al comparar estas mediciones, se obtuvieron los datos que se pueden ver en la tabla 4.1, en la cual se calcula el porcentaje de error entre las dos medidas de cada día. Al obtener un error del 1.83% para el día uno y 4% para el día 2, se valida la calibración del sensor de forma aceptable, siendo estos errores menores al 5%.

Tabla 4.1: Comparación temperatura con cámara térmica y sensor infrarrojo

Días	Día 1	Día 3
Hora	11:59 AM	11:59 AM
Cámara térmica	27.2°C	30°C
Sensor infrarrojo	27.7°C	31.2°C
Porcentaje de error	1.83%	4%

Para corroborar la calibración realizada con el sensor de color, es necesario usar un dispositivo fotográfico, y aplicar un perfil de color específico por medio de la aplicación ColorChecker camera calibration. De esta manera, se puede obtener el valor en RGB del cultivo de arroz que se evidencia en la figura 4.5. Los valores RGB tomados por el sensor y por la fotografía se puede evidenciar en la tabla 4.2, y de la cual se obtiene el porcentaje de error y se comparan las tonalidades.



(a) Fotografía tomada con luz ambiente 12 pm



(b) Fotografía tomada con luz ambiente 1 pm

Figura 4.5: Temperatura de los cultivos de arroz en distintas fases fenológicas

Al observar la tabla 4.2, se puede notar que a simple vista la tonalidad de verde entre el sensor TCS3200 y la fotografía no varía mucho. No obstante, los valores de RGB sí difieren entre sí. El porcentaje de error (comparado con la fotografía) para el filtro rojo (R) es de 5.26 %, para el filtro verde (G) se obtiene un error de 3.67 %, y en cuanto al color azul (B) se obtiene un error de 8.6 %. Una vez calculado los porcentajes de error de cada filtro, se debe pasar cada color a un solo valor decimal, con el fin de encontrar el error entre cada color. De esta forma se obtiene que el error entre el color captado por el sensor y la fotografía es de 5.47 %.

Tabla 4.2: Comparación del color del sensor TCS3200 y fotografía calibrada.

TCS3200 (Calibrado)	Fotografía (Calibrada)
RGB = 90,131,53	RGB = 95,136,58

Con el factor de calibración determinado, el TCS3200 y el MLX90614 identificaron el color y la temperatura de la planta de arroz. No, obstante para mantener dicha calibraciones, es necesario que se cumpla la distancia entre los sensores y la planta. Dado que factores como el viento, podrían mover dicha planta durante las mediciones, se podría usar un sensor de proximidad para garantizar que todas las lecturas se tomen a una distancia fija. Por otro lado, se puede implementar un sistema mecánico para modificar la posición de los sensores, respecto a la planta.

### 4.3. Análisis de costos

El diseño y la implementación del sistema, se llevó a cabo por dos estudiantes de ingeniería electrónica próximos a graduarse. El salario promedio que gana un recién egresado en Colombia, es de aproximadamente 1.295.000\$ con 160 horas de trabajo al mes, por lo que la hora de trabajo es de 8.900.75\$. Para calcular el costo de la mano de obra se realizó la siguiente tabla 4.3, en donde se evidencian las labores realizadas y el tiempo estimado en horas para cada labor.

Tabla 4.3: Costo mano de obra del proyecto

Recurso humano	Labor realizada	Tiempo estimado (horas)	Salario
Ing electrónico	Investigación de bases teóricas y antecedentes	60	534.945 \$
Ing electrónico	Selección de componentes electrónicos	40	356.030 \$
Ing electrónico	Diseño electrónico	40	356.030 \$
Ing electrónico	Diseño Estructural	60	534.945 \$
Ing electrónico	Calibración de los sensores	80	712.060 \$
Ing electrónico	Ensamblaje de los diseños	32	284.000 \$
Ing electrónico	Desarrollo de plan de pruebas	24	213.618 \$
Ing electrónico	Implementación de plan de pruebas	24	213.618 \$
	<b>Total</b>	<b>370</b>	<b>3.025.246 \$</b>

El precio de los componentes electrónicos que se usaron para el sistema, se pueden observar

en la tabla 4.4. Asimismo, en esta tabla se podrá encontrar las demás materias primas usadas durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 4.4: Precio de los componentes implementados

Componente	Precio
ESP32	28.450 \$
Sensor TCS3200	24.850 \$
Sensor MLX90614	42.670 \$
Módulo de reloj	10.000 \$
Módulo de memoria	7.500 \$
Regulador DC/DC	16.800 \$
Paneles solares	11.000 \$
Controlador de carga	5.000 \$
Batería	7.000 \$
Botón, resistencia y led	7.200 \$
Cables (3 m)	15.000 \$
Impresión en PLA	250.000 \$
Spray de poliuretano	33.000 \$
Tubo PVC y uniones	8.000 \$
<b>Total</b>	<b>466.470 \$</b>

Como puede observarse en las tablas anteriores, el precio de mano de obra equivale a 2.707.628 \$, mientras que el de los dispositivos electrónicos y demás materias primas es de 466.470\$, por lo que el costo total para el desarrollo de este proyecto es de 3.025.246\$. En caso de fabricar 100 nodos, se esperaría un descuento de aproximadamente el 40% para los componentes usados, esto debido a que se puede contactar directamente al proveedor, y al incrementarse la cantidad de dispositivos, el valor del transporte se reduciría, y el proveedor aplicaría descuentos por compra superiores a un tope. En este caso el valor de los componentes sería de 279.882 \$.

En otro sentido, el ingeniero solo se encargaría de la calibración de los nuevos sensores, el ensamblaje de los diseños y la implementación del plan de pruebas. En este caso, el tiempo de calibración por ambos sensores se reduciría a 10 horas. La implementación también se reduciría a 24 horas. Lo anterior sería por la experiencia y conocimientos obtenidos del primer prototipo. De esta manera, el precio del nodo por ingeniero sería de 516.200 \$ y el proyecto para 100 nodos tendría un precio de 79.608.200.

En el mercado existen diferentes alternativas que ofrecen sistemas similares, como las cámaras multispectrales en drones, o estaciones meteorológicas para cultivos. No obstante, estos dispositivos como el Altium MicaSense o Arabe Mark 2, son sistemas que cuestan 9.154.250 \$ y 5.492.550 \$ respectivamente. De esta manera, la implementación realizada en

este trabajo de grado, ofrece una alternativa económica para llevar a cabo análisis sobre temperatura y estados vegetativos de los cultivos.

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## CONCLUSIONES

Se logró diseñar e implementar un sistema de bajo costo, capaz de medir y almacenar las variables de color y temperatura de una planta de arroz (*Oriza Sativa L*), y a partir de esto determinar la deficiencia nutricional que pueda tener la planta. Este sistema puede ser usado por programas como OMICAS, o por grandes y pequeños agricultores, que deseen realizar un análisis de estas variables en las etapa fenológicas de su cultivo.

Teniendo en cuenta el contexto de uso, así como las condiciones ambientales a las cuales será expuesto el sistema, se logró identificar los requerimientos del proyecto, mediante búsqueda de información literaria y antecedentes. Con el fin de diseñar el sistema que satisficiera de manera eficiente dichos requerimientos. Esto permitió seleccionar los dispositivos más apropiados para las condiciones de uso.

Adicionalmente, se logró diseñar un encapsulado 3D en filamentos de PLA para permitir integrar todos los componentes electrónicos. Por otro lado, se diseñó un sistema fotovoltaico, con el que se aprovecha la energía solar para alimentar la batería recargable, y así poder suplir la energía que necesita el sistema para su funcionamiento, lo cual permite darle mayor autonomía al sistema.

Asimismo, se calibraron los sensores de temperatura y color, mediante métodos de ajustes de curva, que permitieron obtener mediciones precisas de las variables muestreadas por cada sensor. La calibración del color se realizó en el espacio RGB con el uso de una escala de grises para ajustar la luminosidad del sensor, después de esto se calibró el sensor para distintas tonalidades de verde. El sensor de temperatura se calibró teniendo en cuenta la emisividad de las plantas y el ángulo de visión del sensor.

Finalmente, se evaluó el desempeño del sistema en el contexto de uso real. Este se llevó a cabo en un cultivo de arroz donde el dispositivo permaneció durante tres días. Los resultados

obtenidos de la temperatura y el color se compararon con dispositivos certificados, evidenciando una correcta calibración con un error de 2.94 % y 5,47 % respectivamente. De igual manera, el sistema fotovoltaico suministró la energía necesaria a la batería para el correcto funcionamiento en los días de uso. Igualmente, el encapsulado impreso permitió proteger los dispositivos de las condiciones ambientales de la intemperie.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

## TRABAJOS FUTUROS

### 6.1. Diseño estructural

Con el fin de que el sistema presente un mayor tiempo de vida útil, se busca que el diseño estructural se pueda someter sin complicación, a las condiciones de humedad y temperatura al que será expuesto. En este caso se recomienda la impresión del diseño con filamentos de material ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato), que es un terpolímero amorfo termoplástico. Este material ofrece mayores niveles de resistencia a las influencias meteorológicas y a la radiación UV en comparación al filamento de ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [29].

Este material puede ser usado en impresoras 3D compatibles con este material, y es apropiado para temperaturas de hasta 100°C, por lo que resulta ideal para aplicaciones exteriores. Este material duradero conserva su color original sin amarillear, puede estar expuesto a largos intervalos de tiempo al aire libre, lluvia, frío y al agua salada del mar, además de que tiene una mayor resistencia a químicos. [30]. (En los artículos [29], [30] y [31] se puede evidenciar los pros y contras de usar este material, en comparación con los filamentos de PLA, ABS y PETG).

Hemos visto como usar filamentos del material ASA resulta ser más apropiado para los requerimientos de usuario del proyecto, puesto que es un material con mayor durabilidad y resistencia frente a las condiciones ambientales al que será expuesto (radiación UV, lluvia, altas temperaturas etcétera). Sin embargo, este material resulta ser más costoso en comparación con otros filamentos de impresión 3D, se requiere una mayor temperatura de la extrusora, alta temperatura de lecho, consume mayor energía, entre otros contras que se pueden consultar en la bibliografía [30].

Por otra parte, en caso de que no resulte viable la impresión con material ASA, se re-

comienda el uso de cajas de registro con certificación IP65 (Resistencia al agua y al polvo). Estas cajas permiten aislar los materiales electrónicos contenidos en ellas, de las condiciones del exterior al que será expuesta la caja. Por lo general ya vienen construidas bajo un estándar de diseño y de material (ABS), por lo que se requiere buscar una caja que cumpla con las condiciones de usuario respecto a tamaño, separación de sensores, costo y color.

## 6.2. Sistema embebido

Durante el desarrollo del proyecto se usaron distintos módulos los cuales contienen los elementos electrónicos necesarios para dar funcionamiento cada dispositivo, tales el módulo de reloj, de memoria y los módulos de sensores. Se recomienda usar un sistema embebido que abarque cada uno de estos módulos, de esta manera se busca ahorrar espacio y costo, puesto que es más económico conseguir cada componente electrónico por aparte y no el módulo completo. Asimismo estos módulos suelen venir con leds de notificación que resultan ser innecesarios, puesto que estos estarán fuera del alcance de la vista del usuario, además consumen energía.

Por otra parte, al usar dispositivos embebidos se puede realizar un mantenimiento más sencillo, dado que estos se pueden implementar con elementos electrónicos del mercado local. El diseño de estos sistemas embebidos, se puede desarrollar con distintos software de diseño electrónico como Altium o EAGLE, que permiten la aplicación de placas de circuitos electrónicos. Estas placas pueden ser de distintos tamaños y de distintos materiales, los cuales permiten un mayor control en cuanto a economía y cumplimiento de los requerimientos de usuario, por lo que son una mejor opción para cumplir los objetivos del proyecto y del programa OMICAS en cuanto a su replicación en masa.

## 6.3. Consulta de datos de manera inalámbrica

Abarcando de manera global la problemática y las soluciones propuestas en OMICAS, se requiere de que el sistema pueda transmitir los datos monitorizados a un gateway central, el cual recibirá los datos de los distintos sistemas presentes en el cultivo. De esta manera, es necesario usar dispositivos de transmisión RF que sean económicos y tengan un alcance de como mínimo un kilómetro de distancia. Por otra parte, hay que tener en cuenta que aunque su tamaño pueda ser reducido, es necesario un nuevo diseño estructural que contemple este módulo.

Este proyecto de grado no tiene en cuenta la implementación de un dispositivo de transmisión, al no tener conocimiento sobre el gateway central a usar, ni el tipo de modulación. Para su implementación es necesario realizar un nuevo análisis de consumo y análisis económico

para verificar la viabilidad de la solución propuesta. Sin embargo, podemos recomendar el uso del módulo Ttgo Sx1278 Lora Esp32, el cual cumple con los requerimientos de usuario en cuanto a economía, consumo, tamaño y distancia requerida de transmisión. Igualmente teniendo en cuenta sus especificaciones, puede soportar distintos modos de modulación como FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y opera a una frecuencia de 433 MHz [32].

## 6.4. Sensor de color y espacio de color

Se recomienda la aplicación del espacio de color  $L^*a^*b^*$ , también referido como CIELAB, que es actualmente uno de los espacios de color más populares y recomendables para la detección de color en superficies, ya sean de objetos, plantas, frutos o seres vivos. Este espacio de color es ampliamente usado, porque permite la correlación de los valores numéricos de color, consistentemente con la percepción visual humana.

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), una organización sin fines de lucro, que es considerada como la autoridad en la ciencia de la luz y el color, ha definido espacios de color, incluyendo CIE XYZ, CIE  $L^*C^*h$ , y CIE  $L^*a^*b^*$ , para comunicar y expresar el color objetivamente.

A diferencia del espacio RGB, en este espacio es más rápido hacer correcciones eficientes de color en Lab. El hecho de que la luminosidad es completamente ignorada en los canales a y b, hace que sea mucho menos sensible a errores. Aunque el número de valores numéricos posibles por cada píxel es menor en Lab, que en RGB o CMYK, es posible referenciar una cantidad superior de colores en total desde el sistema Lab. Además cuenta con gamas de color que no pueden ser descritos con RGB o CMYK, sino que también presenta una respuesta más precisa frente a los cambios de saturación de un mismo tono o matiz.

No obstante, la aplicación de este espacio de color requiere de un dispositivo que no cuente con filtros ya definidos para los colores primarios. Asimismo este espacio permite representar de manera precisa dicho espacio, ya que en este caso no se tienen los canales RGB (rojo, verde, azul), sino que se usa un canal (L) específicamente para la luminosidad, un canal ( $a^*$ ) con coordenadas entre rojo y verde, y un canal ( $b^*$ ) con coordenadas entre amarillo y azul. Este en este sentido, el sensor de color CIELab no cuenta con la captación de intensidad lumínica en los canales  $a^*$  y  $b^*$ , por lo que permite identificar matices de color más pequeños y la mayor estabilidad a largo plazo reduciendo el error de medición.

## 6.5. Uso de herramientas y software

Para el desarrollo de este trabajo de grado, fue necesario implementar distintas herramientas y software que ayudarán a cumplir con los objetivos propuesto. En este caso, se hizo uso de Tinkercad el cual es un programa gratuito de modelado 3D en línea que se ejecuta en un navegador web, conocido por su simplicidad y facilidad de uso. Sin embargo, durante la ejecución del modelado 3D surgieron algunos problemas relacionados con el ajuste de las partes, recortes más avanzados o detallados y formas más complejas que permitieran realizar un diseño más elaborado o específico.

En este caso se recomienda el uso de programas como Solidworks, que a pesar de que sea una herramienta más compleja y tenga una curva de aprendizaje más lenta respecto a Tinkercad, permite la modelación 3D de manera más detallada, con un control más preciso en los movimientos y recortes más exactos, además de que cuenta con figuras complejas que permiten plasmar de mejor manera las ideas propuestas en un boceto.

Se recomienda también el uso de multímetros con un rango de medición mínimo y una precisión elevada o dispositivos que permitan medir bajos niveles de corriente. Esto debido a que por cuestiones de pandemia, se usaron dispositivos de bajo calibre que no contaban con la posibilidad de medir corrientes de bajo rango (en el orden de  $\mu\text{A}$ ).

---

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Artículo publicado en LA TIERRA, periódico de la Federación Agraria Argentina, Año XCIII, Numero 7426. Rosario, Diciembre, 2005. Pagina 8, Suplemento Especial Técnico Económico. Publicado con el titulo: “El camino para un Desarrollo Rural Sostenible”
- [2] Colección de Información del Organismo Internacional de Energía Atómica, División de Información Pública: 02-01585/FS Series 2/04/S.
- [3] ALTIERI, Miguel A.; NICHOLLS, Clara I. Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. LEISA revista de agroecología, 2009, vol. 14, p. 5-8.
- [4] LÓPEZ, María del Mar Muñoz; REVELO, Martha Cecilia; PACHÓN, Helena. El consumo y la producción familiar de frijol, maíz, yuca, batata y arroz en un municipio rural en Colombia: evaluación de la posibilidad de implementar la biofortificación de cultivos. Perspectivas en Nutrición Humana, 2008, vol. 10, no 1, p. 11-21.
- [5] Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz FAO. Comisión Internacional del Arroz ; preparada por R.C. Chaudhary, J.S. Nanda y D.V. Tran.
- [6] GONZÁLEZ, María Rosario Maqueda, et al. Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. Ingeniería de recursos naturales y del ambiente, 2005, no 4, p. 14-18.
- [7] I Martínez. Termodinamica básica y aplicada. Capitulo 13. Radiación térmica. pag. 299 - 335.
- [8] Martínez, R. (1999). La teoría de la radiación del cuerpo negro. Momento, (19), 59-75.
- [9] Iñigo González de Arrieta. Aplicaciones de la radiación térmica. 18 de febrero de 2015.
- [10] Blevin, WR y Brown, WJ (1971). Una medición precisa de la constante de Stefan-Boltzmann. Metrología , 7 (1), 15.

- 
- [11] González, W. U. P., y Usuga, Y. (1991). Teoría del color (Doctoral dissertation, Unian-des).
- [12] PESQUERA, Aída; RODRÍGUEZ, Adriana. Impactos del actual TLC entre Estados Unidos y Colombia para los pequeños productores rurales. *Deslinde*, 2009, vol. 44, p. 1-17.
- [13] Ballesteros, H. B., y Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. Bogotá DC: nota técnica del IDEAM.
- [14] Martínez, A., y Magdalena, S. (2016). Influencia de las Altas Temperaturas en el Vaneamiento de dos Materiales de Arroz (*Oryza Sativa L. Subsp. Japonica*).
- [15] Reol, E. M. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Revista Ecosistemas*, 12(1).
- [16] Sainz Rozas, H., y Echeverría, H. E. (1998). Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 103.
- [17] Programa OMICAS: Optimización Multiescala In-silico de Cultivos Agrícolas Sostenibles (Infraestructura y validación en Arroz y Caña de Azúcar).
- [18] Organización de Naciones Unidas(ONU). Población. Una población en crecimiento.
- [19] Angladette, André, Vicente Ripoll, and Fermín Palomeque. *El arroz*. (1975).
- [20] 4. CENSADO NACIONAL ARROCERO 2016. Resultados. Bogotá, Colombia. Febrero 10,2016. DANE.
- [21] Seelye, M., Gupta, G. S., Bailey, D., y Seelye, J. (2011, May). Low cost colour sensors for monitoring plant growth in a laboratory. In 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Othman, M., Bakar, M. N. A., Ahmad, K. A., y Razak, T. R. (2014). Fuzzy ripening mango index using RGB colour sensor model. *Researchers World*, 5(2), 1.
- [23] A cost-effective canopy temperature measurement system for precision agriculture: a case study on sugar beet. J. Martínez G. Egeal J. Agüera M. Perez-Ruiz1. Published online: 20 August 2016. Springer Science+Business Media New York 2016.
- [24] Jin, G., Zhang, X., Fan, W., Liu, Y., y He, P. (2015). Design of non-contact infra-red thermometer based on the sensor of MLX90614. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 7(1).
- [25] Quesada, J. G. (2000). Tutorial de Análisis Numérico Interpolación: Splines cúbicos. Departamento de Informática y Sistemas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

- 
- [26] Carletti, E. J. (2007). Comunicación-Bus I2C. Robots Argentina.
- [27] LUIS LLAMAS.18 MAYO, 2016. EL BUS I2C EN ARDUINO.Disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-i2c/>
- [28] Shingare, T. D., y Patil, R. T. (2013). SPI implementation on FPGA. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2(2), 7-9.
- [29] Febrero 4, 2019. PETG vs ABS vs ASA. Filament2Print.
- [30] Jackson O'Connell. Enero 2021. ASA Filament: The Basics Best Brands in 2021.
- [31] Briceño-Martínez, B. J., Llanes-Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J. C., Chamba, E., Cuasapud, D., y Cárdenaz-Yáñez, A. (2019). Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles. Enfoque UTE, 10(3), 13-29.
- [32] SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver
- [33] Fontal, B., Suárez, T., y Reyes, M. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Escuela de la Ingeniería, 1, 24.
- [34] A. Rogalski. (2011). Infrared Detectors. New York: CRC Press
- [35] Carmona, M. L. Calibración de sensores infrarrojos utilizando la plataforma Raspberry Pi.
- [36] D. Xu, B. Xiong and Y. Wang, "Micromachined Thermopile IR Detector Module With High Performance, in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 3, pp. 149-151, Feb.1, 2011.
- [37] Barrero Mendoza, Oscar y Trujillo Hernandez, Juan y Lozano, Luis y Becerra, Nilson y Collazos, John y Varón, Gabriel y Suárez, Darío y Martínez, Yorlis y Balaguera-Reina, Sergio. (2020). Guía práctica para la generación de alertas tempranas en cultivos de arroz usando drones.

---

---

# CAPÍTULO 7

---

## ANEXOS

### 7.1. Anexo A: Códigos

#### Código Arduino sistema general:

```
1  /*CODIGO TRABAJO DE GRADO SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y COLOR
   PARA PLANTAS DE ARROZ (ORYZA SATIVA L)
2  Creado por Sebastian Arteaga- Cristian ortiz
3  PUJ Cali
4  04/2021*/
5
6  //LIBRERIAS
7  #include <Wire.h> //Comunicaci n I2C
8  #include <Adafruit_MLX90614.h>
9  #include <analogWrite.h>
10 #include <SPI.h> //librer a SPI
11 #include <SD.h> //libreria lector micro SD
12 #include "RTClib.h" //Cargamos libreria reloj RTC ds3231
13
14 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
15 RTC_DS3231 RTC;
16 File myFile; // creamos la funcion que nos permitira crear archivo de
   texto
17
18 #define SD_CS 5 //Declaramos el pin CS de la SD
19 #define PIN_COLOR 15
20 #define PIN_OUT 27 // N mero de pin al que se conecta la salida del
   pulso del TCS3200
21 #define PIN_S0 32 // N mero de pin de Arduino que conecta a S0 del
   TCS3200 (escala de frecuencia)
22 #define PIN_S1 33 // N mero de pin de Arduino que conecta a S1 del
   TCS3200 (escala de frecuencia)
```

```

23 #define PIN_S2 25 // N mero de pin de Arduino que conecta a S2 del
    TCS3200 (filtro de color)
24 #define PIN_S3 26 // N mero de pin de Arduino que conecta a S3 del
    TCS3200 (filtro de color)
25 #define TOTAL_FILTROS 3
26 #define TIMEOUT_TCS3200 10000 // M ximo tiempo de espera de lectura (en
    microsegundos)
27 #define TIEMPO_ENTRE_RESULTADOS 1000 // Esperar 3 segundos para mostrar
    el resultado
28 #define sensorOut 27
29 #define TIEMPO_ENTRE_LLECTURAS 1000 // Informar cada segundo (1000
    milisegundos)
30 #define TIEMPO_FALLA 5000
31
32
33 //Variables cronometros
34 unsigned long cronometro_lecturas=0;
35 unsigned long cronometro_lecturas2=0;
36 unsigned long cronometro=0;
37 unsigned long cronometro2=0;
38
39 //Variables sensor color
40 unsigned long cronometro_resultado=0;
41 unsigned char contador_filtro; // Contador global del n mero de filtro
    que se est procesando
42 unsigned int tiempo_pulso;
43 unsigned int contador_medidas=0;
44 unsigned int valor_calibrado;
45 unsigned int valor_mapeado;
46 float valor_restm;
47 float valor_verde;
48 String nombre[TOTAL_FILTROS]={”Rojo”,”Verde”,”Azul”};
49 float cont_pulso[TOTAL_FILTROS]={0,0,0}; // Valores medios
50 unsigned int minimo[TOTAL_FILTROS]={330,400,300}; //blanco
51 unsigned int neutral8[TOTAL_FILTROS]={440,561,430};
52 unsigned int neutral65[TOTAL_FILTROS]={568,787,593};
53 unsigned int neutral5[TOTAL_FILTROS]={697,1077,805};;
54 unsigned int neutral35[TOTAL_FILTROS]={796,1371,1017};
55 unsigned int maximo[TOTAL_FILTROS]={1150,1600,1350}; //negro
56 float factor[TOTAL_FILTROS] = {1.23353,1.10650,1.16141};
57 bool s2[TOTAL_FILTROS]={LOW,HIGH,LOW}; // Vlor del pin S2 para conseguir
    el rojo (0), verde (1) azul (2) y la luminosidad (3)
58 bool s3[TOTAL_FILTROS]={LOW,HIGH,HIGH}; // Valor del pin S3 para
    conseguir el rojo (0), verde (1) azul (2) y la luminosidad (3)
59 float rgb=255;
60 float color[TOTAL_FILTROS];
61
62 //Otras variables
63 String Datos;
64 bool estado1 = false;
65 bool estado2 = false;
66 bool estado3 = false;

```

```
67 bool estado4= false;
68 float TempO=0;
69 float TempOp=0;
70 float TempA=0;
71 float Humedad;
72 float tempa=0;
73 float tempo=0;
74 int rojo=0;
75 int verde=0;
76 int azul=0;
77 int Rojo=0;
78 int Verde=0;
79 int Azul=0;
80 int hora;
81 int minuto;
82 int segundo;
83 int i=1;
84 int ano;
85
86
87 //sensor temperatura para calibracion
88 float x[]={23 ,26, 29, 31, 34, 37,40};
89 float A[] ={23.0,28.500,31.500000000000000,34.000000000000000,36.00000000
000000,39.000000000000000,42};
90 float B[] ={2.0931 , 1.3138 , 1.31517 , 1.0352 , 0.72128 , 1.0796 };
91 float C[]={0 , -0.25976 , -0.20571, -0.26292 , 0.15927 , 0.039817,0
};
92 float D[] ={-0.028862, 0.051719, -0.078273, 0.047021, -0.022121, 0
.0044241};
93 float newvalorO;
94
95 //RTC interno contadores
96 #define uS_TO_S_FACTOR 1000000 //Conversion factor for micro seconds to
seconds
97 uint64_t sleep_time_1; //Time ESP32 will go to sleep (in seconds) son 5
horas 59 min
98 uint64_t sleep_time_2;
99 uint64_t sleep_time_3;
100 uint64_t sleep_time_4;
101 uint64_t sleep_time_5;
102
103 //SEPTUP
104 void setup() {
105 //Iniciamos librerias
106 Serial.begin(9600);
107 SPI.begin();
108 RTC.begin();
109 Wire.begin();
110 mlx.begin();
111
112 //Tomamos el a o
113 DateTime now = RTC.now();
```

```

114 int ano=now.year();
115 if (ano==2000||ano==2165){
116     estado1=true;//Falla reloj
117 }
118 //PINES LED.MULTICOLOR
119 pinMode(12,INPUT);
120 pinMode(14,INPUT);
121 pinMode(4,INPUT);
122 //PIN SD
123 pinMode (SD_CS, OUTPUT); // declaramos selector de la microSD como
    salida
124 //PINES SENSOR COLOR
125 pinMode(PIN_COLOR,OUTPUT);
126 pinMode(PIN_OUT,INPUT);
127 pinMode(PIN_S0,OUTPUT);
128 pinMode(PIN_S1,OUTPUT);
129 pinMode(PIN_S2,OUTPUT);
130 pinMode(PIN_S3,OUTPUT);
131 digitalWrite (PIN_S0,HIGH); //Maxima frecuencia S0 HIGH S1 HIGH
132 digitalWrite (PIN_S1,HIGH);
133 digitalWrite (PIN_COLOR,HIGH);
134
135 // Establecemos la hora y la fecha
136 //RTC.adjust(DateTime(a o , mes, dia , hora , min , seg));
137 //RTC.adjust(DateTime(2021,03,30,23,58,30)); //comentar despues de
    cambiar y cargar otra vez
138
139 // Initialize SD card
140 Serial.println("Initializing SD card...");
141 if (!SD.begin(SD_CS)) {
142     Serial.println("ERROR – fallo iniciando modulo de memoria");
143     estado2=true;
144 }
145 File file = SD.open("/datos.csv");
146 if(!file) {
147     Serial.println("Archivo no existe");
148     Serial.println("Creando archivo...");
149     EscribirFile(SD, "/datos.csv", "TempObj( C ) TempAm( C ) Rojo(R)
    Verde(G) Azul(B) Hora(H:M:S) Fecha(D/M/A)\r\n");
150     Serial.println("TempObj( C ) TempAm( C ) Rojo(R) Verde(G) Azul(B)
    Hora(H:M:S) Fecha(D/M/A)");
151 }
152 else {
153     delay(1000);
154     Serial.println("El archivo ya existe ");
155     Serial.println("TempObj( C ) TempAm( C ) Rojo(R) Verde(G) Azul(B)
    Hora(H:M:S) Fecha(D/M/A) ");
156 }
157 file.close();
158 //Lee temperatura y compara
159 TempO = mlx.readObjectTempC();
160 temperatura();

```

```

161 TempA= mlx.readAmbientTempC ();
162 if (newvalorO>=100 || TempA>=100) {
163     estado3=true;
164 }
165 //Lee color y compara
166 colores ();
167 if (color [0]==0&&color [1]==0&&color [2]==0 || color [0]==255&&color [1]==25
168     5&&color [2]==255) {
169     estado3=true;
170 }
171 Rojo=color [0]=0;
172 Verde=color [1]=0;
173 Azul= color [2]=0;
174 }
175 //LOOP
176 void loop () {
177     //Lee la hora
178     DateTime now = RTC.now ();
179     hora=now.hour ();
180     minuto=now.minute ();
181     segundo=now.second ();
182     //Si todo funciona calcula el tiempo a dormir segun la hora medida
183     if (estado1==false&&estado2==false&&estado3==false) {
184         if (cronometro<=TIEMPO_FALLA) {
185             Color (255 ,0 ,255); //VERDE
186             cronometro=millis ();
187         }
188         else if (hora>=00&&hora<12&&minuto>0&&minuto<=58) {
189             sleep_time_1=(((12-hora-1)*60*60)+((60-minuto-1)*60)+(60-segundo))-
190             60;
191             esp_sleep_enable_timer_wakeup (sleep_time_1* uS_TO_S_FACTOR);
192             esp_deep_sleep_start ();
193         }
194         else if (hora>=12&&hora<24&&minuto>0&&minuto<=58) {
195             sleep_time_2=(((24-hora-1)*60*60)+((60-minuto-1)*60)+(60-segundo))-
196             60;
197             esp_sleep_enable_timer_wakeup (sleep_time_2* uS_TO_S_FACTOR);
198             esp_deep_sleep_start ();
199         }
200         //Si esta en la hora de medio dia , mide temperatura y guarda promedio
201         else {
202             if (hora<=12&&hora>=1) {
203                 if ((unsigned long) (millis ()-cronometro_lecturas)>
204                     TIEMPO_ENTRELECTURAS) {
205                         digitalWrite (PIN_COLOR,LOW); //Desactivamos el sensor de color
206                         cronometro_lecturas=millis ();
207                         TempO=mlx.readObjectTempC ();
208                         temperatura ();
209                         tempo=tempo+newvalorO;
210                         i=i+1;
211                         if (i==100) {

```

```

209         TempA=mlx.readAmbientTempC();
210         TempOp= tempo/i;
211         rojo=0;
212         verde=0;
213         azul=0;
214         DatosMemoria(); //guardar
215     }
216 }
217 }
218 //Si esta en la hora de media noche, mide color y guarda promedio
219 else if(hora>12&&hora<=23 || hora==0){
220     if((unsigned long)(millis()-cronometro_lecturas)>
TIEMPO_ENTRELECTURAS){
221         cronometro_lecturas=millis();
222         colores();
223         Rojo=Rojo+color[0];
224         Verde=Verde+color[1];
225         Azul=Azul+color[2];
226         i=i+1;
227         if(i==100){
228             rojo=Rojo/i;
229             verde=Verde/i;
230             azul=Azul/i;
231             TempOp=0;
232             TempA=0;
233             DatosMemoria(); //guardar
234         }
235     }
236 }
237 }
238 }
239 //FALLAS
240 if(estados1==true){ //SI FALLA EL RELOJ
241     if(cronometro2<TIEMPO_FALLA){
242         cronometro2=millis();
243         Color(0,255,255); //ROJO
244     }
245     else{
246         cronometro2=0;
247         esp_sleep_enable_timer_wakeup(15* uS_TO_S_FACTOR);
248         esp_deep_sleep_start();
249     }
250 }
251 //SI FALLA MODULO MICROSD.O ARCHIVO
252 else if(estados2==true){
253     if(cronometro2<TIEMPO_FALLA){
254         cronometro2=millis();
255         Color(255,255,0); //AZUL
256     }
257     else{
258         cronometro2=0;
259         esp_sleep_enable_timer_wakeup(15* uS_TO_S_FACTOR);

```

```

260     esp_deep_sleep_start ();
261     }
262 }
263 //SI FALLAN SENSORES
264 else if (estado3==true){
265     if (cronometro2<TIEMPO_FALLA){
266         cronometro2=millis ();
267         Color (0,0,0); //BLANCO
268     }
269     else{
270         cronometro2=0;
271         esp_sleep_enable_timer_wakeup (15* uS_TO_S_FACTOR);
272         esp_deep_sleep_start ();
273     }
274 }
275 }
276
277 //COLOR LED RGB
278 void Color (int R, int G, int B)
279 {
280     analogWrite (12 , R) ;    // Red    – Rojo
281     analogWrite (14, G) ;    // Green  – Verde
282     analogWrite (4, B) ;    // Blue   – Azul
283 }
284
285 //CALIBRAR TEMPERATURA
286 void temperatura () {
287     //Compara valor medido y calcula el polinomio cubico segun el rango
288     if (TempO>x [1]&&TempO<=x [2]) {
289         newvalorO=(A [1]+B [1] * (TempO-x [1]) +(C [1] * pow ((TempO-x [1]) , 2) )+D [1] * pow
                ((TempO-x [1]) , 3));
290     }
291     else if (TempO>x [2]&&TempO<=x [3]) {
292         newvalorO=(A [2]+B [2] * (TempO-x [2]) +(C [2] * pow ((TempO-x [2]) , 2) )+D [2] * pow
                ((TempO-x [2]) , 3));
293     }
294     else if (TempO>x [3]&&TempO<=x [4]) {
295         newvalorO=(A [3]+B [3] * (TempO-x [3]) +(C [3] * pow ((TempO-x [3]) , 2) )+D [3] * pow
                ((TempO-x [3]) , 3));
296     }
297     else if (TempO>x [4]&&TempO<=x [5]) {
298         newvalorO=(A [4]+B [4] * (TempO-x [4]) +(C [4] * pow ((TempO-x [4]) , 2) )+D [4] * pow
                ((TempO-x [4]) , 3));
299     }
300     else if (TempO>x [5]&&TempO<=x [6]) {
301         newvalorO=(A [5]+B [5] * (TempO-x [5]) +(C [5] * pow ((TempO-x [5]) , 2) )+D [5] * pow
                ((TempO-x [5]) , 3));
302     }
303     else if (TempO>x [6]&&TempO<=x [7]) {
304         newvalorO=(A [6]+B [6] * (TempO-x [6]) +(C [6] * pow ((TempO-x [6]) , 2) )+D [6] * pow
                ((TempO-x [6]) , 3));
305     }

```

```

306 }
307
308 //Guardar variables y fecha en memoria
309 void DatosMemoria () {
310     DateTime now = RTC.now ();
311     Datos = String (TempOp) + " " + String (TempA) + " " + String (rojo) + " " +
        String (verde) + " " + String (azul) +
312     " " + String (now.hour ()) + ":" + String (now.minute ()) + ":" + String (now.
        second ()) + " " + String (now.day ()) + "/" + String (now.month ()) + "/"
        + String (now.year ()) + "\r\n";
313     AgregarFile (SD, "/datos.csv", Datos.c_str ());
314     Serial.println ("Guardando datos: ");
315     Serial.println (Datos);
316 }
317
318 //MEDIR Y CALIBRAR COLOR
319 void colores () {
320     for (contador_filtro=0; contador_filtro < TOTAL_FILTROS; contador_filtro++)
321     {
322         digitalWrite (PIN_S2, s2 [contador_filtro]);
323         digitalWrite (PIN_S3, s3 [contador_filtro]);
324         contador_medidas++;
325         pulseIn (PIN_OUT, LOW, TIMEOUT_TCS3200); // Esperar a que cambie el
        estado a bajo
326         tiempo_pulso=pulseIn (PIN_OUT, HIGH, TIMEOUT_TCS3200); // Tiempo
        transcurrido hasta que cambia el estado (medio ciclo)
327         tiempo_pulso+=pulseIn (PIN_OUT, LOW, TIMEOUT_TCS3200); // Volver a medir
        para completar y ciclo y disminuir un poco el error
328         cont_pulso [contador_filtro]=cont_pulso [contador_filtro]*
        (contador_medidas-1)/contador_medidas+(float) tiempo_pulso/
        contador_medidas;;
329     }
330
331     if ((unsigned long) (millis ()-cronometro_resultado) >
        TIEMPO_ENTRE_RESULTADOS)
332     {
333         cronometro_resultado=millis ();
334         contador_medidas=0;
335         for (contador_filtro=0; contador_filtro < TOTAL_FILTROS; contador_filtro
        ++))
336         {
337
338
339             if (cont_pulso [contador_filtro] <= neutral8 [contador_filtro])
340             {
341                 valor_mapeado=map (cont_pulso [contador_filtro],
        minimo [contador_filtro], neutral8 [contador_filtro], 255, 200);
342                 valor_restm=constrain (valor_mapeado, 200, 255)/rgb;
343                 valor_verde=(pow (valor_restm, factor [
        contador_filtro]))*rgb;
344
345             }

```

```

346
347     if (cont_pulso [ contador_filtro ] > neutral8 [ contador_filtro ] &&
cont_pulso [ contador_filtro ] <= neutral65 [ contador_filtro ])
348     {
349         valor_mapeado = map ( cont_pulso [ contador_filtro ] ,
neutral8 [ contador_filtro ] , neutral65 [ contador_filtro ] , 200 , 160 ) ;
350         valor_restm = constrain ( valor_mapeado , 160 , 200 ) / rgb ;
351         valor_verde = ( pow ( valor_restm , factor [ contador_filtro
])) * rgb ;
352     }
353
354     if (cont_pulso [ contador_filtro ] > neutral65 [ contador_filtro ] &&
cont_pulso [ contador_filtro ] <= neutral5 [ contador_filtro ])
355     {
356         valor_mapeado = map ( cont_pulso [ contador_filtro ] ,
neutral65 [ contador_filtro ] , neutral5 [ contador_filtro ] , 160 , 122 ) ;
357         valor_restm = constrain ( valor_mapeado , 122 , 160 ) / rgb ;
358         valor_verde = ( pow ( valor_restm , factor [ contador_filtro
])) * rgb ;
359     }
360
361     if (cont_pulso [ contador_filtro ] > neutral5 [ contador_filtro ] &&
cont_pulso [ contador_filtro ] <= neutral35 [ contador_filtro ])
362     {
363         valor_mapeado = map ( cont_pulso [ contador_filtro ] ,
neutral5 [ contador_filtro ] , neutral35 [ contador_filtro ] , 122 , 85 ) ;
364         valor_restm = constrain ( valor_mapeado , 85 , 122 ) / rgb ;
365         valor_verde = ( pow ( valor_restm , factor [ contador_filtro
])) * rgb ;
366     }
367
368     if (cont_pulso [ contador_filtro ] > neutral35 [ contador_filtro ] &&
cont_pulso [ contador_filtro ] <= maximo [ contador_filtro ])
369     {
370         valor_mapeado = map ( cont_pulso [ contador_filtro ] ,
neutral35 [ contador_filtro ] , maximo [ contador_filtro ] , 85 , 0 ) ;
371         valor_restm = constrain ( valor_mapeado , 0 , 85 ) / rgb ;
372         valor_verde = ( pow ( valor_restm , factor [ contador_filtro
])) * rgb ;
373     }
374     color [ contador_filtro ] = valor_verde ;
375     cont_pulso [ contador_filtro ] = 0 ;
376     Serial . flush ( ) ;
377     Serial . println ( nombre [ contador_filtro ] ) ;
378     Serial . print ( " Frecuencia : " ) ;
379     Serial . print ( cont_pulso [ contador_filtro ] ) ;
380     Serial . println ( " KHz" ) ;
381     Serial . println ( " VALOR RGB : " ) ;
382     Serial . println ( color [ contador_filtro ] ) ;
383     Serial . flush ( ) ;
384     Serial . print ( "\n" ) ; // Una l nea en blanco como separador
385

```

```
386 //
387
388     }
389 }
390 }
391
392 // Escribir en la memoria micro SD
393 void EscribirFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
394     Serial.printf("Creando archivo: %s\n", path);
395     File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
396     if(!file) {
397         Serial.println("Fallo al crear en el archivo");
398         estado2=true;
399         return;
400     }
401     if(file.print(message)) {
402         Serial.println("Se escribio en el archivo");
403     } else {
404         Serial.println("No se escribio en el archivo");
405         estado2=true;
406     }
407     file.close();
408 }
409 // Agregar datos el archivo creado en la memoria mIcro SD
410 void AgregarFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
411     Serial.printf("Agregando datos al archivo: %s\n", path);
412     File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
413     if(!file) {
414         Serial.println("Falla al agregar datos al archivo");
415         estado2=true;
416         return;
417     }
418     if(file.print(message)) {
419         Serial.println("Datos agregados correctamente");
420     } else {
421         Serial.println("Falla al escribir datos");
422         estado2=true;
423     }
424     file.close();
425 }
```

Listing 7.1: Código Arduino

### Código MATLAB Spline cúbico:

```
1
2 %interpolacion por spline cubico
3
4 function splinee2(x,y)
5
```

```

6 plot(x,y,'o');% grafica puntos utilizados
7 n=length(x);
8 b=zeros(1,n);
9
10 for i=1:n
11     a(i)=y(i);%genero los a
12 end
13
14 for i=1:n-1
15     h(i)=x(i+1)-x(i);%genero los H
16 end
17
18 for i=2:n-1
19     b(i)=(3/h(i))(a(i+1)-a(i))-(3/h(i-1))(a(i)-a(i-1));%genero el vector b,
    nota: es diferente a los b.
20 end
21
22 v=ones(1,n);
23 A=diag(v);
24
25 for i=2:n-1
26     for e=2:n-1
27         if i==e
28             A(i,e)=2*(h(i-1)+h(i));%genero la matriz A
29             A(i,e-1)=h(i-1);
30             A(i,e+1)=h(i);
31
32         end
33     end
34
35 end
36
37 b=transpose(b);
38 c=transpose(inv(A)*b);%soluciono el sistema
39
40 for i=1:n-1
41     B(i)=(a(i+1)-a(i))/h(i)-(2*c(i)+c(i+1))*(h(i)/3);%genero los b
42     d(i)=(c(i+1)-c(i))/(3*h(i));%genero los d
43 end
44
45 area=0;
46
47 for i=1:n-1
48     xf=linspace(x(i),x(i+1),100);
49     t=length(xf);
50     for e=1:t
51         s(i,e)=a(i)+B(i)(xf(e)-x(i))+c(i)(xf(e)-x(i))^2+d(i)*(xf(e)-x(i))
    ^3;%construyo los polinomios cubicos
52     end
53     hold on
54     plot(xf,s(i,:), 'r') %grafico cada polinomio con sus limites
55 end

```

## 7.2. Anexo B: Bocetos de diseño estructural

En cuanto a requerimientos que debían cumplir los bocetos propuestos se plantearon las siguientes requisitos:

- Estructura que proteja los dispositivos electrónicos, permitiendo medir las variables de interés.
- Estructura que permita el funcionamiento de los dispositivos en entorno de humedad, viento, radiación UV altas temperaturas (superior a 30°C).
- Base sólida que permita enterrarse en el suelo de la superficie donde estará expuesto el sistema.
- El diseño estructural no debe influir en las mediciones de los sensores (generar sombras en el punto de medición).
- Los productores prefieren no tener elementos en sus cultivos.
- La fuente de alimentación debe permitir que el sistema sea portátil.
- La medición de temperatura y color se debe realizar a unos centímetros de la planta.
- La estructura debe permitir el movimiento de los sensores para ajustar su posición.
- El diseño estructural debe ser económico.
- El diseño debe permitir una fácil interacción con el usuario.
- El diseño estructural debe contar con un color que permita su reconocimiento a distancia.
- Debe ser marca de referencia para drones.
- El diseño estructural debe resistir una caída eventual.
- La estructura debe ser lo suficientemente aerodinámica para evitar caídas por el viento.
- La estructura debe estar compuesta por pocas partes para su replicación.

Teniendo en cuenta los requisitos propuestos, se procedió a desarrollar distintos bocetos en la aplicación Stormboard, con el fin de explorar distintas formas de diseño que pudieran cumplir con dichos requerimientos. Es necesario tener en cuenta que algunos de estos bocetos cumplen en mejor medida algunas especificaciones y otras no tanto, por lo que la aplicación de criterios de selección, permite ayudar a elegir que diseño estructural satisface de mejor manera, las condiciones de uso al que será expuesto el diseño. A continuación, se presentan los bocetos que se realizaron y que ayudaron a encontrar el diseño estructural más adecuado para los objetivos del proyecto.

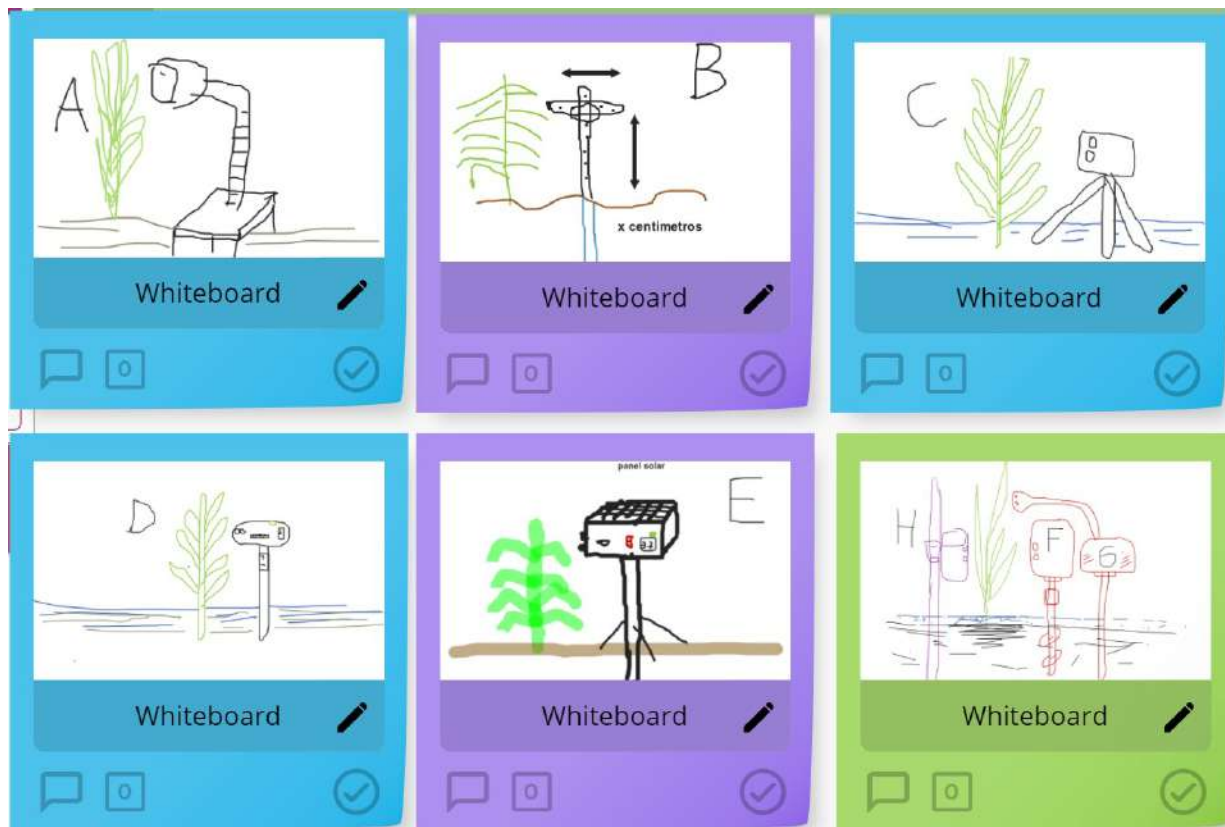


Figura 7.1: Bocetos desarrollados diseño estructural

**Boceto A:** Este boceto se caracteriza por tener una base estable con cuatro soportes a sus extremos, que fijan la base a la superficie de instalación. Los componentes electrónicos se encuentran en dicha base, sin embargo los sensores se encuentran en la parte superior de su brazo mecánico, y que permiten un ajuste más detallado de la ubicación de los sensores.

Este boceto no está diseñado para la implementación de paneles solares, y su implementación es costosa por el uso del brazo mecánico. Por otra parte, es un boceto que podría presentar problema de impermeabilidad, debido a que la ubicación de los dispositivos electrónicos se encuentran en la parte baja, dado que el sistema se encontrará en condiciones de alta

humedad y temperatura.

**Boceto B:** Este boceto se caracteriza por tener la posibilidad de ajustar el cuerpo del sistema de manera vertical y horizontal. Se plantea la idea de usar una estructura metálica con cubierta plástica que permita este ajuste por medio de anillos. La disposición de los dispositivos electrónicos, contando los sensores, se encuentran en la parte superior y están lejos de la humedad del suelo, por lo que presenta un grado más elevado de impermeabilidad.

Este diseño es de alto costo debido a su cuerpo metálico o de aluminio, además de que es de un gran tamaño. Por otra parte, la cantidad de partes usadas hace que el diseño no sea un dispositivo simple de armar y no cuenta con la posibilidad de implementar un panel solar.

**Boceto C:** Este boceto tiene una alta estabilidad para su sistema, debido a que utiliza una base de tres soportes tipo trípode, por lo que resulta muy difícil correr o tumbar el dispositivo. Sin embargo, el uso de este tipo de base afecta el costo, la simplicidad en cuanto implementación, vida útil del sistema y tamaño.

Por otra parte, este diseño contempla la implementación de paneles solares su parte superior, por lo que aumenta la autonomía energética del sistema. La impermeabilidad de este dispositivo también sería alta, debido a que no cuenta con agujeros en su parte superior por donde se pueda filtrar el agua.

**Boceto D:** Este boceto se caracteriza por su simplicidad y estabilidad, cuenta con un cuerpo aerodinámico en forma de disco y permite la implementación de paneles solares. Se compone principalmente del cuerpo donde irán todos los componentes electrónicos y de la base que irá incrustada en la superficie de instalación. Dado que este diseño se compone principalmente de dos partes (base y cuerpo), resulta ser un dispositivo económico y tamaño reducido.

Por otra parte, su diseño en forma de elipsoide evita que se acumule agua en alguna de sus partes, esto en comparación con diseños cuadrados. Además, su cuerpo compacto permite una mejor impermeabilidad y es fácil de ajustar el cuerpo del dispositivo a la distancia y altura requerida para la lectura de los sensores.

**Boceto E:** Este boceto se caracteriza por su estabilidad, cuenta con la posibilidad de implementar paneles solares y de ganchos en su base que se aferran a la superficie donde será instalado. Su diseño es cuadrado, por lo que podría afectar la aerodinámica de este, y los soportes que van instalados en la base podrían romperse con facilidad. Por otra parte, el diseño cumple con las condiciones apropiadas de impermeabilidad y se puede ajustar de manera eficiente a la distancia y altura requeridas.

**Boceto F:** Este diseño se caracteriza principalmente por su estabilidad, debido a que su base irá enterrada en la superficie del suelo y es en forma de tornillo, lo que facilita su incrus-

tación, y le brinda mejor estabilidad frente a otros diseño que se entierren en la superficie. Por otra parte, su diseño también es rectangular, ubicando su parte más larga de manera vertical, por lo que su tamaño podría generar sombras en el punto de medición que afecten las lecturas de los sensores.

También cuenta con la posibilidad de implementar paneles solares y dado que se compone principalmente de dos partes como lo son el cuerpo y la base, no presenta agujeros por donde se pueda filtrar el agua. Además, puede ubicarse cerca de la planta debido a su cuerpo compacto.

**Boceto G:** En este boceto se plantea un sistema que se caracterice por su estabilidad y la proximidad que puedan tener los sensores en el punto de medición de la planta. Es un diseño más complejo debido a que se componen principalmente por tres partes; una base para ajustar a la superficie, el cuerpo donde irán ubicados los componentes electrónicos y un brazo mecánico que permite ajustar los sensores de manera sencilla y eficiente. Teniendo esto cuenta, podría ser un diseño costoso principalmente por su brazo mecánico y tamaño.

Por otra parte, este boceto permite usar paneles solares, sin embargo debido al uso del brazo mecánico este diseño podría tener problemas con la impermeabilidad y la aerodinámica del dispositivo, además de que el brazo podría generar sombra en los paneles solares.

Cada boceto realizado y visto en la figura 7.1, pertenece a una idea de diseño única, y en donde cada uno presenta características especiales como el tipo de alimentación, el tamaño, estabilidad, proximidad de sensores, entre otros criterios de selección que se presentan a continuación. Cada criterio tendrá una evaluación de 0 a 10, en donde 0 representa que no satisface el requerimiento evaluado y 10 que lo cumple en su totalidad. Cada criterio de evaluación mencionado tiene el mismo valor de importancia, dado que se busca que el diseño estructural pueda satisfacer en gran medida todos los requisitos evaluados.

- **Costo:** Se tiene en cuenta el tipo de material y la cantidad de las partes diseñadas, así como el tamaño del prototipo. Se busca que el diseño sea lo más económico posible.
- **Simplicidad:** Se evalúa que el diseño no tenga formas complejas, ni que cuente con partes adicionales a las ya requeridas como base y cuerpo.
- **Alimentación:** Se propone el uso de dos tipos de alimentación básicas que cumplan con el requisito de portabilidad; uno se refiere a la alimentación por baterías sin el uso paneles solares, y el otro se refiere a baterías con paneles solares. En este caso se da un mayor valor a la alimentación con paneles solares.
- **Tamaño:** Se evalúa las dimensiones del diseño, se busca que sea un dispositivo pequeño y que no afecte el entorno, ni que incida en el crecimiento de la planta.

- **Impermeabilidad:** Se evalúa que tan impermeable es el diseño estructural, se tiene en cuenta la cantidad de aperturas presentes en el diseño y si utiliza o no alguna cubierta plástica para evitar la entrada de fluidos en dichas aperturas. Se busca un sistema que sea impermeable y pueda ser usado sin complicaciones por causas de las variables atmosféricas como la humedad.
- **Estabilidad:** Se evalúa el tipo de base propuesta en el boceto y que tan estable podría ser su implementación. Se busca una base estable que evite que el cuerpo del diseño estructural se mueva con facilidad.
- **Aerodinámica:** Se evalúa que tan posible es que el diseño estructural pueda ser movido por causas ambientales como vientos de alta velocidad, presentes tanto cuando llueve como cuando no. Se espera que el sistema presente un diseño aerodinámico para que el flujo del viento circule con normalidad.
- **Proximidad:** Se evalúa que tan sencillo es ubicar los sensores a distancias y alturas definidas de la planta. Se requiere que los sensores estén ubicación a una distancia predeterminada, sin que afecten el desarrollo del crecimiento de esta.

Teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente, se presenta la tabla 7.1 en donde se puede visualizar la comparativa y evaluación que se le dio a cada boceto visto en la figura 7.1. Posteriormente se dan las razones o justificación de porque se eligió este diseño, y se da paso a su modelación en 3D con el programa Tinkercad, el cual es una herramienta sencilla y fácil de usar por medio del modelado a través de página web.

Tabla 7.1: Comparación de bocetos para el diseño estructural.

Criterios	A	B	C	D	E	F	G
Costo	6	5	7	10	8	7	5
Simplicidad	4	4	7	10	8	10	7
Alimentación	5	5	10	10	10	10	10
Tamaño	5	5	5	10	8	8	5
Impermeabilidad	5	5	9	9	9	9	5
Estabilidad	10	6	10	8	10	10	8
Aerodinámica	5	4	6	10	8	8	9
Proximidad	10	8	6	8	8	8	10
Total	50	42	60	75	69	70	59

**Justificación de selección:** Como se puede visualizar en la tabla 7.1, el boceto de diseño que mas satisface los requisitos de usuario es el diseño D. Se selecciona este diseño

debido a su simplicidad de instalación, ya que cuenta esencialmente con un cuerpo donde ira ubicados todos los dispositivos, y una base que se puede incrustar en la superficie de instalación. Además de esto, su inspiración de diseño basado en un disco, le brinda una mayor aerodinámica frente a otros diseño, por lo que resulta ser un dispositivo que influye o afecta en menor medida el ambiente donde se instalará. Su tamaño reducido y simplicidad facilidad convertirlo en un sistema impermeable.

Además de lo anterior, el diseño esta enfocado al uso de paneles solares y no afecta las mediciones del los sensores con la generación de sombras, ni afecta el crecimiento de la planta. También hay que tener en cuenta, que dado que solo su cuerpo será impreso en 3D, resulta ser un dispositivo de bajo costo. Hay que considerar que su base, puede ser un tubo de PVC o algún otro material de bajo costo, que cuente con un diseño alargado y permita ser anclado a la superficie.

## 7.3. Anexo C: Manual de usuario

### SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y COLOR PARA PLANTAS DE ARROZ (ORYZA SATIVA L)



Leer y entender este manual antes iniciar una operación con el sistema  
Este dispositivo es un prototipo diseñado exclusivamente para el uso de la  
industria agrícola

### Precauciones importantes

Cuando se dispositivos electrónicos, siempre seguir las instrucciones básicas de seguridad, en las que se incluyen las siguientes:

1. Lea y siga todas las instrucciones antes de usarlo.
2. No sumerja este dispositivo en ningún tipo de líquido.
3. No coloque cerca del dispositivo ninguna fuente de calor, como, por ejemplo: radiadores, rejilla de calefacción u otros aparatos que generen calor (incluidos los amplificadores).

4. No utilice el dispositivo para otro uso que no sea el uso previsto.
5. Use exclusivamente los dispositivos/accesorios indicados por el fabricante.
6. El servicio técnico debe ser realizado siempre por personal cualificado.
7. No coloque sobre el aparato objetos que puedan suponer un peligro, por ejemplo (objetos que contengan líquidos inflamables o velas encendidas).
8. No alimente el dispositivo con baterías que no sean las indicadas por el fabricante.
9. No realizar movimientos bruscos mientras se transporta el dispositivo.
10. No usar el dispositivo si no contiene una microSD insertada.
11. Asegúrese de que la tapa protectora del puerto microSD se encuentra bien cerrada.
12. Asegúrese de mantener una distancia fija de 0.5cm(recomendado) entre el dispositivo y la planta.

## Advertencias

1. No quite nunca la carcasa de este dispositivo.
2. No usar el dispositivo si este se encuentra físicamente deteriorado.
3. No usar si la carcasa se encuentra parcialmente abierta.
4. No usar en un área donde existan dispositivos que alteren el campo electromagnético y afecten las mediciones.
5. No limpiar el dispositivo con sustancias corrosivas.
6. No someter el dispositivo a temperaturas mayores a 80 °C.

## Consejos

1. Inspecciones periódicamente si un tornillo o la carcasa se encuentra flojo, usar herramienta adecuada.
2. Asegurarse de que, en la instalación del dispositivo, este se encuentre totalmente fijo a la superficie y no sea afectado por las condiciones ambientales externas.
3. Asegure usar siempre el dispositivo con una memoria microSD insertada.
4. Inspeccione que, al encender el dispositivo, este queda funcionando correctamente.

5. Asegure de usar las distancias adecuadas entre el dispositivo y la planta.
6. Asegúrese de usar el dispositivo horizontalmente, y de manera perpendicular a la planta.
7. Retire o inserte suavemente la memoria microSD, con el dispositivo apagado.
8. Verificar durante las fases fenológicas el estado de led, para validar que el funcionamiento es el correcto.
9. Verificar semanalmente que los paneles solares ni los sensores se encuentren obstruidos por algún tipo de suciedad.

## Medio ambiente

- El dispositivo este compuesto por materiales que se pueden reciclar o volver a utilizar si lo desmonta correctamente personal autorizado.
- El sistema se encuentra elaborado en filamentos de PLA, el cual es un material de compostaje industrial.
- Siga la normativa nacional o local sobre el desecho de materiales electrónicos o baterías.
- No arroje el dispositivo junto con la basura doméstica cuando termine su vida útil, entréguelo en un punto de recolección oficial para su reciclado. Esto ayuda a evitar consecuencias negativas para el medio ambiente.

## INTRODUCCIÓN

Este dispositivo es capaz de medir y almacenar en una memoria microSD las variables de temperatura y color en un punto fijo de una planta. Permite extraer la información de las variables recopiladas en archivo de formato csv y puede ser leído a través de Excel, por medio de un dispositivo compatible.

Posee un sistema de alimentación autónomo que brinda al usuario portabilidad y eficiencia energética, por medio del uso de la energía fotovoltaica que es almacenada en una batería recargable que permite usar el dispositivo de manera continua en horarios diurnos y nocturnos.

La carcasa es una estructural diseñada e impresa en 3D con materiales de policarbonato, además posee de una recubierta de poliuretano que impermeabiliza la carcasa y protege los demás dispositivos de la humedad. Este dispositivo está diseñado con materiales y elementos electrónicos de bajo costo, lo que convierte en un sistema viable respecto a otros dispositivos diseñados para el mismo fin.

## PRESENTACIÓN DEL DISPOSITIVO

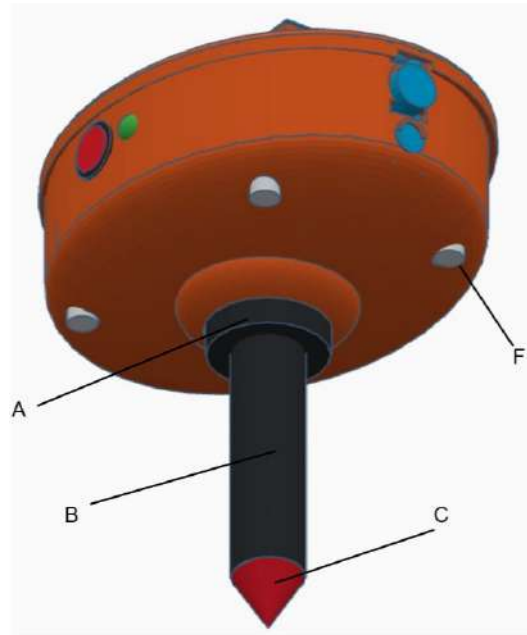


Figura 7.2: Presentación del diseño estructural exterior desde abajo

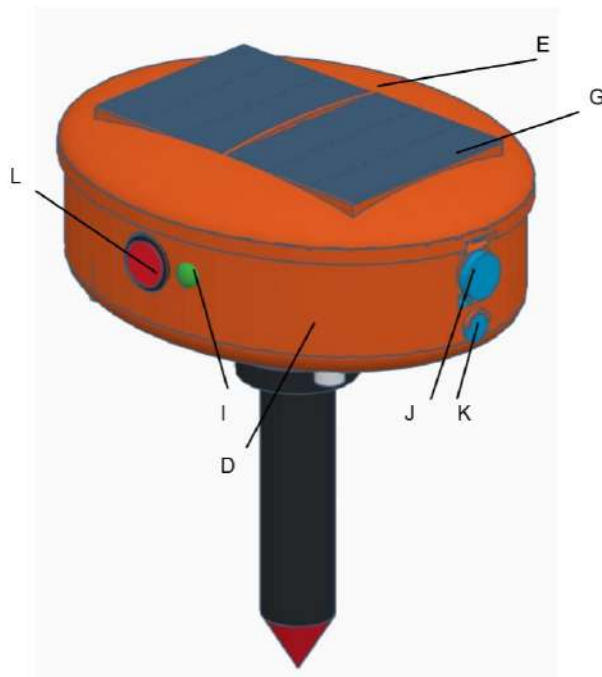


Figura 7.3: Presentación del diseño estructural exterior

## Elementos externos

1. Base
2. Tubo de soporte
3. Punta de perforación
4. Carcasa
5. Tapa superior
6. Tornillos
7. Paneles solares
8. Led
9. Salida sensor color
10. Salida sensor temperatura
11. Botón ON/OFF

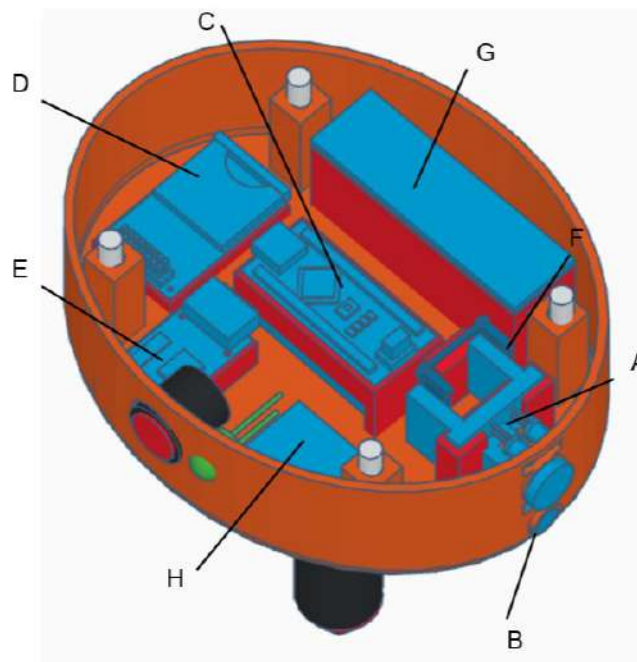


Figura 7.4: Presentación del diseño estructural interior

## Elementos internos

1. Sensor color
2. Sensor temperatura
3. Microcontrolador
4. Módulo de memoria
5. Módulo de reloj
6. Controlador de carga
7. Batería
8. Tarjeta de conexión

## Pasos de instalación

1. Verifique que el dispositivo se encuentra apagado.
2. Ubique la punta perforación en la superficie de instalación, ubicando la salida de los sensores aproximadamente medio centímetro de la planta.
3. Sujete la base y el tubo de soporte para enterrarlo a una altura determinada por el usuario. **Nota: Asegúrese que el área a medir de la planta sea mayor o igual a 1 cm<sup>2</sup>. Leer especificaciones del dispositivo.**
4. Ajuste la distancia del dispositivo a medio centímetro de la planta. **Nota: Se recomienda usar un instrumento de medición para tomar esta distancia.**
5. Refuerce con más tierra el tubo de soporte y asegúrese de que el dispositivo queda totalmente fijo a la superficie del suelo.

## Uso del dispositivo

1. Asegúrese que el dispositivo contiene una microSD insertada, o de lo contrario inserte una.
2. Presione la tapa que protege la entrada microSD, asegurándose que quede bien sellada.
3. Presione el botón ON/OFF para encender el dispositivo.
4. Espere 10 segundos y verifique que el color del led es de color verde. Esto quiere decir que el sistema funciona correctamente. **Nota: Este debe permanecer encendido durante 5 segundos. En caso de que el color del led sea azul esto indicará que no hay memoria insertada o que la memoria es incompatible con el sistema,**

si es rojo indica problemas con el modulo de reloj al registrar la hora, y si es blanco indica problemas con alguno de los sensores.

5. Para obtener los resultados medidos, el usuario deberá apagar el dispositivo con el botón ON/OFF y extraer la memoria microSD suavemente.
6. Para leer los datos correctamente introduzca la memoria microSD en un dispositivo compatible con los formatos de lectura (Excel).
7. Para abrir el archivo .csv en Excel, 1-Abrir la aplicación. 2-Ir a la pestaña de Datos. 3-En la sección Obtener y seleccionar datos, seleccionar Desde el texto/CSV. 4- Se abre una ventana, seleccionar el archivo datos.csv ubicado en la memoria microSD. 5-En la nueva ventana sección delimitador seleccionar Espacio. 6-En la sección Detección de tipo, seleccionar No detectar tipos de datos. 7- Finalmente cargar.

## Especificaciones del sistema

- **Dimensiones dispositivo:** 17.7 cm (Largo) x 14 cm (Ancho) x 8.8 cm (Alto)
- **Peso total:** 500 gramos.
- **Dimensiones tubo de soporte:** 2,54 cm (Diámetro) x 40 cm (Alto)
- **Alimentación:** Sistema fotovoltaico con 2 Paneles solares de 100mA 5v; Batería recargable de li-ion de 3.7v 4800mAh.
- **Almacenamiento:** Memoria microSD 2 GB, soporta hasta 16 GB.
- **Formato lectura de datos:** Formato csv compatible con Excel.
- **Consumo de energía:** 0.33 mA en modo Sleep. 2530 mWh/día durante el tiempo que estará en este modo. 79 mA en modo activo. 7.37 mWh/día durante el tiempo que toma las lecturas.
- **Días de autonomía:** 3 días para condiciones de baja radiación solar. 18 horas en caso de no tener paneles solares conectados y la batería este totalmente cargada.
- **Color dispositivo:** Anaranjado brillantes
- **Tipo de material:** PLA con revestimiento de poliuretano.
- **Nivel de impermeabilidad:** Resistencia IP3 – No debe entrar el agua en un ángulo hasta de 60° de la derecha e izquierda de la vertical.
- **Estado de led:** **Verde:** El sistema funciona correctamente. **Azul:** El sistema no reconoce la memoria y/o almacenamiento insuficiente. **Rojo:** El sistema no tiene un registro de fecha y hora. **Blanco:** Error en la medición de alguno de los sensores. **Sin color:** El sistema se encuentra apagado, no tiene suficiente batería.

- **Campo de visión:** Sensor temperatura: 90°. Por cada centímetro de distancia de la muestra, el área de detección crecerá el doble. 1 cm equivale a un área de medición de 2 cm cuadrado. Sensor de color: Sensor color: 3.5 milímetros cuadrados.
- **Temperatura de operación:** Entre -40°C y 85°C.
- **Rango temperatura sensor:** 0 a 40°C calibrado para plantas.
- **Error de medición:** Temperatura objetivo: 4.2 %. Color: 5.6 %.
- **Distancia óptima de medición:** Entre 0.5 y 1 cm de la planta.
- **Frecuencia de muestreo:** 50 muestras por minuto, durante 2 minutos. Esto se repite cada 12 horas. La temperatura se mide al medio día, el color se mide en la medía noche.

## Detección de problemas

1. Si al encender el dispositivo, el color del led es azul aun con la memoria microSD insertada, apague el dispositivo, retire e inserte la memoria nuevamente. Si el problema persiste, la memoria no es compatible con el dispositivo.
2. Si al encender el dispositivo, el color de led es rojo, verifique las conexiones del módulo de reloj, apague el dispositivo por 10 segundos y encienda nuevamente. Si el problema persiste, comuníquese con los fabricantes.
3. Si el dispositivo no se ajusta correctamente al suelo, asegúrese de enterrar el tubo de soporte a una profundidad adecuada, de lo contrario puede remplazar este tubo por uno de dimensiones más grandes.
4. Si la carcasa se encuentra con grietas, recubrir nuevamente con poliuretano material la grieta, si el daño es mayor, cambiar la carcasa y recubrir nuevamente con poliuretano.
5. Si no se cumple con los días de autonomía propuestos, asegúrese de que los paneles no estén sucios o cubiertos por algún objeto, o que el dispositivo no se encuentre en un área donde exista sombra (arboles, casa, etc).

## LIMPIEZA

Para mantener el dispositivo en un correcto funcionamiento se debe limpiarlo con una frecuencia semanal, o si existen objetos obstruyendo a los paneles solares o salidas de los sensores.

Al limpiar el dispositivo asegúrese de que se encuentre apagado. No se debe usar ningún tipo de líquido corrosivo para la limpieza.

Después de 3 meses de uso, comuníquese con el fabricante para el mantenimiento y limpieza interna del dispositivo.

## AVISO

Este dispositivo es creado por estudiantes de ingeniería electrónica de la universidad Javeriana de Cali. No se autoriza por ningún motivo la venta o copia total o parcial del producto, este dispositivo está diseñado para fines académicos o de investigación.

**7.4. Anexo D: Plan de pruebas**

# Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

## 1. Calificación instalación

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
1.0	<p><b>Acoples dispositivos electrónicos</b></p> <p>Verifique que el diseño estructural permite acoplar a su base los siguientes elementos electrónicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador</li> <li>• Sensor color</li> <li>• Sensor temperatura</li> <li>• Módulo de memoria</li> <li>• Módulo de carga</li> <li>• Módulo de reloj</li> <li>• Batería</li> <li>• Botón ON/OFF</li> <li>• Led</li> <li>• Paneles solares</li> <li>• Elevador de voltaje</li> </ul>	<p>El diseño estructural permite acoplar correctamente cada de los dispositivos electrónicos descritos. Estos quedan fijados a la base del diseño.</p> <p>Los dispositivos electrónicos son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador: <u>Esp32</u></li> <li>• Sensor color: <u>TCS3200</u></li> <li>• Sensor temperatura: <u>MLX90614</u></li> <li>• Módulo de memoria: <u>Módulo microSD TF Board V 1.0</u></li> <li>• Módulo de carga: <u>TP4056</u></li> <li>• Módulo de reloj: <u>RTC DS3231</u></li> <li>• Batería: <u>GH18650 4800 mAh 3.7 V Li-ion</u></li> <li>• Botón ON/OFF: <u>Impermeable</u></li> <li>• Led: <u>Led multicolor</u></li> <li>• Paneles solares: <u>5V 100 mAh x2</u></li> <li>• Elevador de voltaje: <u>Regulador voltaje DC/DC 3,3 V</u></li> </ul>	<p>Comentario: <u>El encapsulador impreso permitió acoplar y fijar todos los componentes descritos anteriormente, con suficiente espacio para su cableado.</u></p>
2.0	<p><b>Reconocimiento del equipo</b></p> <p>Verifique que el sistema se encuentra identificado con colores que permitan su fácil reconocimiento y ubicación.</p>	<p>El sistema se encuentra debidamente identificado con colores que permiten su fácil reconocimiento.</p>	<p>Comentario: <u>El encapsulado es de color anaranjado brillante, lo que permite su distinción en el cultivo. Este es reconocible a 20 metros de distancia.</u></p>
3.0	<p><b>Instalación en superficie</b></p> <p>Verifique que el sistema se instala debidamente a la superficie donde será usado. El sistema debe quedar a la altura y distancia correcta de</p>	<p>El sistema se instala correctamente en la superficie donde será instalado, permite mantener la posición fija a la altura y distancia correcta.</p>	<p>Comentario: <u>El encapsulado 3D cuenta con un acople de rosca para bases de diferentes alturas. Esta permite</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
	<p>la planta, sin que sufra modificaciones de posición por agentes externos como el aire, humedad de la tierra y fauna (insectos, aves pequeñas).</p>		<p><u>enterrarse fijamente al suelo y a la distancia de la planta.</u></p>
4.0	<p><b>Condiciones de temperatura y humedad</b>            Verifique que el sistema permite su correcto funcionamiento en las condiciones de temperatura y humedad del área de instalación. El diseño estructural cuenta con materiales y diseño adecuados para la protección de los dispositivos electrónicos ante las condiciones ambientales. Temperatura admitida por el material: <u>máximo 60 °C</u>            Humedad admitida por el material y diseño: <u>13 %.</u></p>	<p>El sistema cumple con el funcionamiento correcto en las condiciones ambientales al que será expuesto. El diseño estructural protege correctamente los dispositivos electrónicos de las condiciones de humedad y temperatura al que será expuesto.            Las siguientes mediciones se realizaron en el área con un sensor DHT11 dentro del encapsulado:            T= <u>29.7 °C</u>            %HR= <u>65 %.</u></p>	<p>Comentario: <u>El encapsulado permite resguardar los dispositivos electrónicos de las variables de temperatura y humedad. Para aumentar la resistencia a estas, se aplicaron distintas capas de poliuretano. Sin embargo, las condiciones ambientales al que es expuesto el sistema no se recomiendan para este tipo de material (PLA).</u></p>
5.0	<p><b>Identificación del dispositivo</b>            Identifique la siguiente información del sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Color.</li> <li>• Tamaño del sistema.</li> <li>• Peso final.</li> <li>• Tipo de diseño.</li> <li>• Tipo de material.</li> <li>• Nombre del sistema.</li> <li>• Versión.</li> <li>• Fabricante.</li> <li>• Proveedor.</li> </ul>	<p>Se registra la siguiente información del sistema:            Color: <u>Anaranjado brillante</u>            Tamaño del sistema: <u>17.7 cm (largo) x 14 cm (ancho) x 8.8 cm (alto)</u>            Peso final: <u>500 gramos (con dispositivos)</u>            Tipo de diseño: <u>Elipsoide</u>            Tipo de material: <u>PLA recubierto de poliuretano</u>            Nombre del sistema: <u>SMTC</u>            Versión: <u>1.0</u>            Fabricante: <u>Prototipo trabajo de grado</u>            Proveedor: <u>PUJ CALI</u></p>	<p>Comentario: <u>El diseño estructural diseñado corresponde con el diseño impreso.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
6.0	<p><b>Interfaz de usuario</b> Verifique que el sistema permite encenderse por medio del botón físico ON/OFF.</p> <p>Verifique que el sistema permita extraer los datos en formato .csv de las variables de temperatura y humedad con fecha y hora de registro.</p> <p>Verifique el sistema permite visualizar el estado de funcionamiento por medio de la notificación del led.</p>	<p>El sistema permite encender y apagar el dispositivo por medio del botón físico ON/OFF.</p> <p>El sistema permite extraer los datos de las variables de temperatura y humedad por medio de la memoria sd, esta puede ser leída por medio de un pc en formato csv que puede ser leído por Excel.</p> <p>El sistema permite visualizar el estado de funcionamiento por medio de la notificación led.</p>	<p><u>Comentario: El sistema permite encenderse y apagarse mediante un botón.</u></p> <p><u>El sistema permite extraer los datos en formato .csv de la memoria microSD.</u></p> <p><u>El sistema permite visualizar los estados de funcionamiento del sistema, mediante de colores de led de notificación.</u></p>
7.0	<p><b>Verificar calibración</b> Verifique que los sensores se encuentran calibrados y evidencie las pruebas realizadas.</p> <p><b>Nota:</b> Los datos de calibración se observan en apartado de interfaz.</p>	<p>Los sensores encuentran debidamente calibrados.</p>	<p><u>Comentario: Las calibraciones fueron realizadas en laboratorio. El sensor de temperatura se encuentra calibrado con el método de ajuste de curva, spline cúbico con un porcentaje de una media de error del 0.58 respecto a la cámara térmica FLIR. El porcentaje de error en comparación con la planta de arroz (Oriza Sativa L), tiene un error de 2.94%.</u></p> <p><u>El sensor de color se encuentra calibrado con un porcentaje de error 2,33%, 2,96% y 1,33 % respecto a la tabla ColorChecker y al software ColorChecker camera calibration. La calibración en comparación con el color de la planta de arroz es de 5,47%</u></p>

### 4. Calificación operación

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado actual
-----	--------------------------	--------------------	------------------

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

8.0	<p><b>Voltaje de alimentación</b> Verifique que los dispositivos electrónicos usados operan con el voltaje de alimentación descrito en su hoja de datos.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Microcontrolador (3.3 V – 12V)</li><li>• Sensor color (2.7V – 5.5V)</li></ul>	Los dispositivos electrónicos usados permiten su correcto funcionamiento según el voltaje de entrada especificado en su hoja de datos.	Comentario: <u>Todos los dispositivos electrónicos se alimentaron con un voltaje de 3.3 V. Exceptuando el controlador de carga que se alimenta de los paneles solares a (5 V). Además, el regulador que es alimentado por la batería entre 2.5 y 4.2 V.</u>
-----	--	--	---

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado actual
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor temperatura (3.3. V – 5V)</li> <li>• Módulo de memoria (3.3V – 5V)</li> <li>• Módulo de carga (-0.3 V – 8 V)</li> <li>• Módulo de reloj (3.3. V – 5V)</li> <li>• Batería (3.7 V)</li> <li>• Regulador (1.8 a 5 V)</li> <li>• Botón ON/OFF</li> <li>• Led (3.3 V)</li> </ul>		
9.0	<p><b>Registro de consumo (Modo activo)</b></p> <p>Verifique que los dispositivos electrónicos usados consumen la corriente según sus especificaciones de su hoja de datos.</p> <p><b>Nota:</b> El consumo de cada dispositivo se registra en su modo de operación normal, sin ninguna función aplicada para el ahorro de energía.</p> <p><b>Nota:</b> Esta prueba se realiza con un multímetro.</p>	<p>El consumo de corriente de los dispositivos usados se presenta a continuación según las especificaciones de su hoja de datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador: 15 mA máx.</li> <li>• Sensor de color: 1.4 mA typ. / 9 mA máx. (Sin led encendido)</li> <li>• Sensor de temperatura: 1.3 mA typ. / 2 mA máx.</li> <li>• Módulo de memoria: 15 mA typ. / 200 mA máx.</li> <li>• Módulo de carga: 150 <math>\mu</math>A typ. / 500 <math>\mu</math>A máx.</li> <li>• Módulo de reloj: 200 <math>\mu</math>A máx. activo / 110 máx. espera</li> <li>• Led 10 mA máx.</li> <li>• Convertidor 1.6 mA typ. / 2.2 mA máx.</li> </ul> <p>El consumo total del sistema calculado de manera teórica es: 53.55 mA máx.</p>	<p>Comentario: <u>El consumo del sistema en modo activo es de aproximadamente: 20 mA typ. Con los leds del sensor de color activos.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador: 5 mA máx. (80 Mhz)</li> <li>• Sensor de color: 6,2 mA Máx.</li> <li>• Sensor de temperatura: 1.95 mA máx.</li> <li>• Módulo de memoria: 10 mA máx.</li> <li>• Módulo de carga: 150 <math>\mu</math>A typ. / 0.5 mA máx.</li> <li>• Módulo de reloj: 2,9mA máx.</li> <li>• Led 3,8 mA máx.</li> <li>• Regulador 2mA máx</li> </ul>
10.0	<p><b>Registro de consumo (Modo sleep)</b></p> <p>Verifique el consumo del sistema cuando se aplica la</p>	<p>El consumo total del sistema con el microcontrolador en modo sleep es: <u>5 mA</u></p>	<p>Comentario: <u>El microcontrolador cuenta con la opción de “Deep sleep” que permite bajar su consumo a 7 <math>\mu</math>A en la teoría.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado actual
	<p>función de modo sleep al microcontrolador.</p> <p><b>Nota:</b> Este modo permite ahorrar el consumo energético, en este modo no se registran datos.</p> <p><b>Nota:</b> Esta prueba se realiza con un multímetro.</p>		<p><u>No obstante, los demás módulos se alimentan de manera constante a 3.3 V. Sin embargo, el sensor de color se alimenta directamente desde el microcontrolador, por lo que cuando este se duerme y el sensor de color se apaga.</u></p>
11.0	<p><b>Subsistema de alimentación</b></p> <p>Verifique que el subsistema de alimentación funciona acorde a lo diseñado de acuerdo con los requerimientos consumo energético del sistema.</p> <p>Verifique que la salida de voltaje del subsistema de alimentación permita alimentar el microcontrolador.</p> <p>Verifique que los paneles solares usados suministran la potencia necesaria para la alimentación del sistema.</p> <p>Verifique que el controlador de carga permite gestionar la energía de los paneles solares hacia la batería.</p> <p>Verifique el convertidor DC/DC permite elevar el voltaje proveniente la batería hacia el microcontrolador.</p>	<p>El subsistema de alimentación suministra la potencia requerida para el funcionamiento total del sistema. La potencia requerida por el subsistema debe ser de 2,05 mW en modo activo y de 517,22 mW en modo sleep.</p> <p>Los paneles solares suministran una potencia de 1 W. Se usan dos paneles solares de 5 V y 100 mA en configuración paralelo. Esta configuración permite una salida de 5 V y 200 mA.</p> <p>El controlador de carga permite cargar las baterías, interrumpiendo el suministro de energía cuando estas ya se encuentran cargadas.</p> <p>El convertidor DC/DC permite regular el voltaje de la batería de 4.2 V a 3.3 V requeridos por el microcontrolador.</p>	<p>Comentario: <u>El sistema cuenta con una batería de 3.7 V y 4800 mAh. De esta manera la potencia suministrada por el sistema sufre con la potencia requerida por el sistema en modo activo y modo sleep.</u></p> <p><u>Los paneles solares cargan la batería de manera satisfactoria.</u></p> <p><u>El controlador desconecta la batería de los paneles cuando esta se encuentra encargada, indicando con un led de color azul que la carga esta completa.</u></p> <p><u>El convertidor DC/DC permite regular de manera correcta el voltaje necesario para el sistema.</u></p>
12.0	<p><b>Funcionamiento sensor color</b></p> <p>Verifique que el sensor de color capta la intensidad lumínica reflejada de los objetos, y que esta es convertida en frecuencia.</p> <p>Verifique que el sensor de color permite captar la</p>	<p>El sensor de color permite captar la intensidad lumínica y convertirla en frecuencia.</p> <p>El sensor de color permite captar distintos valores de frecuencia según el filtro de color seleccionado.</p>	<p>Comentario: <u>El sensor de color funciona adecuadamente, con una escala de conversión de frecuencia al 100 % para los distintos filtros seleccionados.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado actual
	<p>intensidad lumínica de los distintos filtros usados. Verifique que el sensor muestra una señal cuadrada del 50% de ciclo de trabajo.</p>	<p>El sensor de color permite entregar al microcontrolador una señal cuadrada con 50% de ciclo de trabajo.</p>	<p><u>Esta entrega una señal cuadrada al 50% de ciclo de trabajo.</u></p>
13.0	<p><b>Funcionamiento sensor de temperatura</b> Verifique que el sensor de temperatura capta la frecuencia infrarroja radiada de los objetos y los convierte en valores de voltaje. Verifique que la señal de salida sea una señal cuadrada tipo PWM. Verifique la sincronización del pin SCL entre el sensor y el microcontrolador.</p>	<p>El sensor de temperatura capta la frecuencia infrarroja y permite visualizar valores de voltaje relacionadas con dicha frecuencia. El sensor muestra como una señal de salida tipo PWM. El sensor muestra una señal cuadrada de sincronización en su pin SCL.</p>	<p>Comentario: <u>El sensor muestra una señal de salida tipo PWM, la cual tiene un protocolo de comunicación I2C.</u> <u>Permite enviar los datos de temperatura por el pin SDA y se sincroniza con el microcontrolador por el SCL.</u></p>
14.0	<p><b>Funcionamiento módulo de memoria</b> Verifique que el módulo de memoria permite almacenar en una microSD la información suministrada por el microcontrolador. Verifique el que el módulo de memoria permite almacenar la información en formato .csv con registro fecha y hora de la variable medida.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fecha y hora de la medición.</li> <li>• Valor de la variable medida.</li> <li>• Unidades de medidas.</li> </ul> <p>Verifique que la información almacenada en la microSD puede ser leída y extraída por medio de un dispositivo compatible.</p>	<p>El módulo de memoria microSD permite almacenar la información suministrada por el microcontrolador. El módulo de memoria permite almacenar la información en formato .csv con el registro de fecha y hora de los instantes de medición. Los datos almacenados en la memoria pueden ser leídos y extraídos por un dispositivo compatible.</p>	<p>Comentario: <u>El módulo de memoria permite almacenar los datos de las variables y el registro de fecha y hora de medición, mediante el protocolo de comunicación SPI.</u> <u>Estos datos pueden ser leídos en formato .csv a través del software de Excel.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

No.	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado actual
15.0	<p><b>Funcionamiento módulo reloj</b></p> <p>Verifique que el módulo de reloj permite visualizar la fecha y hora, y que esta cambia acorde al tiempo transcurrido.</p> <p>Verifique que la hora y fecha del módulo se mantiene actualizada por medio del funcionamiento autónomo de su batería.</p>	<p>El módulo de reloj permite registrar la fecha y hora y esta cambia acorde al tiempo transcurrido.</p> <p>La fecha y hora del sensor se mantiene actualizada debido a su funcionamiento autónomo.</p>	<p>Comentario: <u>El módulo de reloj permite llevar de manera precisa la hora y la fecha en que se registran los datos. Esto se comparó con el tiempo real en cada instante de medición.</u></p>
16.0	<p><b>Almacenamiento de códigos del microcontrolador</b></p> <p>Verifique que el microcontrolador cuenta con la capacidad de memoria suficiente que permite almacenar las instrucciones de código en su memoria flash.</p>	<p>El microcontrolador cuenta con espacio suficiente en su memoria flash para almacenar las instrucciones de código del sistema.</p>	<p>Comentario: <u>El microcontrolador ESP32 cuenta con suficiente espacio de memoria para almacenar las instrucciones de funcionamiento del sistema. La memoria total del ESP32 es de 4 MB y el código del sistema ocupa el 12% de esta memoria.</u></p>

### 5. Protocolo de desempeño

Paso	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
17.0	<p><b>Desempeño de instalación</b></p> <p>Verifique que el sistema se mantiene fijo a la superficie a una distancia y altura constante de la planta. Se deben tomar datos de la altura y la distancia horizontal entre la planta y el sistema.</p> <p><b>Nota:</b> Esta prueba se realiza con un metro o herramienta matemática que permita medir la distancia, además de un nivel para medir su horizontalidad.</p>	<p>El sistema se mantiene fijo en la superficie de instalación, a una altura adecuada y a una distancia de 1 cm de la planta, además se mantiene horizontal respecto a la superficie. La posición no se ve afectada por condiciones como el viento, la humedad del suelo y fauna (insectos y aves pequeñas).</p> <p><b>Día de instalación:</b>  Distancia: <u>1 cm</u>  aproximadamente.  Altura: <u>34 cm</u> de altura  Horizontalidad: <u>90°</u></p>	<p>Comentario: <u>La base del sistema permitió que el este estuviera fijo a una altura de 34 cm durante los tres días de prueba. La horizontalidad también se mantuvo fija y la distancia de 1 cm se mantiene respecto a la planta. La base se enterró aproximadamente 10 cm en el suelo.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

Paso	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
18.0	<p><b>Condiciones de humedad y temperatura</b>  Verifique que el sistema funciona correctamente en las condiciones de humedad del área de instalación donde se encuentra la planta. El sistema debe mantenerse impermeable, sin rastros de humedad en su interior.</p> <p><b>Nota:</b> La prueba de humedad y temperatura se realizan con un sensor capaz de medir estas variables, este sensor se ubicará de manera interna y se contará con el mismo sensor de manera externa para registrar y comparar estas variables.</p> <p><b>Nota:</b> La prueba de límite de temperatura se realiza en el horario de medio día, donde se presenta mayor incidencia de los rayos solares. La prueba de humedad se realiza en condiciones de lluvia, en caso de no originarse este evento natural, se recreará artificialmente.</p>	<p>El sistema se mantiene impermeable internamente y no registra valores de temperatura fuera del rango de operación de los componentes electrónicos del sistema.</p>	<p>Comentario: <u>La temperatura y humedad interna del sistema, se midió con el uso de un sensor DHT11. Estas mediciones se realizaron a las 12 del medio día.</u>  <u>La humedad presenta valores altos durante el primer día, debido a que se realizó una prueba mediante riego de agua, simulando la lluvia.</u></p> <p><b>Día 1:</b>  Temperatura interna: 27,2 °C  Temperatura externa: 28,93 °C  Humedad interna: 65 %</p> <p><b>Día 2:</b>  Temperatura interna: 30,8 °C  Temperatura externa: 33,53 °C  Humedad interna: 67%</p> <p><b>Día 3:</b>  Temperatura interna: 32,4 °C  Temperatura externa: 34,76 °C  Humedad interna: 71 %</p>
19.0	<p><b>Influencia en el ambiente</b>  Verifique que el sistema no intervenga en el crecimiento de la planta, ni que afecte la biodiversidad.</p> <p><b>Nota:</b> Esta prueba se realiza comprobando de que el sistema no se encuentra en contacto con la planta, ni que contamina la superficie del suelo ni el ambiente.</p>	<p>El sistema no afecta el crecimiento ni se encuentra en contacto directo con la planta, además, no hay rastro de contaminación en el suelo ni en el ambiente debido al sistema.</p>	<p>Comentario: <u>Para cumplir con esta prueba el sistema debe estar ubicado a los alrededores del cultivo. Esto debido a que las plantaciones de este se encuentran muy juntas entre sí, por lo que resulta imposible no hacer contacto con la planta.</u></p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

Paso	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
20.0	<p><b>Instalación en superficie</b> Verifique que el sistema es reconocible a la distancia, diferenciándose del medio ambiente con un color característico.</p> <p><b>Nota:</b> El sistema es de color anaranjado.</p>	<p>El sistema es reconocible a larga distancia y es fácil reconocerlo entre el ambiente por su color característico.</p>	<p>Comentario: <u>Debido al color del sistema, este es reconocible a una distancia de 20 m.</u></p>
21.0	<p><b>Adquisición de datos</b> Verifique que el sistema permite almacenar los datos de la variable de temperatura y color según su tiempo establecido. La adquisición de la variable de temperatura se realiza cada 12 horas, y el valor del color se realiza cada 24 horas.</p> <p>Verifique que el sistema registra la fecha y hora de los instantes de medición para ambas variables.</p> <p>Verifique el sistema permite almacenar las unidades de medida según la variable muestreada.</p> <p><b>Nota:</b> El valor de la variable color se realiza cada 24 horas en el horario nocturno.</p> <p><b>Nota:</b> Las variables de temperatura y humedad medidas se toman cada segundo durante un minuto, estos datos obtenidos serán promediados y este será el valor almacenado.</p> <p><b>Nota:</b> Por cuestiones de prueba, los datos muestreados cada segundo durante un minuto también serán almacenados, junto con el valor promediado de las variables.</p>	<p>El sistema permite almacenar los datos de la variable de temperatura cada 12 horas, y de la variable de color cada 24 horas en el horario nocturno.</p> <p>El sistema permite almacenar fecha y hora de los instantes de medición de cada una de las variables.</p> <p>El sistema permite promediar los datos obtenidos durante un minuto y almacenarlos en la memoria.</p>	<p>Comentario: <u>Los datos tomados en esta prueba son los medidos por el sistema a lo largo de tres días. En este se toman datos cada segundo durante 2 minutos, y estos son promediados, para posteriormente guardar dicho promedio.</u></p> <p><b>Día 1.</b> Temperatura promediada: 27,73° C Fecha y hora temperatura: 12:00:50 Color promediado: 90-131-53 Fecha y hora color: 12:00:50</p> <p><b>Día 2.</b> Temperatura promediada: 30,71° C Fecha y hora temperatura: 12:00:50 Color promediado: 80-134-55 Fecha y hora color: 00:00:50</p> <p><b>Día 3.</b> Temperatura promediada: 31,23° C Fecha y hora temperatura: 12:00:50 Color promediado: 92-133-57 Fecha y hora color: 00:00:50</p>

## Plan de pruebas – Sistema de monitoreo de temperatura y color para plantas de arroz

Paso	Descripción de la prueba	Resultado esperado	Resultado real
22.0	<p><b>Validación de calibración</b></p> <p>Verifique que los datos de la temperatura y color de la planta registrados por el sistema se encuentran calibrados, comparándolos con dispositivos certificados.</p> <p><b>Nota:</b> El valor de temperatura será comparado con una cámara térmica. El color de la planta se comparará mediante análisis fotográfico.</p> <p><b>Nota:</b> El porcentaje de error permitido en la calibración se encuentra registrado en el procedimiento de calibración.</p>	<p>Los datos registrados de la temperatura y color de la planta se encuentran calibrados. Estos datos son comparados con dispositivos certificados, teniendo como referencia el procedimiento de calibración, con un error permitido de 5% para el sensor de temperatura y un error de 10% para el sensor de color.</p>	<p>Comentario:</p> <p><b>Dia de instalación.</b>            Temperatura sistema: 27,73°C            Temperatura cámara: 27,2°C            Error: 1,83%            Color sistema: 90-131-53 RGB            Color fotografía: 90-136-58RGB            Error: 5,47%</p> <p><b>Dia final.</b>            Temperatura sistema: 30°C            Temperatura cámara: 31,2°C            Error: 4%</p>
23.0	<p><b>Autonomía</b></p> <p>Verifique que el sistema funciona los días de autonomía propuestos en el diseño del sistema de alimentación fotovoltaico.</p> <p><b>Nota:</b> Los días de autonomía del sistema serán puestos a prueba con la HSP (hora solar pico) del peor mes. La referencia de las horas pico del peor mes se obtuvieron de los datos de radiación solar del año 2020.</p>	<p>El sistema cuenta con una autonomía de 3 días en condiciones de HSP del peor mes.</p>	<p>Comentario: <u>Se verifico que los paneles entregaran el debido voltaje. Este voltaje fue de 5.3 V para el día de instalación a las 12 del medio día. En caso de la batería, esta contaba con un voltaje de 4.1 V</u>  <u>Pasado tres días, el voltaje de la batería 4 V, por lo que se verificó que los paneles solares si cargan la batería, por lo que el sistema estuvo en funcionamiento constantes los tres días de instalación, esto teniendo en cuenta los datos adquiridos durante el día y la noche.</u></p>