



Alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos mediante el uso de bioconvertidores y herramientas Iot.

Juan Manuel Salazar Londoño

Informe de practica para optar al título de Bioingeniero

Asesor

Jonathan Gallego Londoño, M.Sc Ingeniería Biomédica.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Bioingeniería

Medellín

2023

Referencia

Estilo IEEE (2020)

- [1] J. Salazar Londoño “Alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos mediante el uso de bioconvertidores y herramientas Iot.”, Trabajo de grado profesional, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023



Lugar de realización de la práctica: RECIMED

Asesor de práctica interno: Jonathan Gallego Londoño

Asesor de práctica externo: Leonardo Gómez Marín



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: John Fredy Ochoa Gómez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia por siempre permanecer ahí incluso cuando el camino se encontraba confuso y las lágrimas de angustia cegaban mi futuro; ellos siempre estuvieron ahí.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a los profesores que me brindaron su ayuda y conocimiento para forjar lo que de ahora en adelante seré.

Agradezco también a RECIMED por darme la oportunidad de no solo ser parte del proyecto sino también de que mis ideas fueran escuchadas y puestas en marcha.

A mis tutores Jonathan Gallego y Leonardo Gómez por acompañarme en este último peldaño de mi carrera, sin ellos nada de esto hubiera sido posible

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
III. MARCO TEÓRICO	14
Residuos orgánicos	14
Monitoreo de Variables	17
Cloud	19
Dashboards	20
Bases de datos	20
IV. METODOLOGÍA	21
Diseño Hardware.	21
Microcontrolador.	22
Sensores temperatura y humedad relativa.	23
Desarrollo Software	25
I2C Librería	26
Si7021	27
Pantalla Oled (SSD1306)	27
WiFi	28
ThingSpeak	28

Implementación plataforma IoT (ThingSpeak).	29
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
Primer prototipo	35
Plataforma IoT.	35
Prototipo Final	36
VII. CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS	41

LISTA DE TABLAS

TABLA I VARIABLES A TENER EN CUENTA	18
TABLA II DISTRIBUCION PINES ESP32.....	23
TABLA III CARACTERISTICAS SI7021.....	23
TABLA IV ESTRUCTURA DEL SOFTWARE.....	26
TABLA V FUNCIONES LIBRERÍA I2C (Wire.h)	26
TABLA VI FUNCIONES LIBRERÍA Si7021 (Adafruit_Si7021.h).....	27
TABLA VII FUNCIONES LIBRERÍA Oled (U8x8lib.h).....	27
TABLA VIII FUNCIONES LIBRERÍA WIFI (Wifi.h)	28
TABLA IX FUNCIONES LIBRERÍA THINGSPEAK (ThingSpeak.h)	29
TABLA X FORMATO ARCHIVO .CSV	34

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Generación de residuos en Colombia. Tomado de [6].....	15
Fig. 2. Flujo del proceso de Bioconversión para la BSF. Tomado de [11]	16
Fig. 3. Protocolo de comunicación I2C. Tomado de [12]	19
Fig. 4. Diagrama de flujo de la etapa de monitoreo	21
Fig. 5. Esquemático de la etapa de monitoreo.....	22
Fig. 6. Diagrama funcional de Bloques para TCA9548A Multiplexor. Tomado de [18]	25
Fig. 7. Creación Dashboard ThingSpeak.	30
Fig. 8. Información importante del canal para la implementación en Arduino (Channel ID y Write API Key).	31
Fig. 9. Dashboard creados por la plataforma ThingSpeak a la espera de la recolección de datos via API Key mediante comunicación WiFi con Esp32.....	32
Fig. 10. Ruta para descargar archivo .csv con toda la información enviada en el tiempo	33
Fig. 11. Primer montaje en protoboard.	35
Fig. 12. Esquematación de los datos mediante Dashboard usando ThingSpeak.....	36
Fig. 13. Circuito soldado en placa base.....	37
Fig. 14. Temperaturas y humedades Septiembre (Arriba rak de adelante, abajo rak del fondo) ...	37
Fig. 15. Temperaturas y Humedades después de construir sala.....	38
Fig. 16. Adecuación sala para proceso de bioconversión.	39

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IoT	Internet Of Things
VPN.	Virtual Private Network
DBMS	DataBase Management System
.csv	Comma Separated Values
KPI	Key Performance Indicator
MSc	Magister Scientiae
BSF.	Black Soldier Fly
I2C	Inter-Integrated Circuit
Json	JavaScript Object Notation

RESUMEN

En el presente proyecto se propone un análisis a la gestión de residuos orgánicos en un modelo operativo real mediante el uso de sistemas embebidos, IoT y bioconvertidores, para la implementación de una herramienta de monitoreo a las variables a controlar, de esta manera obtener la analítica de datos en un periodo de tiempo, para con esta ejercer la toma de decisiones en el control de las mismas, de esta forma se busca obtener un rango de valores de trabajo justo antes de la implementación de soluciones a bajo costo y así analizar como estas variables se comportan tanto en tiempo real como en la interferencia con este y por ultimo obtener una buena solución a la gestión de estos residuos los cuales son la primordial necesidad de muchas empresas ya que estos implican para ellos un desecho mas no un residuo aprovechable por tanto en nuestro trabajo este se puede convertir en una solución a esta problemática.

***Palabras clave* — Residuos orgánicos, IoT, bioconvertidores, sistemas embebidos.**

ABSTRACT

This project proposes an analysis of organic waste management in a real operating model through the use of embedded systems, IoT and bioconverters, for the implementation of a monitoring tool to control variables, thus obtaining the analytical data over a period of time, in order to exercise decision making in the control of the same, in this way we seek to obtain a range of working values just before the implementation of low-cost solutions and thus analyze how these variables behave both in real time and in the interference with this and finally get a good solution to the management of these wastes which are the primary need of many companies as these involve for them a waste but not a usable waste therefore in our work this can become a solution to this problem.

Keywords — Organic waste, IoT, bioconverters, embedded systems.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos son un producto final normal dentro del crecimiento de las civilizaciones en el tiempo, por lo tanto, siendo ambas tendencias en crecimiento, se puede decir que estos tienen un comportamiento directamente proporcional, convirtiéndose entonces en un problema. Según la ONU, el mundo en 1990 tenía una población de no más de cinco mil millones de personas y solo en 2015 se alcanzaron la suma de siete mil millones de personas, además de esto se espera una proyección a 2030 a 9.7 mil millones de personas [1], esta proyección también fue estipulada por el banco mundial en su reporte sobre los residuos sólidos, donde muestra que en 2018 se generan alrededor de 2.01 Billones de toneladas de residuos y que para 2050 esta crecería hasta llegar a unos 3.40 Billones de toneladas de residuos en el mundo, además entrega que el 43% de estos residuos son residuos orgánicos siendo estos los más desechados [2] De esta manera, la implementación de modelos de Bioconversión de residuos orgánicos es muy viable para el control de estos residuos, ya que de estos se usan insectos y estos son los mayores pobladores del planeta, su crecimiento es exponencial y son fáciles de conseguir. Un ejemplo de estos son las larvas de mosca soldado las cuales en una pequeña área (1.4m) con 100 kg de residuo orgánico solo generan un producto final de 5 kg de residuo aprovechable [3], el problema entonces radica que para obtener tan maravillosa cifra, las condiciones ambientales deben moldearse a unos rangos específicos, por lo cual, un sistema de monitoreo surgió como una gran necesidad en el proyecto, el cual permita dar una vista global a todos las posibles soluciones a implementar en este modelo operativo sin perder entonces el lema de la corporativa y trabajando por lo tanto con soluciones de bajo costo.

Por otra parte, la tecnología ha tenido un gran avance en las ayudas visuales en este contexto, permitiendo así que desde pequeños microcontroladores que hacen lecturas a sensores, viajen por internet los datos recolectados hasta una nube la cual permita, mediante software modelarlos para generar entonces estas ayudas visuales o dashboards, este proceso en gran parte se conoce como el Internet de las cosas (IoT). Esta tecnología se viene utilizando bastante en la gestión de recursos, ayudando de esta forma a tener un mayor control de las variables presentadas y obteniendo así mejores resultados, ya sea en las pequeñas industrias como en procesos de agricultura inteligente [4].

Este proyecto se desenvuelve entonces en los ítems antes referenciados, Por lo tanto, se busca desarrollar un sistema de monitoreo y control usando sensores, microcontroladores y

herramientas electrónicas, generando por lo tanto dos etapas, la primera de monitoreo donde los datos se enlazan mediante la nube de Matlab (ThingSpeak) para generar en este el sistema de monitoreo en tiempo real mediante Dashboards, este sistema permite el análisis de los datos usando Python para la implementación de soluciones de bajo costo para el control de las temperaturas y humedades enriqueciendo de esta manera el proceso de bioconversión para el tratamiento de los residuos orgánicos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar procesos de monitoreo a la operación del sistema de gestión de residuos orgánicos mediante el uso de sistemas embebidos para la identificación de soluciones al control de variables específicas.

B. Objetivos específicos

- Identificar requerimientos necesarios para el monitoreo de variables usando modelos de información en software en función de la gestión de residuos orgánicos.
- Esquematizar las variables de temperatura y humedad relativa obtenidos, usando servicios en la nube que permita utilizar Dashboards para monitorear la variación de estas con el tiempo.
- Analizar los datos encontrados para la modelación de escenarios a partir de la analítica obtenida.
- Optimizar las condiciones de desarrollo mediante uso de elementos electrónicos, herramientas IOT y soluciones de bajo costo para mejorar la gestión de recursos orgánicos.

III. MARCO TEÓRICO

Residuos orgánicos

Estos son todos los elementos de desechos o residuos de origen animal y/o vegetal. Estos residuos tienen la capacidad de descomponerse rápidamente en otra sustancia orgánica. Estos residuos orgánicos son los que más se generan y los que menos se gestionan, representan cerca del 50% [2] de los residuos sólidos mundiales y son principalmente arrojados a la basura, tienen también un fuerte impacto ambiental generando gases de efecto invernadero y la producción de lixiviados los cuales afectan directamente la calidad del aire y por consiguiente la salud de las personas.

Según el DNP, Colombia atraviesa un gran problema con la creciente entrada de estos residuos en el modelo social e industrial, puesto que los modelos de tratamiento de estos no son muy eficaces y no existe aún la capacidad para solventar esta problemática, de esta forma ellos indican que en el año 2030 el país tendrá emergencias sanitarias en la mayoría de las ciudades y una alta generación de emisiones de gases efecto invernadero, lo que afecta la calidad del aire. Una cifra alarmante de esto es que en Colombia según la Superintendencia de Servicios Públicos y Domiciliarios – Superservicios, se estima que, de la basura producida en los hogares, un 40% de esta es materia orgánica totalmente aprovechable [5]. En el siguiente gráfico se observa entonces el principal problema enfocado en Colombia y el posible nicho del postulado trabajo.



Fig. 1. Generación de residuos en Colombia. Tomado de [6]

- *Bioconversión para control de residuos orgánicos*

La bioconversión se basa en la transferencia de nutrientes de los desechos orgánicos a los organismos que los consumen, dando como resultado productos útiles como la biomasa y los fertilizantes [7]. Gracias a esto la bioconversión presenta una gran utilidad a la hora de generar un plan de contención de residuos orgánicos debido a la facilidad de implementación y a los grandes resultados que según la literatura este arroja, de tal manera que este implica entonces un camino a recorrer en la composición de la solución planteada ante tan grande problemática. Esto se puede verificar entonces en el viejo continente, donde el tratamiento de residuos orgánicos mediante el sistema de bioconversión se ha adaptado a las políticas de la economía circular la cual se ha venido promoviendo desde el 2015, de esta forma se busca extraer el máximo valor y uso a los residuos ya que ellos buscan que este producto sea reutilizado y reciclado, reduciendo entonces las emisiones de gases de efecto invernadero y evitando posibles residuos malignos que se pueden alojar en ecosistemas marítimos y terrestres reduciendo de esta manera su degradación paulatina [8].

- *Insectos en modelo de Bioconversión*

Debido a que los insectos tienen la capacidad de adaptarse a la temperatura ambiente, pueden convertir eficientemente los alimentos en biomasa durante el desarrollo. Estos descomponedores naturales están altamente especializados en convertir residuos orgánicos en sustancias semitransformadas y estabilizar ecosistemas [9]. Esta flexibilidad nutricional permite a ciertos insectos saprófagos colonizar y desarrollarse sobre cualquier desecho.

Un dato interesante es que, debido a su hábito detritívoro generalista, las larvas de insectos pueden reducir desechos orgánicos hasta en un 66,5% [10]. Para lograr esto entonces se deben de crear un ambiente idóneo en donde se pueda generar todo el ciclo de bioconversión para este (véase figura 2) de esta manera se obtienen los mejores resultados en la capacidad total de bioconversión de los residuos orgánicos, generando así un microsistema eficaz y escalable.

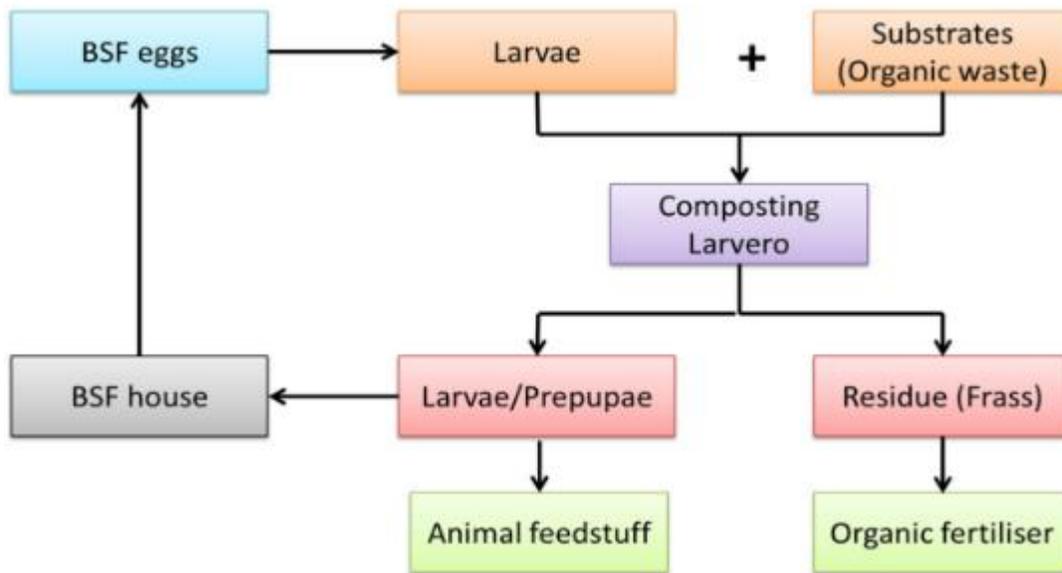


Fig. 2. Flujo del proceso de Bioconversión para la BSF. Tomado de [11]

Un ejemplo de este proceso es lo que se hace en medio oriente y en Europa con la mosca soldado la cual tiene unos maravillosos números de degradación de residuos orgánicos, dado a que esta en su etapa larval consume enormes cantidades de residuos orgánicos para poder hacer una especie de hibernación debido a que en la etapa de prepupa y hasta el fin de su ciclo vital esta tendrá su tracto digestivo cerrado. Además de que al final del ciclo se obtienen productos

a reciclar como la biomasa o fertilizantes residuos del proceso de bioconversión (frass) que entrarían a una etapa de producción a implementar [11].

Monitoreo de Variables

El control de variables usualmente está asociado a procesos productivos. Por esta razón, con el monitoreo de variables es posible visualizar y analizar rangos de desempeño y de trabajo para crear comparativas que ayuden a definir soluciones al control de variables específicas, para esto se pueden usar ayudas de herramientas de la electrónica para una fácil y rápida lectura por medio de protocolos Wi-Fi para la verificación de datos remoto y en todo momento.

- *Microcontroladores y sensores.*

Son estas ayudas electrónicas que brindan una comunicación máquina – persona para una retroalimentación de los datos obtenidos y las cuales facilitan la lectura de variables ambientales como lo son la temperatura y la humedad.

De esta forma los sensores ayudan a la lectura de los datos ambientales empaquetándolos en un bus de datos que en este caso se envió mediante el protocolo I2C para una rápida lectura e interpretación desde el microcontrolador, los parámetros para esta comunicación se encuentran en cada datasheet del dispositivo a implementar.

- *Variables a medir*

Debido a que el proceso de Bioconversión necesita de unas condiciones especiales para obtener el máximo de su capacidad se pensó en monitorear y/o controlar las dos variables primordiales del sistema de tratamiento de residuos orgánicos las cuales se presentan en la siguiente tabla:

TABLA I
VARIABLES A TENER EN CUENTA

Parámetro	Importancia en el proceso
Temperatura	La temperatura afecta directamente en el proceso bioquímico de bioconversión, debido a que este proceso es de carácter exotérmico, tener una temperatura muy alta o muy baja no permitiría que el flujo del ciclo sea estable, el rango ideal es de 27 - 37 C [11]
Humedad relativa	La humedad relativa afecta entonces al crecimiento y salud de las larvas, una humedad relativa demasiado alta produce un índice de mortandad mayor, por otro lado, tener una humedad relativa baja genera una desnutrición en la larva afectando de igual manera la capacidad del sistema, el rango ideal es de 60 - 70 % [11]

- *I2C.*

El Inter-Integrated Circuit es un protocolo de comunicación síncrono en serie, el cual permite la multiconexión de dispositivos mediante la interacción maestro-esclavo, de este modo el maestro solo envía por un bus de datos la dirección de esclavo a elegir de tal modo que permita obtener los datos del dispositivo con cierta dirección, para esto, el bus de datos I2C necesita 2 líneas ya que es un protocolo síncrono necesita de una señal reloj o SCL y la señal corriente SDA, estos buses de datos de comunicación son de 8 bits y la dirección del esclavo es de 7, permite además una rápida comunicación con un 100Kbit/s hasta los 400 Kbit/s. Cabe mencionar que este protocolo de comunicación necesita de resistencias de pull-up conectadas a las salidas SDA y SCL para una correcta interpretación de los resultados.

El modelo de comunicación se puede ver representado en la figura 3.

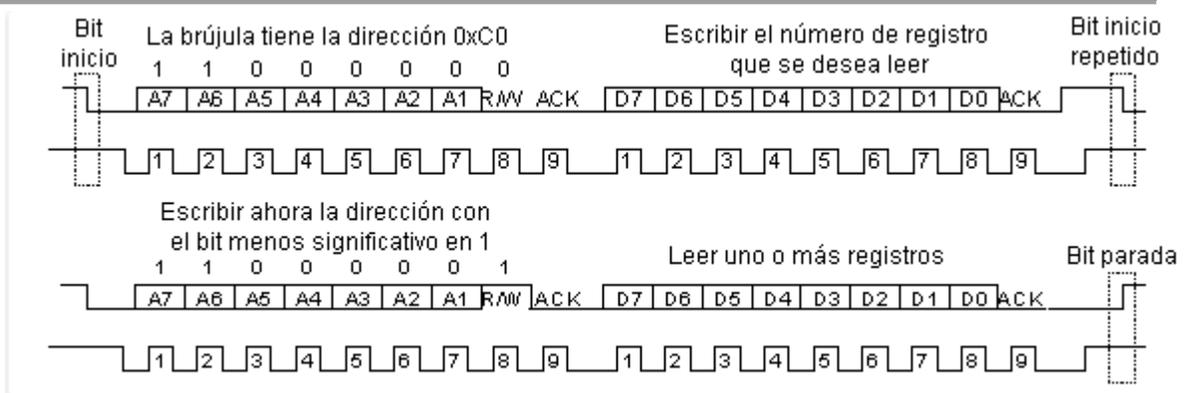


Fig. 3. Protocolo de comunicación I2C. Tomado de [12]

- *Simulaciones*

Medios en los cuales se generan los primeros prototipos a generar para su posible implementación en el campo real, gracias a las simulaciones se pueden usar de manera libre y gratis una gran cantidad de elementos electrónicos para la organización y testeos de estos en búsqueda de la tecnología que más se acople.

- *IoT*

Es un sistema de dispositivos informáticos interconectados, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas que tienen identificadores únicos y pueden transferir datos a través de una red sin interacción humana - humana. En su mayor funcionalidad es para agregar sensores y conexiones a cualquier cosa, y que eventualmente pueda tener su propio poder de procesamiento, de esta manera se automatiza la toma de datos día a día para una mayor constancia de estos y un periodo de muestreo estable en el tiempo.

Cloud

Un servicio en la nube es una infraestructura, plataforma o sistema de software alojado por un proveedor de servicios externo al que pueden acceder los usuarios a través de Internet. Facilitan la comunicación de los clientes front-end (p. Por ejemplo, servidores, tabletas y computadoras portátiles/de escritorio; es decir, cualquier sistema del lado del cliente) al sistema del proveedor de servicios y viceversa. Para acceder a los servicios en la nube, los usuarios solo necesitan una computadora, un sistema operativo y una conexión a Internet o red privada virtual (VPN). Por tanto, en el proyecto son usados para el correcto guardado de los datos proporcionando al final archivos de base de datos (.csv) para su posterior análisis.

- *ThingSpeak for Iot Projects*

Este es un servicio de Cloud enfocada al IoT que permite alojar, visualizar y analizar los datos enviados a través de microcontroladores usando el internet, esto da la facilidad de revisar los datos en tiempo real y crear análisis dinámicos en MATLAB para ver su interacción con futuras mejoras al sistema usando lo antes visto que son las soluciones bajo costo.

Dashboards

Un Dashboard es una herramienta de administración de información que monitorea, analiza y muestra visualmente indicadores clave de rendimiento (KPI), métricas y datos maestros para rastrear el estado de algunas variables comprendidas en un proceso específico [13]. ThingSpeak tiene a disposición una serie de Dashboards en tiempo real bastante útiles para el análisis de datos en el momento preciso.

Bases de datos

Una base de datos es un sistema de gestión de datos electrónicos estructurados lógicamente que, a través de un sistema de gestión de bases de datos (DBMS), gestiona la propiedad y los derechos de acceso y almacena información y la agrega a los repositorios existentes. La mayoría de las bases de datos solo se pueden abrir, editar y consultar mediante aplicaciones especiales [14]. Para la implementación en el proyecto se usan archivos .csv para ser analizados en Python mediante las librerías Matplotlib y Pandas. ThingSpeak permite descargar nuestra base de datos en formato csv para esta etapa de análisis de datos.

IV. METODOLOGÍA

Para este trabajo, se llevaron a cabo las tareas fundamentadas en el cumplimiento de cada uno de los objetivos denotados anteriormente, de esta manera el proyecto consta de dos etapas importantes, la primera el monitoreo de las variables a analizar y la segunda la implementación de soluciones a bajo costo. Inicialmente, se describe entonces las especificaciones de selección de los dispositivos a implementar para así cumplir con el requerimiento de un diseño de hardware, luego de esto, se describe el desarrollo de software usando la plataforma de Arduino, para con esto implementar la plataforma de ThingSpeak como herramienta de IoT.

Diseño Hardware.

Anteriormente se habló sobre dos etapas principales las cuales incluían por aparte un flujo de ideas, por lo cual, y como cada una tiene enfoques diferentes, se busca entonces diseñar para cada apartado una solución en hardware usando elementos embebidos comerciales. De esta forma se utilizan entonces sensores Si7021 de Adafruit los cuales entregan mediante el protocolo I2C la información de temperatura y humedad, además de esto se utilizan entonces para la verificación local una pantalla Oled con comunicación I2C la cual imprimirá los datos relevantes de cada sensor en el sistema y por último el microcontrolador especializado en IoT Esp32 de Espressif Systems, el cual permitirá enviar los datos recolectados por los sensores mediante WiFi a él Cloud seleccionado (ThingSpeak) para la esquematización y visualización en Dashboards dinámicos, esta información se puede ver referenciada en el siguiente diagrama de bloques:

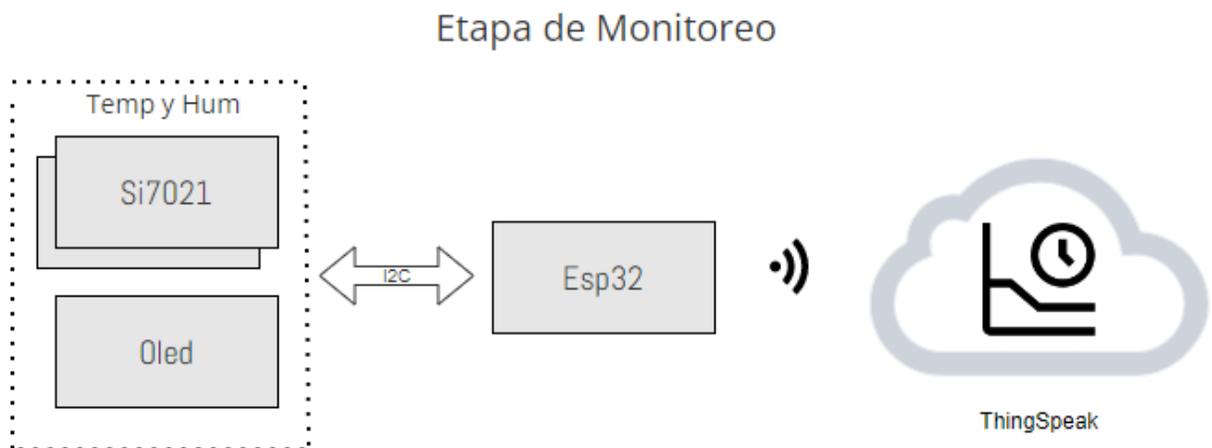


Fig. 4. Diagrama de flujo de la etapa de monitoreo

un multiplexor que intercalaba la conexión de los sensores para evitar el problema de que cada sensor tenía la misma dirección de esclavo [15].

La distribución de las conexiones al microcontrolador se detalla en la siguiente tabla:

TABLA II
DISTRIBUCION PINES ESP32

# PIN	FUNCION
22	Comunicación I2C pin del SDA para los sensores Si7021, multiplexor y pantalla OLED
21	Comunicación I2C pin del SCL para los sensores Si7021, multiplexor y pantalla OLED
3v	Pin de alimentación para los sensores Si7021, multiplexor y pantalla OLED
GND	Pin de tierra para los sensores Si7021, multiplexor y pantalla OLED

Sensores temperatura y humedad relativa.

El dispositivo que más se ajustaba a las necesidades del proyecto fue el Si7021 de la empresa Adafruit, este es un sensor industrial de buena precisión que viene calibrado de fábrica y el cual tiene soporte de librería en Arduino donde ofrece también una ecuación de calibración para posibles ajustes si se compara con un equipo patrón, sus características son las siguientes:

TABLA III
CARACTERISTICAS SI7021

PARAMETRO	VALOR
Voltaje de alimentación	3.3V
Precisión HR	± 3% entre 0-80% RH
Precisión Temperatura	± 0.4 C (max) entre -10 y 85 C
Rango operación	0-100 % RH y -40 a 125 C
Consumo	150 uA
Comunicación	I2C

Todos los datos y comandos del Si7021 se encuentran en dos bytes es decir por 16 bits compartidos por I2C en dos buses de respuesta.

Estos valores están linealizados para funcionar en el voltaje de operación del sensor por lo que se necesita de una fórmula para hallar sus correspondientes datos de temperatura y humedad, de esta forma las fórmulas implementadas se pueden ver en las siguientes ecuaciones [16].

$$\%RH = \frac{125 * RH}{65536} - 6 \quad (1)$$

$$Temperatura (C) = \frac{175.72 * Temp}{65536} - 46.85 \quad (2)$$

Donde RH y Temp son las palabras de 16 bits entregadas por el sensor al MCU.

Como se usaron la cantidad de 4 sensores por Rak y como este sensor no permite cambiar la dirección de esclavo (0x40) se usó entonces un multiplexor (TCA9548A) de Adafruit el cual ayuda a intercalar la lectura de cada sensor mediante interruptores, esto se puede evidenciar mejor en la figura 5, de esta manera se pueden leer los datos enviados por cada sensor en una sola comunicación I2C, su conexión se denota también en la figura 5 donde se observa que los pines A0, A1 y A2 van a tierra puesto que estos son para seleccionar una dirección propia de esclavo que por elección será para este 0x70 [17].

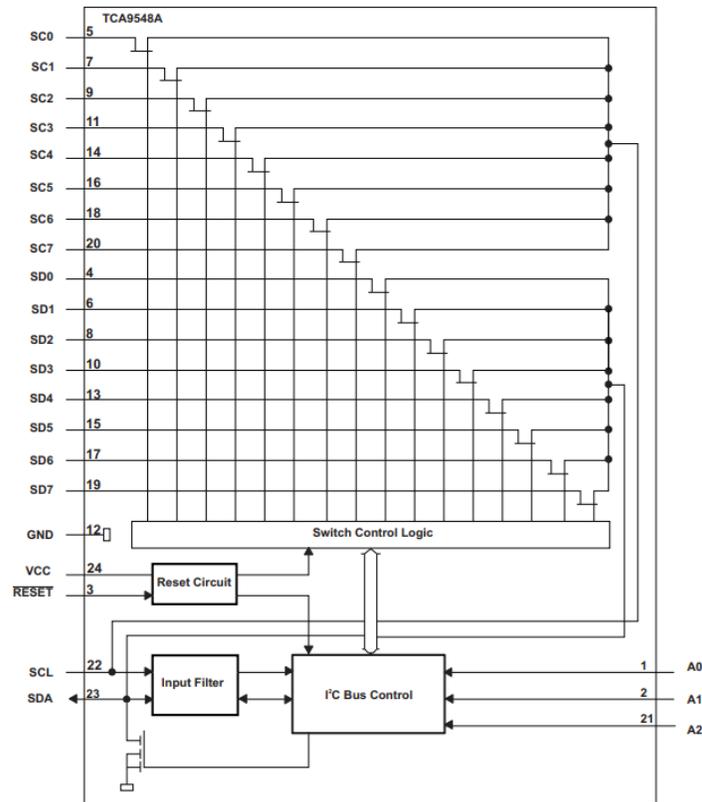


Fig. 6. Diagrama funcional de Bloques para TCA9548A Multiplexor. Tomado de [18]

Para la visualización de los datos arrojados por los sensores se usó entonces una pantalla Oled de resolución 128x64 y tamaño 0.96” el cual posee un controlador SSD1306 y su comunicación es sencilla ya que usa I2C con una dirección esclavo de 0x3C, por lo cual se puede conectar en serie a las conexiones de SDA y SCL usadas para el multiplexor y su conexión igualmente se detalle en la figura 5.

Desarrollo Software

Como se mencionó anteriormente, el firmware del Esp32 se puede desarrollar en el IDLE de Arduino usando las librerías desarrolladas por la empresa Espressif Systems, por tanto, se programa todo el código a desarrollar en este ambiente.

Para este sistema se usaron diferentes librerías las cuales facilitaban el manejo y el envío de datos desde la comunicación I2C, hasta la comunicación vía API para la nube. La estructura del sistema se evidencia a continuación.

TABLA IV
ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

Comunicación	Librerías	Definiciones
I2C	Wire.h	Librería general de Arduino para la implementación del protocolo I2C.
	Librería Si7021	Librería donde se ejecutan la lectura de los datos mediante el protocolo I2C para los sensores de temperatura y humedad
	Librería Oled	Librería donde permite visualizar los datos reportados en el proyecto de manera local mediante el protocolo I2C para la pantalla Oled
Wifi	Wifi.h	Librería que permite generar una puerta de enlace con una red local de internet dependiendo de los parámetros de red, librería local de Arduino.
	Librería ThingSpeak	Permite la comunicación mediante API Key para el envío de datos a la nube y su posible visualización.

I2C Librería

Esta librería facilitó la conexión entre sensores, pantalla y MCU para su fácil y rápida interacción sin tener que ocupar demasiados pines del MCU ya que esta permite conectar múltiples esclavos a un solo maestro, en este caso el maestro fue el ESP32 y sus esclavos cada uno de los sensores de temperatura y humedad, unido a la pantalla Oled. En la tabla V se detalla la librería usada para la conexión I2C.

TABLA V
FUNCIONES LIBRERÍA I2C (Wire.h)

FUNCION	DESCRIPCION
Wire.begin(num) o Wire.begin(SDApin, SCLpin)	Inicia la librería Wire para unirse al bus I2C como maestro o esclavo
Wire.beginTransmission(num)	Inicia la transmisión de datos al dispositivo esclavo con dirección (num)
Wire.write(dato, longitud)	Inserta en el búfer del maestro un byte de datos para ser transmitido al esclavo
Wire.endTransmission()	Termina la comunicación, si esta fue exitosa devuelve un cero

Si7021

Adafruit desarrolla una librería especialmente para estos sensores de temperatura y humedad la cual permitió una rápida configuración e interpretación de los buses de datos para el microcontrolador de tal manera que se pudieran leer localmente con la pantalla Oled y tanto enviarse a la plataforma IoT para su posible esquematización. En la tabla VI se describen las funciones utilizadas.

TABLA VI
FUNCIONES LIBRERÍA Si7021 (Adafruit_Si7021.h)

FUNCION	DESCRIPCION
bool Adafruit_Si7021::begin()	Inicia la conexión I2C del dispositivo, retorna verdadero si la conexión es correcta
float Adafruit_Si7021::readHumidity()	Lee el valor de humedad desde el Si7021 y retorna el valor de este como flotante aplicando la ecuación (1), si ocurre un error de tiempo, este retorna NAN
float Adafruit_Si7021::readTemperature()	Lee el valor de temperatura desde el Si7021 y retorna el valor de este como flotante aplicando la ecuación (2), si ocurre un error de tiempo, este retorna NAN

Pantalla Oled (SSD1306)

Se hizo uso de la librería U8x8lib.h la cual contenía todo el apartado para una buena lectura local de las variables mostradas y la ubicación dependiendo del sensor, esta librería permite la conexión I2C y la selección de posibles estilos de letras para una correcta visualización. En la tabla VII se describen cada una de las funciones utilizadas.

TABLA VII
FUNCIONES LIBRERÍA Oled (U8x8lib.h)

FUNCION	DESCRIPCION
class U8X8_SSD1306_128X64_NONAME_HW_I2C : public U8X8	Se selecciona esta clase ya que el Oled usado es de 128x64, usa un controlador SSD1306 y utiliza el protocolo I2C
bool U8x8::begin(void)	Inicia la transmisión de datos al dispositivo esclavo
void U8x8::setFont(const uint8_t *font_8x8)	Función que ayuda a seleccionar tipo y tamaño de letra

<code>void U8x8::setCursor(uint8_t x, uint8_t y)</code>	Ayuda a seleccionar un recuadro dentro de los 128x64 disponibles para escritura, siendo x el recuadro en el eje x y Y el recuadro en el eje y
<code>void U8x8::print()</code>	Función que redirige a la librería print.h, esta lee el valor ingresado por el usuario y escribe en la pantalla el carácter ingresado

WiFi

El Esp32 cuenta con un periférico Wifi que permite la conexión a una red inalámbrica para la transmisión y recepción de datos. Se hizo uso entonces de la librería WiFi desarrollada por Arduino la cual permite este enlace. En la tabla VIII se evidencian las funciones utilizadas en este caso.

TABLA VIII
FUNCIONES LIBRERÍA WIFI (Wifi.h)

FUNCION	DESCRIPCION
<code>WiFiClient::WiFiClient()</code>	Se selecciona el método de conexión de WiFi con HTTP
<code>int WiFiClass::begin(const char* ssid, const char *passphrase)</code>	Inicia la conexión WiFi mediante el SSID de la red ingresada y su contraseña ingresada como passphrase
<code>uint8_t WiFiClass::status()</code>	Funcion que sirve para verificar si la conexión se logró establecer, si esta es igual al valor guardado WL_CONNECTED, es por que la conexión a sido exitosa
<code>int WiFiClass::disconnect()</code>	Función útil cuando ocurre una caída de Wifi y el server no logra conectarse, de esta manera hacemos una desconexión del servidor para luego intentar una reconexión
<code>int WiFiClass::reconnect()</code>	Función que intenta reconectar el WiFi con las credenciales mencionadas anteriormente

ThingSpeak

Para enviar los datos a la plataforma IoT se necesita una puerta de enlace, Matlab permite mediante el uso de su librería generarla fácilmente con sus APIs y el protocolo de conexión WiFi. En la tabla IX se pueden verificar las funciones utilizadas para el envío de datos de manera virtual hacia la nube.

TABLA IX
FUNCIONES LIBRERÍA THINGSPEAK (ThingSpeak.h)

FUNCION	DESCRIPCION
<code>bool ThingSpeakClass::begin(Client & client)</code>	Inicializa la librería y las configuraciones de red. Client son los parámetros de red de conexión WiFi Http o Https como WiFiClient visto en la librería anterior
<code>int ThingSpeakClass::setField(unsigned int field, int value)</code>	Selecciona el valor a alojar en un único field de la plataforma ThingSpeak. Field numero (1-8) con el canal a escoger, value, es un valor int para alojar dentro del field del canal.
<code>int ThingSpeakClass::writeFields(unsigned long channelNumber, const char * writeAPIKey)</code>	Escribe múltiples valores ya seleccionados en los diferentes fields de ThingSpeak previamente escogidos. ChannelNumber es el numero de canal entregado por ThingSpeak, WriteAPIKey es la llave para poder enviar los datos a la nube mediante su API
<code>int WiFiClass::disconnect()</code>	Función útil cuando ocurre una caída de Wifi y el server no logra conectarse, de esta manera hacemos una desconexión del servidor para luego intentar una reconexión
<code>int WiFiClass::reconnect()</code>	Función que intenta reconectar el WiFi con las credenciales mencionadas anteriormente

Implementación plataforma IoT (ThingSpeak).

Se creó entonces un usuario y contraseña en la plataforma MathWorks para tener acceso a la plataforma IoT de Matlab, de esta manera se pudo comenzar a generar los Dashboard. Para esto se ingresó en la plataforma y se seleccionó el botón de crear nuevo canal, ya dentro de este se llenen los campos correspondientes como se muestra en la siguiente imagen:

New Channel

Name	<input type="text" value="Temperaturas y Humedades Fondo"/>
Description	<input type="text" value="Temperaturas y humedades del proceso de Bioconversión"/>
Field 1	<input type="text" value="Temperatura 1"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 2	<input type="text" value="Humedad 1"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 3	<input type="text" value="Temperatura 2"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 4	<input type="text" value="Humedad 2"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 5	<input type="text" value="Temperatura 3"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 6	<input type="text" value="Humedad 3"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 7	<input type="text" value="Temperatura Suelo"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 8	<input type="text" value="Humedad Suelo"/> <input checked="" type="checkbox"/>

Fig. 7. Creación Dashboard ThingSpeak.

Después de seleccionado los datos se guarda el canal y se obtienen entonces los datos para que la librería de ThingSpeak en Arduino pueda escribir sobre los canales en los fields correspondientes (véase tabla 9), estos datos se presentan en la siguiente imagen y son solo un ejemplo.

Temperaturas y Humedades Fondo

Channel ID: 2008864

Author: mwa0000024827982

Access: Private

Temperaturas y humedades de Bioconversión

Private View

Public View

Channel Settings

Sharing

API Keys

Data

Write API Key

Key

JJX0NYN63D18040M

Generate New Write API Key

Read API Keys

Key

Z0SALNFHZSHUJQBW

Fig. 8. Información importante del canal para la implementación en Arduino (Channel ID y Write API Key). Luego de tener todo organizado el Dashboard estará listo para recibir los datos enviados a través del Esp32 para su esquemización. (véase figura 9)

Channel Stats

Created: 7 minutes ago
Entries: 0

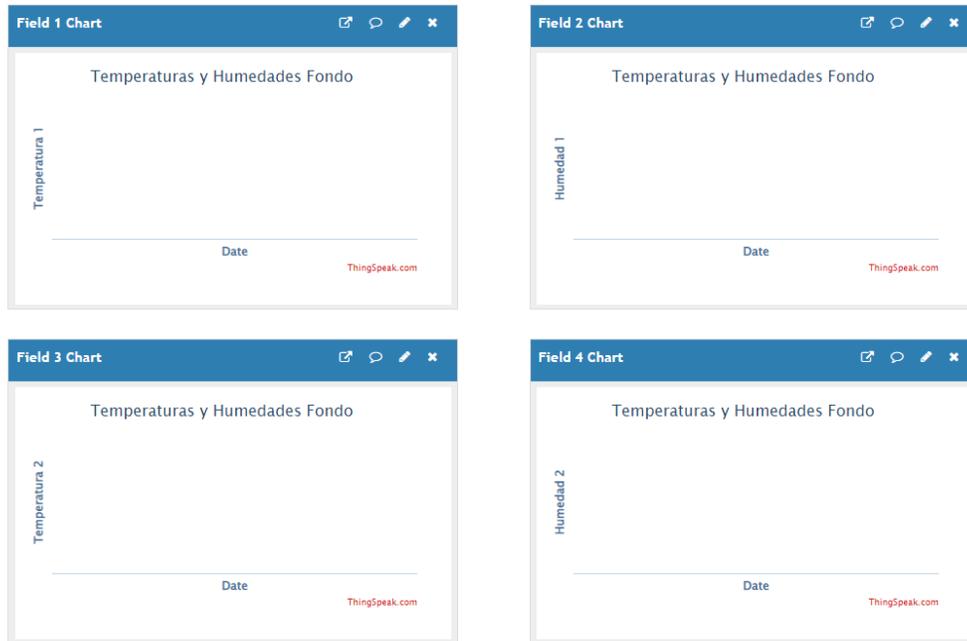


Fig. 9. Dashboard creados por la plataforma ThingSpeak a la espera de la recolección de datos via API Key mediante comunicación WiFi con Esp32.

También ThingSpeak permite la recolección de datos en una base de datos .csv para su posible análisis, esta opción se obtiene desde la pestaña Data import/Export y seleccionando la zona horaria se puede extraer toda la base de datos disponible. (véase figura 10).

Temperaturas y Humedades Fondo

Channel ID: 2008864
Author: mwa0000024827982
Access: Private

Temperaturas y humedades del proceso de Bioconversión

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Import

Upload a CSV file to import data into this channel.

File Ninguno archivo selec.

Time Zone (GMT+00:00) UTC

Upload

Help

Import

The correct format for data import is provided in this [CSV Import Template File](#). Use the field names *field1*, *field2*, and so on, instead of custom field names.

CSV Import Format

```
created_at,field1,field3,field4,field8,elevation  
2019-01-01T10:11:12-05:00,11,33,44,88,10
```

Other Import and Export Options

You can also use MATLAB, the REST API, or the MQTT API to import and export channel data.

[Read Data](#)

[Write Data](#)

Export

Download all of this Channel's feeds in CSV format.

Time Zone (GMT-05:00) Bogota

Download

Fig. 10. Ruta para descargar archivo .csv con toda la información enviada en el tiempo

Con este archivo .csv se graficaron por días y/o semanas el comportamiento del sistema y se analizaron los cambios producidos por las interferencias inducidas. El formato del archivo .csv se puede ver en la tabla X.

TABLA X
FORMATO ARCHIVO .CSV

COLUMNA	DESCRIPCION
Created_at	Formato de dataframe que contiene fecha, zona horaria y hora del dato enviado
Field1	Contiene el valor de temperatura 1 enviado por el MCU en C
Field2	Contiene el valor de Humedad 1 enviado por el MCU en %
Field3	Contiene el valor de temperatura 2 enviado por el MCU en C
Field4	Contiene el valor de Humedad 2 enviado por el MCU en %
Field5	Contiene el valor de temperatura 3 enviado por el MCU en C
Field6	Contiene el valor de Humedad 3 enviado por el MCU en %
Field7	Contiene el valor de temperatura suelo enviado por el MCU en C
Field8	Contiene el valor de Humedad suelo enviado por el MCU en %

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Primer prototipo

Se realiza un primer montaje en protoboard para el análisis y la operativa del sistema encontrando los primeros valores de temperatura y humedad que sirvieron para un análisis más riguroso más adelante. Se usó entonces un total de 2 MCU los cuales controlaban cada uno 4 sensores para un total de 8 sensores ubicados en los extremos de la sala de la unidad de bioconversión, es decir un módulo en el rack del fondo de la sala y otro en la parte de más adelante, los sensores fueron ubicados uno en la parte superior del rack, otro en el medio, en la parte inferior del rack y el último en el suelo, la distribución y el primer montaje se pueden ver en la siguiente figura.



Fig. 11. Primer montaje en protoboard.

Plataforma IoT.

Después de que se logra la conexión a la nube, la plataforma de ThingSpeak permite entonces graficar los últimos datos capturados por los sensores en tiempo real, además de que los

datos los va almacenando en una base de datos para su posible análisis. En la figura siguiente se muestra la interfaz de la plataforma donde se ven las gráficas desplegadas por la plataforma.



Fig. 12. Esquematización de los datos mediante Dashboard usando ThingSpeak.

Prototipo Final

Pasado un tiempo prudente se optó por soldar los circuitos en una placa base para evitar desconexiones y así tener un circuito mucho más protegido, el resultado se evidencia en la figura siguiente.

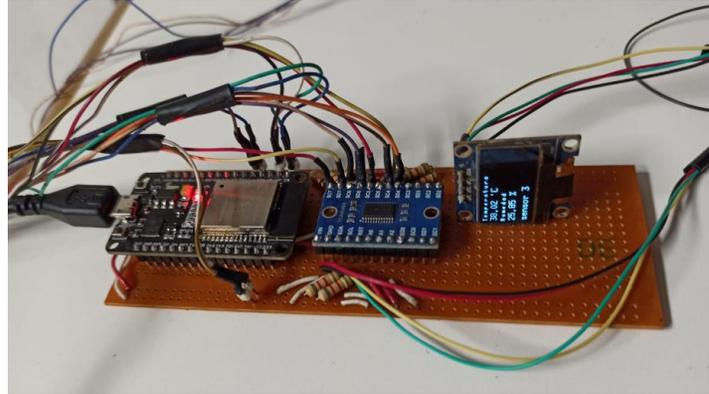


Fig. 13. Circuito soldado en placa base

Con la ayuda de Python y librerías como pandas y matplotlib se graficaron en un tiempo más extenso los informes entregados por la plataforma de ThingSpeak, para así determinar los tiempos en donde las temperaturas y humedades eran más críticas y poder verificar si sus valores estaban en el rango definido para la eficiencia del ciclo de bioconversión.

Se halló por consiguiente las gráficas mostradas a continuación.

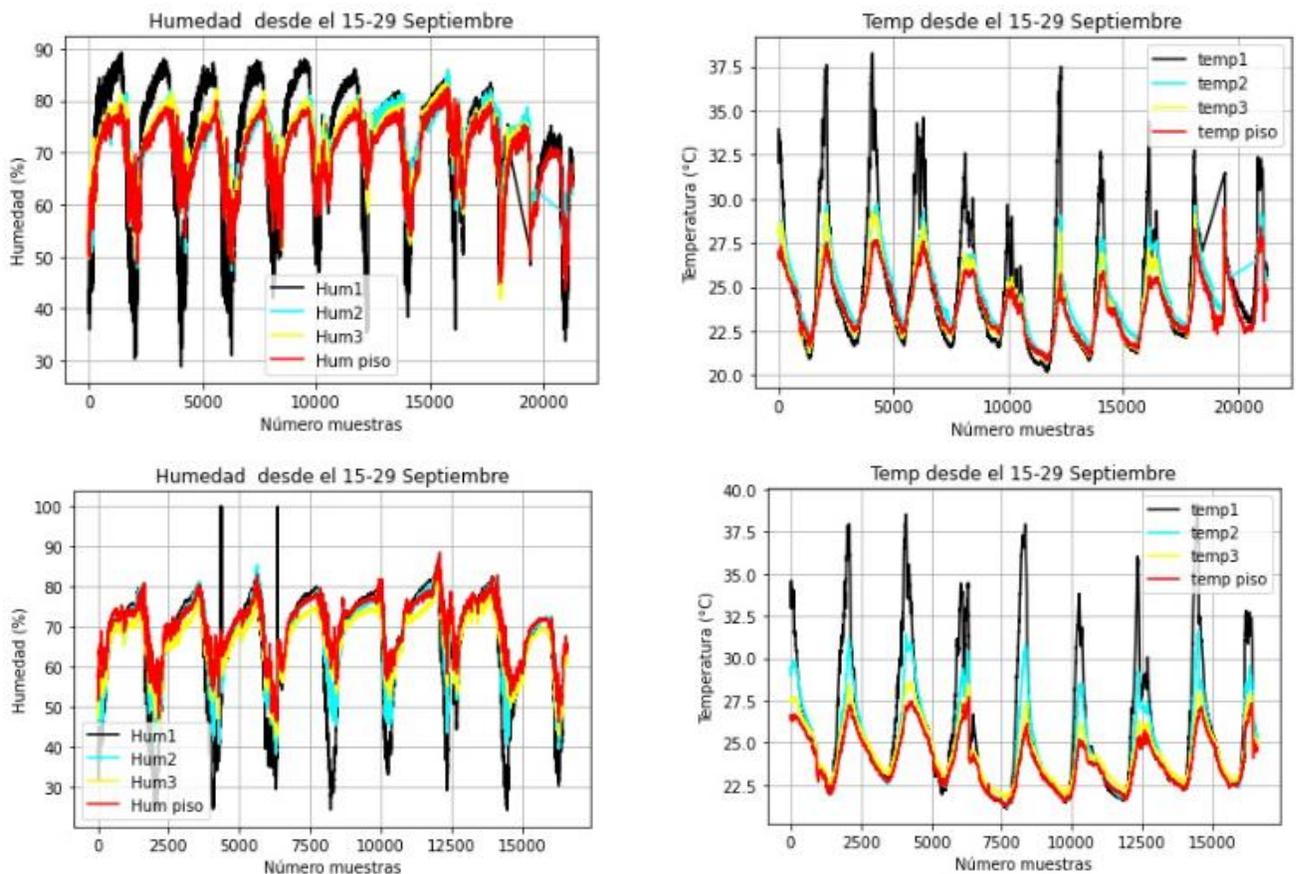


Fig. 14. Temperaturas y humedades Septiembre (Arriba rak de adelante, abajo rak del fondo)

De esta forma se encontró entonces que las temperaturas y humedades eran inversamente proporcionales casi siempre y que las críticas se encontraban cerca del mediodía donde las temperaturas alcanzaban su máximo 37.5 C aproximadamente y las humedades decaían incluso hasta llegar a unos 20 % de humedad relativa. El otro punto crítico pasaba en las noches donde la temperatura decaía con valores por debajo de 23 C y la humedad por su parte aumentaba casi hasta un 80 %. También se halló que las temperaturas y humedades eran más críticas en la parte superior de los racks esto debido a que por ser el proceso de bioconversión un proceso exotérmico, las temperaturas en las zonas medias tienden a estabilizarse entre ellas cosa que por tanto los extremos tienden a perder esta estabilidad.

Debido a estos hallazgos se optó por encerrar en una sala construida por medio de paredes recicladas (Fig. 16) el proceso de bioconversión y analizar como esto se comporta. Se obtuvo muy buenos resultados dado a que el proceso exotérmico de bioconversión ayudó a que las temperaturas y humedades se mantuvieran un poco más cercanas una de otras en los racks, esto se puede evidenciar en la figura siguiente.

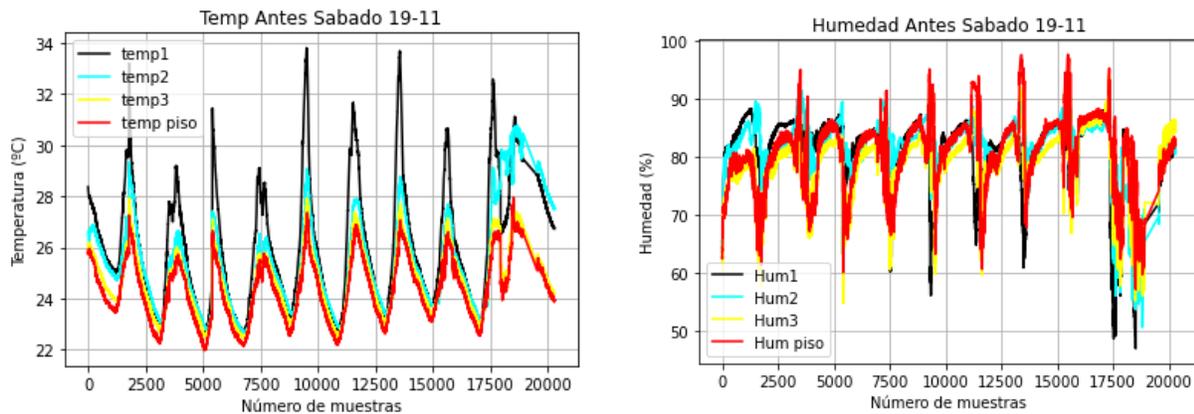


Fig. 15. Temperaturas y Humedades después de construir sala.

Aunque las temperaturas superiores siempre alcanzaban un umbral mucho mayor que las temperaturas en el medio, ya no eran tan altas como las temperaturas de 37 C que llegó a experimentar el sistema abierto, además se evidencia entonces como las temperaturas y humedades medias ya están muy superpuestas entre sí, llegando entonces a reducirse las temperaturas entre racks.



Fig. 16. Adecuación sala para proceso de bioconversión.

Aunque no se logró aún los requerimientos iniciales de temperaturas y humedades, se deja un gran camino para continuar con procesos de automatización a emplear para el control de las temperaturas y humedades en un espacio más controlado.

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollo un dispositivo que por medio de IoT permite la visualización en tiempo real de las variables de temperatura y humedad relativa dentro de un sistema operativo real de bioconversión. Este sistema fue desarrollado para lograr obtener todos los datos y su posible análisis mediante software para encontrar posibles soluciones a bajo costo a implementar, por lo tanto, se encontró con unas simples paredes recicladas reducir las diferencias de temperaturas y humedades presentes en las diferencias por alturas entre cada casillero del rack, logrando así una posibilidad bajo costo de control. También se logró implementar una plataforma que permita la recolección y visualización de las variables de temperatura y humedad relativa del sistema en tiempo real, esto de tal modo para verificaciones rápidas de las soluciones a bajo costo anteriormente planteadas para así tener un control más orientado sobre las posibles alteraciones que estas influyan.

Como un futuro trabajo se dejan entonces las bases para reconexión mediante la plataforma ThingSpeak la posibilidad de obtener los datos para intentar generar la automatización de un circuito de control para las variables de temperaturas y humedad usando extractores y ventiladores.

REFERENCIAS

- [1] U. Nations, “Población | Naciones Unidas”, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- [2] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. van Woerden, “What a Waste 2.0,” *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, Sep. 2018, doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [3] “Bioconversion of Food Waste: Black Soldier Fly.” <https://web.archive.org/web/20081013183235/http://www.esrint.com/pages/bioconversion.html> (accessed Jan. 14, 2023).
- [4] T. Changmai, S. Gertphol, and P. Chulak, “Smart Hydroponic Lettuce Farm using Internet of Things,” *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, pp. 231–236, Aug. 2018, doi: 10.1109/KST.2018.8426141.
- [5] S. Castañeda Torres and J. P. Rodríguez Miranda, “Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia,” *Univ Salud*, vol. 19, no. 1, 2017, doi: 10.22267/rus.171901.75.
- [6] “Hasta 70% de los residuos sólidos del país se pueden transformar en compostaje.” <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/hasta-70-de-los-residuos-solidos-del-pais-se-pueden-transformar-en-compostaje-2762298> (accessed Jan. 14, 2023).
- [7] N. EVANSMANYARA, “OPTIMIZATION OF PRODUCTION OF BLACK SOLDIER FLY LARVAE (*Hermetia illucens*, L) FOR FISH FEED FORMULATION,” *J Linguist*, vol. 3, no. 2, 2018.
- [8] “Un consorcio europeo promoverá la reutilización de residuos orgánicos urbanos para una economía circular – Aclima.” <https://aclima.eus/un-consorcio-europeo-promovera-la-reutilizacion-de-residuos-organicos-urbanos-para-una-economia-circular/> (accessed Jan. 14, 2023).
- [9] G. G. R and P. M. K, “Occurrence of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* (Diptera : Stratiomyidae) in Biocompost,” *Res J Recent Sci*, vol. 2, no. 4, 2013.
- [10] M. Bonelli *et al.*, “Black soldier fly larvae adapt to different food substrates through morphological and functional responses of the midgut,” *Int J Mol Sci*, vol. 21, no. 14, 2020, doi: 10.3390/ijms21144955.

- [11] N. F. Amrul, I. K. Ahmad, N. E. A. Basri, F. Suja, N. A. A. Jalil, and N. A. Azman, “A Review of Organic Waste Treatment Using Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*),” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 4565, vol. 14, no. 8, p. 4565, Apr. 2022, doi: 10.3390/SU14084565.
- [12] D. J. funcionamiento por Eduardo Carletti, “Comunicación-Bus I2C”.
- [13] J. Han, K. H. Kim, W. Rhee, and Y. H. Cho, “Learning analytics dashboards for adaptive support in face-to-face collaborative argumentation,” *Comput Educ*, vol. 163, 2021, doi: 10.1016/j.compedu.2020.104041.
- [14] C. H. Ortiz and J. I. Uribe, “BASES DE DATOS,” in *Crecimiento económico, industrialización y empleo*, 2021. doi: 10.2307/j.ctv1k03n4m.16.
- [15] Espressif Systems, “ESP32 Series Datasheet,” *Espressif Systems*, 2021.
- [16] D. el Houssaini, S. Khriji, K. Besbes, and O. Kanoun, “Real time temperature measurement for industrial environment,” in *8th EnvImeko - IMEKO TC19 Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements*, 2019.
- [17] K. Podbucki, J. Suder, T. Marciniak, and A. Dąbrowski, “(Electronic measuring matrix for testing airport lamps).,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 97, no. 3, 2021, doi: 10.15199/48.2021.02.12.
- [18] TEXAS INSTRUMENTS, “TCA9548A DATASHEET.” <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/tca9548a.pdf> (accessed Jan. 15, 2023).