

Optimización del proceso de secado del cacao mediante internet de las cosas (IoT)

Brayan Alexis Morales Vasquez y Juan Sebastian Jaimes Medina

Trabajo de grado presentado como Requisito para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Marco Fidel Flórez Franco

Magister en Ingeniería

Universidad De Investigación y Desarrollo – UDI

Facultad De Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

RESUMEN

Los cacaoteros colombianos han empleado el secado tradicional durante décadas, enfrentando dificultades debido al tiempo requerido. Aunque se han desarrollado equipos de secado artificial que reducen el tiempo, estos afectan la calidad del producto. Nuestro proyecto se centra en el mejoramiento del rendimiento del secado tradicional del cacao mediante el uso de un concentrador solar controlado electrónicamente y monitoreado por tecnología IoT (Internet de las Cosas). Este proyecto abarca objetivos generales y específicos, incluyendo el diseño, la implementación y la validación. Realizamos una investigación sobre el conocimiento del cacao, considerando numerosos aspectos para la implementación y seleccionando cuidadosamente los elementos a utilizar para el armado del prototipo, en el cual, conlleva algoritmos como lo son: Seguidor y reflector Solar, transmisión y recepción de datos bajo el protocolo LoRa, información y alertas de condiciones meteorológicas y comunicación con plataforma IoT.

En esta última etapa, la información del concentrador se muestra en tiempo real a través de una aplicación móvil, proporcionando alertas frecuentes al cacaotero. Estos datos validan los diseños 3-D de infraestructura del concentrador y sus dispositivos auxiliares, conformando el monitoreo tecnológico. El concentrador obtuvo resultados exitosos, con datos que mostraron una eficiencia y eficacia conforme a lo planeado y esperado.

Palabras Clave: cacao, concentrador solar, IoT (internet de las cosas), FreeRTOS.

ABSTRACT

Colombian cocoa farmers have used traditional drying for decades, facing difficulties due to the time required. Although artificial drying equipment has been developed that reduces the time, it affects the quality of the product. Our project focuses on improving the yield of traditional cocoa drying by using an electronically controlled solar concentrator monitored by IoT (Internet of Things) technology. This project encompasses general and specific objectives, including design, implementation and validation. We conducted research on cocoa knowledge, considering numerous aspects for the implementation and carefully selecting the elements to be used for the assembly of the prototype, in which, it entails algorithms such as: Solar tracker and reflector, transmission and reception of data under the LoRa protocol, information and alerts of weather conditions and communication with IoT platform.

In this last stage, information from the concentrator is displayed in real time through a mobile application, providing frequent alerts to the cocoa farmer. These data validate the 3-D infrastructure designs of the concentrator and its auxiliary devices, making up the technological monitoring. The concentrator obtained successful results, with data showing efficiency and effectiveness as planned and expected.

Keywords: cocoa, solar concentrator, IoT (internet of things), FreeRTOS.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Planteamiento del Problema	17
2. Objetivos del Proyecto.....	18
2.1 Objetivo General	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Justificación	19
4. Marco Referencial.....	20
4.1 Estado del Arte.....	20
4.1.1 Proceso de Secado.....	20
4.1.2 Maquinaria Industrial	23
4.1.3 Protocolos de Comunicación y Tecnología IoT	27
4.2 Marco Teórico.....	29
4.2.1 Métodos de Secado.....	29
4.2.2 Estructuras.....	31
4.2.3 Tipos de Sensores.....	34
4.2.4 Motores.....	37
4.2.5 Microcontroladores	39
4.2.6 Tecnologías IoT (Internet de las Cosas).....	44
4.2.7 Espectro para uso libre en Colombia.....	49
4.2.8 FreeRTOS.....	50

5.	Metodología	51
5.1	Tipo de Investigación.....	51
5.1.1	Preparación.....	51
5.1.2	Planificación.....	51
5.1.3	Diseño.....	52
5.1.4	Implementación	52
5.1.5	Operación	52
5.1.6	Optimización	53
6.	Componentes Electrónicos para CSIoT	53
6.1	Sensor de Temperatura y Humedad HDC1080	53
6.2	LDR 10k 7mm	55
6.3	Micro-Servomotor MG90S	55
6.4	Módulo LoRa RFM95W	57
6.5	Microcontrolador ESP32-WROOM-32D	58
6.6	Step-Down LM2596 y SIG0326.....	60
6.7	Pantalla LCD 16x2 I2C.....	62
6.8	Encoder de Rotación KY-040.....	63
7.	Diseños Electrónicos.....	64
7.1	Módulos LoRa RFM95W	64
7.1.1	Shield de Expansión Casero	64
7.1.2	Pruebas de funcionamiento LoRa	65
7.2	Concentrador Solar	68
7.2.1	Esquemático Concentrador Solar	68

7.2.2	Seguidor	69
7.2.3	Reflector	71
7.3	Caja Negra	74
7.4	Caja Blanca	77
8.	Diseños CAD	80
8.1	Caja Negra	80
8.2	Caja Blanca	82
8.3	Concentrador Solar	83
8.4	Medidas finales	87
9.	Monitor de Clima IoT	88
9.1	Clima y Pronóstico	89
9.2	Alertas	93
9.2.1	OpenWeatherMap	94
9.2.2	AccuWeather	95
9.2.3	Probabilidad de Precipitación	96
9.2.4	Algoritmo	97
9.2.5	Pruebas	98
10.	Prototipo	99
10.1	Construcción	99
10.2	Pruebas y funcionamiento	103
10.3	Prueba Experimental	105
11.	Plataforma IoT	108
11.1	Blynk	108

11.2 Creación de Interfaz	110
11.3 Pruebas en Blynk	113
11.4 Notificaciones	114
11.4.1 Información de Eventos	114
11.4.2 Advertencias.....	115
11.4.3 Alertas Criticas	116
12. CSIoT	117
12.1 Prueba piloto 1	118
12.1.1 Resultado.....	121
12.2 Prueba piloto 2	125
12.2.1 Resultado.....	129
13. Conclusiones.....	132
14. Recomendaciones	134
Referencias Bibliográficas	136
Apéndices.....	145

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Secadora de granos rotativa SGV 300	24
Figura 2. Secadoras para cacao serie SRE-025/150.....	25
Figura 3. Secadora de granos de cacao a gas - JM Estrada S.A	27
Figura 4. Secado natural del cacao	30
Figura 5. Secado artificial del cacao	31
Figura 6. Placa de vidrio flotado.....	33
Figura 7. Arduino UNO R3	40
Figura 8. ESP32-WROOM-32.....	41
Figura 9. Raspberry PI Pico	42
Figura 10. Tipos de tecnología LPWAN	48
Figura 11. Sensor de temperatura y humedad HDC1080	54
Figura 12. LDR 10k 7mm.....	55
Figura 13. Micro-Servomotor MG90S	56
Figura 14. Módulo LoRa RFM95W	57
Figura 15. ESP32-WROOM-32D.....	59
Figura 16. Step-Down LM2596 y SIG0326	61
Figura 17. Pantalla LCD 16x2 I2C	62
Figura 18. Encoder KY-040.....	63
Figura 19. Shield Casero para LoRa RFM95W	65
Figura 20. Esquemático Conexión RFM95W a ESP32	66

Figura 21. Diagrama de flujo algoritmos Transmisor y Receptor	67
Figura 22. Prueba básica de funcionamiento LoRa	68
Figura 23. Esquemático Concentrador Solar	69
Figura 24. Diagrama de flujo algoritmo Seguidor Solar.....	70
Figura 25. Diagrama Ley de Reflexión.....	71
Figura 26. Diagrama de ejemplo: Rayo Incidente y Objeto	72
Figura 27. Diagrama de ejemplo: cálculo θ_c	73
Figura 28. Diagrama de flujo algoritmo reflector solar	74
Figura 29. Esquemático "Caja Negra"	75
Figura 30. Diagrama de flujo algoritmo Caja Negra	76
Figura 31. Esquemático "Caja Blanca"	78
Figura 32. Diagrama de flujo algoritmo Caja Blanca	79
Figura 33. Diseño CAD Caja Negra	81
Figura 34. Diseño CAD Caja Blanca.....	83
Figura 35. Modelo Micro-Servomotor y agarre de eje	84
Figura 36. Modelo de soporte LDR para Seguidor Solar	85
Figura 37. Modelo de bases, soportes, rodamientos y micro-servos	85
Figura 38. Modelo de espejo y agarres laterales.....	86
Figura 39. Modelo diseño final del Concentrador Solar.....	86
Figura 40. Modelo de diseño final del prototipo.....	87
Figura 41. Diagrama de flujo algoritmo de Clima y Pronóstico.....	91
Figura 42. Prueba en Monitor Serial Condiciones Actuales.....	92
Figura 43. Ejemplo de visualización de información en plataforma IoT	92

Figura 44. Ejemplo de visualización de información en sistema físico.....	93
Figura 45. Ejemplo de documento JSON entregado por OpenWeatherMap.....	94
Figura 46. Ejemplo de documento JSON entregado por AccuWeather	95
Figura 47. Diagrama de flujo algoritmo de alertas	97
Figura 48. Ejemplo de visualización de alerta en notificación push.....	98
Figura 49. Ejemplo de visualización de alerta en sistema físico	99
Figura 50. Planos para corte laser	100
Figura 51. Proceso de Corte Laser	101
Figura 52. Prototipo físico de Caja Negra	101
Figura 53. Prototipo físico de Caja Blanca	102
Figura 54. Prototipo físico de Concentrador Solar	102
Figura 55. Base para Cacao	103
Figura 56. Prueba de Funcionamiento: Reflexión de Luz Solar	104
Figura 57. Prueba de Funcionamiento: Seguidor Solar	104
Figura 58. Prueba de Funcionamiento: Control de temperatura	105
Figura 59. Caja Negra posicionada a 210 metros de distancia	106
Figura 60. Prueba Experimental: Inicio de Proceso.....	107
Figura 61. Prueba Experimental: Dirección de Luz Incidente	107
Figura 62. Prueba Experimental: Reflexión de Luz Incidente	108
Figura 63. Creación de interfaz en app móvil.....	111
Figura 64. Creación de datasheets	112
Figura 65. Creación de palabra clave para el llamado de alertas.....	112
Figura 66. Datos visualizados en Blynk desde app de escritorio.....	113

Figura 67. Visualización de historial en prueba hipotética en Blynk desde app móvil	113
Figura 68. Ejemplo 1 de notificación push de información de evento	114
Figura 69. Ejemplo 2 de notificación push de información de evento	115
Figura 70. Ejemplo de Notificación push de advertencias	116
Figura 71. Ejemplo de notificación push de alerta critica	117
Figura 72. Condición climática inicio prueba piloto 1	119
Figura 73. Preparación del secado en prueba piloto 1	119
Figura 74. Notificaciones emitidas por Blynk en el proceso de secado en prueba piloto 1	120
Figura 75. Resultado del cacao después del proceso de secado en prueba piloto 1	121
Figura 76. Graficas finales en prueba piloto 1	122
Figura 77. Grafica sensor concentrador solar en prueba piloto 1	122
Figura 78. Grafica sensor ambiente en prueba piloto 1	123
Figura 79. Humedad del cacao bajo el concentrador después del secado en prueba piloto 1	124
Figura 80. Humedad del cacao bajo el sol después del secado en prueba piloto 1	125
Figura 81. Condición climática inicio prueba piloto 2	126
Figura 82. Instalación del sistema y cacao prueba piloto 2	126
Figura 83. Notificaciones de alertas prueba piloto 2	127
Figura 84. Tormenta en prueba piloto 2.....	128
Figura 85. Gráficas finales prueba piloto 2.....	129
Figura 86. Archivo .CSV dado por Blynk en prueba piloto 2	130
Figura 87. Gráfica sensor ambiente en mayor exposición solar prueba piloto 2.....	131
Figura 88. Gráfica sensor concentrador en mayor exposición solar prueba piloto 2.....	131

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Informaciones técnicas secadora rotativas – Dinatek	25
Tabla 2. Información técnica sensores de temperatura y humedad	35
Tabla 3. Información técnica sensores de temperatura independientes	36
Tabla 4. Comparación de motores	38
Tabla 5. Comparación micro-servomotores.....	39
Tabla 6. Información técnica de microcontroladores	43
Tabla 7. Características del sensor HDC1080	54
Tabla 8. Características del Micro-Servomotor MG90S	56
Tabla 9. Características LoRa RFM95W	57
Tabla 10. Características ESP32 WROOM 32D	59
Tabla 11. Características del LM2596 y SIG0326.....	61
Tabla 12. Características LCD 16x2 I2C.....	62
Tabla 13. Medidas de componentes para Caja Negra.....	80
Tabla 14. Medidas de componentes para Caja Blanca	82
Tabla 15. Medidas de elementos para el Concentrador Solar.....	83
Tabla 16. Medidas finales de cada pieza del prototipo.....	88
Tabla 17. Características de OpenWeatherMap y AccuWeather.....	89
Tabla 18. Plan Free y Maker de Blynk	109
Tabla 19. Tabla comparativa de resultados en prueba piloto 2.....	130

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Manual de Usuario.....	145
Apéndice B. Artículo IEEE.....	145
Apéndice C. Nota de Aceptación	146

GLOSARIO

Arduino IDE: Aplicación multiplataforma utilizada para escribir y cargar programas en placas compatibles con Arduino. También puede usarse con placas de desarrollo de otros proveedores mediante núcleos de terceros.

Blynk: Paquete de software integral para crear proyectos IoT, tanto personales como comerciales a gran escala. Permite a los usuarios conectar hardware a la nube, desarrollar aplicaciones para iOS, Android y web, analizar datos históricos y en tiempo real, controlar dispositivos de forma remota, recibir notificaciones y mucho más.

Concentrador Solar: Tipo de colector diseñado para concentrar la energía solar en un área específica.

EasyEDA: Software de diseño electrónico que facilita el diseño de circuitos, simulación y creación de PCBs directamente desde el navegador.

FreeRTOS: Sistema operativo avanzado para controladores y procesadores integrados, que permite ejecutar aplicaciones a gran escala de manera ordenada. Soporta la ejecución de múltiples tareas simultáneas en un solo núcleo, cumpliendo con los plazos de tiempo real.

Inkscape: Editor de gráficos vectoriales libre y de código abierto. Permite crear y editar diagramas, gráficos, logotipos e ilustraciones complejas. Su formato principal es Scalable Vector Graphics (SVG).

IoT (Internet de las Cosas): Red de dispositivos conectados que facilita la comunicación entre dispositivos y la nube, así como entre los propios dispositivos.

LoRa WAN: Protocolo WAN de bajo consumo diseñado para conectar objetos y activos inalámbricos a largas distancias.

Microcontrolador ESP32: Chip SoC de bajo coste y consumo energético, con conectividad Wi-Fi y Bluetooth de doble modo integrada.

SolidWorks: Software de diseño CAD 3D utilizado para modelar piezas, ensamblajes en 3D y planos en 2D.

Introducción

El sector cacaotero colombiano ha crecido notablemente en las últimas décadas, posicionando al país como un importante productor mundial. Sin embargo, el proceso tradicional de secado del cacao, que se realiza al sol durante un período prolongado, presenta desafíos que afectan la calidad del producto y limitan la productividad. Los cacaoteros colombianos estiman un tiempo de secado de 7 a 15 días, dependiendo del clima y la exposición solar. Los productores de baja y media escala buscan reducir este tiempo y aumentar la producción a bajo costo.

La investigación de esta tesis ha sido un éxito en el secado solar, manteniendo una intensidad de luz constante por el algoritmo para la reflexión del panel de vidrio. Este panel amplía el rango de luz, abarcando uniformemente la zona de dispersión del cacao, lo que permite un secado uniforme. Se ha demostrado que el dispositivo puede aumentar la intensidad solar, proporcionando al cacaotero, a través de una aplicación web, parámetros que indican el estado del secado a una distancia determinada por el agricultor.

Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un concentrador solar para cacao con IoT, que se enfoca en el secado rápido y autónomo, considerando la intensidad solar, temperatura y humedad. Esto mejora la calidad del aroma y sabor del producto, y busca aumentar la demanda del cacao colombiano.

1. Planteamiento del Problema

En la Organización Internacional del Cacao (ICCO), Colombia ocupa el décimo puesto a nivel mundial y el quinto lugar en Latinoamérica en términos de producción, exportación y calidad de cacao (Luis Fernando Julio, 2023). Aunque Colombia no es el mayor productor en volumen absoluto, su cacao se distingue por sus características únicas. Además, se tiene la capacidad de producir cacao especial, lo que se coloca en un selecto grupo junto algunos países que manejan el 70% de la producción mundial de cacao fino y de aroma (CFA). Esto representa una participación del 5% de la producción mundial de cacao fino y de aroma.

El sector cacaotero colombiano ha experimentado un crecimiento importante en las últimas décadas. Hace 17 años, la producción de cacao en Colombia alcanzaba las 30,000 toneladas, pero hoy en día ha duplicado esa cifra, llegando a aproximadamente 60,000 toneladas. Además, las importaciones de cacao han experimentado una notable reducción, descendiendo de alrededor de 12,000 toneladas hace 17 años a menos de 300 toneladas en la actualidad (Sandoval, 2024). Asimismo, las exportaciones han aumentado, no solo en grano sino también en subproductos.

Para lograr este crecimiento, los cacaos cultores colombianos han implementado prácticas clave en la producción. Estas incluyen la fermentación, el secado, la selección y clasificación, el tostado, el descascarillado y la molienda del producto. Cada uno de estos pasos es crucial y requiere tiempo y dedicación.

En el proceso de secado tradicional, se estima un tiempo de 7 a 15 días, dependiendo del clima y la exposición solar. Los cacaoteros de baja y media producción buscan reducir este tiempo y aumentar la cantidad de producción a bajo costo. Sin embargo, el secado artificial tiene un tiempo

estimado de 24 a 48 horas, aunque este proceso puede afectar el sabor y el aroma del producto. A pesar de ello, la cantidad de producto por secado aumenta. En la zona tropical, se encuentran estados de climas diferentes donde los cacaoteros exponen al sol el producto durante varios días. Ellos no pueden permanecer vigilando el secado constantemente, por lo tanto, en un descuido, el clima puede arruinar el proceso de secado del cacao debido a la lluvia. (Palencia Blanco et al., 2021).

Si el cacao sobrepasa la temperatura de 80°C el producto se quema este problema sucede mucho en secado tradicional ya que la radiación del sol es inestable lo cual el cacaotero no tiene el control. (*El secado del cacao - Cacao Móvil*, s/f)

2. Objetivos del Proyecto

2.1 Objetivo General

Mejorar el rendimiento del secado tradicional del cacao mediante el uso de un concentrador solar controlado electrónicamente y monitoreado por tecnología IoT (Internet de las Cosas).

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar los equipos electrónicos necesarios para el secado del cacao mediante concentración solar y monitoreo de los granos, basado en Internet de las Cosas (IoT).

Diseñar la estructura del concentrador solar para que sea controlado mediante sensores y actuadores eléctricos.

Diseñar red de sensores para el monitoreo del proceso de secado y la detección temprana de lluvia mediante el uso de Internet de las Cosas (IoT).

Implementar código necesario para el control del sistema y la captura de los sensores bajo el protocolo LoRa/LoRaWAN.

Validar el funcionamiento del proceso de secado y monitoreo comparando los resultados obtenidos con el secado tradicional.

3. Justificación

El sector cacaotero colombiano ha experimentado un crecimiento notable en las últimas décadas, posicionando al país como un importante productor a nivel mundial. Sin embargo, el proceso tradicional de secado del cacao, que se realiza al sol durante un período prolongado, presenta diversos desafíos que afectan la calidad del producto y limitan la productividad. Entre estos desafíos se encuentran la variabilidad climática, la falta de control del proceso y el riesgo de quemaduras debido a las altas temperaturas. Se requieren soluciones alternativas que aceleren el secado, mejoren la calidad del cacao y reduzcan los riesgos asociados al método tradicional, permitiendo a los cacaoteros, especialmente a aquellos de baja y media producción, optimizar sus recursos y potenciar su competitividad en el mercado global.

Desde la ingeniería electrónica, se implementará un proyecto para optimizar el secado tradicional. El objetivo es reducir tanto el tiempo de secado como la humedad del proceso. Además, incorporar una comunicación basada en Internet de las Cosas (IoT) que recopilará datos necesarios para el proceso como son: temperatura y humedad. Estos datos se mostrarán en una aplicación móvil o página web, donde los cacaoteros recibirán información sobre el proceso de secado del cacao, junto con indicadores de alertas tempranas que adviertan sobre riesgos como la lluvia.

El presente documento propone una investigación con el objetivo de mejorar la eficiencia del secado para los pequeños y medianos productores de cacao. Esto contribuirá a aumentar la calidad del cacao en el mercado, garantizando un aroma y sabor óptimos.

4. Marco Referencial

4.1 Estado del Arte

4.1.1 Proceso de Secado

En este apartado, se describirán las principales líneas de investigación relevantes, junto con los resultados o información importante para optimizar el secado del grano de cacao. Además, se identificarán los avances, problemas y posibles investigaciones a futuro.

En el artículo del año 2022, la Universidad Técnica de Manabí en Ecuador propone la “Evaluación de los parámetros para el secado de cacao CCN 51 de una finca integral”(Burgos Briones et al., 2022). Los docentes Gabriel Burgos Briones, Luis Menéndez Cevallos y Viviana Bedón Arteaga plantean un estudio sobre las temperaturas de 45°C y 60°C con flujo de aire y sin flujo de aire en un secador de túnel, utilizando el software Statgraphics Centurion XVIII y 4 modelos matemáticos sobre el secado. Se concluyó que utilizar un equipo de secado con flujo de aire a una temperatura de 80°C es el mejor proceso, según los modelos matemáticos utilizados en la investigación, debido a que este tratamiento permite eliminar la mayor parte de agua en el menor tiempo posible, correspondiendo al 97% de eficiencia en el aumento de producción y disminución de la humedad.

En la Universidad Unidades Tecnológicas de Santander en el año 2020 Carlos Lizardo Corzo Ruiz y Daniel Alexander Velasco Capacho plantea en la revista Colombia Tecnologías de Avanzada “Control automático de microclima en invernadero para secado eficiente de granos de cacao” (Corzo Ruiz & Velazco Capacho, 2020). El proyecto tiene como objetivo el control microclimático de temperatura y humedad en ambientes cerrados, a través de una interfaz gráfica web accesible desde dispositivos móviles, manteniendo las condiciones necesarias para lograr una excelente calidad en sabor y aroma del grano. Para ello, se utilizó un invernadero prototipo a escala, equipado con mesas/bandejas para el secado y ventilación forzada ubicada paralelamente a las mesas. Este sistema retroalimentado direcciona aire caliente hacia los granos, manteniendo la temperatura óptima. Los resultados destacan el control y seguimiento de la temperatura, tanto relativa del ambiente como del grano. Sin embargo, el secado no fue homogéneo, y el grano absorbió humedad durante la noche. El porcentaje de humedad óptimo (7,5%) se alcanzó recién al

sexto día. Por lo tanto, la humedad del ambiente es un factor crítico que determina el secado homogéneo.

En la Universidad Tecnológica Equinoccial, en el año 2018, los estudiantes de mecatrónica Javier Orna, Nelson Chuquin, Luis Saquinga y Oswaldo Cueva proponen el “Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio con una capacidad de 500 kg” (Orna et al., 2018). En dicho estudio, se plantea el diseño de una máquina automática para el secado artificial del cacao, modelada como un cilindro vertical que utiliza aire caliente de tipo rotatorio. El producto se deposita en este cilindro para su secado, utilizando un extractor centrífugo y un quemador. Realizaron varias pruebas con un rango de temperatura entre 43°C y 60°C grados, utilizando 200 kg de materia prima en la cual cada 5 minutos durante el proceso, se examinan los valores de humedad y temperatura. Los resultados mostraron que, después del proceso de secado en la máquina, el grano quedó con un porcentaje de humedad del 9%, alcanzando una temperatura entre 43°C y 44°C. Además, se observó que, a mayor temperatura, disminuye la humedad del cacao y se reduce su peso. Esto representa un acierto para mantener los estándares de calidad y el volumen de producción, además de reducir la necesidad de mano de obra.

En el año 2020, Guzmán Hernández y Obando Ulloa de Costa Rica proponen la “Tecnología térmica solar aplicada al proceso de secado de cacao” (Ulloa & Hernández, 2020). Ellos señalan que, aunque el secado tradicional tiene ventajas, no es recomendable para algunos productos agrícolas, ya que puede decolorarlos, disminuir su calidad nutricional y funcional, y causar pérdida de sabor y aroma. Por lo tanto, proponen un sistema térmico solar híbrido forzado de secado que utiliza los rayos solares para alimentar la cámara, la cual recibe agua, aire caliente y gas LP, logrando un valor de humedad del 7%. Las evaluaciones de este sistema permitieron

comprobar su efectividad para reducir el tiempo del proceso de secado de 15 días (método tradicional) a 5 días. Es importante destacar que la fermentación es la etapa más crucial en el tratamiento del grano, ya que produce cambios bioquímicos que dan origen a los precursores del sabor y aroma, determinando así su calidad química y física.

El artículo “El sabor del cacao ‘a toda máquina’” (Meneses, 2021) del año 2021 de Joaquín Gómez Meneses de la Universidad Pontificia Bolivariana de Santander, mostró una investigación sobre la comparación de los métodos de secado tradicional y mecánica, para el proceso mecánico se usa cualquier maquinaria para trabajar con más cantidades en menor tiempo. Esta investigación arrojó que en principio el secado mecánico preserva mejor las propiedades químicas, olor y sabor del cacao, sin embargo, estos resultados cambian a raíz del tipo de grano y la fermentación previa: “Si esos dos se controlan y el cacao se seca luego por dos métodos diferentes, los resultados del secado mecánico pueden ser más convenientes para el cacao como alimento” (Castellanos Olarte). Por lo tanto, para un alto estándar de calidad en el proceso mecánico se hace énfasis en el proceso de pre-secado.

4.1.2 Maquinaria Industrial

En esta sección se expondrá la investigación llevada a cabo acerca de diversos tipos de maquinaria empleada en la industria del secado de granos. Se proporcionará un análisis detallado de su información técnica, así como de su proceso específico de secado.

La empresa Vulcano de Lima, Perú, fabricantes de maquinaria para alimentos, cuenta con más de 30 años de experiencia en el sector. Ofrecen una secadora de granos rotativa mediante aire caliente, elaborada en acero inoxidable, con una capacidad aproximada de 300 kg por lote de

producción. Su potencia total es de 7.5 kilovatios y el tiempo de secado es de 2 horas. El modelo de referencia de la máquina es el SGV 300 (Figura 1). En su procedimiento, cuenta con un agitador que distribuye el grano mientras la corriente de aire lo recorre. Además, tiene un rotor y reflectores que distribuyen el aire de forma homogénea. La estructura de la máquina está conformada por planchas de criba y puertas laterales para la descarga del producto. El precio de esta máquina es de 40 millones de pesos colombianos, sin incluir costos de importación.

Figura 1.

Secadora de granos rotativa SGV 300



Tomado de (*Secadora de granos - Vulcanotec, s/f*)

Dinatek, empresa de Guayaquil, Ecuador, tiene como misión proporcionar soluciones técnicas integrales para el sector agrícola e industrial. Fundada en 1975, lleva 49 años en el mercado, ofreciendo sus servicios. En su catálogo, destacan las secadoras rotativas, disponibles en diferentes modelos, desde la serie SRE-025 hasta la SRE-150 (Figura 2 y Tabla 1). Las diferencias entre estos modelos radican en la capacidad, que va desde 1.600 kg hasta 2.900 kg, y la velocidad, que oscila entre 1.750 y 1.950 revoluciones por minuto. Estas máquinas están elaboradas en acero

inoxidable y cuentan con un tambor para homogeneidad del secado. Su ventaja con respecto al mercado es la uniformidad en el secado, un tiempo de secado más reducido, rapidez en la carga y descarga, y un menor consumo de combustible. El funcionamiento comienza cuando el tambor gira lentamente y la temperatura aumenta gradualmente hasta alcanzar el punto óptimo para el secado del cacao. En este proceso, el tiempo total es de 3 horas hasta el ciclo final. El costo de la secadora rotativa varía entre 25 millones y 80 millones de pesos colombianos.

Figura 2.

Secadoras para cacao serie SRE-025/150



Tomado de (*SECADORAS Y TECNOLOGÍA PARA CACAO - Dinatek, s/f*)

Tabla 1.

Informaciones técnicas secadora rotativas – Dinatek

Modelo	Capacidad		Potencia	Peso Neto
	Litros	M²		
SER-025	2.500	2.5	2 HP	1.613
SER-050	5.000	5	2 HP	1.815

Modelo	Capacidad		Potencia	Peso Neto
	Litros	M²		KG
SER-075	7.500	7.5	3 HP	2.005
SER-090	9.000	9	5 HP	2.500
SER-150	15.000	15	5 HP	2.900

Adaptada de (Dinatek & Pinhalense, s/f)

El 9 de febrero de 1951, se creó JM Estrada S.A. en Antioquia, Colombia. Esta empresa lleva más de 73 años en el mercado y se especializa en desarrollos propios de maquinaria agroindustrial. Entre sus productos se encuentra una secadora de granos de cacao (Figura 3). La estructura de la secadora es cuadrada, con medidas de 100 x 65 x 150 cm. Tiene tres compartimentos separados por una malla perforada, y cada compartimento recibe 80 kg de granos, lo que suma un total de 240 kg. El proceso de secado se realiza mediante gas natural y un ventilador que lleva aire caliente para evaporar la humedad de los granos. Es importante tener en cuenta que los compartimentos en el proceso de secado del cacao son diferentes, ya que la temperatura varía según el lugar, desde 0°C hasta 350°C, con diferente humedad y tiempo. El costo de esta secadora en Colombia es de 10 millones de pesos.

Figura 3.

Secadora de granos de cacao a gas - JM Estrada S.A



Tomado de (*Secadora de granos de cacao a gas en acero inoxidable - JM Estrada, s/f*)

4.1.3 Protocolos de Comunicación y Tecnología IoT

En esta sección se abordará la investigación realizada sobre las aplicaciones agrícolas de tecnologías IoT, mediante la presentación de estudios comparativos de los principales protocolos utilizados en este ámbito.

En el artículo del año 2022, “Performance evaluation of communication systems used for internet of things in agriculture” (Yascaribay et al., 2022), Geovanny Yascaribay, Mónica Huerta, Miguel Silva y Roger Clotet presentan un estudio comparativo de los principales protocolos de Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) y su idoneidad en aplicaciones agrícolas de IoT (Internet de las Cosas). Entre las redes LPWAN más destacadas se encuentran Weightless, Ingenu RPMA, Symphony Link SIGFOX, Long Range (LoRa)/Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) y Narrowband Internet of Things (NB-IoT). En este artículo, se enfocan en tres tecnologías específicas (LoRaWAN, SIGFOX y NB-IoT) para determinar cuál tecnología

LPWAN es más adecuada para aplicaciones de IoT se deben considerar varios factores como el alcance, cobertura, vida útil del dispositivo, latencia, escalabilidad, duración de la carga útil, complejidad de la implementación, calidad del servicio y costo. Tras evaluar estos parámetros, concluyen que LoRa tiene ventajas en términos de costo, duración de la batería e implementación; además, está disponible comercialmente en varios países.

El artículo “Coverage analysis of lora and nb-iot technologies on lpwan-based agricultural vehicle tracking application” (Soy, 2023) del 2023 de Hakkı Soy, se enfoca en el concepto emergente de Internet de Vehículos (IoV) y su aplicación en el seguimiento integrado de vehículos y maquinaria agrícola mediante dos tecnologías líderes de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN). La principal contribución de esta investigación radica en la comparación de los límites de cobertura de las tecnologías LoRa y NB-IoT en entornos urbanos, suburbanos y rurales, a través de expresiones matemáticas explícitas. Para llevar a cabo este análisis comparativo, se empleó el modelo de pérdida de trayectoria de Hata, el cual evalúa la disminución de potencia en relación con la frecuencia y la altura de la antena. Además, para ilustrar el impacto de las variaciones del terreno en el alcance de cobertura, los resultados de las simulaciones fueron respaldados por mapas generados con la herramienta de planificación de radio XIRIO Online. A partir del análisis de cobertura teórica presentado, se concluye que NB-IoT ofrece una cobertura más amplia en comparación con LoRa. Dado que las actividades agrícolas se desarrollan mayormente en zonas rurales en todo el mundo, tanto LoRa como NB-IoT son soluciones viables para aplicaciones de seguimiento de vehículos en extensas áreas agrícolas. La conectividad LoRa destaca por su acceso independiente a la nube de la red celular, lo que la convierte en una opción más rentable al evitar el pago de tarifas mensuales de acceso a operadores móviles para vehículos conectados. Por otro lado, la conectividad NB-IoT puede resultar atractiva debido a su capacidad para garantizar la

continuidad del servicio mediante la infraestructura de comunicación móvil existente, especialmente cuando se implementan estaciones base LTE en áreas de cobertura de vehículos agrícolas.

En “Coverage and energy-efficiency experimental test performance for a comparative evaluation of unlicensed lpwan: lorawan and sigfox” (Pérez et al., 2022) se aborda el creciente interés en evaluar las diversas tecnologías LPWAN disponibles. Se propone un enfoque experimental para comparar LoRaWAN y SIGFOX, dos tecnologías LPWAN emergentes, en términos de cobertura y eficiencia energética. El estudio presenta pruebas de rendimiento diseñadas para evaluar estos aspectos, donde se realizan mediciones, y finalmente, destacan los principales hallazgos de rendimiento en ambas redes con fines de comparación. Los resultados destacan que, bajo condiciones climáticas favorables, LoRaWAN superó a SIGFOX en términos de cobertura, logrando una mayor tasa de entrega de paquetes (PDR) superior al 80%, y una señal de radio más potente (RSSI superior a -110dBm). Por otro lado, SIGFOX, muestra una mejor eficiencia energética al enviar un 20% más de mensajes en las mismas condiciones de prueba.

4.2 Marco Teórico

4.2.1 *Métodos de Secado*

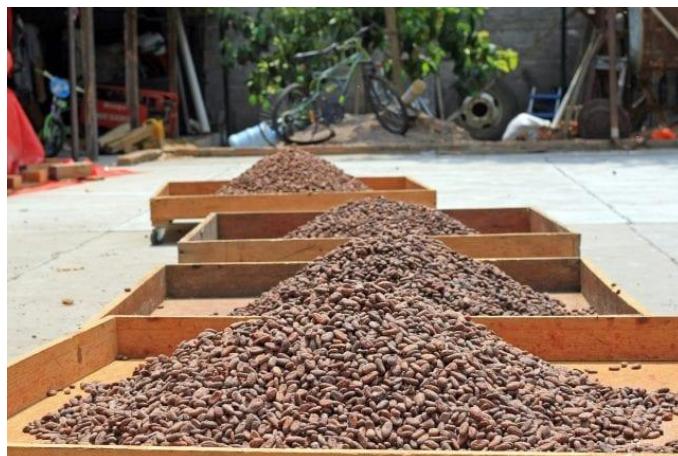
El secado del grano de cacao es una etapa esencial en su camino hacia la transformación en chocolate de alta calidad. En esta fase, se reduce la humedad a un margen entre 6.5 a 7.5% del grano, preparándolo para las etapas posteriores de procesamiento. Existen dos métodos principales para llevar a cabo este proceso: el secado natural y el secado artificial.

Secado Natural

Durante años, este método ha sido el preferido por los cultivadores de cacao debido a su eficacia al aprovechar la energía solar. Este proceso consiste en tomar la pepa de cacao y colocarla en una superficie de madera o en sacos bien ventilados y expuestos a la intensa luz solar. Es necesario rotar los granos cada 48 horas para garantizar un secado uniforme, hasta alcanzar un nivel de humedad del 6 al 7%, momento en el cual estarán listos para el almacenamiento, concluyendo así el proceso de secado. Sin embargo, las condiciones climáticas pueden influir en la duración del proceso, ya que el cacao no debe entrar en contacto con el agua para evitar el aumento de la humedad y posibles daños.

Figura 4.

Secado natural del cacao



Tomado de (Guevara, 2018)

Secado Artificial

Este método se emplea en áreas con alta humedad o temporada de lluvias, además de ser utilizado para minimizar el tiempo de secado en producciones más grandes. Se recurre a diversos

tipos de maquinaria que buscan optimizar el rendimiento del secado mediante la inyección de calor, ya sea a través de gas natural, gasolina o electricidad. Estas máquinas de índole industrial, pueden afectar su sabor y aroma, pero a cambio, incrementan la capacidad de producción y reducen la humedad en un periodo de tiempo determinado. La elección entre una máquina rotativa o vertical depende de las especificaciones particulares de cada agricultor.

Figura 5.

Secado artificial del cacao



Tomado de (*Secadora SIRCA con Intercambiador de Calor – Maquinaria Agroindustrial SIRCA*, s/f)

4.2.2 Estructuras

Placa de vidrio

El vidrio es una estructura cristalina que está formada por elementos naturales. En la industria, existen varios tipos de vidrios, como el flotado, el templado y el laminado, entre otros, con diferentes tecnologías

Vidrio flotado: El vidrio flotado, conocido como vidrio común, tiene una alta transmisión de luz y gran transparencia. Este tipo de vidrio se utiliza en diversas aplicaciones, ya sea pintado o recubierto (*Vidrio flotado: qué es y cuáles son los beneficios / Guardian Glass, s/f*)

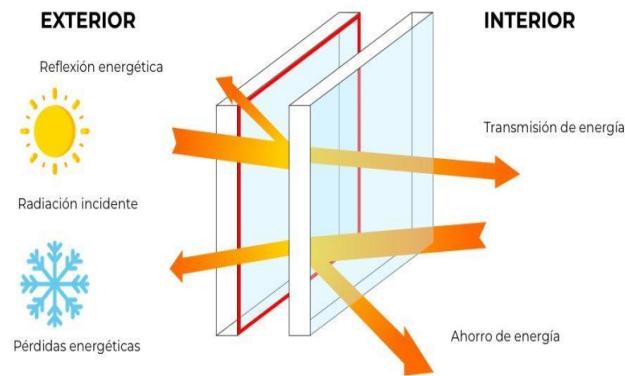
Vidrio templado: Este tipo de vidrio se utiliza para seguridad, ya que su resistencia es mayor en comparación con el vidrio flotado. Sin embargo, a pesar de su alta transmisión de luz y transparencia, se emplea en diversas aplicaciones, como puertas, estanterías y mesas, entre otras. (*Vidrio templado: qué es, fabricación y características - Barrioglass, 2019*)

Vidrio laminado: Es un tipo de vidrio de seguridad que se compone de dos o más láminas, lo que le confiere mayor resistencia. Sin embargo, a pesar de esta resistencia, presenta una reducción en la luminosidad y aislamiento térmico. Se utiliza en diversas aplicaciones, como paredes, techos y barandillas de escaleras. (*Vidrio Laminado: Definición, Características y Usos / Maderame, s/f*)

Teniendo en cuenta los tres tipos de vidrios, el más adecuado es el vidrio flotado debido a sus características en la reflexión de energía, como se puede observar en la Figura 6. Además, es recubrible y fácil de encontrar en el mercado, y su precio es más bajo.

Figura 6.

Placa de vidrio flotado



Tomado de (*Todos los tratamientos del cristal para ventana - Cabañero, s/f*)

Tipo material bases de estructura

Se pueden emplear dos tipos de materiales en la estructura: madera y metal, cada uno con sus propias ventajas y desventajas:

Madera: La madera, un material natural proveniente de los árboles, se moldea mediante tratamiento para alcanzar formas y dimensiones específicas. Entre sus beneficios se cuentan el aislamiento térmico, la versatilidad en el manejo, el costo y la durabilidad. No obstante, su mayor inconveniente radica en su susceptibilidad al fuego. (*Ventajas y desventajas del uso de la madera - proscont.com, s/f*)

Aluminio: El aluminio, un metal con características maleables y dúctiles, es empleado en la construcción gracias a su composición. Destaca por ser ligero, buen conductor térmico y no tóxico, además de resistente a la corrosión. Sin embargo, presenta desventajas como su elevado costo, bajo punto de fusión, fragilidad y conductividad eléctrica. (Layne, s/f)

Considerando las características de ambos materiales, cada uno ofrece beneficios y limitaciones. El aluminio sobresale en la ejecución del proyecto debido a su habilidad para conducir el calor, esencial para aprovechar la radiación solar y secar el cacao. Por otro lado, la madera, como base del proyecto, resulta ser indispensable gracias a su capacidad de aislamiento térmico y su durabilidad, teniendo en cuenta el cuidado necesario y la reducción de costos. En resumen, se optará por combinar ambos materiales para la construcción de la infraestructura.

4.2.3 Tipos de Sensores

Para definir qué sensores se utilizarán en el proceso de secado del grano de cacao, se realiza una investigación de las variables más críticas a monitorear. Entre estas, el tiempo, la temperatura y la humedad son determinantes para la efectividad del secado del cacao (*Cacao Buenas Prácticas*, s/f). Con este conocimiento, es posible especificar que la temperatura y la humedad tanto del grano como del ambiente son datos fundamentales a vigilar durante el proceso.

Sensores de humedad y temperatura

Para medir la humedad del grano de cacao y del entorno, aspecto crucial para preservar su sabor y aroma, se necesitan sensores específicos que no requieran incrustación (en el caso del grano). Algunas opciones viables son: DHT11/21/22, BME280/680, STH31 y AHT21 (humedad relativa).

Además de la humedad, la temperatura es otra variable crucial a medir. Algunos sensores mencionados anteriormente, como los DHT, pueden medir tanto la temperatura como la humedad, lo que permite utilizar un solo dispositivo para ambas funciones. Uno de ellos se encargará de

medir la temperatura del cacao, mientras que el otro estará monitoreando la temperatura del ambiente cerca y lejos de este grano.

En Tabla 2 se realiza una comparación de varios sensores.

Tabla 2.

Información técnica sensores de temperatura y humedad

Modelo	Voltaje de Operación	Rango de Humedad	Rango de Temperatura	Precisión de Temperatura	Precisión de Humedad
DHT11	3.3V ~ 5V	20% RH ~ 90% RH	0°C ~ 50°C		
DHT21	3.5V ~ 5.5V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 80°C	±0.5°C	±3%
DHT22	3.3V ~ 6V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 125°C	-40°C ~ 80°C	2% ~ 5%
SHT31	2.4V ~ 5.5V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 125°C	±0.2°C	2%
ATH21	3.3V ~ 5V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 125°C	±0.3°C	2%
BME280	1.7V ~ 3.6V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 85°C		±3%

Modelo	Voltaje de Operación	Rango de Humedad	Rango de Temperatura	Precisión de Temperatura	Precisión de Humedad
BME680	3.3V ~ 5V	0% RH ~ 100% RH	-40°C ~ 85°C	±1°C	±3%

Adaptado de (*Sensor BME280 Presión, Temperatura y Humedad, s/f; Sensor BME680 Presión, Temperatura, Humedad y Gas, s/f; Sensor de Temperatura y Humedad DHT11, s/f; Sensor de Temperatura y Humedad DHT22, s/f; Sensor de temperatura y humedad relativa AHT21, s/f; Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302), s/f; Sensor de temperatura y humedad relativa SHT31, s/f*)

Sensores de temperatura independientes

Además de los sensores que pueden medir dos variables simultáneamente, tenemos otros tipos de sensores de temperatura independientes, como el DS18B20 y el MLX90614 (Tabla 3). El sensor DS18B20 se caracteriza de tener un voltaje de funcionamiento de 3v a 5.5v, posee un rango de temperatura entre -55°C hasta 125°C y una precisión de ±0.5°C. Por otro lado, el sensor MLX90614, su característica principal es la forma de medir la misma temperatura, ya que al poseer un infrarrojo el sensor debe estar en un rango de 2 cm a 5 cm de distancia de captación respecto al objeto a medir y este posee un rango de temperatura de -70°C hasta 380°C con una precisión de ±0.5°C.

Tabla 3.

Información técnica sensores de temperatura independientes

Características	DS18B20	MLX90614
Rango de temperatura	-55 a 125°C	-70 a 380°C

Características	DS18B20	MLX90614
Resolución	9 a 12 bits	ADC interno de 17 bits
Comunicación	1-Wire	I2C y PWM
Precisión	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0.02^{\circ}\text{C}$
Tiempo de captura	Inferior a 75Ω	None
Rango de captación	None	2 a 5 cm
Alimentación	3v a 5.5v	3v a 5v

Adaptado de (*Sensor de Temperatura DS18B20, s/f; Sensor Infrarrojo de Temperatura MLX90614, s/f*)

4.2.4 Motores

El sistema de control de giro es fundamental para determinar el ángulo en el que se encuentra el rayo de luz incidente y calcular el ángulo de compensación necesario para que la luz reflejada se dirija a un punto específico.

Para simplificar el sistema y evitar la creación de un sistema de reconocimiento de ángulo, se considera importante que el motor tenga la capacidad especificar únicamente su posición final en el rango de giro disponible. No es necesario que el motor proporcione información sobre su posición actual durante el movimiento.

A continuación, algunos de los motores a comparar:

Motorreductor

Es un motor eléctrico (puede ser de corriente continua o alterna) acoplado a un reductor de velocidad, lo que permite disminuir la velocidad de salida del motor mientras aumenta el torque.

Micro-servomotor

Es un motor, generalmente de corriente continua o alterna, que incorpora un sistema de control y retroalimentación (encoder o potenciómetro) para controlar de manera precisa la posición, velocidad y aceleración.

Motor paso a paso

Es un motor que divide una rotación completa en un número de pasos discretos. Cada pulso de corriente mueve el rotor un paso fijo, lo que permite un control preciso sin necesidad de retroalimentación.

Tabla 4.

Comparación de motores

Característica	Motorreductor	Micro-servomotor	Motor paso a paso
Rango de giro	Continuo	0° a 180°/360°	Ambas direcciones
Torque	Alto	Medio a alto	Moderado
Reconocimiento del ángulo	No tiene reconocimiento de ángulo integrado	Preciso (tiene retroalimentación de posición)	Controlado por la cantidad de pasos (no tiene retroalimentación de posición)

Fuente: Autores.

El micro-servomotor cumple con sus características (Tabla 4) en gran medida con la consideración anteriormente mencionada, y dependiendo del modelo elegido, algunas características como el rango de giro y el torque pueden cambiar. A continuación, en Tabla 5, se presenta tres modelos diferentes de micro-servomotores: SG90, SG92R y MG90S.

Tabla 5.*Comparación micro-servomotores*

Micro-servomotor	Rango de giro	Torque	Piñonearía	Precisión
SG90	180°	1.98 Kg-cm @ 4.8V	Plástica	Baja
SG92R	180°/360°	2.5 Kg-cm @ 4.8V	Fibra de carbono	Moderada
MG90S	180°	1.8 Kg-cm @ 4.8V	Metálica	Alta

Adaptado de ([MG90S] Micro servomotor 4.8-6v 1.8Kg/cm / Didácticas Electrónicas I+D, s/f; [SG90] Micro Servo Tower pro 9g / Didácticas Electrónicas I+D, s/f; [SG92R-180] Micro Servo Tower pro 9g-FC 180° / Didácticas Electrónicas I+D, s/f)

4.2.5 Microcontroladores

El microcontrolador es un circuito integrado esencial en las aplicaciones embebidas. Funciona como una pequeña computadora al incluir sistemas para controlar entradas y salidas, un procesador y memoria para almacenar programas y variables (como flash y RAM). Básicamente, opera como una versión en miniatura de una PC. Su objetivo principal es automatizar procesos y procesar información de manera eficiente (E-Marmolejo, s/f).

Los microcontroladores son componentes fundamentales en una gran variedad de sistemas y dispositivos. Frecuentemente, estos dispositivos emplean múltiples microcontroladores que colaboran entre sí dentro del sistema para gestionar sus tareas respectivas (*¿Qué es un Microcontrolador y Para qué Sirve?*, s/f)

Figura 7.*Arduino UNO R3*

Tomado de (*Arduino Uno Rev3 — Arduino Online Shop, s/f*)

Arduino es una plataforma de electrónica de código abierto que se fundamenta en hardware y software libres, ofreciendo flexibilidad y facilidad de uso para creadores y desarrolladores. Esta plataforma posibilita la creación de microcontroladores de placa única, los cuales pueden ser adaptados para diversos propósitos por la comunidad de usuarios (Fernández, 2022).

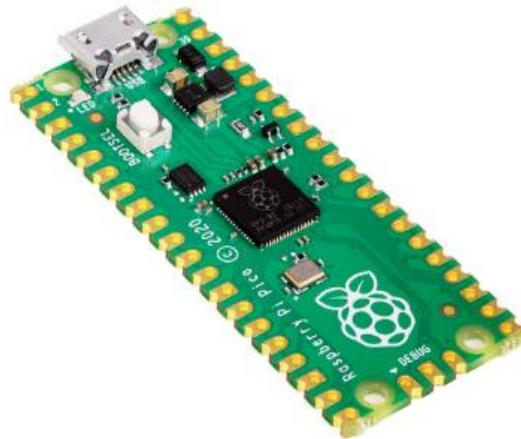
La placa Arduino UNO R3 está disponible en varias versiones, como la normal, R1, R2, R3 y SMD, y se basa en el microcontrolador ATmega328P. Dispone de 14 pines digitales que pueden usarse como entradas o salidas (de los cuales 6 permiten la modulación de ancho de pulso, PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un botón de reset.

Figura 8.*ESP32-WROOM-32*Tomado de (*TARJETA DE DESARROLLO ESP32 WIFI BLUETOOTH, s/f*)

El ESP32 es un SoC (System on Chip) que incluye un procesador de doble núcleo LX6 de 32 bits que funciona a una velocidad nominal de 160 MHz, con la capacidad de llegar hasta los 240 MHz. Esto representa el doble de velocidad en comparación con el ESP8266. Este nuevo SoC se distingue por integrar no solo la pila de comunicación Wi-Fi, con mejoras en seguridad como encriptación criptográfica, sino que también agrega una pila Bluetooth Low Energy (BLE, 4.1). Esta adición amplía las posibilidades al permitir la implementación de diversos perfiles más allá de la comunicación serie Bluetooth típica (perfil SPP). Se pueden utilizar perfiles para transmisión de audio, puerta Bluetooth-WiFi, o para dispositivos HID (interfaz hombre-máquina), como ratones, teclados o gamepads, así como cualquier otro dispositivo de control imaginable, entre otros (*TARJETA DE DESARROLLO ESP32 WIFI BLUETOOTH, s/f*).

Figura 9.

Raspberry PI Pico



Tomado de (*Raspberry Pi Pico - El primer microcontrolador de Raspberry Pi Silicon — 330ohms, s/f*)

La Raspberry Pi Pico es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador RP2040, diseñada para ser flexible y económica. Cuenta con dos núcleos ARM Cortex-M0+ a 133 MHz, 2 MB de memoria Flash y 264 KB de RAM. Incorpora una fuente de alimentación SMPS buck-boost para adaptarse a varios voltajes de entrada, facilitando su uso con diferentes fuentes de energía.

Dispone de 30 pines GPIO, de los cuales 26 son accesibles para propósitos generales y 3 pueden funcionar como ADC. La programación se realiza fácilmente mediante USB, utilizando un programa UF2 o a través de Thonny, un IDE popular para MicroPython (*Raspberry Pi Pico - El primer microcontrolador de Raspberry Pi Silicon — 330ohms, s/f*).

En la Tabla 6 se hace la comparación de las características de los anteriores microcontroladores:

Tabla 6.*Información técnica de microcontroladores*

Características	Arduino UNO R3	ESP32	Raspberry PI Pico
Procesador	ATmega328P	Xtensa LX6	RP2040
Velocidad del reloj	16 MHz	240 MHz (Doble núcleo de 32 bits con velocidad de 160MHz)	133MHz
Memoria flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0,5 KB utilizados por el gestor de arranque	4 MB	2 MB
SRAM	2 KB (ATmega328P)	520 kBytes	264 kB
EEPROM	1 KB	512 bytes	No aplica
Voltaje de operación	5V	5 a 3.3V	3.3V
Pines	14 GPIO	34 GPIO	26 GPIO
PWM	6	16	16
ADC	ADC de 10 bits hasta 6 canales	SAR ADC de 12 bits hasta 18 canales	3 convertidores ADC de 12 bits
WiFi	No aplica	802.11 b/g/n/e/i/n, Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, P2P Group Owner mode y P2P Power Management	No aplica

Características	Arduino UNO R3	ESP32	Raspberry PI Pico
Bluetooth	No aplica	Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE	No aplica

Adaptado de (*Arduino Uno Rev3 — Arduino Online Shop*, s/f; *Raspberry Pi Pico - El primer microcontrolador de Raspberry Pi Silicon — 330ohms*, s/f; *TARJETA DE DESARROLLO ESP32 WIFI BLUETOOTH*, s/f)

4.2.6 Tecnologías IoT (Internet de las Cosas)

El concepto de IoT, abreviatura de Internet de las Cosas, engloba la interconexión de dispositivos y la tecnología que posibilita la comunicación entre dichos dispositivos y la nube, así como entre ellos mismos (*¿Qué es IoT? - Explicación del Internet de las cosas - AWS*, s/f).

Con la introducción de chips informáticos económicos y el desarrollo de telecomunicaciones de alta velocidad, hemos presenciado la conexión masiva de dispositivos a Internet. Este avance posibilita que objetos cotidianos, como cepillos de dientes, aspiradoras, automóviles y máquinas, empleen sensores para recolectar datos y responder de manera inteligente a las necesidades de los usuarios.

El rápido desarrollo de esta tecnología ha generado un vasto campo de oportunidades para la adopción de la agricultura inteligente. Esta tecnología posibilita la conexión de diversos dispositivos agrícolas, los cuales pueden recolectar y transmitir datos a servidores para su análisis. Estas herramientas resultan fundamentales para que los agricultores optimicen el rendimiento de sus cultivos. Sin embargo, uno de los desafíos principales en las zonas rurales es la escasez de conectividad o la deficiente calidad de la misma.

Por estas razones, se agradece la existencia de estudios e investigaciones anteriores que han propuesto métodos para evaluar el rendimiento de los sistemas de comunicación empleados en Internet de las Cosas (IoT) para aplicaciones agrícolas.

Los principales protocolos de Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) más adecuados para esta situación son: Symphony link SIGFOX, Long Range (LoRa)/Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) y Narrowband Internet of Things (NBIOT).

SIGFOX

SIGFOX es una red global de conectividad celular diseñada específicamente para el Internet de las cosas (IoT). Su enfoque se centra en comunicaciones de baja velocidad, lo que reduce los costos y el consumo de energía de los dispositivos conectados. Además de su velocidad reducida, esta red utiliza una banda extremadamente estrecha, lo que le permite a los dispositivos penetrar obstáculos con facilidad y comunicarse a largas distancias, incluso en entornos urbanos.

Desde el punto de vista tecnológico, SIGFOX utiliza la banda UNB (Ultra Narrow Band) que opera a bajas velocidades, con una transferencia de datos que va desde 10 a 1.000 bits por segundo. Esta tecnología se basa en la transmisión de canal de espectro muy estrecho, inferior a 1 kHz, lo que posibilita un alcance inalámbrico considerable de hasta 20 km en áreas abiertas y de 1,5 km en entornos urbanos. La utilización de la banda UNB es esencial para ofrecer una red evolutiva, de alta capacidad y con un consumo energético mínimo.

Las principales ventajas de esta tecnología son su bajo costo, con tarifas de suscripción asequibles, fácil integración tecnológica y acceso gratuito al protocolo. En cuanto a su cobertura, actualmente abarca 60 países, llegando a una población de 803 millones de personas en todo el mundo. Además, se destaca por su eficiencia energética, gracias a comunicaciones optimizadas

que reducen el consumo de los dispositivos conectados. Hasta la fecha, SIGFOX ha proporcionado conexión a más de 10 millones de dispositivos.

Esta tecnología es versátil y puede ser utilizada para monitorear una amplia gama de variables de interés, que van desde la eficiencia energética en términos de electricidad, agua, gas y otros recursos, hasta las condiciones de confort dentro de los edificios y los factores ambientales externos. Además, es adecuada para supervisar el funcionamiento de instalaciones de producción, condiciones climáticas y variables relevantes para el sector agrícola. También puede detectar incidencias como inundaciones o presencia no deseada, e incluso ofrecer conectividad a sensores MODBUS. (*Sigfox: ventajas y funcionalidades de la tecnología IoT - Productos IoT*, s/f)

LoRa/LoRaWAN

LoRa, desarrollada por Semtech Corporation, es una tecnología de capa física, mientras que LoRaWAN, desarrollada por LoRa Alliance, constituye la capa de acceso que utiliza la tecnología LoRa para la comunicación y la administración de dispositivos.

Esta innovación posibilita la transmisión y recepción de información punto a punto. Su característica distintiva radica en su comunicación de bajo consumo y alcance extendido, patentada por Semtech. Este enfoque se basa en la ampliación del espectro mediante la técnica de Espectro de Difusión Chirp (CSS), junto con la corrección de errores hacia adelante (FEC), lo que otorga a LoRa robustez ante las interferencias. La técnica de CSS implica el uso de pulsos modulados con un ancho de banda de frecuencia lineal, cuya frecuencia varía según la información codificada. LoRa opera en varios rangos de frecuencia sin licencia en las bandas ISM, dependiendo de la región geográfica.

Las numerosas ventajas ofrecidas por esta tecnología permiten una amplia gama de aplicaciones a través de sus dispositivos finales. Estas aplicaciones incluyen la recopilación de

datos distribuidos, redes IoT para ciudades inteligentes, así como para sectores industriales, agrícolas, entre otros. Se pueden monitorear procesos y variables, como la eficiencia energética, controlar instalaciones y realizar el seguimiento de vehículos, animales y personas, entre otros usos. (*Lorawan - Tecnología y distribución de productos LoraWan, s/f*)

NBIOT

La red NBIOT forma parte de las tecnologías LPWA (Low Power Wide Area), que se caracterizan por su bajo consumo, ancho de banda estrecho y amplia cobertura. Está diseñada para satisfacer las necesidades de conectividad de dispositivos IoT, especialmente aquellos que transfieren datos en volúmenes bajos durante períodos prolongados, incluso en áreas remotas.

Desarrollada por 3GPP, esta tecnología, conocida como extended Machine Type Communications (eMTC), proporciona una cobertura estable, una alta densidad de conexiones y se integra fácilmente en redes móviles existentes.

NBIOT aprovecha la tecnología LTE existente, lo que garantiza conexiones con menor interferencia y una cobertura más amplia al operar en frecuencias no utilizadas por otras redes de comunicación.

Estos sistemas de conexión están formados por dispositivos y sensores diseñados para recopilar datos del entorno y transmitirlos a estaciones base o nodos NB-IoT. Una de sus principales ventajas radica en su bajo consumo de energía, lo que prolonga la vida útil de la batería de los dispositivos IoT. Además, su amplia cobertura, que algunos expertos consideran teóricamente global, facilita su uso incluso en zonas rurales o de difícil acceso.

Además, al ser una tecnología de bajo costo, permite que muchas pequeñas empresas y organizaciones públicas accedan a una cobertura de largo alcance. Esto posibilita que un gran

número de dispositivos conectados por IoT puedan operar en áreas previamente poco accesibles.

(*¿Qué es NB-IoT y cómo funciona? - Telefónica, s/f*)

En ‘PERFORMANCE EVALUATION OF COMMUNICATION SYSTEMS USED FOR INTERNET OF THINGS IN AGRICULTURE’ nos propone factores a tener en cuenta (Figura 10) para elegir una tecnología más adecuada “Se deben considerar varios factores, incluido el alcance, la cobertura, la vida útil del dispositivo, la latencia, la escalabilidad, la duración de la carga útil, la complejidad de la implementación, la calidad del servicio y el costo” (Yascaribay, Huerta, Silva, & Clotet, 2022).

Figura 10.

Tipos de tecnología LPWAN

Types of LPWAN Technology	LoRaWAN	SIGFOX	NB-IoT
Coverage	2–5 km urban zone 10–20 km rural zone	3–10 km urban zone 20–40 km rural zone	1 km urban zone 10 km rural zone
Standard	LoRa Alliance	Sigfox	3GPP release 13
Licensed spectrum	No	No	Yes
Frequency	ISM Bands 433 MHz Asia, 868 MHz Europe, 915 MHz N. America	ISM Bands 433 MHz Asia, 868 MHz Europe, 915 MHz N. America	Cell Band LTE
Modulation	Chirp Spread Spectrum (CSS)	DBPSK/GFSK	QPSK/BPSK
Data speed	250 bps–50 kbps	100 bps	200 Kbps
Bandwidth	125–250 KHz	100 Hz	200 KHz
Topology	star	star	LTE network
Capacity Connected device	50 K per cell	50 K per cell	100 K per cell
Bidirectional communication	yes/Half duplex	Limited/Half duplex	yes/Half Duplex
Protocol	asynchronous	asynchronous	synchronous
Message per day	unlimited	140 uplink 4 downlink	unlimited
Maximum payload length	243 bytes	12 bytes uplink 8 bytes downlink	1600 bytes
Security	Yes (AES 128b)	No	Yes (LTE)
Geolocation	TDoA	RSSI	OTDoA
QoS	No	No	Yes
Energy consumption	low	low	high
Latency	Low with class C	high	low
Interference immunity	high	high	low
Installation cost per base station	>EUR 1000	>EUR 4000	>EUR 15,000
Final device cost	EUR 3–5	<EUR 2	>EUR 20

Tomado de (Yascaribay et al., 2022).

Del análisis proporcionado en la anterior tabla, nos comentan que, “podemos concluir que LoRa tiene ventajas en términos de costo, duración de la batería e implementación; además, está disponible comercialmente en varios países. Por estos motivos, nos centramos en el uso de esta tecnología, que se adapta a las condiciones de las zonas rurales, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones agrícolas” (Yascaribay, Huerta, Silva, & Clotet, 2022)

La incorporación de LoRa permitirá conectar una gran cantidad de dispositivos en un largo alcance con un bajo consumo de energía, favoreciendo el monitoreo de variables necesarias en el secado del cacao (humedad y temperatura) y alertas tempranas como la lluvia. Se espera que estos permitan mejoras en la calidad del sistema de secado y mantengan la calidad del producto.

4.2.7 Espectro para uso libre en Colombia

El uso libre del espectro es una forma de acceso al espectro radioeléctrico que no requiere de un permiso previo, explícito ni otorgado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) para su uso. Asimismo, no se exige el pago de una contraprestación económica ni periódica para utilizar este recurso.

¿Qué frecuencias se puede utilizar para operar sistemas de Internet de las Cosas (IoT)? El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión digital de objetos con Internet, una conexión que puede realizarse de forma inalámbrica a través del espectro radioeléctrico. Existen diversas tecnologías con características y requisitos técnicos específicos para lograr esta interconexión.

La Resolución 105 de 2020 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) no menciona directamente el concepto de IoT como una aplicación permitida bajo la modalidad de uso libre del

espectro. No obstante, la normativa incluye varias aplicaciones autorizadas que abarcan no solo las tecnologías IoT, sino también muchas otras. Un ejemplo es la aplicación "Dispositivos de salto en frecuencia, modulación digital o híbridos", que establece condiciones técnicas y operativas para el uso del espectro en la banda de frecuencias de 915 a 928 MHz bajo la modalidad de uso libre. Esta categoría abarca tecnologías como LoRa y SIGFOX, comúnmente utilizadas en despliegues de IoT. (*Agencia Nacional del Espectro / Radiodifusión Sonora, s/f*)

4.2.8 FreeRTOS

Desarrollado en colaboración con las principales empresas de semiconductores durante 15 años, FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real (RTOS) líder en el mercado para microcontroladores y microprocesadores pequeños. Distribuido de manera gratuita bajo una licencia de código abierto MIT, FreeRTOS incluye un núcleo y un conjunto creciente de bibliotecas adecuadas para su uso en diversos sectores industriales. Este sistema operativo está diseñado con un fuerte énfasis en la confiabilidad y la facilidad de uso. (*¿Qué es FreeRTOS? - FreeRTOS, s/f*)

Los RTOS son sistemas operativos avanzados que facilitan a los controladores y procesadores integrados la ejecución ordenada de aplicaciones integradas a gran escala. Esto permite que múltiples tareas se ejecuten simultáneamente en un solo núcleo, cumpliendo al mismo tiempo con los plazos establecidos en tiempo real. En los ecosistemas de IoT, un RTOS permite que los dispositivos se conecten a plataformas en la nube y a dispositivos de borde, intercambiando datos de manera eficiente en tiempo real mientras llevan a cabo tareas multitarea integradas. (Magalhaes, 2024)

5. Metodología

5.1 Tipo de Investigación

La estrategia empleada en este proyecto sigue el modelo PPDIOO (Preparación-Planificación-Diseño-Implementación-Operación-Optimización), que abarca la preparación, planificación, implementación, diseño, operación y optimización de cada fase del proceso. Cada paso de esta metodología se centra en actividades clave que permiten alcanzar los objetivos del proyecto de manera excepcional. (Ortiz & Monge, 2014)

5.1.1 Preparación

Durante esta etapa, se propone un método potencial para mejorar el proceso de secado convencional del cacao. Asimismo, se identificarán los datos cruciales a monitorear y, mediante una comparación basada en investigaciones previas, se seleccionará el sistema de comunicación más adecuado de Internet de las Cosas (IoT) para su aplicación en la agricultura.

5.1.2 Planificación

En esta etapa, se procederá con la contextualización basada en los objetivos establecidos, llevando a cabo una investigación sobre los componentes necesarios para la construcción del secador, así como sobre los sensores requeridos para medir las variables necesarias en el proceso

de secado. Además, se explorarán el software y los dispositivos apropiados para la implementación de la red de sensores utilizando tecnología IoT.

5.1.3 Diseño

Tras completar la fase de planificación, se procederá con el diseño del sistema de secado, los circuitos y la red de sensores. Antes de avanzar hacia los diseños definitivos, se llevarán a cabo pruebas del sistema y los circuitos en placas de prueba o prototipos de diseño para asegurar su óptimo funcionamiento.

5.1.4 Implementación

Después de completar las pruebas y confirmar el funcionamiento óptimo, se avanzará con el montaje y preensamblado del sistema. Esto incluirá la integración de todos los circuitos en una unidad única, así como la incorporación de sistemas de alerta temprana y comunicación basados en tecnología IoT.

5.1.5 Operación

Tras la implementación, se llevarán a cabo pruebas adicionales para verificar el funcionamiento del sistema. Se establecerá un monitoreo continuo para asegurar su eficacia y detectar cualquier problema que surja de manera inmediata.

5.1.6 Optimización

Como etapa final, se realizarán ajustes para mejorar el sistema de secado, monitoreo, comunicación y alerta. Además, se considerará la adopción de alternativas que optimicen cada uno de estos aspectos, buscando así obtener resultados más favorables.

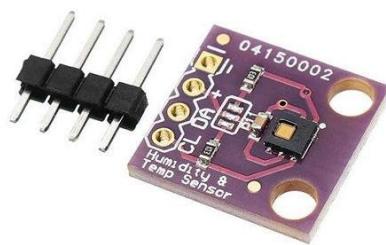
6. Componentes Electrónicos para CSIoT

6.1 Sensor de Temperatura y Humedad HDC1080

En la comparación de algunos de los sensores más utilizados, se eligió el sensor HDC1080. El sensor de temperatura y humedad HDC1080 GY-213V es una opción precisa e inteligente, destacándose por su simplicidad en comparación con el sensor de humedad y temperatura SHT15.

Figura 11.

Sensor de temperatura y humedad HDC1080



Tomado de (*Sensor de Humedad y Temperatura HDC1080 GY-213V, s/f*)

Tabla 7.

Características del sensor HDC1080

Características HDC1080	
Voltaje de Operación	3.3V
Comunicación	I2C
Rango de Temperatura	- 40 °C ~ 125 °C
Precisión Temperatura	± 0.2 °C
Rango Humedad Relativa	0% ~ 100%
Precisión Humedad Relativa	± 2%
Excelente estabilidad a alta humedad	
Resolución de medición	14 bits
Corriente en modo de reposo	100nA

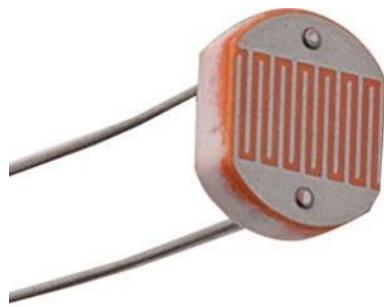
Adaptado de (“HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor”, 2015)

6.2 LDR 10k 7mm

Para reconocer el ángulo de la luz incidente, se deben comparar dos LDRs para determinar la dirección de la luz en un solo eje. Fue elegido un resistor dependiente de la luz con una variación aproximada de 0.5K Ohm en luz diurna y 3M Ohm en oscuridad con un tamaño de 7mm.

Figura 12.

LDR 10k 7mm



Tomado de (*Fotorresistencia LDR 7mm / Didácticas Electrónicas I+D, s/f*)

6.3 Micro-Servomotor MG90S

Al requerir alta precisión, el micro-servomotor MG90S es una opción viable para este sistema, ya que necesita moverse con exactitud dentro de su rango disponible. Esto es posible gracias a su construcción interna de alta calidad con piñonera metálica.

Figura 13.

Micro-Servomotor MG90S



Tomado de (*Micro Servo Metálico MG90S - Electronilab, s/f*)

Tabla 8.

Características del Micro-Servomotor MG90S

Características MG90S	
Voltaje de operación	4.8 V a 6 V
Velocidad de operación	0.1 s/60° (4.8 V), 0.08 s/60° (6 V)
Torque detenido	1.8 kgf·cm (4.8 V), 2.2 kgf·cm (6 V)
Con cojinete	
Banda muerta	5 µs
Peso ligero	13.4 g
Dimensiones compactas	Largo 22.5 mm, ancho 12 mm, altura 35.5 mm aprox.

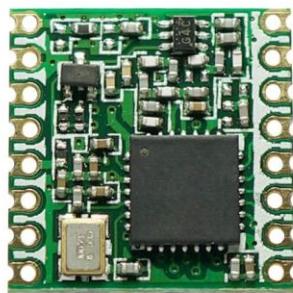
Adaptado de (*Micro Servo Metálico MG90S - Electronilab, s/f*)

6.4 Módulo LoRa RFM95W

La comunicación LoRa es uno de los aspectos cruciales en el sistema IoT, por lo que se han considerado módulos de baja potencia y largo alcance que operen dentro del espectro libre disponible en Colombia. El módulo seleccionado es el transceptor RFM95W (Figura 14) de 915 MHz. Este dispositivo, de bajo consumo y costo, permite la transmisión y recepción de datos con un alcance teórico de aproximadamente 2 km, dependiendo de factores como los obstáculos, la frecuencia, la antena y la potencia de salida. A continuación, se muestra características del módulo en la Tabla 9.

Figura 14.

Módulo LoRa RFM95W



Tomado de (*RFM95W-915MHZ - Sigma Electrónica, s/f*)

Tabla 9.

Características LoRa RFM95W

Características MG90S	
Modulación	FSK/(G)FSK/MSK/(G)MSK/LoRa/OOK

Características MG90S	
Frecuencia	868/915MHz
VDD	2.4-3.7V
Velocidad máxima de datos	300Kbps
Corriente TX	-
Corriente RX	10.3mA
Sensibilidad	-140dBm
Salida	20dBm
Medidas	16*16mm
Interfaz	SPI

Adaptado de (*RFM95W - HOPERF - Reliable original manufacturer of IoT key components, s/f*)

6.5 Microcontrolador ESP32-WROOM-32D

Tras la comparación previa de los tres tipos de microcontroladores, se optó por la línea ESP32. No obstante, existen varias versiones con diferencias en el chip, la antena y la cantidad de pines disponibles, así como en la capacidad de memoria. Se consideró inicialmente la versión ESP32-WROOM-32 (Figura 8), pero esta cuenta con un número reducido de pines disponibles (30 pines expuestos). Por ello, se decidió cambiar a la revisión 32D, que ofrece un total de 38 pines expuestos. A continuación, se muestra características del microcontrolador en la Tabla 10.

Figura 15.*ESP32-WROOM-32D*

Tomado de (*ESP32 microcontroller WiFi Bluetooth 38 pins ESP-WROOM-32D met CP2102 USB chip USB-micro - DomoticX, s/f*)

Tabla 10.*Características ESP32 WROOM 32D*

Características ESP32 WROOM 32D	
Características Clave	240 MHz doble núcleo Tensilica LX6
	SRAM integrada de 520 KB
	Transceptor Wi-Fi integrado
	Bluetooth (clásico y BLE)
	16 MByte flash
	Voltaje de funcionamiento de 2.2V a 3.6V
	Antena PCB
Sensores	Sensor Hall
	10x interfaz táctil capacitiva
	Cristal de 32 kHz
GPIO 32X	3 x UART

Características ESP32 WROOM 32D

	3 x SPI
	2 x I2S
	12 x canales de entrada ADC
	2 x DAC
	2 x I2C
Seguridad Relacionada	Entrada/salida de PWM/temporizador disponible en cada pin GPIO
	WEP, WPA/WPA2 PSK/Empresa
	Cifrado acelerado de hardware: AES / SHA2
	/Criptografía de Curva Elíptica / RSA-4096
Rendimiento	Admite modos sniffer, station, softAP y Wi-Fi directo
	Velocidad máxima de datos de 150 Mbps@11n HT40,
	72 Mbps@11n HT20, 54 Mbps@11g y 11 Mbps@11b
	Potencia máxima de transmisión de 19.5 dBm@11b,
	16.5 dBm@11g, 15.5 dBm@11n
	Sensibilidad mínima del receptor de - 98 dBm
	Rendimiento sostenido UDP de 135 Mbps
	2,5 microA corriente de sueño profundo

Adaptado de (*ESP32 microcontroller WiFi Bluetooth 38 pins ESP-WROOM-32D met CP2102 USB chip USB-micro - DomoticX, s/f*)

6.6 Step-Down LM2596 y SIG0326

Dado que el voltaje de funcionamiento del ESP32, el RFM95W y los micro-servomotores está en un rango entre 3.3V y 5V, es necesario utilizar un regulador de voltaje Step-Down para reducir la entrada de 12V y proporcionar un voltaje constante adecuado para estos componentes.

Esto garantiza un suministro de energía estable y seguro para el correcto funcionamiento del sistema.

Para esto, se implementan dos reguladores, el SIG0326 y el LM2596, para suministrar el voltaje adecuado a cada grupo de componentes: el microcontrolador y los micro-servomotores, respectivamente.

Figura 16.

Step-Down LM2596 y SIG0326



Tomado de (*SIG0326 - Sigma Electrónica, s/f; TARJETA LM2596 - Sigma Electrónica, s/f*)

Tabla 11.

Características del LM2596 y SIG0326

Características	LM2596	SIG0326
Voltaje de Entrada	4 a 40V	4.75 a 23V
Tensión de Salida	1.23 a 35V	1 a 17V
Corriente de Salida	2 A	1.8 A
Eficiencia	92%	96%

Adaptado de (*SIG0326 - Sigma Electrónica, s/f; TARJETA LM2596 - Sigma Electrónica, s/f*)

6.7 Pantalla LCD 16x2 I2C

Para una visualización física de la información se implementó una pantalla LCD 16x2 I2C.

Figura 17.

Pantalla LCD 16x2 I2C



Tomada de (*LCD 16X2 1602 VERDE CON CONVERSOR I2C, s/f*)

Tabla 12.

Características LCD 16x2 I2C

Características Pantalla LCD 16x2 I2C	
Tensión de Alimentación	5V
BUS	I2C
TAMAÑO	82x35x18 mm

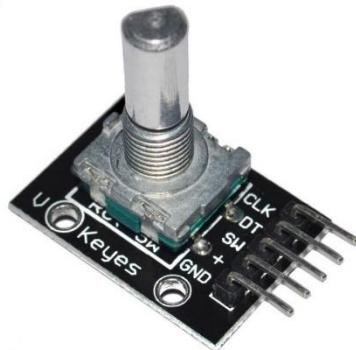
Adaptado de (*LCD 16X2 1602 VERDE CON CONVERSOR I2C*, s/f)

6.8 Encoder de Rotación KY-040

Para un movimiento en una interfaz simplificada, se eligió el módulo encoder de rotación KY-040, que proporciona una indicación de cuánto se ha rotado y en qué dirección. Este módulo se utiliza, por ejemplo, en el control de motores paso a paso, micro-servomotores y potenciómetros digitales.

Figura 18.

Encoder KY-040



Tomado de (*Módulo Encoder de rotación KY-040 / Didácticas Electrónicas I+D, s/f*)

7. Diseños Electrónicos

7.1 Módulos LoRa RFM95W

Antes de comenzar con las pruebas de funcionamiento y conexión entre los componentes, se requiere una shield de expansión, ya que el módulo LoRa presenta una separación entre sus pines de 2 mm (siendo el estándar de 2.54 mm). Por lo tanto, las placas de prueba, headers y baquelas genéricas no son compatibles directamente.

El protocolo del módulo RFM95W por sí solo utiliza la modulación LoRa, puede ser parte de una red LoRaWAN para aprovechar la infraestructura de red y las características avanzadas de gestión que ofrece LoRaWAN. Esto incluye la comunicación bidireccional, la gestión eficiente de dispositivos y la seguridad a través del cifrado AES-128 (*Introduccion LoRa & Modulo RFM95 Hoperf – PDAControl, s/f*).

7.1.1 Shield de Expansión Casero

El shield se diseñó siguiendo las medidas estándar de separación, sin embargo, el módulo LoRa requiere una extensión de sus pines mediante cableado UTP soldado para lograr un contacto adecuado con los headers hembra. En la Figura 19 se observa el resultado.

Los componentes que conforman el shield son los siguientes:

LoRa RFM95W

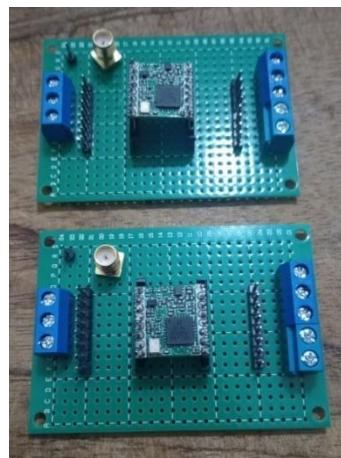
Headers hembra y macho

Borneras

Conecotor antena SMA

Figura 19.

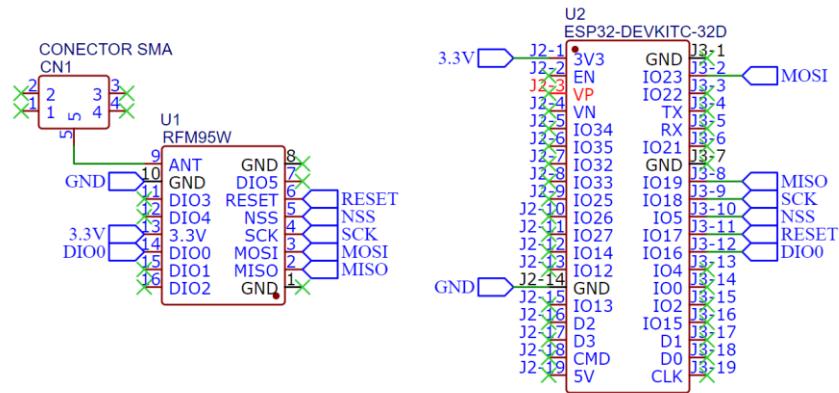
Shield Casero para LoRa RFM95W



Fuente: Autores.

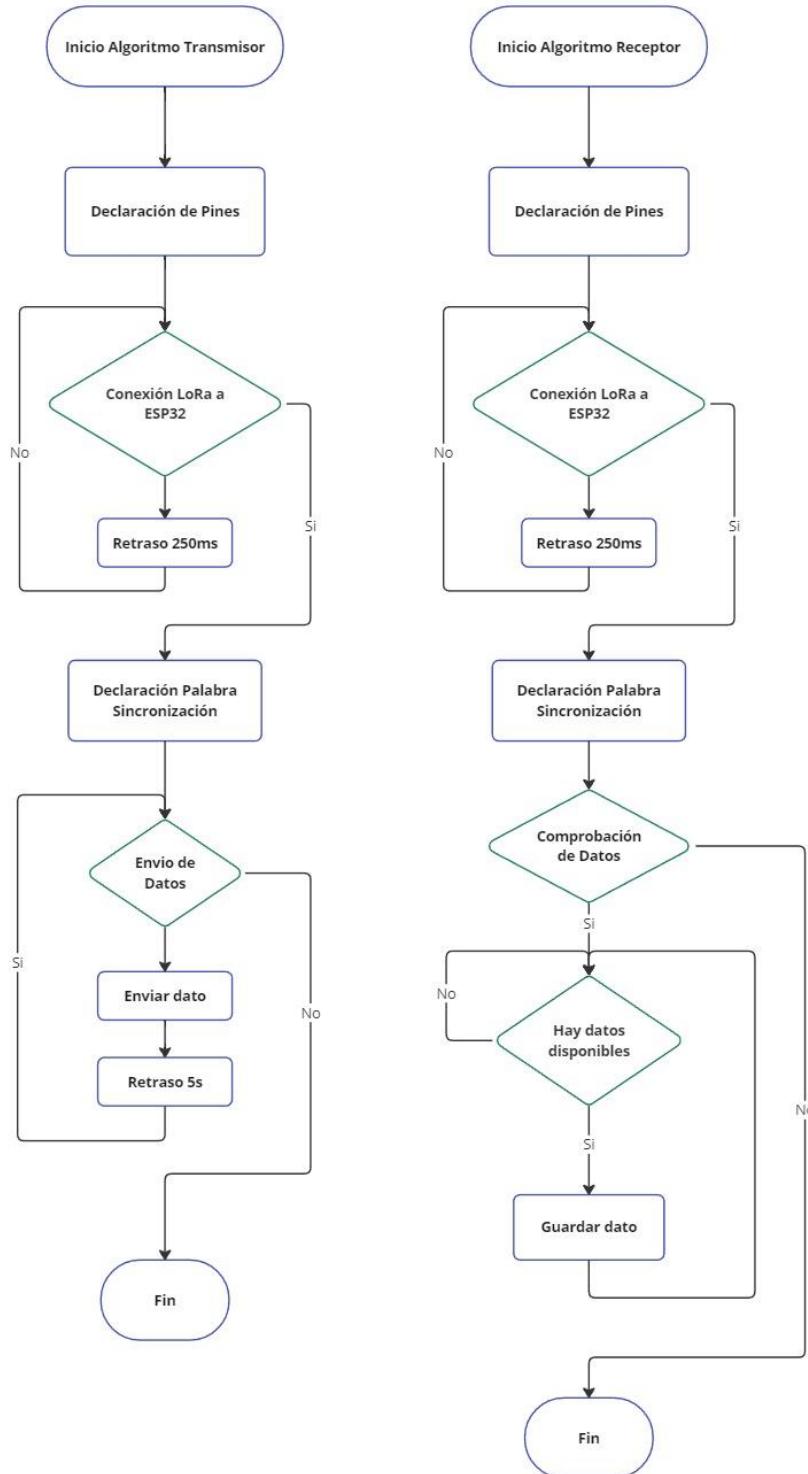
7.1.2 Pruebas de funcionamiento LoRa

Con el shield casero, se revisa la conexión entre el módulo LoRa con el ESP32 siguiendo el esquemático correspondiente en la Figura 20.

Figura 20.*Esquemático Conexión RFM95W a ESP32*

Fuente: Autores.

Teniendo la conexión correcta, se crea el código fuente del Emisor y Receptor, a continuación, en la Figura 21, se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento de los dos códigos y una prueba de comunicación sencilla entre los dos módulos, en el que, el transmisor envía un “hello” junto a un contador (Figura 22).

Figura 21.*Diagrama de flujo algoritmos Transmisor y Receptor*

Fuente: Autores.

Figura 22.

Prueba básica de funcionamiento LoRa

```
00:34:19.271 -> mode:DIO, clock div:1
00:34:19.271 -> load:0x3fff0030,len:1448
00:34:19.271 -> load:0x40078000,len:14844
00:34:19.271 -> ho 0 tail 12 room 4
00:34:19.271 -> load:0x40080400,len:4
00:34:19.271 -> load:0x40080404,len:3356
00:34:19.271 -> entry 0x4008059c
00:34:19.362 -> LoRa Receiver
00:34:19.396 -> LoRa Initializing OK!
00:35:51.189 -> Received packet 'hello 0' with RSSI -95
00:35:53.787 -> Received packet 'hello 0' with RSSI -96
00:36:02.762 -> Received packet 'hello 0' with RSSI -100
00:36:12.803 -> Received packet 'hello 1' with RSSI -104
00:36:22.824 -> Received packet 'hello 2' with RSSI -108
00:36:32.828 -> Received packet 'hello 3' with RSSI -107
```

Fuente: Autores.

7.2 Concentrador Solar

El concentrador solar cuenta con un sistema giratorio para el reconocimiento del ángulo de la luz incidente y un sistema giratorio para la reflexión de dicha luz. Este sistema es capaz de detectar el ángulo con precisión en un solo eje.

7.2.1 Esquemático Concentrador Solar

En la Figura 23 se diseña el esquemático correspondiente del circuito electrónico del concentrador solar que se compone de:

1 ESP32 WROOM 32D

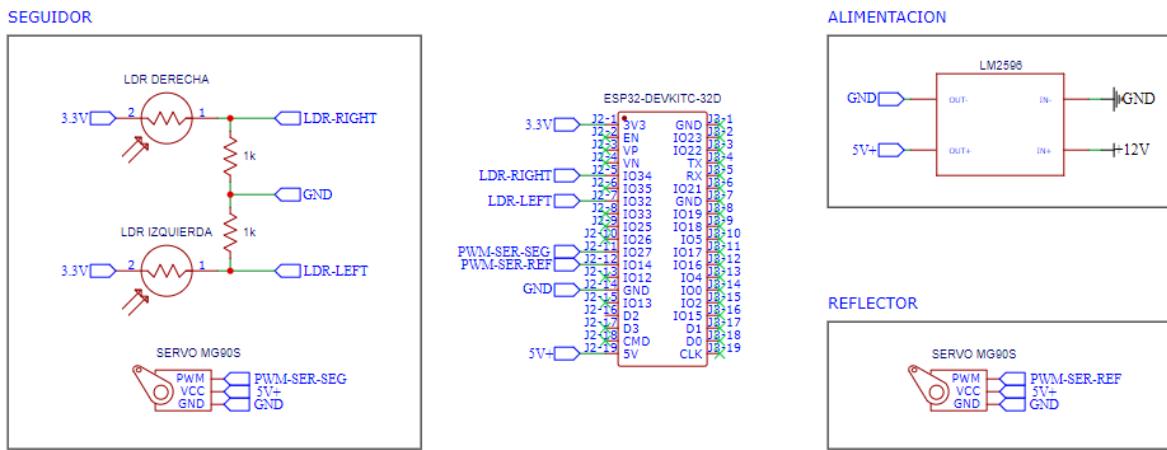
2 Micro-ServoMotores

2 LDRs

1 Regulador de voltaje StepDown LM2596

Figura 23.

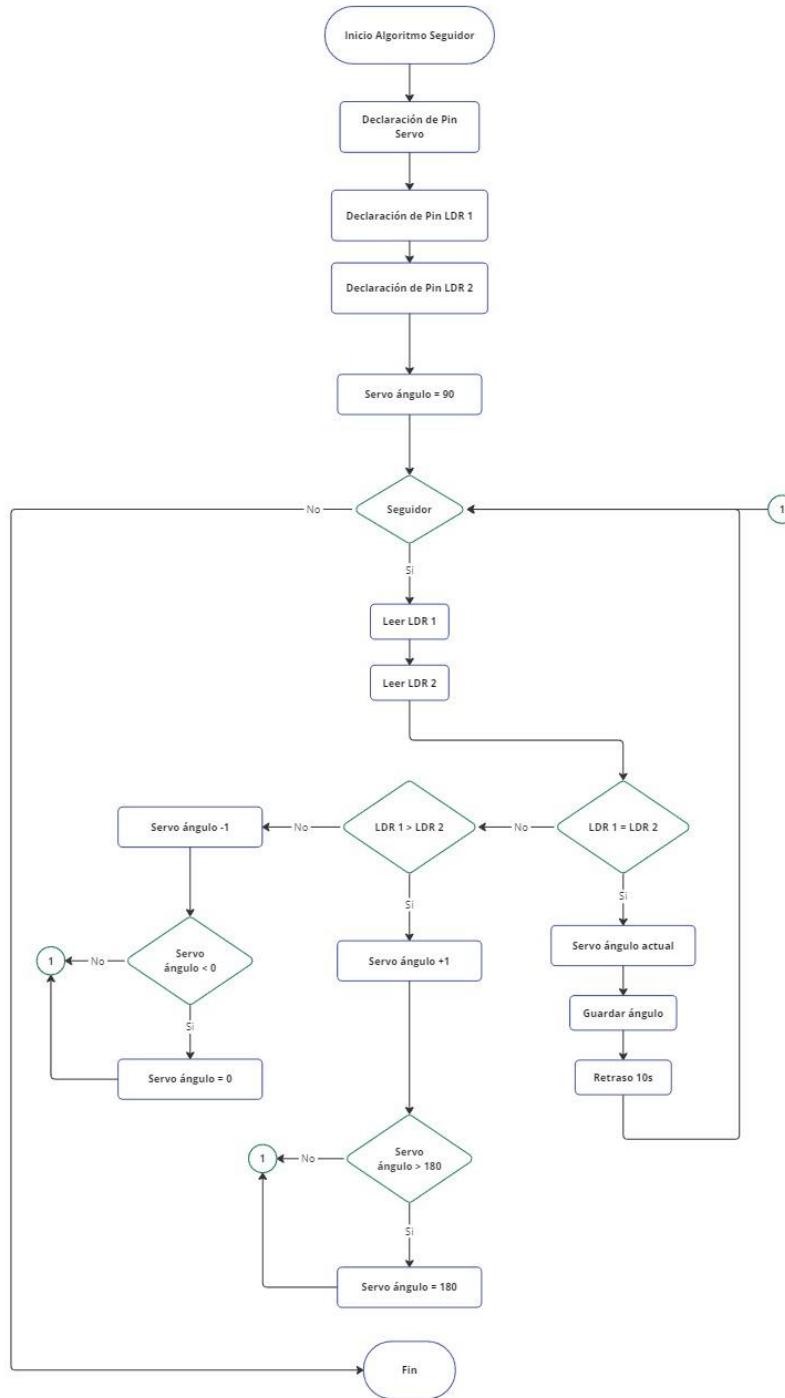
Esquemático Concentrador Solar



Fuente: Autores.

7.2.2 Seguidor

El seguidor se compone de 2 LDRs y un micro-servomotor. Las LDRs se encargan de indicar en qué dirección (en un solo eje) se encuentra la luz incidente en el plano, y el micro-servomotor se moverá en una de las dos direcciones hasta que la intensidad de la luz sea igual en ambas celdas, en la Figura 24 diagrama se detalla su algoritmo de funcionamiento.

Figura 24.*Diagrama de flujo algoritmo Seguidor Solar*

Fuente: Autores.

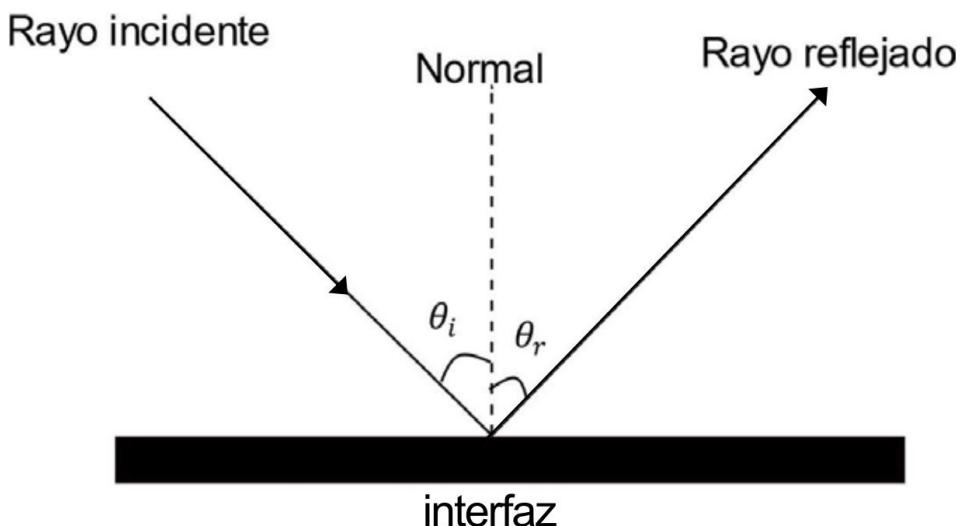
7.2.3 Reflector

El reflector está compuesto por un único elemento, el micro-servomotor, que ajusta el ángulo de la luz reflejada en un solo eje para dirigirla a un punto específico. Para un funcionamiento óptimo, es fundamental comprender la Ley de Reflexión.

Cuando un haz de luz incide en una superficie, una parte se refleja y otra se transmite. La Ley de Reflexión establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Esta relación se expresa como: $\theta_i = \theta_r$. (Montes González, s/f)

Figura 25.

Diagrama Ley de Reflexión



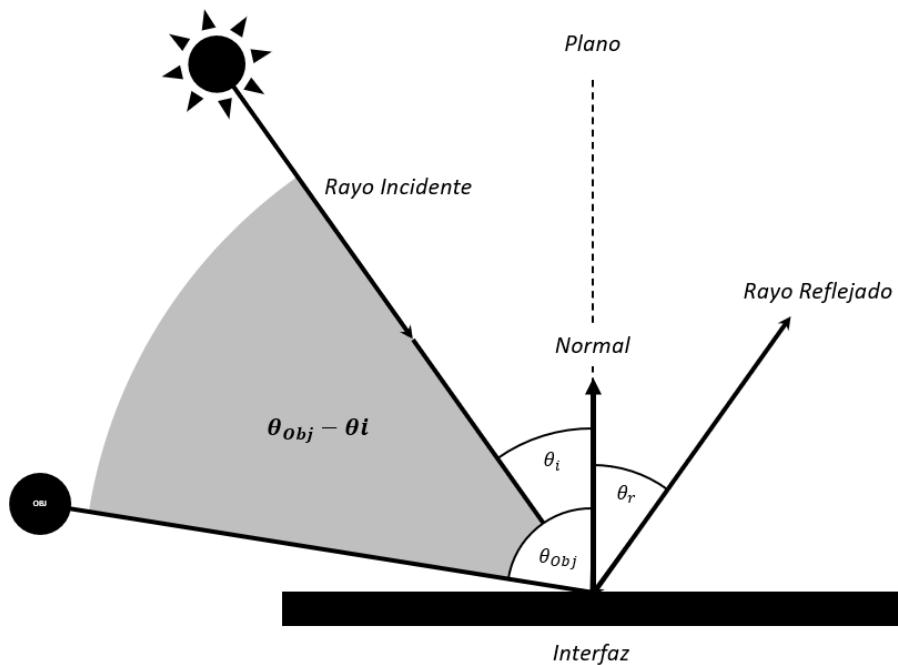
Tomado de (Montes González, s/f)

De este modo, para que el rayo reflejado se oriente hacia un objeto, es necesario aplicar un ángulo de compensación (θ_c) en el eje de la interfaz. Esto se consigue ajustando la línea normal

de la interfaz, de manera que apunte hacia el punto medio entre el objeto y el rayo incidente, cumpliendo así con la Ley de Reflexión (Figura 26).

Figura 26.

Diagrama de ejemplo: Rayo Incidente y Objeto



Fuente: Autores.

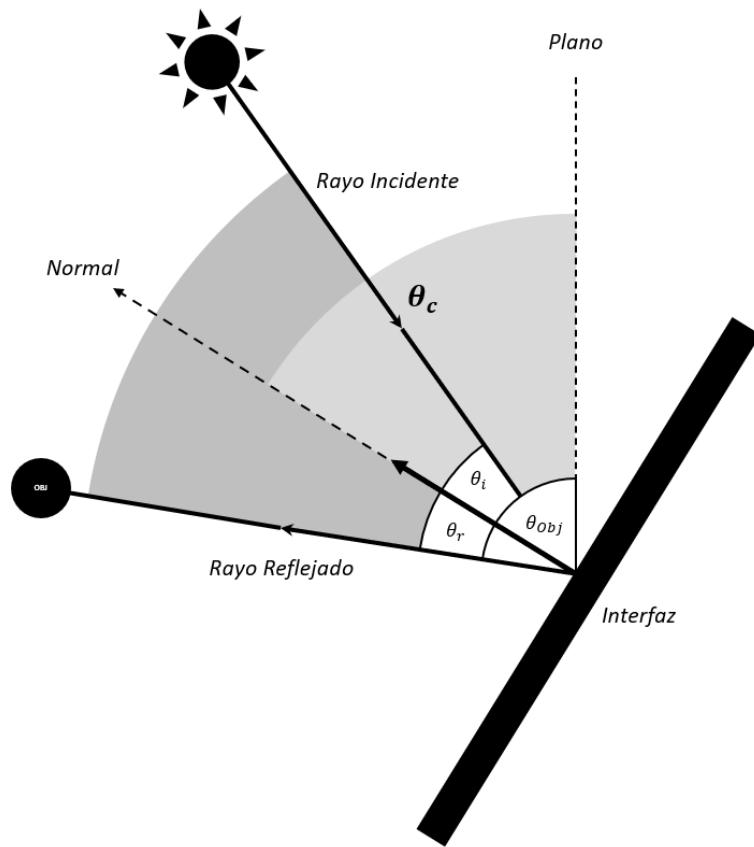
Con los valores obtenidos en la Figura 26, podemos formular una ecuación para calcular el ángulo de compensación de la interfaz (θ_c), lo que permitirá posicionar la línea normal de la interfaz entre el objeto y el rayo de luz incidente (Figura 27):

Ecuación 1

$$\theta_c = \theta_i + (\theta_{obj} - \theta_i) \times 0.5$$

Figura 27.

Diagrama de ejemplo: cálculo θ_c

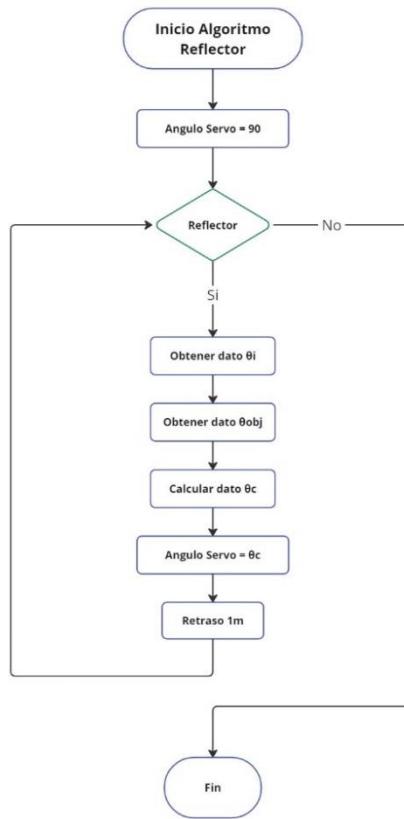


Fuente: Autores.

En base en la Ecuación 1, se desarrolla el código fuente para el reflector solar. A continuación, en la Figura 28, se presenta el diagrama del algoritmo correspondiente.

Figura 28.

Diagrama de flujo algoritmo reflector solar



Fuente: Autores.

7.3 Caja Negra

La “Caja Negra” es la unidad que recibe la información recolectada del concentrador solar (“Caja Blanca”) y los datos meteorológicos (condiciones climáticas actuales en la zona y pronóstico). Además, envía esta información a una plataforma IoT de bajo código a través de Internet y mediante el protocolo LoRa envía los datos meteorológicos recolectados de vuelta a la “Caja Blanca”, aparte de dar el aviso de inicio del proceso de secado.

En la Figura 29 se diseña el esquemático correspondiente del circuito que se compone de los siguientes elementos electrónicos:

LoRA RFM95W

ESP32 WROOM 32D

LCD 16x2 I2C

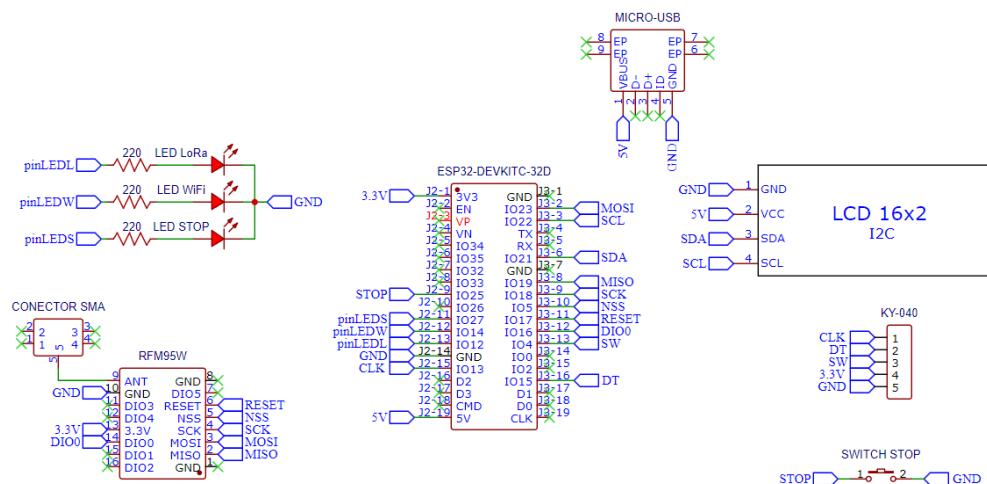
KY-040

Switch pulsador

LEDs indicadores

Figura 29.

Esquemático "Caja Negra"

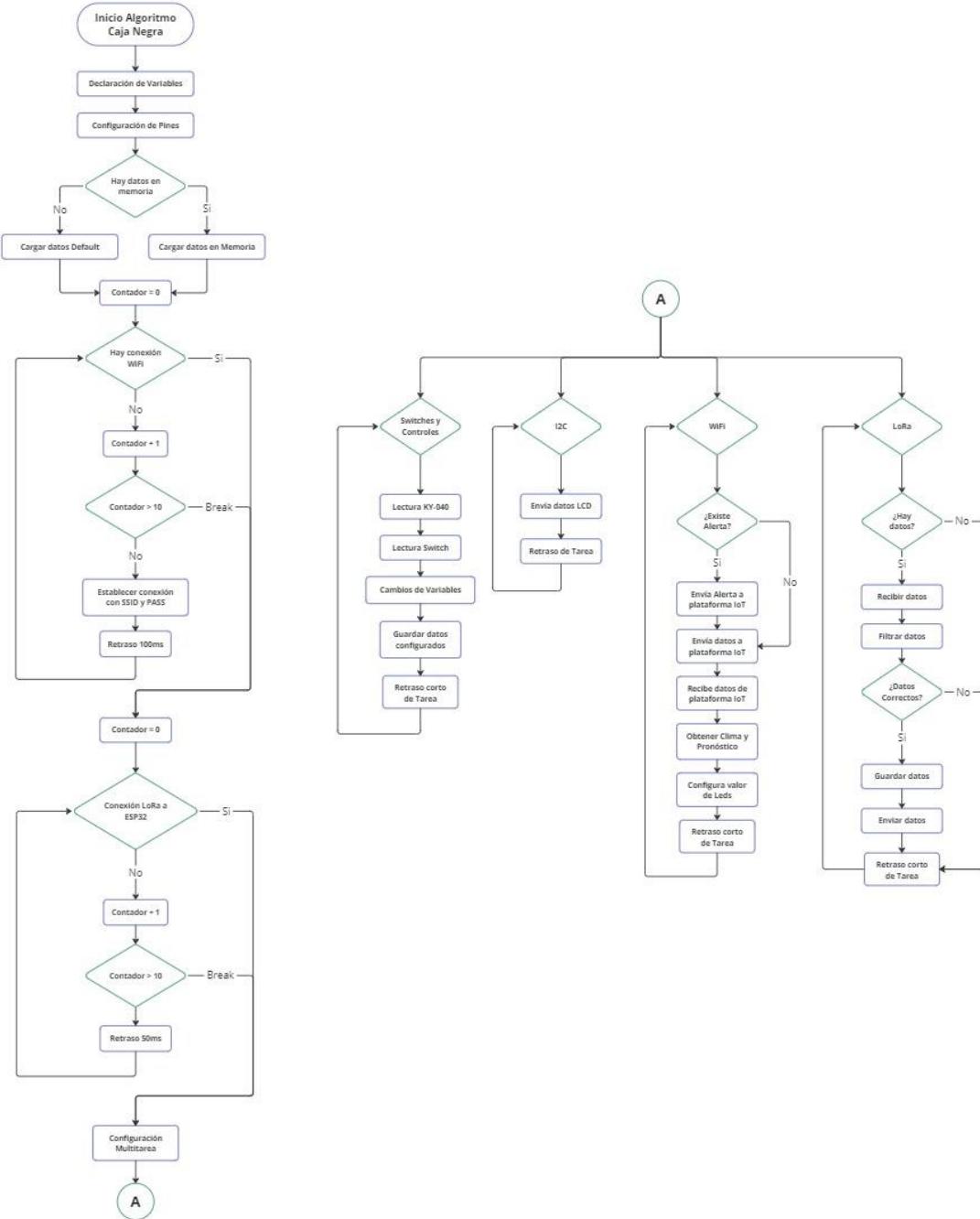


Fuente: Autores.

Al utilizar FreeRTOS, las tareas se dividen en múltiples procesos que se distribuyen entre los dos núcleos físicos del ESP32. Como resultado, en la Figura 30, el algoritmo generado inicia varios subprocessos de manera simultánea.

Figura 30.

Diagrama de flujo algoritmo Caja Negra



Fuente: Autores.

7.4 Caja Blanca

La "Caja Blanca" es la unidad que controla y monitorea el proceso de secado del cacao.

Utiliza el protocolo LoRa para enviar la información recolectada a la "Caja Negra" y, a su vez, recibe de ésta los datos meteorológicos necesarios para una visualización rápida.

En la Figura 31 se diseña el esquemático correspondiente del circuito que se compone de los siguientes elementos electrónicos:

LoRA RFM95W

ESP32 WROOM 32D

LCD 16x2 I2C

KY-040

Switch pulsador

LEDs indicadores

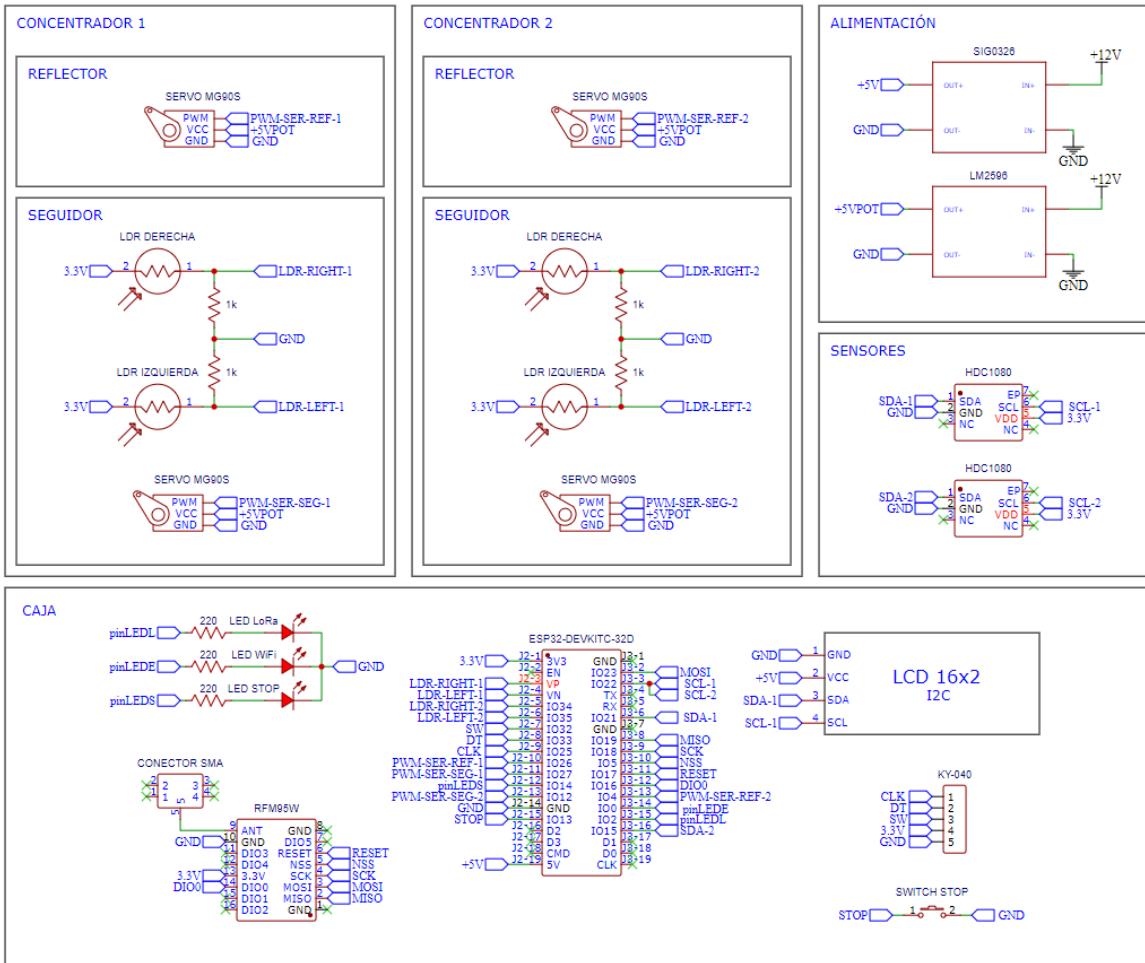
Micro-Servomotores

LDRs

Sensores HDC1080

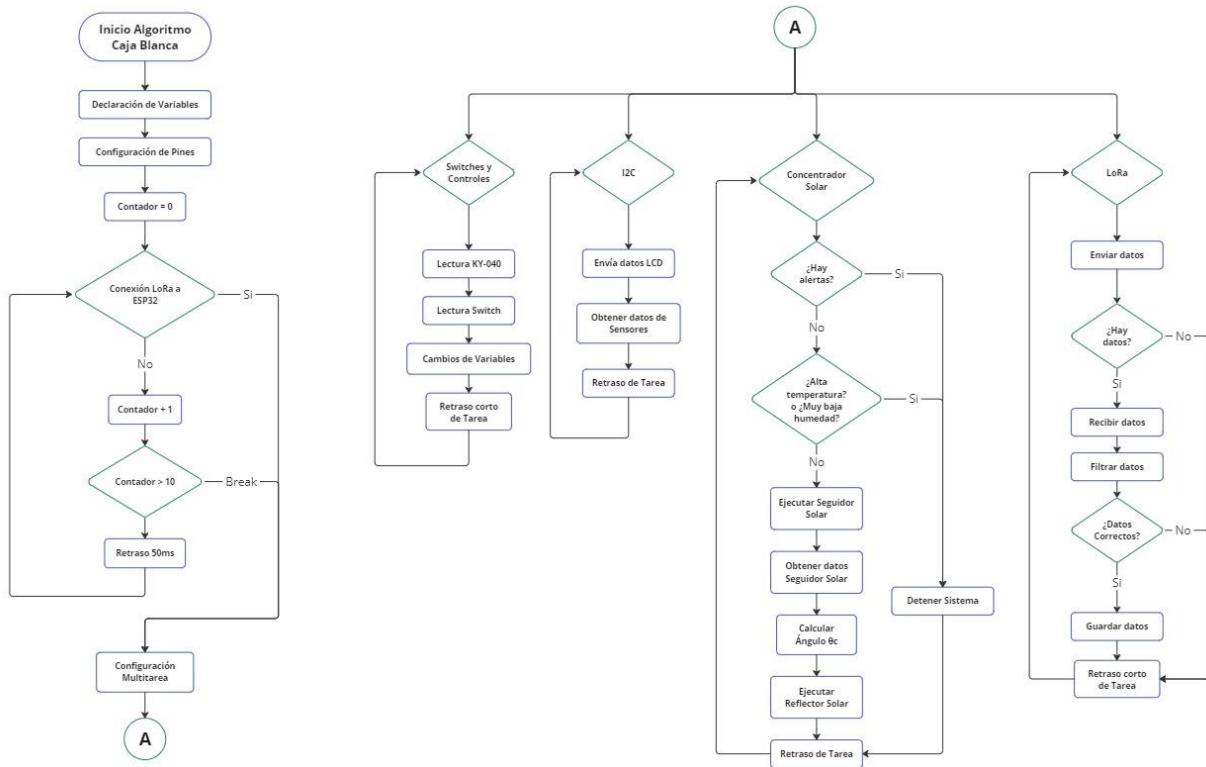
Figura 31.

Esquemático "Caja Blanca"



Fuente: Autores.

Al igual que el algoritmo de la “Caja Negra”, al utilizar FreeRTOS, las tareas se dividen en múltiples procesos que se distribuyen entre los dos núcleos físicos del ESP32. Como resultado, en la Figura 32, el algoritmo generado inicia varios subprocesos de manera simultánea.

Figura 32.*Diagrama de flujo algoritmo Caja Blanca*

Fuente: Autores.

8. Diseños CAD

Para el diseño CAD de cada elemento se utiliza el programa SOLIDWORKS, un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) que permite modelar piezas y ensamblajes en 3D, así como generar planos en 2D. Este software ofrece una amplia gama de soluciones para cubrir los diferentes aspectos del proceso de desarrollo de productos. Sus herramientas permiten crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos relacionados con el proceso de diseño. (*SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve*, s/f)

8.1 Caja Negra

Para la construcción del modelo es necesario conocer las dimensiones de varios componentes. Para ello, se revisan las medidas en las fichas técnicas y se realiza una comprobación sencilla con los componentes físicos (Tabla 13).

Tabla 13.

Medidas de componentes para Caja Negra

Componente	Medidas (mm)			
	Longitud	Anchura	Espesor	Diámetro
ESP32 con Shield de Expansión	70	50	30	-
LoRa con Shield de Expansión	70	50	-	-
Casero				
Conektor SMA	5	5	-	-

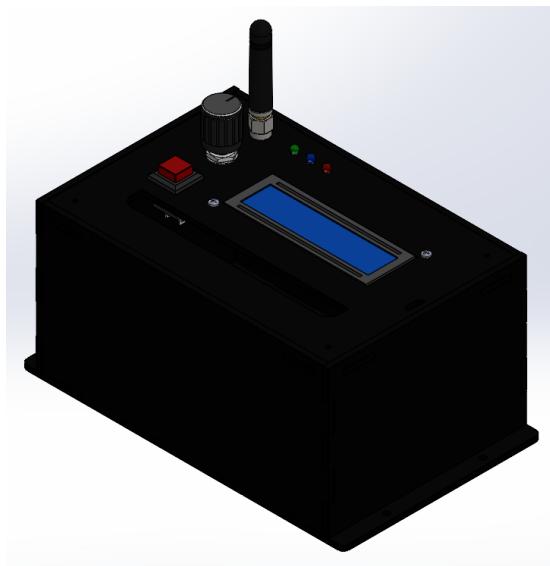
Componente	Medidas (mm)			
	Longitud	Anchura	Espesor	Diámetro
LCD 16x2 I2C	72	25	25	-
KY-040	-	-	-	7
SWITCH STOP	13	11	-	-
LED	-	-	-	3
Conecotor Micro-USB	10	7	-	-

Fuente: Autores.

Con las medidas, en la Figura 33, se presenta el diseño de la caja.

Figura 33.

Diseño CAD Caja Negra



Fuente: Autores.

8.2 Caja Blanca

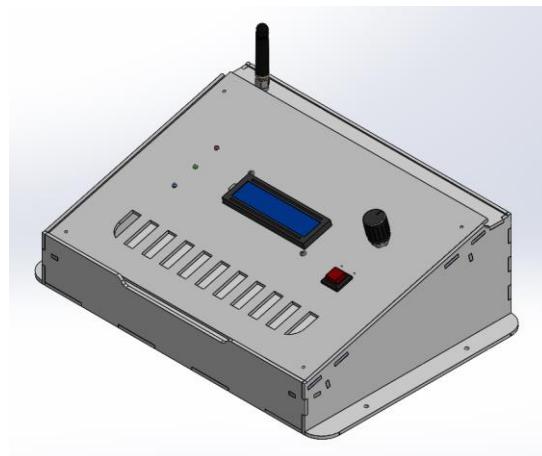
Como en la anterior sección, para la construcción del modelo es necesario conocer las dimensiones de varios componentes. Para ello, se revisan las medidas en las fichas técnicas y se realiza una comprobación sencilla con los componentes físicos (Tabla 14). Con las medidas, en la Figura 34, se presenta el diseño de la caja.

Tabla 14.

Medidas de componentes para Caja Blanca

Componente	Medidas (mm)			
	Longitud	Anchura	Espesor	Diámetro
ESP32 con Shield de Expansión	70	50	30	-
LoRa con Shield de Expansión Casero	70	50	-	-
Conejero SMA	5	5	-	-
LCD 16x2 I2C	72	25	25	-
KY-040	-	-	-	7
SWITCH STOP	13	11	-	-
LED	-	-	-	3
Conejero CCTV Hembra	-	-	-	10
Conejero Molex 6P	16.24	5.58	11.4	-
Placa	80	20	1.6	-

Fuente: Autores.

Figura 34.*Diseño CAD Caja Blanca*

Fuente: Autores.

8.3 Concentrador Solar

Para el diseño en el software SolidWorks, es necesario conocer de antemano las dimensiones de ciertos elementos críticos. Algunos de estos son:

Tabla 15.*Medidas de elementos para el Concentrador Solar*

Elemento	Medidas (mm)			
	Longitud	Anchura	Espesor	Diámetro
Cristal reflector	420	100	3	-
Tubo redondo de soporte (espejo)	507.25	-	-	12
Tubo redondo de soporte inferior	485	-	-	10

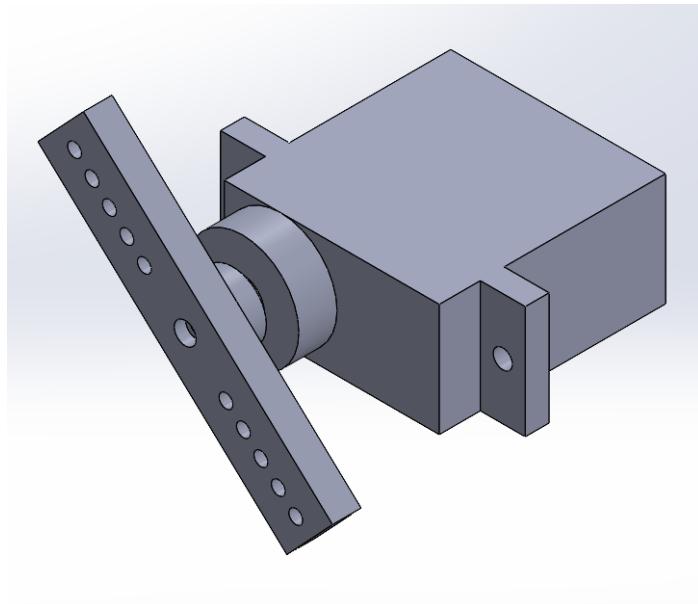
Elemento	Medidas (mm)			
	Longitud	Anchura	Espesor	Diámetro
Rodamientos	28	28	8	12 (interno) y 28 (externo)
LDR	7	5.9	~2	1 (pines)
Micro-servomotor	31.9	30.9	11.8	-
Agarre eje (Horn)	35.7	7	5	1.45 (agujeros laterales)

Fuente: Autores.

A continuación, se presentan los modelos de cada una de las partes necesarias y al final (Figura 39) se muestra el resultado de la unión de dichas piezas.

Figura 35.

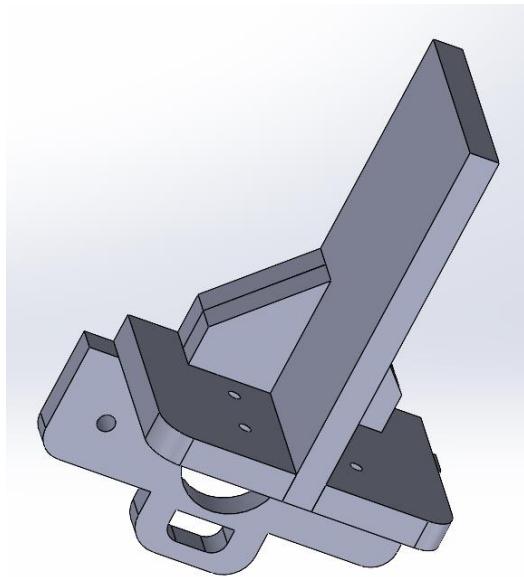
Modelo Micro-Servomotor y agarre de eje



Fuente: Autores.

Figura 36.

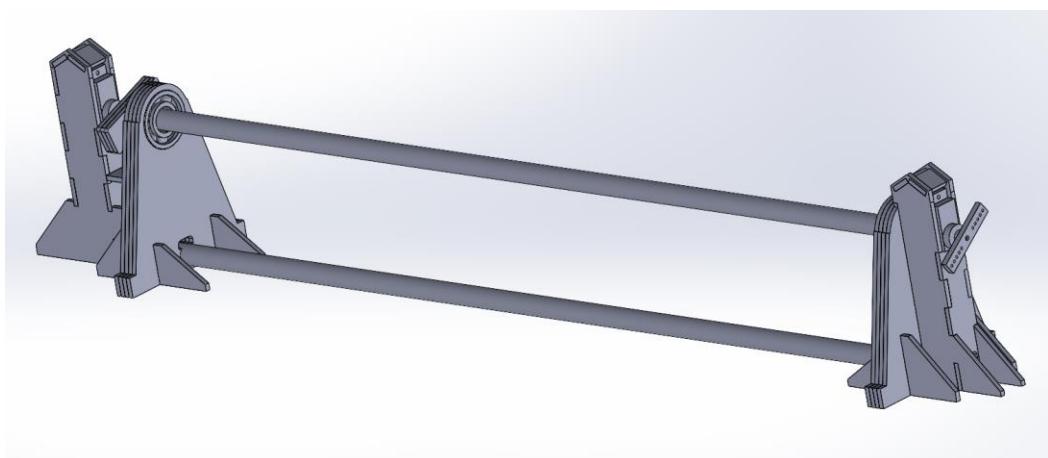
Modelo de soporte LDR para Seguidor Solar.



Fuente: Autores.

Figura 37.

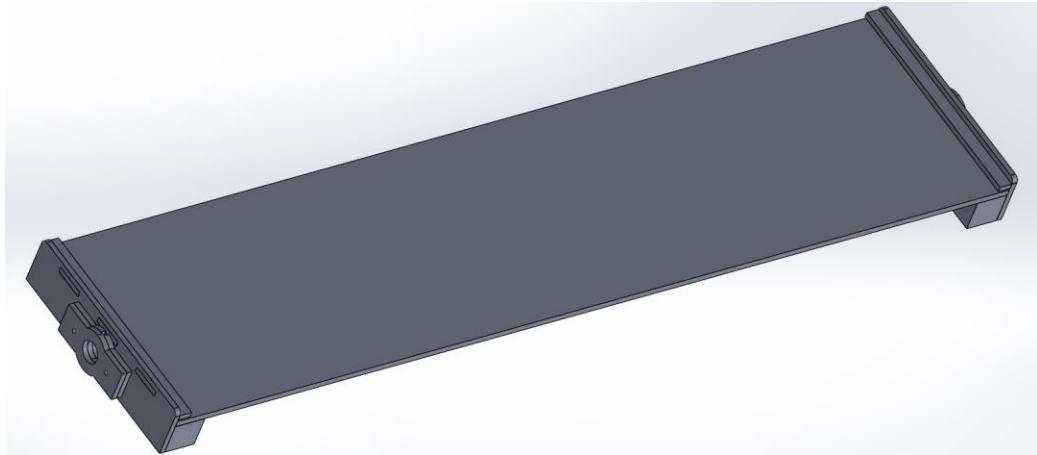
Modelo de bases, soportes, rodamientos y micro-servos



Fuente: Autores.

Figura 38.

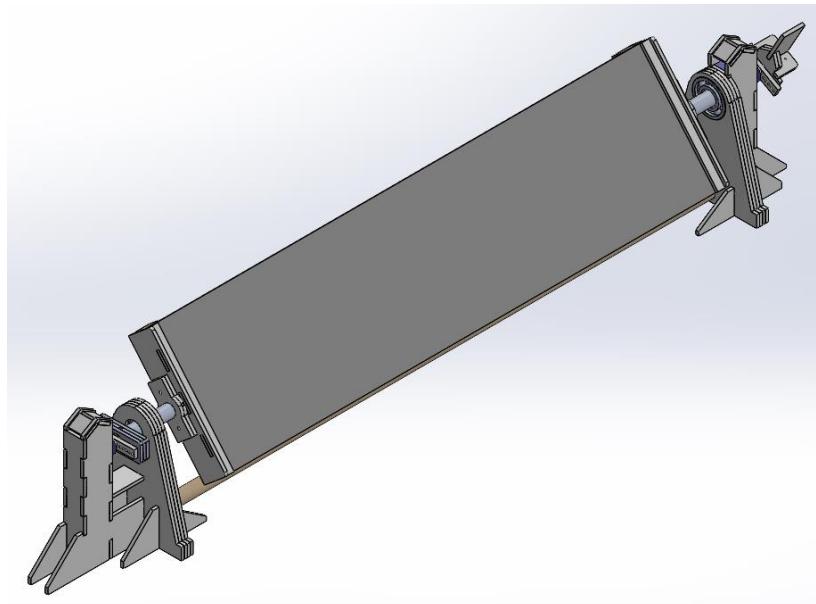
Modelo de espejo y agarres laterales



Fuente: Autores.

Figura 39.

Modelo diseño final del Concentrador Solar



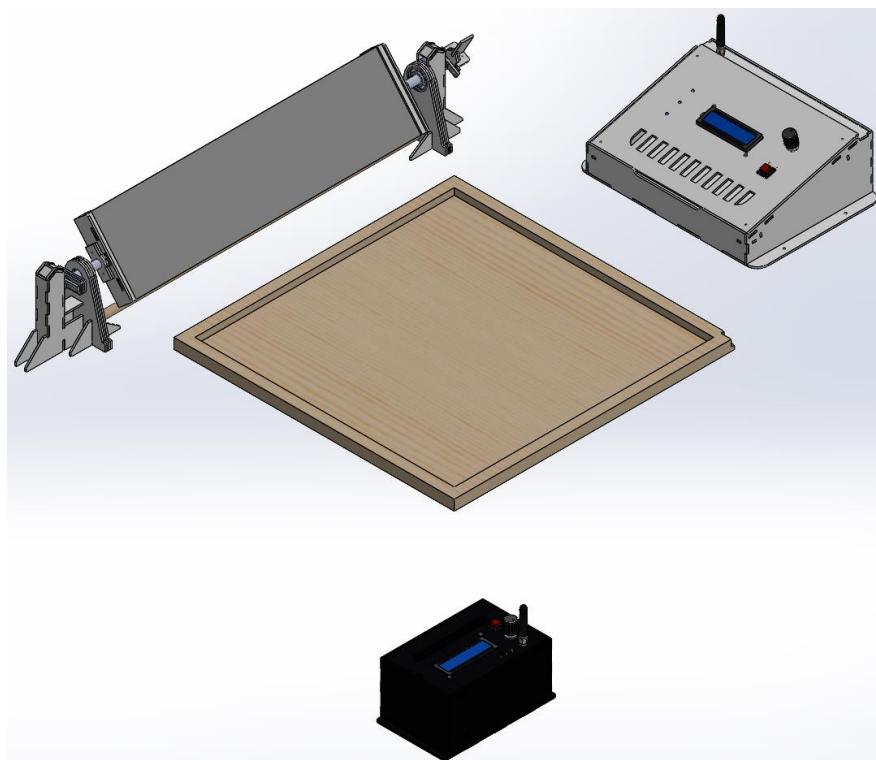
Fuente: Autores.

8.4 Medidas finales

A continuación, se presenta el ensamblaje de todo el sistema junto con las medidas de cada pieza.

Figura 40.

Modelo de diseño final del prototipo



Fuente: Autores.

Tabla 16.

Medidas finales de cada pieza del prototipo

Pieza	Medidas (mm)		
	Longitud	Anchura	Espesor
Caja Negra	160	75.83	98.42
Caja Blanca	259.3	180	80.33
Concentrador Solar	622.8	124.95	100
Superficie Cacao	400	400	15

Fuente: Autores.

9. Monitor de Clima IoT

El clima es un factor importante para el secado del cacao, por lo tanto, es fundamental mantener informado al cacaotero sobre las condiciones climáticas actuales en la zona y el pronóstico del día. Para ello, se eligió utilizar APIs meteorológicas gratuitas. ¿Qué es una API? Las APIs son mecanismos que permiten que dos componentes de software se comuniquen entre sí mediante un conjunto de definiciones y protocolos. Por ejemplo, el sistema de software del instituto de meteorología contiene datos meteorológicos diarios. (*¿Qué es una API? - Explicación de interfaz de programación de aplicaciones - AWS, s/f*)

9.1 Clima y Pronóstico

Existen varias APIs meteorológicas con plan gratuito; las dos elegidas son OpenWeatherMap y AccuWeather. Cada una presenta límites debido al plan como la cantidad de llamadas al mes/día a la API, siendo de 1 millón al mes y 50 al día, respectivamente. Cada API realizará un trabajo específico, y esta división de tareas se debe a lo mencionado anteriormente (cantidad de llamadas). OpenWeatherMap y AccuWeather presentan alta precisión y fiabilidad en sus datos y pronósticos, siendo AccuWeather utilizada por Google.

A continuación, una comparación de entre OpenWeatherMap y AccuWeather:

Tabla 17.

Características de OpenWeatherMap y AccuWeather

Característica	OpenWeatherMap	AccuWeather
Llamadas a la API	60/minuto 1.000.000/mes	50/día
Clima Actual	Si	Si
Pronóstico	Pronóstico de 3 horas 5 días	Pronóstico Diario de 5 Días Pronóstico por Hora de 12 Horas
Cambio de información de pronóstico	Si, cambio y eliminación de pronósticos	No, mantenido con acceso a pronósticos anteriores

Adaptado de (*AccuWeather APIs / Packages, s/f; Pricing - OpenWeatherMap, s/f*)

El funcionamiento de las APIs se basa en la información de la Tabla 17, por lo que se explicará el rol de cada una:

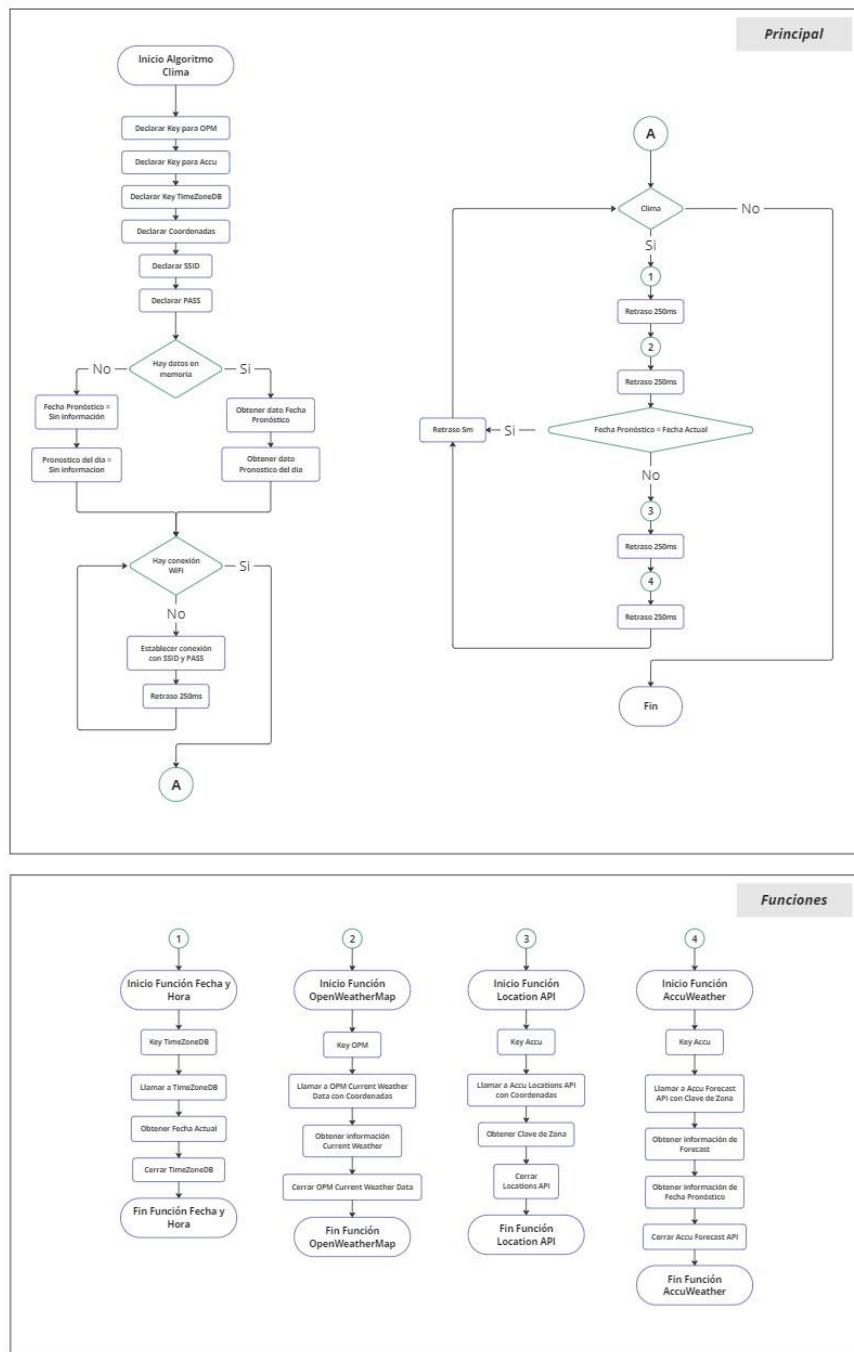
OpenWeatherMap (OPM): Debido a su alto límite de llamadas, su fiabilidad y los cambios frecuentes en sus pronósticos, OPM se encargará exclusivamente de proporcionar información sobre el clima actual a intervalos regulares.

AccuWeather (Accu): Debido a su bajo límite de llamadas, su alta fiabilidad y los pocos cambios frecuentes en sus pronósticos, Accu se encargará de proporcionar el pronóstico para la siguiente hora disponible, almacenándolo en memoria.

TimeZoneDB (TZ): TZ es una de las principales APIs de zonas horarias, proporcionando rápidamente datos horarios de diversas ubicaciones basadas en coordenadas, sin límite de llamadas. Para evitar desperdiciar las llamadas diarias limitadas de AccuWeather, TZ se encargará exclusivamente de entregar al sistema la fecha y hora actual.

Al comparar la fecha proporcionada por TZ con la de Accu en memoria, se puede determinar si es necesario solicitar o no el siguiente pronóstico.

A continuación, en la Figura 41, se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento de las tres APIs.

Figura 41.*Diagrama de flujo algoritmo de Clima y Pronóstico*

Fuente: Autores.

En las siguientes figuras se muestran ejemplos de visualización de la información de las condiciones climáticas y pronóstico en Bucaramanga en una plataforma IoT (Figura 43) y sistema en físico (Figura 44).

Figura 42.

Prueba en Monitor Serial Condiciones Actuales

```
0:26:08.759 -> Fecha y Hora: 2024-10-14 08:26
0:26:09.954 -> Localidad: Bucaramanga
0:26:09.954 -> Temperatura Current: 22.10 °C
0:26:09.954 -> Humedad Current: 94.00 %
0:26:09.954 -> Condicion Current: nubes dispersas
0:26:09.954 -> Es de: Dia
0:26:42.200 ->
0:26:42.631 -> Fecha y Hora: 2024-10-14 08:26
0:26:43.985 -> Localidad: Bucaramanga
0:26:43.985 -> Temperatura Current: 22.10 °C
0:26:43.985 -> Humedad Current: 94.00 %
0:26:43.985 -> Condicion Current: nubes dispersas
0:26:43.985 -> Es de: Dia
0:27:17.208 ->
0:27:19.346 -> Fecha y Hora: 2024-10-14 08:27
0:27:23.391 -> Localidad: Bucaramanga
0:27:23.392 -> Temperatura Current: 22.10 °C
0:27:23.392 -> Humedad Current: 94.00 %
0:27:23.392 -> Condicion Current: nubes dispersas
0:27:23.392 -> Es de: Dia
```

Fuente: Autores.

Figura 43.

Ejemplo de visualización de información en plataforma IoT



Fuente: Autores.

Figura 44.

Ejemplo de visualización de información en sistema físico



Nota: El texto en pantalla posee un desplazamiento horizontal de derecha a izquierda.

Fuente: Autores.

9.2 Alertas

La necesidad de una alerta es fundamental para que el cacaotero esté enterado sobre las condiciones climáticas actuales y futuras en su área. Utilizando los servicios de OpenWeatherMap y AccuWeather, se implementa un sistema que emite alertas cuando se detecta la condición de "Lluvia" en "el clima ahora", además de informar el porcentaje de probabilidad de precipitación en el pronóstico de la siguiente hora.

Las alertas se generan mediante la verificación de las variables proporcionadas por las APIs, y un valor indicativo acompañado de un texto detallado que se envía a una aplicación o plataforma IoT para su visualización o notificación. A su vez, desde las mismas cajas (Negra y Blanca) se puede observar la información de forma rápida en pantalla.

Para generar la alerta hay que saber interpretar los valores entregados por OpenWeatherMap y AccuWeather.

9.2.1 *OpenWeatherMap*

Esta API proporciona un recurso accesible desde el cual se puede obtener la información necesaria en secciones específicas (Figura 45). Para obtener la condición climática de una zona, se accede al campo ["weather"] de la API Weather, que ofrece datos sobre las condiciones actuales. A partir de esta sección, se despliega un conjunto de subsecciones, entre las cuales ["main"] proporciona la condición general del clima, y ["description"] ofrece una descripción detallada. Para generar la alerta mediante una condición, ["main"] nos otorga el valor resultante de "rain" (lluvia), lo que permite activar la alarma.

Figura 45.

Ejemplo de documento JSON entregado por OpenWeatherMap

```
{  
  "coord": {  
    "lon": -73.1632,  
    "lat": 7.1124  
  },  
  "weather": [  
    {  
      "id": 741,  
      "main": "Fog",  
      "description": "bruma",  
      "icon": "50d"  
    }  
  ],  
  "base": "stations",  
  "main": {  
    "temp": 25.58,  
    "feels_like": 26.49,  
    "temp_min": 25.58,  
    "temp_max": 25.58,  
    "pressure": 1012,  
    "humidity": 88,  
    "sea_level": 1012  
  }  
}
```

Fuente: Autores.

9.2.2 AccuWeather

Al igual que OpenWeatherMap, esta API proporciona un recurso accesible desde el cual se puede obtener la información necesaria en secciones específicas (Figura 46). Desde la API Forecast 1 Hour, que proporciona el pronóstico de la siguiente hora en tiempo real, es importante saber interpretar el campo ["PrecipitationProbability"], que corresponde a la probabilidad de precipitación. Este valor indica la probabilidad de que ocurra lluvia o precipitación en el área dentro del intervalo de una hora.

Figura 46.

Ejemplo de documento JSON entregado por AccuWeather

```
[  
  {  
    "DateTime": "2024-10-22T20:00:00-05:00",  
    "EpochDateTime": 1729645200,  
    "WeatherIcon": 15,  
    "IconPhrase": "Tormentas eléctricas",  
    "HasPrecipitation": true,  
    "PrecipitationType": "Rain",  
    "PrecipitationIntensity": "Moderate",  
    "IsDaylight": false,  
    "Temperature": {  
      "Value": 22.6,  
      "Unit": "C",  
      "UnitType": 17  
    },  
    "PrecipitationProbability": 69,  
    "MobileLink": "http://www.accuweather.com/es/c/  
    "Link": "http://www.accuweather.com/es/co/bucan  
  }  
]
```

Fuente: Autores.

9.2.3 Probabilidad de Precipitación

La probabilidad de precipitación es simplemente una estimación estadística de la probabilidad de que se registre 0.01" o más de precipitación en una zona específica dentro del área de pronóstico durante un período de tiempo determinado. Por ejemplo, una probabilidad de lluvia del 40% no significa que el 40% del área estará cubierta por precipitación en un momento dado, ni que lloverá durante el 40% del tiempo en esa área durante el período de pronóstico.

Un ejemplo de lo que significa la probabilidad de lluvia. Si el pronóstico para un condado indica un 40% de probabilidad de lluvia esta tarde, significa que hay un 40% de probabilidades de que ocurra lluvia en cualquier momento entre el mediodía y las 6 p.m., hora local, en algún lugar del condado. (*PRECIPITATION PROBABILITY*, s/f).

Consejos para interpretar el porcentaje de precipitación:

Porcentaje bajo (0-30%): Indica una baja probabilidad de lluvia o lluvias leves y esporádicas. Es probable que el clima se mantenga mayormente seco.

Porcentaje medio (40-60%): Señala una probabilidad moderada de lluvia. Es recomendable llevar un paraguas, ya que es posible que llueva en algún momento del día.

Porcentaje alto (70-100%): Sugiere una alta probabilidad de lluvia, con la posibilidad de precipitaciones en gran parte del área. Es conveniente estar preparado para condiciones húmedas.

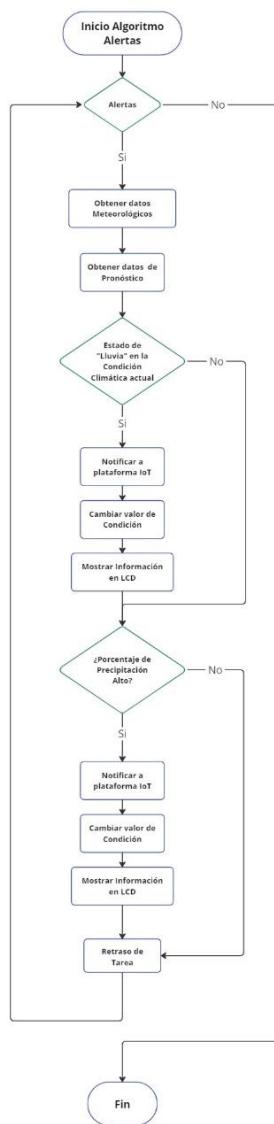
(*Este es el verdadero significado del porcentaje de lluvia en las aplicaciones / Onda Cero Radio, s/f*)

9.2.4 Algoritmo

A continuación, en la Figura 47, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo utilizado en el código fuente del funcionamiento de las alertas.

Figura 47.

Diagrama de flujo algoritmo de alertas



Fuente: Autores.

9.2.5 Pruebas

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de visualización de las alertas generadas en una plataforma IoT mediante una notificación push (Figura 48) y en el sistema en físico vista en la pantalla LCD de la “Caja Negra” (Figura 49).

Figura 48.

Ejemplo de visualización de alerta en notificación push



Nota: El número de notificaciones permitidas en un periodo de tiempo se detalla en Plataforma IoT.

Fuente: Autores.

Figura 49.

Ejemplo de visualización de alerta en sistema físico



Nota: El texto en pantalla posee un desplazamiento horizontal de derecha a izquierda.

Fuente: Autores.

10. Prototipo

10.1 Construcción

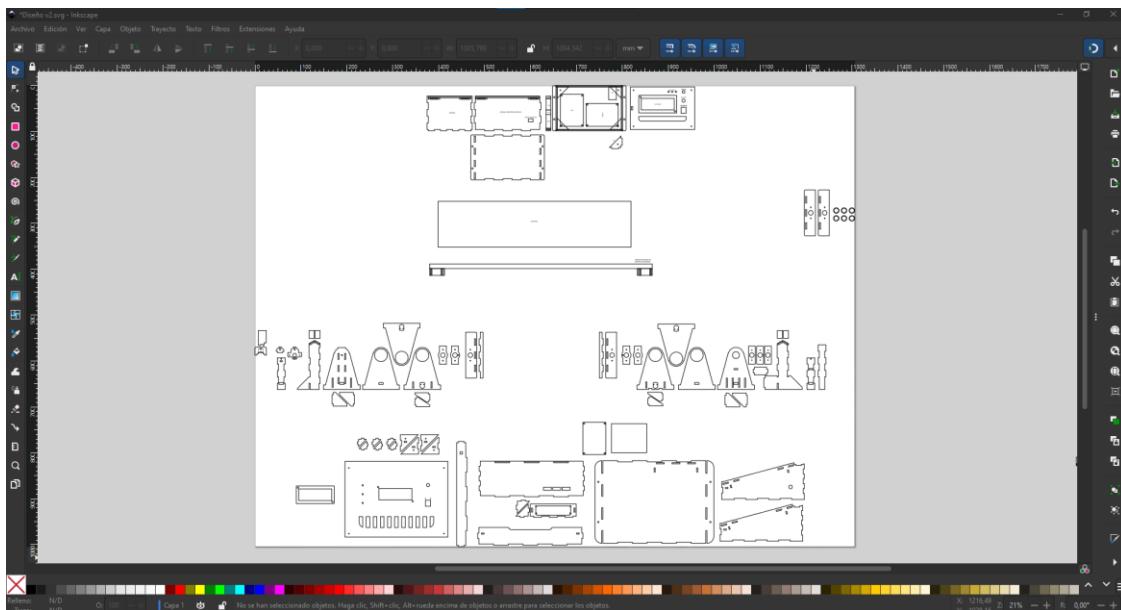
La construcción del prototipo se realizó con madera MDF, que significa "tablero de fibras de densidad media" (del inglés medium density fibreboard), también conocido como DM. Este tipo de tablero está compuesto en un 85% aproximadamente por fibras de madera y resinas sintéticas comprimidas, lo que le otorga una mayor densidad en comparación con los tableros

aglomerados tradicionales o la madera contrachapada. (*Qué es y Características de los tableros o madera MDF, s/f*)

Los planos de corte (Figura 50) se entregaron en un archivo .SVG utilizando el software de diseño vectorial 2D Inkscape.

Figura 50.

Planos para corte laser

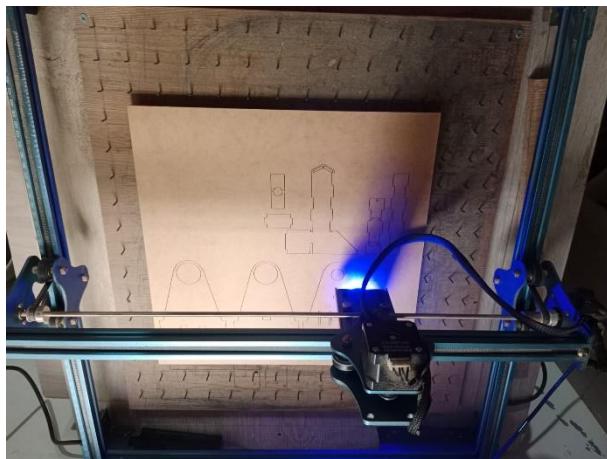


Fuente: Autores.

A continuación, en la Figura 52, Figura 53 y Figura 54, se muestra los resultados del ensamblaje del prototipo:

Figura 51.

Proceso de Corte Laser



Fuente: Autores.

Figura 52.

Prototipo físico de Caja Negra



Fuente: Autores.

Figura 53.

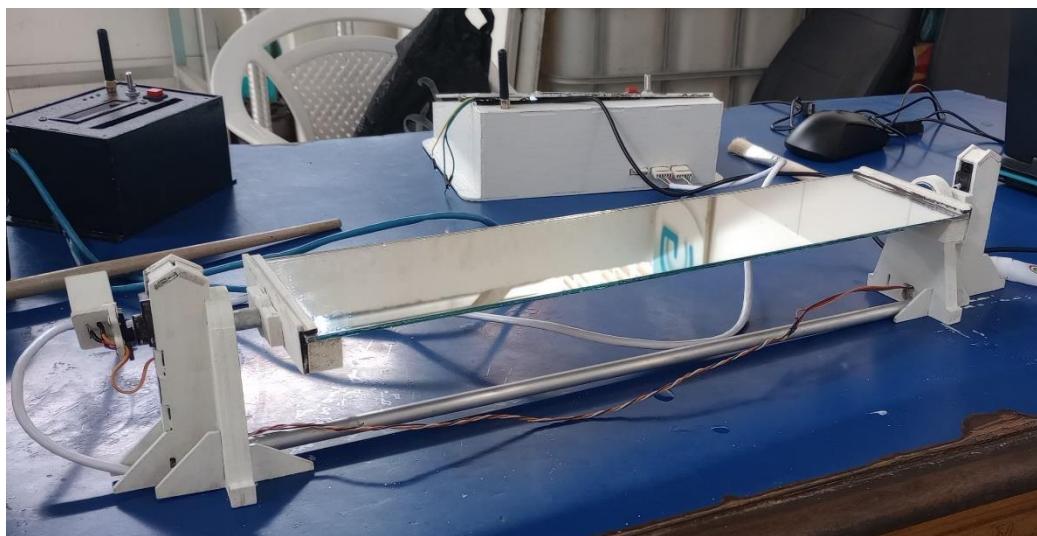
Prototipo físico de Caja Blanca



Fuente: Autores.

Figura 54.

Prototipo físico de Concentrador Solar



Fuente: Autores.

Figura 55.

Base para Cacao



Fuente: Autores.

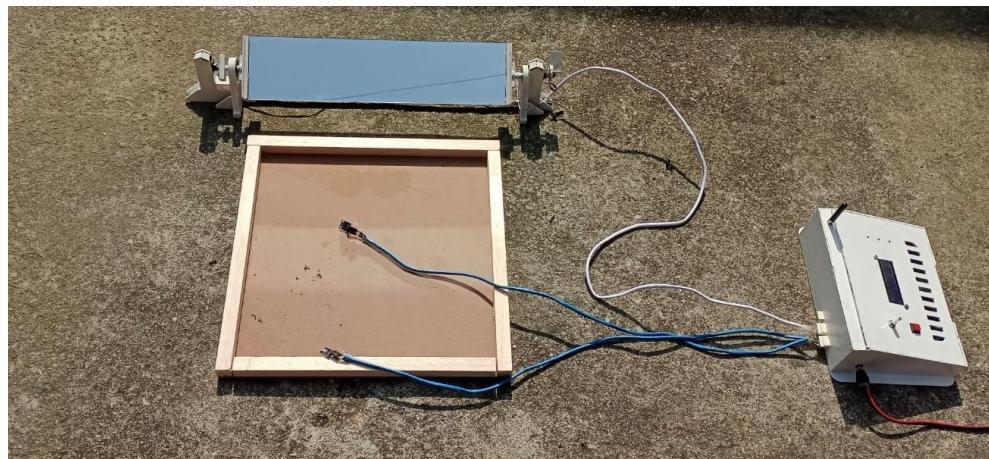
10.2 Pruebas y funcionamiento

La primera prueba se realizó al aire libre en una tarde soleada con alta intensidad solar.

A continuación, en la Figura 56, se observa la dirección en la que la luz es reflejada, en la Figura 57 la dirección de la luz incidente que cae sobre el seguidor y en la Figura 58 el sistema de protección contra alta temperatura, en la que, si supera los 60°C la interfaz o espejo vuelve a su estado de reposo para así no reflejar la luz incidente al punto.

Figura 56.

Prueba de Funcionamiento: Reflexión de Luz Solar



Fuente: Autores.

Figura 57.

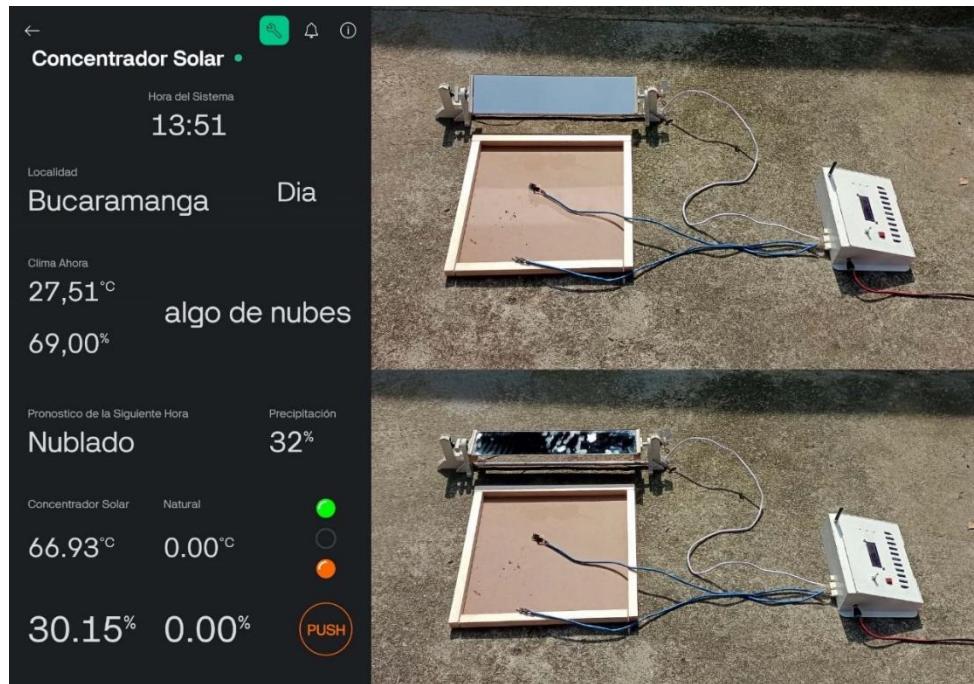
Prueba de Funcionamiento: Seguidor Solar



Fuente: Autores.

Figura 58.

Prueba de Funcionamiento: Control de temperatura



Fuente: Autores.

10.3 Prueba Experimental

Se realizó una prueba hipotética de secado con una pequeña cantidad de pepas de cacao y una comunicación a distancia de aproximadamente 210 metros (Figura 59). En esta prueba, la Caja Negra envía la señal de inicio para activar el proceso de secado en la Caja Blanca.

Figura 59.

Caja Negra posicionada a 210 metros de distancia

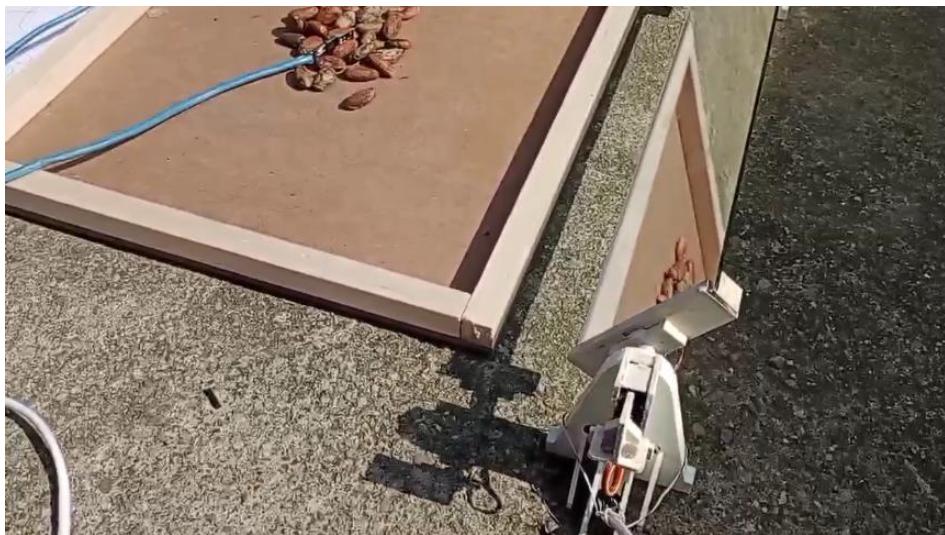


Fuente: Autores.

En las siguientes figuras se muestra una recopilación de fotogramas de un video que documenta el proceso de seguimiento y reflexión. En la que, en la Figura 60, inicia el proceso de secado, en la Figura 61 el seguidor se posiciona en dirección a la luz incidente y en la Figura 62 se observa la reflexión de la luz incidente que cae en la interfaz o espejo.

Figura 60.

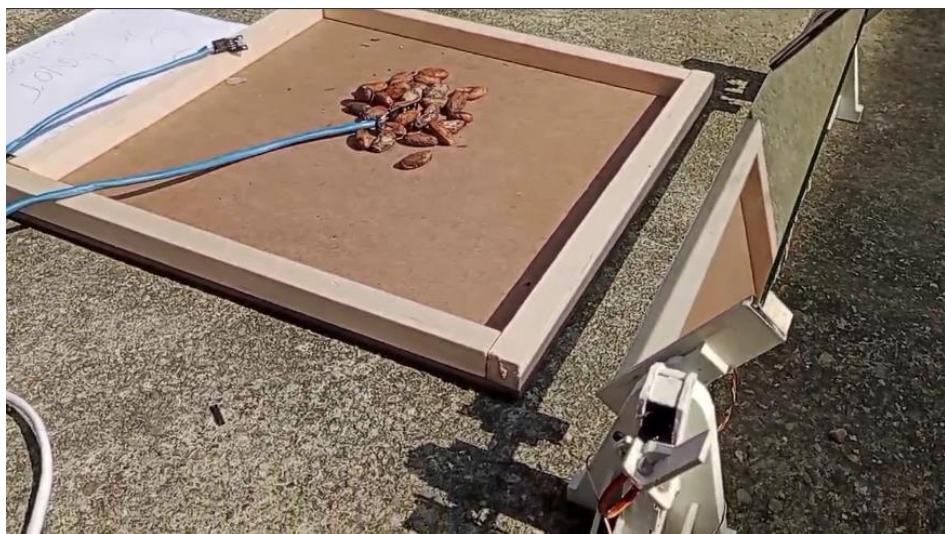
Prueba Experimental: Inicio de Proceso



Fuente: Autores.

Figura 61.

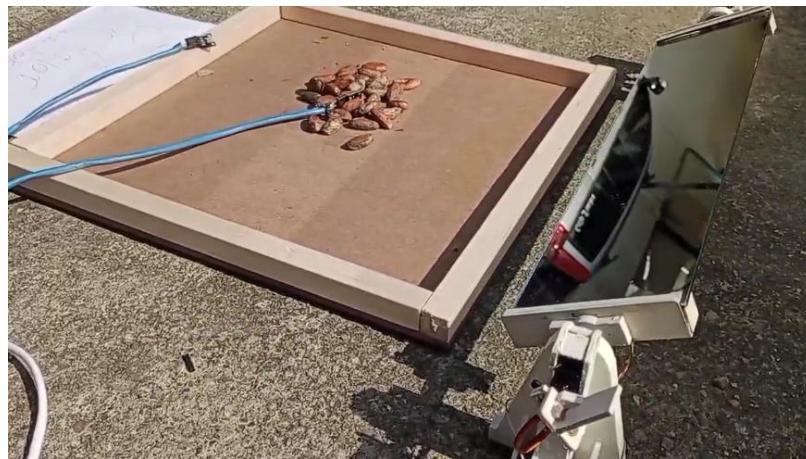
Prueba Experimental: Dirección de Luz Incidente



Fuente: Autores.

Figura 62.

Prueba Experimental: Reflexión de Luz Incidente



Fuente: Autores.

11. Plataforma IoT

11.1 Blynk

Para la visualización de información, notificaciones y control, se elige entre varias plataformas que ofrezcan planes gratuitos o de pago accesibles, con flexibilidad para su uso en aplicaciones móviles y de escritorio. Entre diversas plataformas IoT de bajo código, se seleccionó Blynk.

Blynk es una solución de software integral que facilita la creación de prototipos, la implementación y la gestión remota de dispositivos electrónicos conectados, tanto para proyectos personales de IoT como para la gestión de millones de productos comerciales. Blynk permite a los

usuarios conectar su hardware a la nube, crear aplicaciones para iOS, Android y la web, analizar datos en tiempo real e históricos de los dispositivos, controlarlos de manera remota desde cualquier lugar, recibir notificaciones importantes y mucho más. (*Introduction / Blynk Documentation*, s/f)

Esta plataforma de bajo código ofrece varios planes que se adaptan a las necesidades de cada usuario. Los planes disponibles son: Free, Maker, Pro y Enterprise, cada uno con sus propias características y limitaciones.

A continuación, en la Tabla 18, se detalla las características de dos de los planes que ofrece Blynk.

Tabla 18.

Plan Free y Maker de Blynk

	Free	Maker
Características	10 dispositivos, 1 usuario 10 plantillas de dispositivos Widgets gratuitos 20 datastreams por plantilla 1 semana de almacenamiento de datos históricos	10 dispositivos, 3 usuarios 10 plantillas de dispositivos Widgets Extras 25 automatizaciones 20 datastreams por plantilla 1 mes de almacenamiento de datos históricos 10 Blynk.Air campaings Blynk.Cloud Exportación de datos a CSV Soporte de comunidad
Precio	Gratis	COP 26.500/mes

Nota: Precio disponible en la fecha de octubre de 2024.

Adaptado de (*Pricing / Blynk - IoT platform for businesses*, s/f)

11.2 Creación de Interfaz

Blynk permite a los usuarios crear una interfaz interactiva para visualizar datos y gestionar variables específicas. Sin embargo, la plataforma limita el número de variables que se pueden controlar y monitorear en su plan gratuito, restringiéndolo a 5. Para un proceso simple, donde se requiere observar el progreso y almacenar un historial gráfico de los resultados, este límite suele ser suficiente.

No obstante, mejorar del plan Free al plan Maker brinda mayor flexibilidad y permite diseñar una interfaz más completa. Para crear la interfaz, se utilizaron gráficos y visualizadores de variables (texto y LED indicadores), visto en la Figura 63. Además, se crearon los datasheets correspondientes (Figura 64) y se configuró el código clave para dar llamado a las alertas (Figura 65).

Figura 63.*Creación de interfaz en app móvil*

Fuente: Autores.

Figura 64.*Creación de datasheets*

Datastreams

ID	Name	Alias	Color	Pin	Data Type	Units	Is Raw	Min	Max	Decimals	Defn
1	Temperatura Concentrador Solar	tempConcentrador	Orange	V0	Double	°C	false	-20	70	#.00	C
2	Humedad Concentrador Solar	humedadConcentrador	Cyan	V1	Double	%	false	0	100	#.00	C
3	Temperatura Natural	tempNatural	Orange	V2	Double	°C	false	-20	70	#.00	C
4	Humedad Natural	humedadNatural	Blue	V3	Double	%	false	0	100	#.00	C
5	Localidad	Localidad	Purple	V4	String		false	-	-	E	
6	Fecha	Fecha	Red	V5	String		false	-	-	E	
7	tempCurrent	tempCurrent	Cyan	V6	Double	°C	false	-20	70	#.00	C
8	humedadCurrent	humedadCurrent	Orange	V7	Double	%	false	0	100	#.00	C

Fuente: Autores.

Figura 65.*Creación de palabra clave para el llamado de alertas*

Events & Notifications

ID	Name	Code	Color	Type	Notifications	Description	Expose to Autom
4	Alerta de Pronóstico	pronostico	Orange	Warning	Enabled		CONDITION
5	Información de Evento	start	White	Info	Enabled		CONDITION
6	Alerta de Clima	clima	Red	Critical	Enabled		CONDITION

Fuente: Autores.

11.3 Pruebas en Blynk

Se realizaron pruebas en la plataforma Blynk con un proceso de secado hipotético, en el cual, se almacena en un historial la información recolectada en un proceso de 20 minutos.

Figura 66.

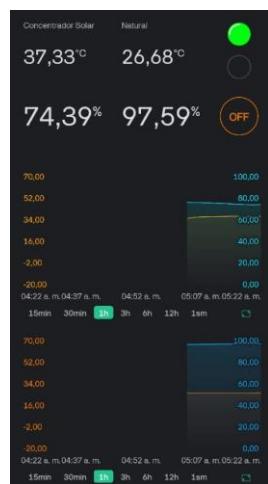
Datos visualizados en Blynk desde app de escritorio



Fuente: Autores.

Figura 67.

Visualización de historial en prueba hipotética en Blynk desde app móvil



Fuente: Autores.

11.4 Notificaciones

La principal característica de Blynk es la notificación de alertas, información y advertencias, entre otras. Estas notificaciones pueden enviarse vía email, push o SMS.

Las notificaciones principales se enviarán mediante push desde la app móvil y de escritorio, informando sobre alertas, datos y advertencias de eventos que ocurran durante el proceso o en el transcurso de la conexión.

11.4.1 Información de Eventos

Estar informados sobre eventos relacionados con el proceso es crucial. Por lo tanto, Blynk notificará sobre inicios, detenciones y estados de conexión del proceso.

Algunos ejemplos de las notificaciones push recibidas a través de la app móvil son los siguientes:

Figura 68.

Ejemplo 1 de notificación push de información de evento



Fuente: Autores.

Figura 69.

Ejemplo 2 de notificación push de información de evento



Fuente: Autores.

El mensaje de información de evento (Figura 68 y Figura 69) puede enviarse cada segundo; por lo tanto, solo se permite una notificación push en un intervalo de un segundo.

11.4.2 Advertencias

Las advertencias son una sección de Blynk que se asemeja a las alertas; por lo tanto, se emitirán notificaciones push sobre el pronóstico disponible para la siguiente hora.

A continuación, en la Figura 70, un ejemplo de notificación push del pronóstico disponible a las 9:00pm del 22 de octubre de 2024:

Figura 70.

Ejemplo de Notificación push de advertencias



Fuente: Autores.

El mensaje de advertencias puede enviarse cada 30 minutos; por lo tanto, solo se permite una notificación push en un intervalo de 30 minutos.

11.4.3 Alertas Críticas

Las alertas climáticas son eventos que afectan el proceso; uno de ellos es el estado del clima actual que puede perjudicar el secado, como la lluvia, la cual se categoriza como una alerta crítica.

Como ejemplo (Figura 71), el 27 de octubre de 2024, a la 1:08 p.m., el sistema emitió una alerta crítica por un evento de "llovizna ligera" en la zona de Bucaramanga. Se corroboró esta información al verificar el clima, el cual coincidía con lo reportado.

Figura 71.

Ejemplo de notificación push de alerta critica



Fuente: Autores.

El mensaje de alertas criticas puede enviarse cada 30 minutos; por lo tanto, solo se permite una notificación push en un intervalo de 30 minutos.

12. CSIoT

CSIoT son las siglas de Concentrador Solar IoT, un sistema diseñado para concentrar la energía solar en un área específica destinada al secado del grano. Este sistema notifica al productor sobre las condiciones meteorológicas en la zona y guarda un historial del proceso de secado en una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) de bajo código.

El sistema se compone de dos partes, la Caja Negra y la Caja Blanca junto al Concentrador Solar.

Caja Negra: Este dispositivo utiliza dos protocolos de comunicación: WiFi y LoRa. A través de WiFi, se conecta con la plataforma IoT para obtener información climática de la zona. Por medio de LoRa, transmite los datos climáticos y el control del sistema, además de recibir información del proceso (como temperatura y humedad) de la Caja Blanca.

Caja Blanca: Es el dispositivo de control del sistema del Concentrador Solar. Utiliza un protocolo de comunicación LoRa para enviar y recibir datos de la Caja Negra.

Concentrador Solar: Está compuesto por el sistema de seguimiento y reflexión solar, controlado por la Caja Blanca.

12.1 Prueba piloto 1

Se realizó una prueba con una cantidad de alrededor de 2kg de granos de cacao húmedos en el concentrador solar y una cantidad moderada de cacao bajo las condiciones ambientales del momento. A una distancia de 210 metros entre cada CAJA, el proceso fue monitoreado mediante la plataforma IoT Blynk en el que se realizó el seguimiento en tiempo real, el proceso de secado tuvo una duración de 12 horas.

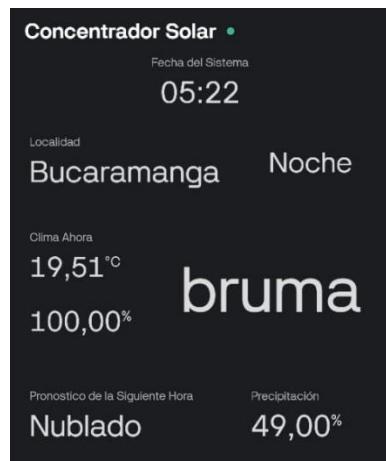
La prueba dio comienzo a las 6:00 a.m., sin embargo, previamente se verificó los datos meteorológicos del día, iniciando con las siguientes condiciones en la zona (Figura 72):

Clima de la zona: temperatura de 19.51°C y humedad de 100%.

Pronostico: Nublado con un 49% de precipitación.

Figura 72.

Condición climática inicio prueba piloto 1



Fuente: Autores.

Se instaló en su sitio todo el sistema con el cacao:

Figura 73.

Preparación del secado en prueba piloto 1



Fuente: Autores.

Con el tiempo, la aplicación emitió alertas sobre el clima en la zona, incluyendo cambios y pronósticos, advirtiendo sobre posibles lluvias.

Figura 74.

Notificaciones emitidas por Blynk en el proceso de secado en prueba piloto 1



Fuente: Autores.

12.1.1 Resultado

Al finalizar el secado, las pepas de cacao húmedas obtuvieron el siguiente resultado:

Figura 75.

Resultado del cacao después del proceso de secado en prueba piloto 1

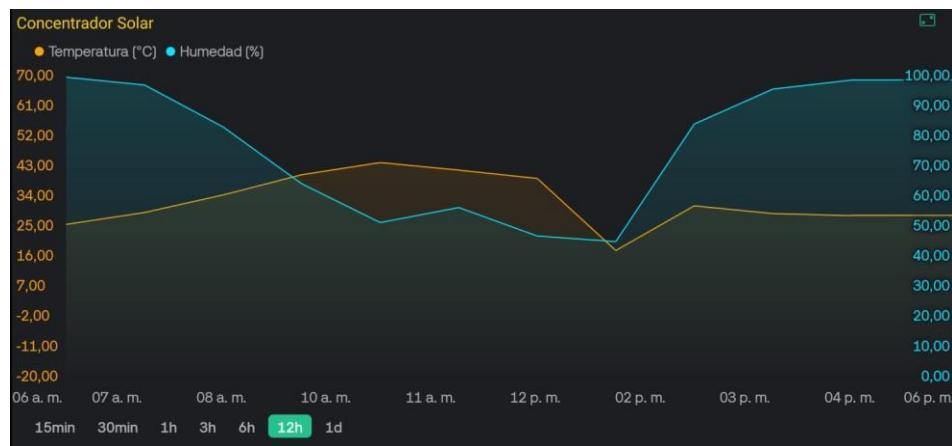


Fuente: Autores.

La grafica resultante del proceso de secado fue la siguiente (Figura 76), siendo la Figura 77 la gráfica independiente del sensor asignado al concentrador solar y la Figura 78 la gráfica independiente del sensor asignado al ambiente:

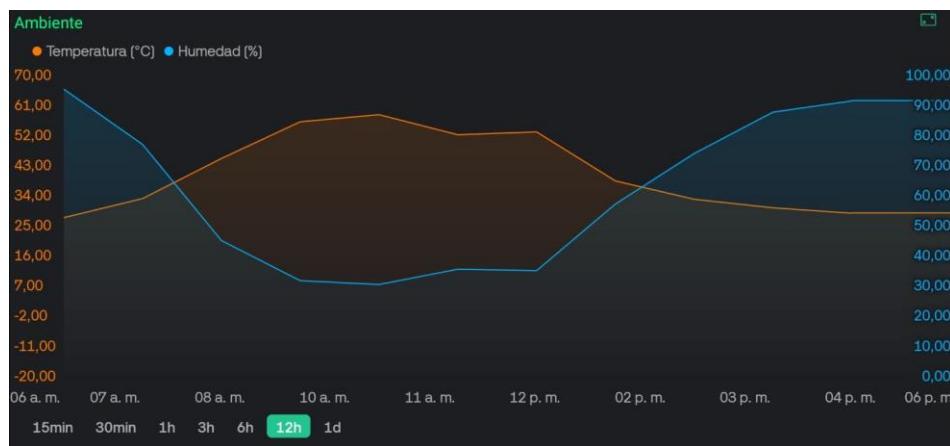
Figura 76.*Graficas finales en prueba piloto 1*

Fuente: Autores.

Figura 77.*Grafica sensor concentrador solar en prueba piloto 1*

Nota: La información visible en la gráfica es una media de los datos por hora en una línea de tiempo de 12 horas.

Fuente: Autores.

Figura 78.*Grafica sensor ambiente en prueba piloto 1*

Nota: La información visible en la gráfica es una media de los datos por hora en una línea de tiempo de 12 horas.

Fuente: Autores.

Se da un inicio a las 6:00 a.m. con una temperatura del cacao de 22.54°C y una humedad del 100% en el sensor asignado al concentrador, en contraste con los 23.71°C y el 99% de humedad registrados por el sensor ambiental.

Después de 2 horas (a las 8:00 a.m.), la humedad en ambos sensores comienza a disminuir, alcanzando su nivel más bajo de 50% en el cacao a las 12:30 p.m., con una temperatura de 45.19°C, en comparación con el 34.84% de humedad y 59.11°C de temperatura en el ambiente.

¿Por qué la diferencia en la temperatura y humedad entre los dos sensores? Esta diferencia se debe a que el grano de cacao libera un líquido conocido como "baba" o mucílago, una sustancia viscosa y dulce que recubre los granos. Este mucílago entra en contacto con el sensor en momentos específicos, lo que puede alterar temporalmente las lecturas de humedad y temperatura. Por lo

tanto, el dato relevante al final del proceso es el porcentaje de humedad al que se reduce el cacao tras el secado.

El cacao al finalizar el proceso pasó de tener una humedad de 100% a 61.36% en el caso del cacao puesto en el concentrador (Figura 79) y 99% a 80.16% en el sensor de ambiente (Figura 80).

Figura 79.

Humedad del cacao bajo el concentrador después del secado en prueba piloto 1

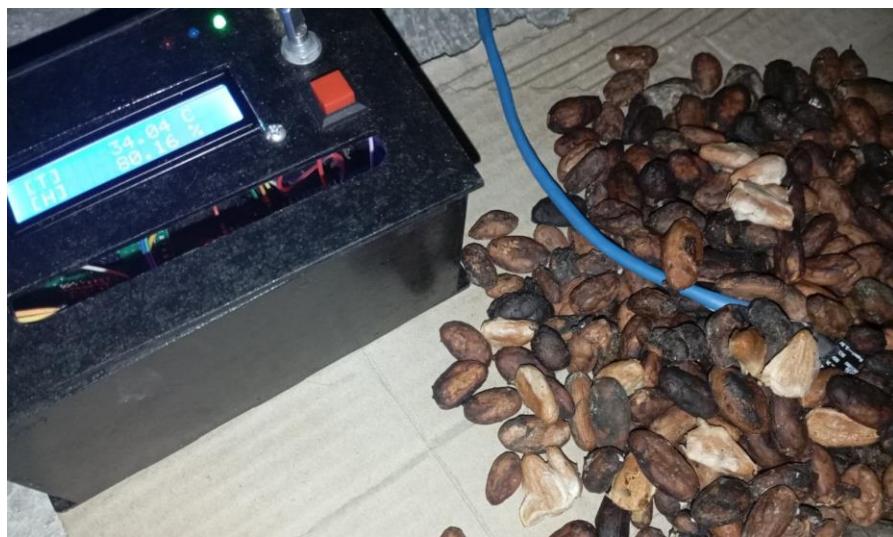


Nota: el cacao fue llevado a otro sitio para ver su humedad de manera correcta.

Fuente: Autores.

Figura 80.

Humedad del cacao bajo el sol después del secado en prueba piloto 1



Nota: el cacao fue llevado a otro sitio para ver su humedad de manera correcta.

Fuente: Autores.

12.2 Prueba piloto 2

Con una cantidad similar de cacao no tan húmedo, se realizó una segunda prueba para comparar la diferencia entre el secado utilizando el sistema de concentración solar y otro sin este. La duración de la prueba fue de alrededor de 3 horas.

La prueba dio inicio a las 12:41 p.m. con un pronóstico de (Figura 81):

Clima de la zona: temperatura de 28.51°C y humedad de 65%.

Pronostico: Nublado con un 49% de precipitación.

Figura 81.

Condición climática inicio prueba piloto 2



Fuente: Autores.

En la Figura 82 se muestra la instalación del sistema y el cacao:

Figura 82.

Instalación del sistema y cacao prueba piloto 2



Fuente: Autores.

Con el tiempo, la aplicación emitió alertas sobre el clima en la zona (Figura 83), incluyendo cambios y pronósticos. En una de estas alertas de precipitación se indicó un 60% de probabilidad de lluvia en la próxima hora (alertas emitidas a las 2:00 y 2:30 p.m.), advirtiéndonos sobre posibles cambios climáticos.

Figura 83.

Notificaciones de alertas prueba piloto 2



Fuente: Autores.

Alrededor de las 3:30 p.m., la condición climática indicada fue "tormenta" (Figura 84), alertando sobre una inminente lluvia en la zona de prueba.

El clima se oscureció rápidamente, comenzando con una lluvia ligera que se intensificó hasta convertirse en una tormenta eléctrica. A las 3:40 p.m., el sistema fue desconectado rápidamente debido al cambio de clima.

Figura 84.

Tormenta en prueba piloto 2



Fuente: Autores.

Debido a la alerta emitida (Figura 83), la condición en la zona (Figura 84) y a la observación del clima en los alrededores de la zona de prueba, el dispositivo fue rápidamente resguardado para evitar daños.

12.2.1 Resultado

Con una interfaz diferente, Blynk permite visualizar la información desde una página web.

El monitoreo se realizó desde esta interfaz para mayor comodidad y para observar el proceso con más detalle.

Figura 85.

Gráficas finales prueba piloto 2



Fuente: Autores.

Para una comparación más detallada, Blynk permite descargar el historial de los datos en un archivo .CSV (Excel):

Figura 86.

Archivo .CSV dado por Blynk en prueba piloto 2

Time	Temperatura Concentrador Solar	Humedad Concentrador Solar	Temperatura Natural	Humedad Natural	Localidad	Fecha
03:41:00 PM						
03:40:00 PM	30.39	84.49	32.08	74.05		
03:39:00 PM	30.39	84.49	32.08	74.05		
03:38:00 PM	30.49	84.19	32.13	73.89		
03:37:00 PM	30.74	83.85	32.33	73.64		
03:36:00 PM	30.81	83.34	32.56	73.21		
03:35:00 PM	31.34	82.74	32.94	72.6		
03:34:00 PM	31.53	82.6	33.13	72.05		
03:33:00 PM	31.79	82.38	33.35	71.54		
03:32:00 PM	31.97	81.68	33.76	70.17		
03:31:00 PM	31.83	81.91	33.78	69.76		
03:30:00 PM	31.85	81.71	33.79	69.65		
03:29:00 PM	32.05	81.31	33.92	69.46		
03:28:00 PM	32.12	81.36	33.8	70.2		
03:27:00 PM	32	82.17	33.83	70.98		
03:26:00 PM	32.1	81.75	33.92	70.67		
03:25:00 PM	32.26	80.76	34.3	69.88		
03:24:00 PM	32.36	80.46	34.22	69.59		
03:23:00 PM	32.45	79.77	34.56	68.73		
03:22:00 PM	32.52	79.11	34.76	67.95		
03:21:00 PM	32.99	77.64	35.18	66.77		
03:20:00 PM	33.24	76.66	35.7	65.14		
03:19:00 PM	33.52	75.18	35.97	64.1		
03:18:00 PM	33.84	74.71	36.3	63.6		

Fuente: Autores.

A continuación, en la Tabla 19, se presenta una tabla con la media, valor máximo y mínimo de los datos dados por Blynk en la anterior imagen (Figura 86):

Tabla 19.

Tabla comparativa de resultados en prueba piloto 2

	Concentrador Solar		Ambiente	
	Temperatura	Humedad	Temperatura	Humedad
Media	41.75°C	52.85%	44.3°C	45.92%
Valor máximo	64.46°C	84.49%	69.45°C	74.05%
Valor mínimo	30.39°C	30.63%	32.08°C	27.7%

Fuente: Autores.

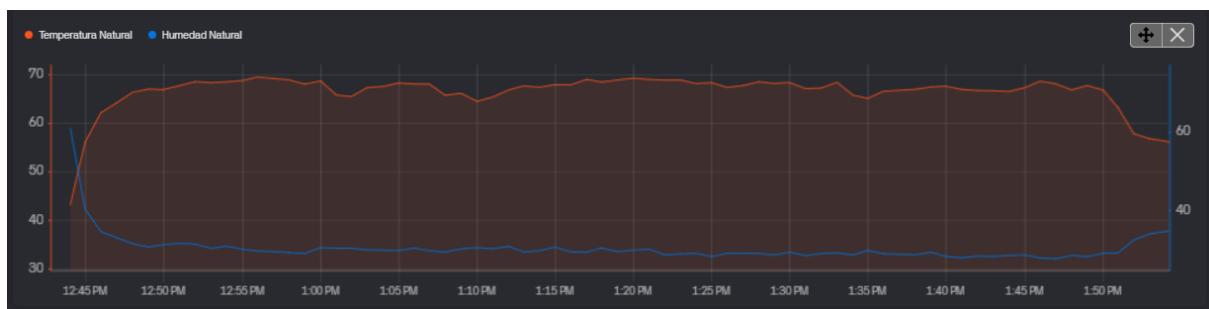
El sistema de concentración solar proporciona valores dentro del rango de temperatura adecuado, ya que para el secado se requiere que la temperatura aplicada al cacao esté entre 45°C

y 60°C. Esto se logra porque el sistema, al superar dicha temperatura máxima, deja de reflejar la luz hacia el cacao.

En cambio, el grano retirado del concentrador y expuesto directamente al sol presenta picos prolongados de temperatura, alcanzando consistentemente los 70°C (Figura 87). A diferencia del concentrador solar, que mantiene rangos de temperatura óptimos para el secado con picos menos prolongados (Figura 88).

Figura 87.

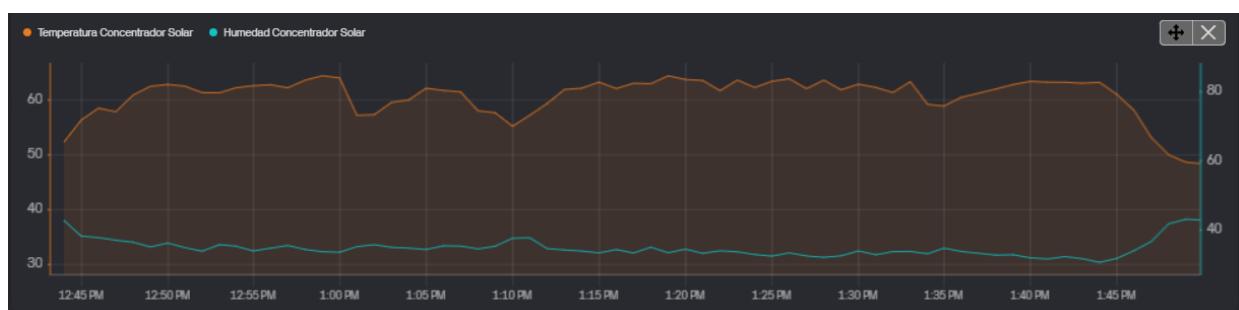
Gráfica sensor ambiente en mayor exposición solar prueba piloto 2



Fuente: Autores.

Figura 88.

Gráfica sensor concentrador en mayor exposición solar prueba piloto 2



Fuente: Autores.

13. Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema de control para el reflector, seguidor y las cajas de secado, basado en sensores, actuadores y una plataforma IoT. Este sistema incluye alarmas y control remoto, facilitando la automatización del proceso.

Se logró la detección temprana de lluvias mediante la consulta de APIs meteorológicas gratuitas, complementada con la integración de alarmas e informes climáticos específicos de la zona, mejorando así la eficiencia y seguridad del sistema. Se puede ver en el Capítulo 9 del presente documento.

Gracias al sistema de alarmas e informes climáticos, el usuario cuenta con información sobre la probabilidad de precipitaciones en la zona, la cual varía entre el 0% y el 100%. La obtención de esta información se explica en el Capítulo 9.2.2, sumado a la condición meteorológica en el instante (Capítulo 9.2.1). Esto permite al usuario anticiparse a eventos desfavorables que podrían afectar el proceso de secado. Esta prevención es demostrada en la Prueba piloto 2; en la Figura 83 se muestra una probabilidad del 60% de precipitación en la siguiente hora. Este valor, combinado con la condición climática de tormenta, indica una alta probabilidad de lluvia en la zona, permitiendo tomar medidas para prepararse ante la inminente lluvia.

Se implementó una plataforma IoT (Capítulo 11) que almacena el historial de datos del proceso de secado, permitiendo una visualización gráfica que facilita el análisis y la comprensión del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

El uso de una plataforma IoT como Blynk permite al usuario no solo un control remoto del sistema, sino también un almacenamiento de datos. A diferencia de otras plataformas como

ThingSpeak o similares, que se centran principalmente en la visualización y análisis de datos en tiempo real, Blynk ofrece capacidades adicionales para gestionar tanto el control del dispositivo como el historial de datos.

La utilización del sistema operativo en tiempo real FreeRTOS aseguró la ejecución eficiente de los procesos, evitando retrasos e interrupciones entre cada tarea.

El uso de software de diseño asistido por computadora, como SolidWorks e Inkscape, fue crucial tanto en la fase de diseño digital como en la construcción física del prototipo. SolidWorks, en particular, permitió identificar y corregir errores en las etapas iniciales, lo que facilitó el perfeccionamiento y desarrollo de la versión final del prototipo.

Se logró establecer una conexión LoRa a una distancia aproximada de 210 metros en un entorno con estructuras que generaban interferencia (Figura 59). No obstante, se observó inestabilidad en la conexión bajo ciertas condiciones. Por lo tanto, se sugiere optimizar la potencia del módulo mediante configuración por software, ya que el valor predeterminado de transmisión en la biblioteca LoRa.h es de 17 dBm, aunque puede incrementarse hasta el máximo de 20 dBm. Además, se recomienda evaluar la ubicación del módulo y la antena empleada para mejorar el desempeño.

El proceso de secado se validó mediante pruebas experimentales (Prueba piloto 1 y Prueba piloto 2) realizadas en un ambiente urbano. En dichas pruebas, se logró reducir la humedad al 61% en un tiempo de 12 horas utilizando el concentrador solar, mientras que bajo exposición solar directa únicamente se alcanzó un 80% de humedad. Los datos recopilados se visualizaron a través de la plataforma IoT (Figura 76 y Figura 85), lo que permitió confirmar la funcionalidad del sistema.

El proyecto logró cumplir con sus objetivos principales al desarrollar una alternativa de secado de bajo costo, cuatro veces más económica en comparación con las máquinas de secado artificial más económicas del mercado, aprovechando la energía solar sin alterar el proceso natural.

14. Recomendaciones

El proyecto CSIoT establece una base sólida para el desarrollo y perfeccionamiento de dispositivos de secado basados en sistemas de concentración solar. Las siguientes recomendaciones pueden orientar investigaciones futuras:

Optimización de los componentes mecánicos: Explorar alternativas que permitan un movimiento más preciso y eficiente en el sistema de reflexión y seguimiento solar.

Rediseño para la adaptación de paneles reflectantes: Considerar la incorporación de paneles de mayor tamaño y un rango de movimiento más amplio para incrementar la eficiencia del sistema.

Incorporación de un sistema de seguimiento con mayor precisión: Implementar un sistema de seguimiento y reflexión con dos o más grados de libertad para un aprovechamiento más eficaz de la radiación solar.

Selección de materiales: Emplear materiales de mayor durabilidad y resistencia a la intemperie, adecuados para un uso constante en exteriores.

Mejora de la conectividad: Optimizar la conectividad WiFi y LoRa mediante la incorporación de módulos con mayor rendimiento y estabilidad.

Optimización de las APIs meteorológicas: Evaluar alternativas más confiables y específicas para la zona de implementación, mejorando así la predicción de las condiciones climáticas.

Desarrollo de una plataforma de monitoreo: Diseñar un aplicativo propio o utilizar una plataforma especializada para el monitoreo y control del proceso de secado, ofreciendo una interfaz más intuitiva y con funcionalidades avanzadas.

Referencias Bibliográficas

AccuWeather APIs / Packages. (s/f). Recuperado el 19 de octubre de 2024, de <https://developer.accuweather.com/packages>

Agencia Nacional del Espectro / Radiodifusión Sonora. (s/f). Recuperado el 16 de octubre de 2024, de <https://www.ane.gov.co/SitePages/Gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/index.aspx?p=23>

Arduino Uno Rev3 — Arduino Online Shop. (s/f). Arduino. Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us>

Burgos Briones, G., Menéndez Cevallos, L., & Bedón Arteaga, V. (2022). Evaluación de los parámetros para el secado de cacao CCN 51 de una finca integral. *Centro Azúcar*, 49(4), 24–34.

Cacao Buenas Prácticas. (s/f). Cadenacacaoca. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://cadenacacaoca.info/estudios-cacao/buenas-practicas/secado>

Corzo Ruiz, C. L., & Velazco Capacho, D. A. (2020). *Control automático de microclima en invernadero para secado eficiente de granos de cacao.*

Dinatek, & Pinhalense. (s/f). *SECADORA ROTATIVA.* www.pinchalense.com.br

El secado del cacao - Cacao Móvil. (s/f). Cacao Móvil. Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://cacaomovil.com/site/guide/cosecha-fermentacion-y-secado-del-cacao/42/el-secado-del-cacao>

E-Marmolejo, R. (s/f). *Microcontrolador - qué es y para que sirve - HeTPro-Tutoriales.*

Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>

ESP32 microcontroller WiFi Bluetooth 38 pins ESP-WROOM-32D met CP2102 USB chip USB-micro - DomoticX. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de <https://domoticx.net/webshop/esp32-microcontroller-wifi-bluetooth-38-pins-esp-wroom-32d-met-cp2102-usb-chip-usb-micro/?add-to-cart=33302>

Este es el verdadero significado del porcentaje de lluvia en las aplicaciones / Onda Cero Radio. (s/f). Recuperado el 16 de noviembre de 2024, de https://www.ondacero.es/noticias/sociedad/este-verdadero-significado-porcentaje-lluvia-aplicaciones_2024102967209116d058410001c7e2fe.html

Fernández, Y. (2022, septiembre 23). *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno.* Xataka. <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

Fotorresistencia LDR 7mm / Didácticas Electrónicas I+D. (s/f). Recuperado el 18 de octubre de 2024, de <https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/ldr10k7mm-fotorresistencia-ldr-7mm-13838#attr=>

Guevara, J. (2018, marzo 6). *Explicación paso a paso: la cosecha y el procesamiento del cacao - Perfect Daily Grind Español.* <https://perfectdailygrind.com/es/2018/03/06/explicacion-paso-paso-la-cosecha-y-el-procesamiento-del-cacao/>

HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor. (2015).

Texas Instruments. www.ti.com

Introduccion LoRa & Modulo RFM95 Hoperf – PDAControl. (s/f). Recuperado el 14 de noviembre de 2024, de <http://pdacontroles.com/introduccion-lora-modulo-rfm95-hoperf/>

Introduction / Blynk Documentation. (s/f). Recuperado el 22 de octubre de 2024, de <https://docs.blynk.io/en>

Layne, J. (s/f). *20 ventajas y desventajas del aluminio / ablison.* ablison. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://ablison.com/es/pros-y-contras-del-aluminio/>

LCD 16X2 1602 VERDE CON CONVERSOR I2C. (s/f). Recuperado el 18 de octubre de 2024, de <https://www.mactronica.com.co/lcd-16x2-1602-verde-con-conversor-i2c>

Lorawan - Tecnología y distribución de productos LoraWan. (s/f). DSET ENERGY. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://productos-iot.com/lorawan-3/>

Luis Fernando Julio. (2023, enero 11). *Cacao: en qué regiones de Colombia se cultiva / RCN Radio.* RCN Radio. <https://www.rcnradio.com/economia/cacao-colombiano-donde-se-cultiva>

Magalhaes, R. (2024, junio 4). *¿Qué es FreeRTOS? – COMPRACO - Actualizaciones, Industria, Tecnología y Noticias.* COMPRACO. <https://compraco.com.br/es/blogs/tecnologia-e-desenvolvimento/o-que-e-freeertos?srsltid=AfmBOoq4Dhjg6QjArcvUXcSDa9E7bBb969IEApOGUsc2UACAcJKhEp>

Meneses, J. G. (2021). El sabor del cacao ‘a toda máquina’. *Universitas Científica*, 24(1), 40–43.

[MG90S] *Micro servomotor 4.8-6v 1.8Kg/cm / Didácticas Electrónicas I+D.* (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/mg90s-micro-servomotor-4-8-6v-1-8kg-cm-1063?search=micro+servo&order=list_price+asc#attr=

Micro Servo Metálico MG90S - Electronilab. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de

<https://electronilab.co/tienda/micro-servo-metalico-mg90s-towerpro/>

Módulo Encoder de rotación KY-040 / Didácticas Electrónicas I+D. (s/f). Recuperado el 18 de

octubre de 2024, de <https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/sen-enco-rota-modulo-encoder-de-rotacion-ky-040-7080#attr=>

Montes González, I. (s/f). Reflexión y refracción (transmisión). *Facultad de Ingeniería, UNAM.*

Recuperado el 19 de octubre de 2024, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Willebrord_Snel_van_Royen

Orna, J., Chuquín, N., Saquinga, L., & Cueva, O. (2018). *Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg (Design and construction of an automatic dryer for cacao a rotating type of hot air base for a capacity of 500 kg).*

Ortiz, V., & Monge, J. P. (2014, marzo 4). *INVESTIGACIÓN PPDIOO.* Prezi.

<https://prezi.com/rqeckutnsos1/investigacion-ppdioo/>

Palencia Blanco, C. G., Paz Díaz, H. J., Lozada, M. A., & Pacheco Valderrama, M. M. (2021).

ETAPAS DEL PROCESAMIENTO DE CACAO (C. G. Palencia Blanco, Ed.).

Pérez, M., Sierra-Sánchez, F. E., Chaparro, F., Chaves, D. M., Paez-Rueda, C.-I., Galindo, G. P., & Fajardo, A. (2022). Coverage and energy-efficiency experimental test performance for a comparative evaluation of unlicensed lpwan: Lorawan and sigfox. *IEEE Access*, 10, 97183–97196.

PRECIPITATION PROBABILITY . (s/f). Recuperado el 21 de octubre de 2024, de

<https://www.weather.gov/media/pah/WeatherEducation/pop.pdf>

Pricing / Blynk - IoT platform for businesses. (s/f). Recuperado el 22 de octubre de 2024, de

<https://blynk.io/pricing>

Pricing - OpenWeatherMap. (s/f). Recuperado el 19 de octubre de 2024, de

<https://openweathermap.org/price>

¿Qué es FreeRTOS? - FreeRTOS. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de

https://docs.aws.amazon.com/es_es/freertos/latest/userguide/what-is-freertos.html

¿Qué es IoT? - Explicación del Internet de las cosas - AWS. (s/f). Amazon. Recuperado el 3 de

mayo de 2024, de <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>

¿Qué es NB-IoT y cómo funciona? - Telefónica. (s/f). Telefónica. Recuperado el 4 de mayo de

2024, de <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/que-es-nb-iot-y-como-funciona/>

¿Qué es un Microcontrolador y Para qué Sirve? (s/f). ELECTRÓNICA ONLINE. Recuperado el

3 de mayo de 2024, de <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/microcontrolador/>

¿Qué es una API? - Explicación de interfaz de programación de aplicaciones - AWS. (s/f).

Recuperado el 18 de octubre de 2024, de <https://aws.amazon.com/es/what-is/api/>

Qué es y Características de los tableros o madera MDF. (s/f). Recuperado el 26 de octubre de

2024, de <https://www.maderassantana.com/caracteristicas-tableros-madera-mdf/>

Raspberry Pi Pico - El primer microcontrolador de Raspberry Pi Silicon — 330ohms. (s/f).

330ohms. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://www.330ohms.com/es-co/products/raspberry-pi-pico>

RFM95W - HOPERF - Reliable original manufacturer of IoT key components. (s/f). Recuperado

el 17 de octubre de 2024, de

<https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95W.html?ref=halle1wh.de>

RFM95W-915MHZ - Sigma Electrónica. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de

<https://www.sigmaelectronica.net/producto/rfm95w-915mhz/>

Sandoval, Y. (2024, marzo 9). *Así es el panorama del sector cacaotero de Colombia en 2024,*

según *Fedecacao* - *VALORA ANALITIK.* *VALORA ANALITIK.*

<https://www.valoraanalitik.com/2024/03/09/asi-es-el-panorama-del-sector-cacaotero-de-colombia-en-2024-segun-fedecacao/>

Secadora de granos - Vulcanotec. (s/f). Vulcanotec. Recuperado el 3 de mayo de 2024, de

<https://vulcanotec.com/maquinaria/secadora-de-granos/>

Secadora de granos de cacao a gas en acero inoxidable - JM Estrada. (s/f). JM Estrada S.A.

Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://www.jmestrada.com/secadora-de-granos-de-cacao-a-gas-en-acero-inoxidable/>

Secadora SIRCA con Intercambiador de Calor – Maquinaria Agroindustrial SIRCA. (s/f). SIRCA.

Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://sircaecuador.com/productos/secadora-sirca-con-intercambiador-de-calor/>

SECADORAS Y TECNOLOGÍA PARA CACAO - Dinatek. (s/f). Dinatek. Recuperado el 3 de mayo

de 2024, de <https://dinatek.ec/producto/secadora-y-tecnologia-para-cacao/>

Sensor BME280 Presión, Temperatura y Humedad. (s/f). naylampmechatronics. Recuperado el 4

de mayo de 2024, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-iniciales-gps/357-sensor-bme280-presion-temperatura-y-humedad.html>

Sensor BME680 Presión, Temperatura, Humedad y Gas. (s/f). naylampmechatronics. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-iniciales-gps/650-sensor-bme680-presion-temperatura-humedad-y-gas.html>

Sensor de Humedad y Temperatura HDC1080 GY-213V. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de https://ferretronica.com/products/sensor-de-humedad-y-temperatura-hdc1080-gy-213v?_pos=1&_sid=68b7dc2e4&_ss=r

Sensor de Temperatura DS18B20. (s/f). Ferretronica. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de https://ferretronica.com/products/sensor-de-temperatura-ds18b20?_pos=2&_sid=c9f491e58&_ss=r

Sensor de Temperatura y Humedad DHT11. (s/f). Ferretronica. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de https://ferretronica.com/products/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11?_pos=2&_sid=6e1a26360&_ss=r

Sensor de Temperatura y Humedad DHT22. (s/f). Ferretronica. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de https://ferretronica.com/products/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht22?_pos=1&_sid=6e1a26360&_ss=r

Sensor de temperatura y humedad relativa AHT21. (s/f). naylampmechatronics. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/1012-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-aht21.html>

Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (AM2302). (s/f). naylampmechatronics. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>

Sensor de temperatura y humedad relativa SHT31. (s/f). naylampmechatronics. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/363-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-sht31.html>

Sensor Infrarojo de Temperatura MLX90614. (s/f). Ferretronica. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de https://ferretronica.com/products/sensor-infrarojo-de-temperatura-mlx90614?_pos=1&_sid=7626b1128&_ss=r

[SG90] Micro Servo Tower pro 9g / Didácticas Electrónicas I+D. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/sg90-micro-servo-tower-pro-9g-1062?search=micro+servo&order=list_price+asc#attr=

[SG92R-180] Micro Servo Tower pro 9g-FC 180° / Didácticas Electrónicas I+D. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/sg92r-180-micro-servo-tower-pro-9g-fc-180deg-3094?search=micro+servo&order=list_price+asc#attr=

SIG0326 - Sigma Electrónica. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/sig0326/>

Sigfox: ventajas y funcionalidades de la tecnología IoT - Productos IoT. (s/f). DSET ENERGY. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://productos-iot.com/sigfox-3/>

SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve. (s/f). Recuperado el 18 de octubre de 2024, de <https://solid-bi.es/solidworks/?v=ab6c04006660>

Soy, H. (2023). Coverage Analysis of LoRa and NB-IoT Technologies on LPWAN-Based Agricultural Vehicle Tracking Application. *Sensors*, 23(21), 8859.

TARJETA DE DESARROLLO ESP32 WIFI BLUETOOTH. (s/f). MACTRONICA. Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://www.mactronica.com.co/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wifi-bluetooth>

TARJETA LM2596 - Sigma Electrónica. (s/f). Recuperado el 17 de octubre de 2024, de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/tarjeta-lm2596/>

Todos los tratamientos del cristal para ventana - Cabañero. (s/f). Cabañero. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://cabanyero.es/blog/tratamientos-cristal-ventana/>

Ulloa, J. M. O., & Hernández, T. de J. G. (2020). La tecnología térmica solar aplicada al proceso de secado de cacao. *Investiga. TEC*, 38.

Ventajas y desventajas del uso de la madera - proscont.com. (s/f). Proscont. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://www.proscont.com/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-la-madera/>

Vidrio flotado: qué es y cuáles son los beneficios / Guardian Glass. (s/f). Guardian Glass. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://www.guardianglass.com/eu/es/our-glass/glass-types/float-glass>

Vidrio Laminado: Definición, Características y Usos / Maderame. (s/f). Maderame. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de <https://maderame.com/vidrio-laminado/>

Vidrio templado: qué es, fabricación y características - Barrioglass. (2019, marzo 26). Barrioglass. <https://barrioglass.com/2019/03/26/vidrio-templado-que-es-fabricacion-y-caracteristicas/>

Yascaribay, G., Huerta, M., Silva, M., & Clotet, R. (2022). Performance evaluation of communication systems used for internet of things in agriculture. *Agriculture*, 12(6), 786.

Apéndices

Apéndice A. Manual de Usuario

En el presente apéndice, se incluye el “Manual de Usuario - CSIoT” para el concentrador solar destinado al secado de cacao, desarrollado como parte del proyecto de tesis. Este manual tiene como objetivo guiar al usuario en la instalación, configuración y operación del dispositivo, asegurando su correcto funcionamiento y optimización de resultados. A lo largo de este documento, se determinan las características técnicas del concentrador, las instrucciones paso a paso para su uso y la solución de problemas. Este manual es una herramienta esencial para que los cacaoteros puedan aprovechar al máximo la tecnología IoT incorporada en el concentrador solar, mejorando así la eficiencia y la calidad del proceso de secado del cacao.

Para más detalles sobre el uso del sistema, consulte el Manual de Usuario - CSIoT (<https://drive.google.com/file/d/19Fza5aiXSvy5PGbWM17DK6kHkX4H8EOn/view?usp=sharing>)

Apéndice B. Artículo IEEE

En este apéndice, se presenta el artículo IEEE, un componente esencial de nuestro proyecto de tesis. Este artículo aborda los aspectos teóricos y prácticos relacionados con la implementación del concentrador solar para el secado de cacao, así como el uso de tecnologías avanzadas de IoT (Internet de las Cosas). En él, se exploran los fundamentos conceptuales y las aplicaciones

prácticas que sustentan nuestra investigación, proporcionando una comprensión integral de los objetivos y métodos empleados. Este anexo servirá como sinopsis para aquellos interesados en profundizar en los detalles técnicos y metodológicos del proyecto, garantizando una perspectiva completa y bien fundamentada.

Para más detalles sobre el proyecto, consulte el resumen completo disponible IEEE - Optimización del Proceso de Secado del Cacao mediante Internet de las Cosas (<https://drive.google.com/file/d/1Um1oMaFi-y0n6YAlvAzoXhPP3KFtRqwF/view?usp=sharing>)

Apéndice C. Nota de Aceptación

En este apéndice, se adjunta la nota de aceptación del proyecto en formato PDF.

Enlace del archivo PDF Nota de Aceptación
(https://drive.google.com/file/d/1IzgAUPbGNkOtTbtzVaYSO7_0m-CVKZwb/view?usp=sharing)