

## SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO DEL PROCESO DE CURADO DE TABACO CON TERMOHIGRÓMETRO MULTI-SONDA

Dioen Biosca Rojas<sup>1</sup>, Ariel Baloira Reyes<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE

<sup>1</sup>e-mail: diosenbiosca@tele.cujae.edu.cu

<sup>2</sup>e-mail: ariel@tele.cujae.edu.cu

### RESUMEN

El presente trabajo propone un diseño de plataforma IoT con termohigrómetros de múltiples sondas, para la industria tabacalera del país, particularmente en el monitoreo remoto de los procesos de curado controlado de las hojas de tabaco. El mismo es capaz de, empleando los principios de IoT, registrar todos los datos sensados hacia una plataforma en la nube, para facilitar su acceso y consulta desde cualquier lugar, en cualquier momento. Se emplea una placa Raspberry Pi 3 Modelo B+ como elemento de control y la posibilidad de conexión de hasta nueve sondas de censado simultáneas, respondiendo a las necesidades de registro de información en múltiples áreas de las casas de curado. Como sensor se propone el uso del SHT85 de Sensirion, probado ya en este tipo de aplicaciones, que ofrece los mejores niveles de exactitud disponibles en el mercado, muy próximos a los de los equipos comerciales empleados actualmente en el país, a un costo significativamente inferior. La plataforma IoT que se propone emplear es ThingsBoard, por la versatilidad y nivel de prestaciones que ofrece. El objetivo del trabajo consiste en ofrecer un sistema alternativo, para la sustitución de importaciones y la disminución de costos por este concepto en la industria del tabaco en Cuba.

**PALABRAS CLAVES:** IoT, Raspberry Pi, Arduino, SHT85, Censado de temperatura y humedad.

## IOT SYSTEM FOR MONITORING THE TOBACCO CURING PROCESS WITH A MULTI PROBE THERMO-HYGROMETER

### ABSTRACT

This paper proposes an IoT platform design using multi-probe thermo-hygrometers for use in the country's tobacco industry, particularly in remote monitoring of the controlled curing processes of tobacco leaves. The system can register all measured data in an IoT cloud platform for consultation from anywhere, anytime. A Raspberry Pi 3 Model B+ board is proposed as the control element, with the possibility of connecting up to nine simultaneous sensing probes, responding to the need to record information in multiple areas of curing houses. As a sensor, the use of Sensirion's SHT85 is proposed, already proved in this type of application, which offers the best levels of accuracy available on the market, very close to those of the commercial equipment currently used in the country, at a significantly lower cost. The proposed IoT platform is ThingsBoard due to its versatility and level of performance. The work aims to propose an alternative system design for the substitution of imports and the reduction of costs for this concept in the tobacco industry.

**INDEX TERMS:** IoT, Raspberry Pi, Arduino, SHT85, Humidity and temperature sensing.

### 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo constituye una iniciativa alineada con el esfuerzo del país en la sustitución de importaciones. La idea del desarrollo del mismo parte de las necesidades concretas del sistema del tabaco en Cuba, particularmente de la empresa TABACUBA S.A. y el Instituto de Investigaciones del Tabaco (IIT), adscrito a la misma.

Una vez cosechado el tabaco se procede a su curación, proceso durante el cual es necesario monitorear y controlar celosamente los parámetros de temperatura y humedad del ambiente, con el objetivo de lograr un producto de la mejor calidad. Estos procesos pueden llevarse a cabo en casas de curado tradicionales o en casas de curado controlado, pero en ambos casos el control del proceso tiene que ser estricto. Una vez concluido el proceso de curado, las hojas de tabaco eventualmente pasan a la cadena productiva, donde se convierten en puros o cigarrillos directamente, o pueden

experimentar procesos como la fermentación y el añejamiento, que producen transformaciones físico-químicas en las hojas de tabaco, para lograr la suavidad y el aroma que caracteriza los puros de la más alta calidad y prestigio del mundo. Durante estos procesos también es necesario cuidar celosamente los parámetros de temperatura y humedad de la masa de tabaco en proceso (pilones). Cuando se alcanzan ciertos valores de los mismos, los operarios tienen que intervenir para deshacer los pilones y reconfigurarlos. Esto se logra cambiando las posiciones de los mazos para lograr uniformidad en el proceso, y continuar el mismo hasta su culminación.

Para el monitoreo y control de la temperatura y humedad, el sistema del tabaco en Cuba utiliza termohigrómetros importados de alta precisión y alto costo en el mercado internacional. Por lo general estos instrumentos posibilitan la conexión de una única sonda de censado, quizá dos. Ello permite el estudio de las variaciones de los antes mencionados parámetros en varios puntos de una casa o batería de curado, para estudiar por ejemplo cómo lograr distribuciones más uniformes de los mismos para todo el volumen de tabaco en proceso. Estos dispositivos son además manuales, no conectables a una red de datos.

El objetivo de este trabajo va precisamente en la línea de desarrollar una propuesta de diseño de sistema alternativo, de mayor versatilidad, a un menor costo que el del equipamiento que se importa actualmente por el sistema productivo del tabaco en Cuba. Otra ventaja es registrar la información de temperatura y humedad sensada, empleando técnicas de Internet of Things (IoT). Con ello se conforma una plataforma en la nube para su consulta en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a la red. El análisis económico realizado para la solución no se incluye dada la extensión del trabajo.

## 2. INSTRUMENTO DE REFERENCIA

En Cuba, el sistema del tabaco ha establecido una relación importante con el proveedor suizo ROTRONIC<sup>1</sup>, importando el Hygropalm HP23-AW-A<sup>2</sup>. A este equipo se le puede conectar una sonda ambiental u otra de inserción para censar la humedad en pilones, por ejemplo, durante los procesos de fermentación. Además de las prestaciones de cada tipo de equipo, la sonda empleada determina las diferencias en precisión, rango de escenarios de aplicación, entre otros. En ocasiones a los instrumentos se les puede conectar una u otra sonda para poder realizar mediciones en distintos escenarios. Existe una gran variedad de sondas en dependencia de la aplicación, las cuales pueden revisarse en el sitio oficial del proveedor ROTRONIC.

Dependiendo de la aplicación, la sonda emplea la familia de sensores HYGROMER [1]–[3]. Estos sensores son desarrollados por la propia firma. La precisión ofrecida por esta familia de sensores es de  $\pm 0.8\%$  HR a  $23^{\circ}\text{C}$ , en el caso de la humedad relativa y  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  para las mediciones de temperatura. Los sensores se colocan en el interior de la sonda, protegidos por un filtro para polvo. Estos usualmente se encuentran en la punta de las sondas es fabricado de poliestireno con porosidades de  $20\mu\text{m}$  o  $40\mu\text{m}$ , PTFE (politetrafluoroestireno) o teflón, con porosidades de  $2\mu\text{m}$  o  $10\mu\text{m}$ , malla de alambre de  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  o  $25\mu\text{m}$ , acero inoxidable sinterizado de  $5\mu\text{m}$  o  $25\mu\text{m}$  o acero sinterizado DIN 1.4401 de  $5\mu\text{m}$ . Los filtros de protección para los sensores de humedad son fabricados de materiales con buenas propiedades hidrofóbicas, o sea que repelen el agua. Se emplean membranas protectoras con distintos niveles de porosidad, para propiciar la permeabilidad necesaria para una medición de humedad efectiva. El tamaño de los poros oscila entre  $5\mu\text{m}$  y  $40\mu\text{m}$  aproximadamente, el cual dependerá del escenario de trabajo y la velocidad de respuesta que requiere la aplicación de medición en cuestión [4], [5]. Particularmente el instrumento de referencia, el Hygropalm HP23-AW-A, emplea las sondas HC2A para mediciones ambientales y la HC2-HP28 para inserción. Los sensores empleados son los HYGROMER IN-1 con las precisiones antes mencionadas para la temperatura y la humedad y filtros que pueden ser de poliestireno de  $20\mu\text{m}$  (NSP-PCB-PE<sup>3</sup>) en el caso de la sonda HC2A-SH o de acero sinterizado DIN 1.4401 de  $5\mu\text{m}$  (ET-Z10<sup>4</sup>) para la sonda HC2-HP28.

El propósito es diseñar una alternativa de instrumento con una precisión lo más cercana posible a la que ofrece el equipo comercial de referencia. Tanto en la medición de temperatura como de humedad, y que al mismo tiempo provea una mayor versatilidad. La idea es que el equipo propuesto pueda recopilar la información de múltiples sondas simultáneamente, para facilitar el estudio de las distribuciones volumétricas de los parámetros en el interior de una

<sup>1</sup> “ROTRONIC Measurement Solutions”. <https://www.rotronic.com> (accedido el 5 de mayo de 2022).

<sup>2</sup> Analizador portable de la actividad del agua. <https://www.rotronic.com/en-us/hygropalm23-aw-hp23-aw> (accedido el 5 de mayo de 2022).

<sup>3</sup> Filtro para sondas HC2-S. <https://www.rotronic.com/en/nsf-pcb-pe> (accedido el 12 de diciembre de 2023).

<sup>4</sup> Filtro para sondas HC2-HP28 <https://www.rotronic.com/en/et-z10> (accedido el 12 de diciembre de 2023).

casa de curado. Se proponen adicionalmente las funciones de visualización y registro remoto de la información mediante la posibilidad de subir todos los datos recopilados a la nube desde una plataforma de IoT como ThingsBoard [6], [7] por ejemplo. Esta prestación superaría al instrumento que se ha tomado como referencia de partida. Esta funcionalidad ya ha sido probada con éxito por los autores y se encuentra reportada en [8], [9].

### 3. REQUERIMIENTOS DEL ESCENARIO DE DESPLIEGUE

A partir de las necesidades, tanto de los investigadores del IIT como de los productores, el diseño del sistema debe contemplar la posibilidad de conectar múltiples sondas para el censado simultáneo de temperatura y humedad. Esta se coloca en varios puntos de interés, tanto en una casa de curado tradicional como en una batería de curado controlado. La Fig. 1 muestra la estructura y dimensiones típicas de una casa de curado controlado y las posiciones para el despliegue de los sensores, la cual se toma como referencia para el diseño.

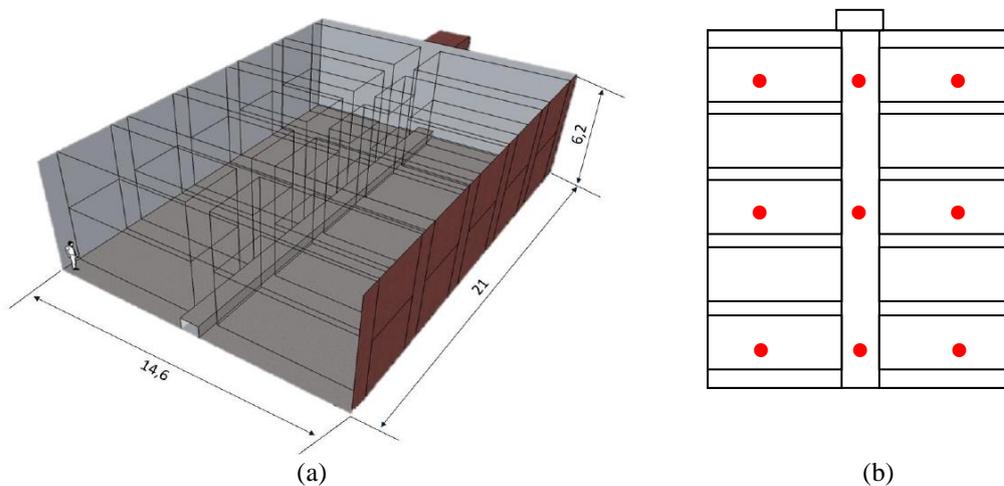


Figura 1: Esquema de una casa de curado controlado de diez aposentos, empleada como escenario de despliegue base para el diseño. (a) Estructura y dimensiones (b) Distribución aproximada de los nueve puntos de censado de temperatura y humedad requeridos.

### 4. INSTRUMENTO DE REFERENCIA

A partir de los requerimientos establecidos en el epígrafe anterior, el instrumento tendrá que tener al menos nueve conexiones disponibles para el despliegue de las sondas de sensado. Este hará de concentrador de la información proveniente de todos los sensores y deberá permitir la visualización de los valores actuales de cada uno de estos. Además, deberá ser capaz de transmitirlos para su registro remoto en la plataforma IoT en la nube.

Como requerimientos adicionales se parte de los rangos y las precisiones especificadas previamente para el sensor del equipo de referencia, tanto para la temperatura como para la humedad. Aunque estos no son los únicos aspectos que constituyen requisitos para la selección del sensor a emplear en el diseño. El protocolo de comunicación que soporte el sensor para el envío de la información hacia la unidad principal es muy importante. Debido a las grandes distancias de cable entre el equipo y los sensores, producto de las grandes dimensiones de las casas de curado, el tema de la comunicación entre la unidad principal y los sensores constituye un reto en el diseño del equipo desde el primer momento.

#### Esquema general del nodo sensor

A partir de las ideas y requerimientos iniciales establecidos, se propone un esquema general para el nodo sensor como el que se muestra en la Fig. 2. El equipo cuenta con una unidad principal, que contiene una pantalla para la visualización de los valores de temperatura y humedad localmente. Además, tres botones para la navegación en el menú de opciones que se visualiza también en la pantalla, el botón de encendido y nueve conexiones, mediante conectores M12, para agregar las nueve sondas de censado que se pueden conectar simultáneamente al equipo.

La unidad principal puede ser instalada en el exterior de la casa de curado, para evitar la necesidad de entrar en su interior para revisar los valores de temperatura y humedad localmente. Las nueve sondas se instalan en las posiciones establecidas y se alcanza cada una de ellas mediante un cable individual de cuatro hilos, con conexiones M12 en ambos extremos. La longitud del cable puede extenderse hasta que sea necesario para llegar a cada posición de censado.

Los cables se corren por el interior de la casa y sus longitudes pueden alcanzar hasta los 40m. Estas distancias de conexión son posibles gracias a que se emplea una interfaz de comunicación RS485 desde la unidad principal y convertidores de interfaz de RS485 a I2C. Estos últimos, también visibles en la Fig. 2, realizan la conversión de señales en el tramo final de conexión al sensor. Estas unidades convertoras, o agregadoras de sensores, se conectan a los sensores mediante otra sección de cable, con conexiones M12, pero mucho más corta, de hasta metro y medio. En esta sección el protocolo de comunicación es I2C, que implementan la mayoría de los sensores estudiados. Este es el motivo por el cual es necesario emplear los convertidores de interfaz para cubrir las distancias de cable hasta la unidad principal.

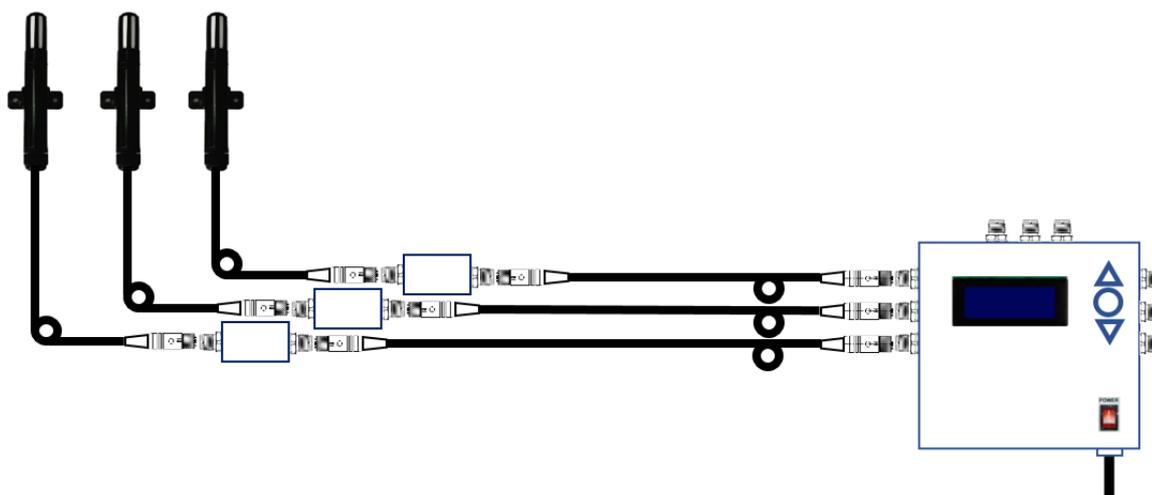


Figura 2: Estructura general del nodo sensor propuesto. Se muestran conectadas, tres de las nueve sondas de censado de temperatura y humedad que puede tener instaladas simultáneamente el equipo con sus respectivos convertidores de interfaz de comunicación de RS485 a I2C.

## Selección del sensor a emplear

Es imprescindible comentar el hecho de que el equipo de referencia, el Hygropalm HP23-AW-A, es fabricado por uno de los dos líderes mundiales en el desarrollo de instrumentos para la medición de humedad relativa, actividad del agua, punto de rocío y otros parámetros relacionados con la humedad del aire; la firma suiza ROTRONIC. El sensor HYGROMER IN-1, que emplea en muchos de sus instrumentos, es uno de los dos sensores, dentro de la amplia búsqueda realizada, capaces de ofrecer exactitudes de  $\pm 0.8\%HR$  en el rango de 0 a 100%HR.

El otro sensor que ofrece esos niveles de exactitud es el HUMICAP 180C<sup>5</sup>, producido por VAISALA, compañía finlandesa fundada en 1936, con casa matriz en Helsinki, Finlandia. Estos dos fabricantes, ROTRONIC y VAISALA, son los únicos que ofrecen instrumentos con sensores capaces de dar exactitudes de  $\pm 0.8\%RH$  y  $\pm 0.1^{\circ}C$  simultáneamente, son los líderes mundiales absolutos en este campo.

En el estudio realizado, que abarcó más de cuarenta y tres sensores de una decena de fabricantes, se pudo constatar lo siguiente:

1. Los fabricantes ROTRONIC y VAISALA, no ofrecen sus sensores a la venta de forma independiente, sino formando parte de sus instrumentos correspondientes, en soluciones propietarias a altos precios.

<sup>5</sup> Sensor de humedad capacitiva de película fina de Vaisala. <https://www.vaisala.com/es/vaisala-humicap-technology> (accedido el 17 de diciembre de 2023).

2. La mayoría de los sensores de humedad y temperatura estudiados ofrecen exactitudes a partir de  $\pm 1.5\%RH$  o  $\pm 1.8\%RH$ , que es lo mejor que se puede encontrar solo en contados casos.
3. El valor de exactitud más común encontrado en los sensores revisados es de  $\pm 2.0\%RH$  y de ahí hacia arriba:  $\pm 3.0\%RH$ ,  $\pm 4.0\%RH$ , ya que son fabricados en su mayoría, con algunas excepciones, para higrómetros domésticos y de monitoreo de humedad ambiental donde estos niveles de exactitud son suficientes.

Tabla 1: Resumen de características de los sensores de humedad y temperatura de mayor exactitud.

Sensor	Temperatura				Humedad				Alimentación y salida		
	Rango [°C]	Exactitud	Resolución	$\tau$	Rango [%RH]	Exactitud	Resolución	$\tau$	Vdd [V]	Salida	Tipo
SHT25	-40 ... 125	$\pm 0.2$ °C	0.01 °C	5 a 30 s	0 ... 100	$\pm 1.8$ %	0.04 %	8 s	2.1 ... 3.6	Digital	I2C
SHT35	-40 ... 125	$\pm 0.2$ °C	0.015 °C	> 2 s	0 ... 100	$\pm 1.5$ %	0.01 %	8 s	2.4 ... 5.5	Digital	I2C
SHT75	-40 ... 125	$\pm 0.3$ °C	0.01 °C	5 a 30 s	0 ... 100	$\pm 1.8$ %	0.05 %	8 s	2.4 ... 5.5	Digital	2w serie
SHT85	-40 ... 105	$\pm 0.1$ °C	0.01 °C	> 2 s	0 ... 100	$\pm 1.5$ %	0.01 %	8 s	2.1 ... 5.5	Digital	I2C
HS310x	-10 ... 80	$\pm 0.2$ °C	0.015 °C	2 s	0 ... 100	$\pm 1.5$ %	0.01 %	4 s	2.3 ... 5.5	Digital	I2C
TH10	-40 ... 90	$\pm 0.2$ °C	0.015 °C	2 s	0 ... 100	$\pm 1.5$ %	0.01 %	86 s	2.4 ... 5.5	Digital	I2C

De la larga lista de sensores analizados, solo ofrecen exactitudes mejores que  $\pm 2.0\%RH$  seis de ellos, mostrados en la Tabla 1. De estos, el que reúne las mejores prestaciones y se selecciona para su empleo es el SHT85 [10]. Este es el único de los sensores analizados capaz de ofrecer exactitudes de  $\pm 1.5\%RH$  y  $\pm 0.1^\circ C$  simultáneamente, la exactitud en los valores de temperatura del resto de los sensores es de  $\pm 0.2^\circ C$  o superior. Adicionalmente, ofrece resoluciones de  $0.01\%RH$  y  $0.01^\circ C$ , las más bajas observadas, soporte de comunicación I2C y voltaje de alimentación hasta 5.5V.

Más importante aún, como se muestra en la Fig. 3, el SHT85 se comercializa en una placa PCB especialmente diseñada para su montaje en las carcasas que se emplean en las sondas de censado de humedad y temperatura disponibles comercialmente. El chip del sensor viene integrado en una pequeña placa para facilitar su instalación y uso, esto es un elemento muy importante con vistas a la implementación del equipo terminado. Este sensor ha sido recientemente empleado en la confección de un medidor de actividad del agua de “bajo costo” y caracterizado experimentalmente con excelentes resultados, los cuales han sido publicados en [11] el pasado año 2021.



Figura 3: Sensor SHT85. (a) Comercializado en placa PCB que facilita su montaje en las sondas de censado de humedad y temperatura disponibles comercialmente. (b) Montado en el interior de una carcasa protectora de acero sinterizado para su empleo.

## Diseño de la unidad principal

Como se presentó en la Fig. 2, el sistema consta de una unidad principal o nodo sensor. En este se encuentra el controlador con todas las interfaces para la conexión de los sensores, las interfaces de comunicación, así como una pantalla para la visualización local de parámetros y la selección de funciones. La estructura interna de la unidad principal se muestra en la Fig. 4.

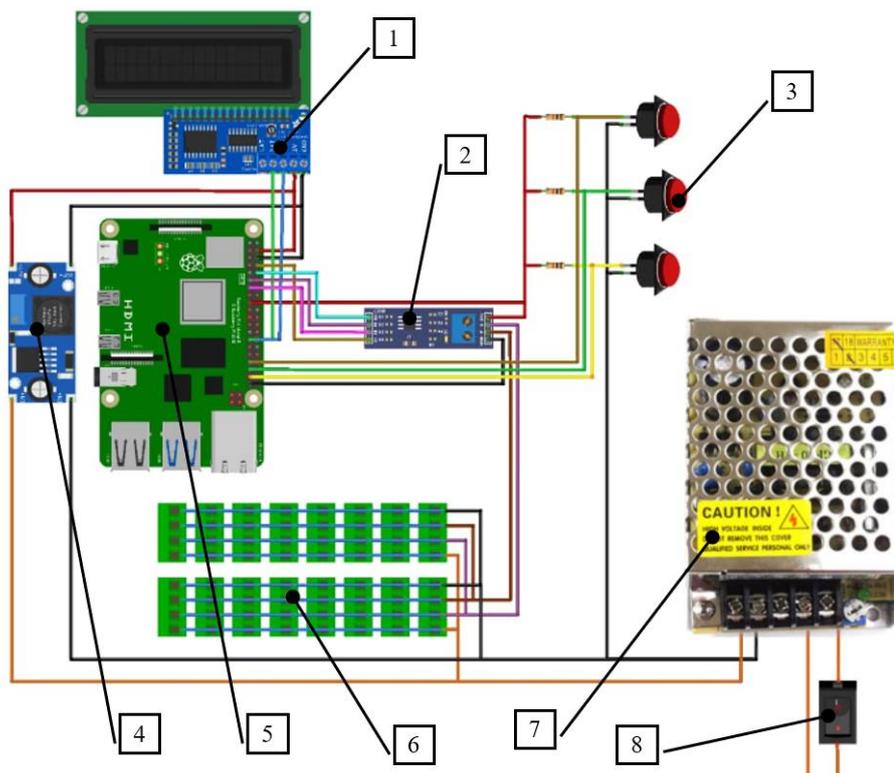


Figura 4: Esquema eléctrico propuesto para la unidad principal. (1) LCD Display I2C de 20x4 (2) Módulo MAX485 (3) Botones pulsadores (4) Convertor DC-DC LM2596 (5) Raspberry Pi 3 modelo B+ (6) Módulo de distribución de 8x4 (7) Fuente de alimentación 9V/5A (8) Interruptor 12/220VAC.

El controlador de la unidad principal lo constituye una placa Raspberry Pi 3 modelo B+ (RPi). Se emplea un convertidor DC-DC, el LM2596, para llevar los 9V de la fuente de alimentación a los 5V que emplea la RPi. Se utiliza una fuente de 9V/5A para poder alimentar todas las sondas de censado desplegadas desde la unidad principal. La pantalla LCD para la visualización local de parámetros y menú se conecta a los puertos I2C de la RPi, pines 27 y 28. Los tres botones, para la selección de funciones, se conectan a los puertos GPIO13, GPIO19 y GPIO26.

Se aprecia también en la Fig. 4 el uso de una pequeña placa de extensión, identificada con el no.2, el módulo MAX485. Este permite el soporte de la interfaz de comunicación con los sensores distantes. Esta placa y los botones se alimentan con 3.3V, voltaje aportado por la propia placa RPi. Los dos módulos de distribución enchufables de 8 posiciones y 4 pines (no.6 en la Fig. 4), son los que permiten materializar el bus RS485 en el equipo, para la conexión de hasta 16 sondas de humedad y temperatura. De cada una de estas posiciones se conecta un cable interno a la unidad principal, para llevar los 4 hilos del bus RS485 hasta los sockets de conexión M12, a los que se conectan exteriormente los cables de larga longitud para alcanzar los sensores.

### Diseño de los módulos conversores de interfaz

En la Fig. 5 se muestra la estructura de los conversores de interfaz. Estos cumplen con la función de convertir la interfaz de comunicación de RS485 a I2C, para el intercambio de señales entre la unidad principal y los sensores. Estas unidades emplean un Arduino Nano y una placa MAX485 alimentados con 9V y 3.3V respectivamente. Los 9V se inyectan por el cable de conexión desde la unidad principal. La interfaz de comunicación I2C no soporta grandes distancias de cable, por esta razón es necesario convertirla a RS485. Se tendrán tantas unidades como sensores se vayan a desplegar, como máximo nueve inicialmente.

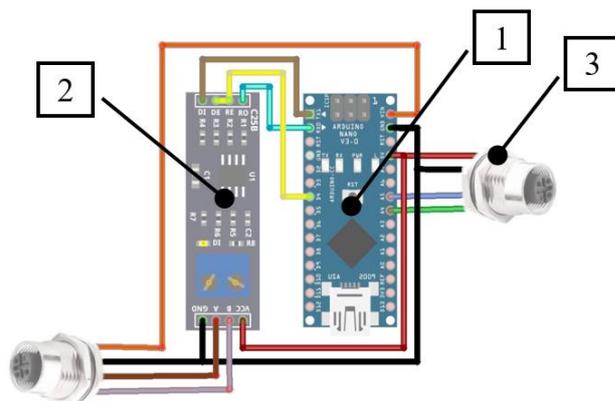


Figura 5: Esquema eléctrico interno de las unidades de conversión de interfaz.  
(1) Arduino Nano (2) Módulo MAX485 (3) Conector hembra M12.

## Variantes previstas para las sondas de muestreo

Las variantes comerciales de este tipo de instrumento son suministradas por lo general con dos tipos de sonda para el censado de temperatura y humedad. Una de ellas se destina a la medición de estos parámetros en el ambiente, el otro tipo se emplea para tomar muestras en el interior de los pilones de tabaco en fermentación, por ejemplo, o durante el proceso de añejamiento. Este segundo tipo de sondas son las llamadas sondas de inserción. Afortunadamente, el primer tipo de sondas puede ser adquirida directamente ya que está disponible en sitios de venta electrónica como [12], [13].

El otro tipo de sonda, de inserción, son de aplicación más especializada y no se encuentran disponibles comercialmente como las primeras, al menos no independientemente. Para que el equipo cuente con una sonda de este tipo es necesario proponer un diseño alternativo.

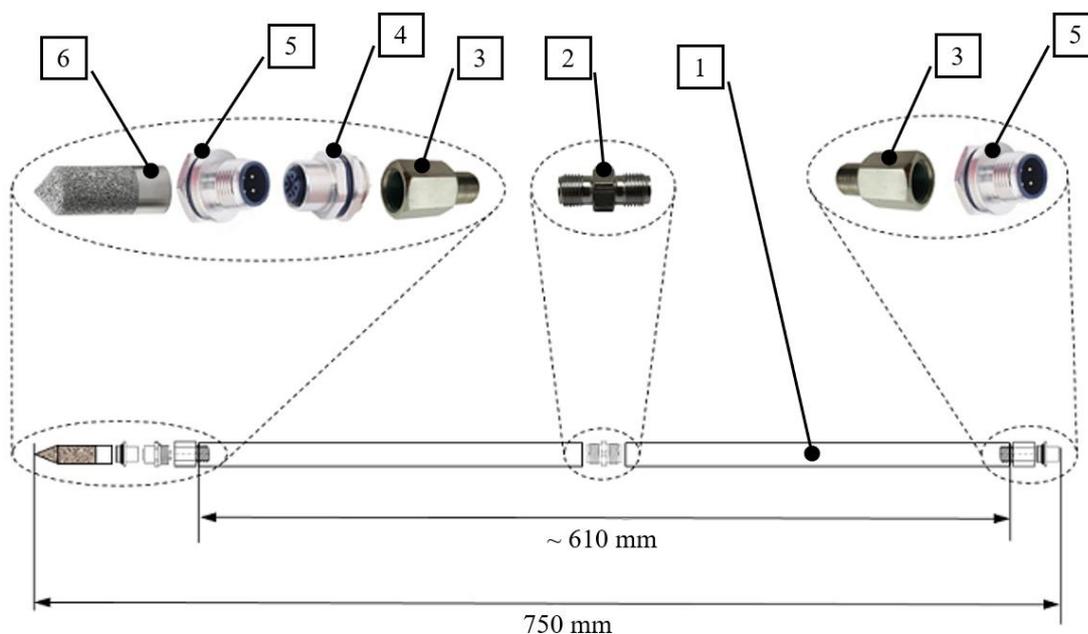


Figura 7: Propuesta de diseño alternativo de sonda de inserción para el muestreo de temperatura y humedad en biomasa de tabaco. (1) Tubo cromado de 300 o 500mm (2) Extensor M10 macho-macho (3) Adaptador M12 hembra a M10 macho (4) Conector hembra M12 (5) Conector macho M12 (6) Carcasa de acero sinterizado protectora de sensor.

A partir de partes y piezas que si están disponibles comercialmente se ha propuesto la variante de sonda de inserción que se muestra en la Fig. 7. Los tubos que forman el cuerpo de la sonda pueden venir en longitudes de 300mm o hasta de 500mm, lo cual da cierta libertad para armar sondas de diferentes tamaños en función de las necesidades que se tengan. Uniendo más o menos secciones tubulares se pueden lograr sondas de la longitud que se requiera. La solución que se muestra en la Fig. 7 es una propuesta, que tiene poco más del doble de la longitud de la sonda comercial de referencia, la HC2-HP28 de ROTRONIC con longitud de 280mm. Con una sección tubular y los componentes adecuados se puede armar una sonda próxima en longitud a la de referencia, de aproximadamente 400mm de longitud, esta flexibilidad se logra con el diseño propuesto. El resto de los elementos que la conforman son adquiribles también en los sitios de venta electrónica mencionados con anterioridad.

## Arquitectura general del sistema

La Fig. 8 muestra la arquitectura general del sistema propuesto. Consta de los termohigrómetros diseñados, que constituyen los nodos sensores y que pueden ser más de uno, tributando información de monitoreo de diversos procesos de curado simultáneamente.

Debido a las características de esta aplicación en concreto, las casas y baterías de curado de tabaco pueden ubicarse por lo general en locaciones remotas o poco pobladas, donde las variantes de conectividad disponibles pueden ser limitadas. Es por eso que el sistema propuesto brinda varias posibilidades de conexión a la red, tanto por *WiFi* o por una conexión de red *Ethernet*. Ambas conexiones están disponibles a nivel de la placa RPi, o incluso el sistema podría conectarse a través de la red móvil, donde opcionalmente se puede equipar el módulo principal con una placa de extensión adicional que permita dicha conexión. Esta placa en particular no se ha incluido en el diseño en esta versión, aunque podría incorporarse si fuera necesario.

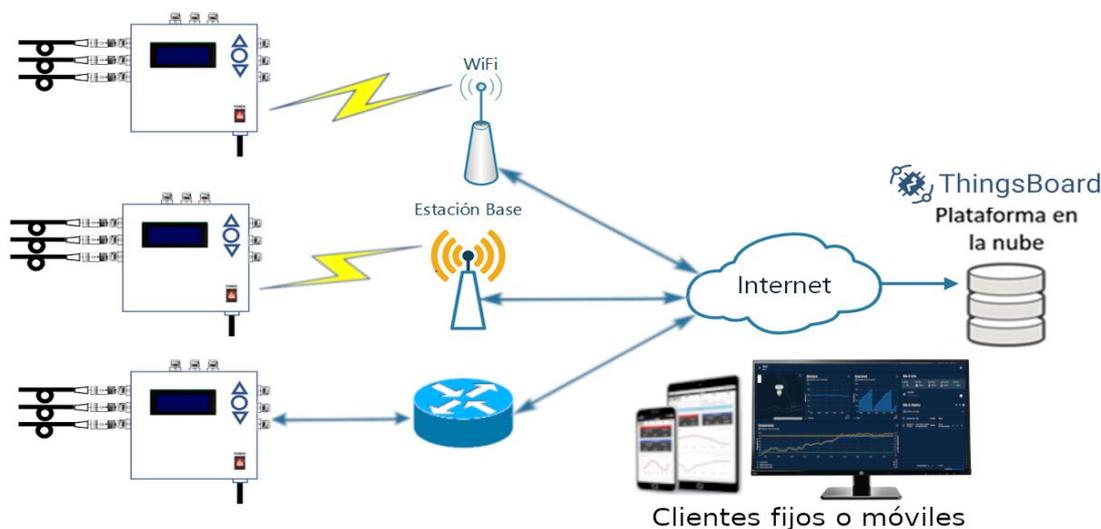


Figura 8: Arquitectura general del sistema propuesto. La versatilidad de la propuesta permite que la información a registrar sea subida a la nube ya sea empleando una conexión WiFi, por la red móvil celular o mediante una conexión de red LAN, según la disponibilidad en el sitio de despliegue.

## La plataforma de IoT en la nube

Mediante la variante de conectividad que esté disponible en el sitio, se establece la comunicación entre el nodo intermedio, constituido por la propia placa RPi, que agrupa además las funciones de puerta de enlace y cliente MQTT<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Protocolo de mensajería estándar de OASIS para IoT. MQTT se utiliza en una amplia variedad de industrias, como automotriz, fabricación, telecomunicaciones, petróleo y gas, etc.

contra la plataforma en la nube. Dicha plataforma debe ser accedida mediante cualquier dispositivo, fijo o móvil, con conexión a la red para realizar tareas de monitoreo de los procesos de curado, en tiempo real.

La selección de la plataforma de IoT puede llegar a ser compleja, producto de una infinidad de factores a tener en cuenta como: protocolos de transporte que permiten, instalación en nube privada, clientes móviles, capacidad de procesamiento, entre otras. Para la adquisición y persistencia de las variables del proceso de curado se selecciona la plataforma *ThingsBoard*. Esta permite la recolección de datos, procesamiento, visualización y gestión de dispositivos. La conexión de los dispositivos es a través de protocolos IoT estándar de la industria y admite implementaciones en la nube y locales. Combina escalabilidad, tolerancia a fallas y rendimiento para no perder datos. *ThingsBoard* puede ser gestionado vía web y mediante una aplicación móvil desarrollada tanto para Android como iOS disponible en GitHub<sup>7</sup>.

### Crterios de seguridad a emplear en la seguridad de la información

De la información que generan los nodos sensores depende la calidad de un producto clave para el país. La fabricación, modificación o eliminación no autorizada de alguno de estos pudiera provocar grandes pérdidas para la economía cubana. Por este motivo se tiene una especial importancia la seguridad de los datos desde que se generan hasta que se almacenan en la plataforma en la nube. En este sentido se presentan diferentes niveles para garantizar la seguridad de los datos, la cual se muestra en la Tabla 2. Los datos son encriptados desde que se transmiten hasta que son guardados en la base de datos de la plataforma.

Tabla 2: Niveles de seguridad de la información aplicados.

Nivel	Dispositivos	Usuarios
1	VPN	VPN (Administración)
2	MQTTS (SSL/TLS)	HTTPS (SSL/TLS)
3		Visualización por roles
4	Restricción de acceso a la base de datos	

La comunicación, ya sea de un dispositivo (RPI) o usuario, se encuentra bajo protocolos de cifrado para lograr la confiabilidad de la información que se transmite. Las Redes Privadas Virtuales (VPN, por las siglas del término en inglés, Virtual Private Network) son de uso obligatorio en los dispositivos ya que estos generan los datos, los cuales pueden ser alterados por un atacante en la ida hacia el servidor (ver Nivel 1 de la Tabla 1). Para su implementación se emplea el programa OpenVPN, de código abierto, tanto en el cliente como en el servidor. En el segundo nivel se define el protocolo que se emplea para la transmisión de la información entre la plataforma y los dispositivos/usuarios, MQTTS/HTTPS respectivamente, ambos emplean métodos de cifrado de los datos. El tercer nivel es para los usuarios, estos solo podrán visualizar la información relacionada con el proceso de monitoreo que les corresponda. El cuarto nivel limita el acceso a la base de datos. El servidor será la única entidad con este privilegio. Se emplea el algoritmo PBKDF2 junto con la función hash SHA256 para la autenticación. Adicionalmente, en el servidor se implementa un cortafuegos para evitar la exposición a Internet de puertos vulnerables o abiertos innecesariamente. Solo se aceptan las conexiones a través de los puertos precisos para la implementación de la plataforma. Esta función se realiza con la herramienta *iptables*.<sup>8</sup>

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE SIMULACIÓN

En [8] se realiza una simulación a través de una maqueta diseñada a escala de una casa de curado controlado de las hojas de tabaco. En esta se pone en funcionamiento el sistema, siendo capaz de medir de forma ininterrumpida los parámetros medioambientales de temperatura y humedad relativa. Se visualizan los valores en tiempo real y de forma sencilla de interpretar. También se generan alertas y alarmas según el criterio definido. En la Fig. 9 se muestra cómo se visualizan los datos en la plataforma. Se puede apreciar una vista del histórico mediante gráfica y el último valor adquirido.

<sup>7</sup> [https://github.com/thingsboard/flutter\\_thingsboard\\_app](https://github.com/thingsboard/flutter_thingsboard_app)

<sup>8</sup> Programa de línea de comandos que se utiliza para configurar el cortafuegos del kernel de Linux.

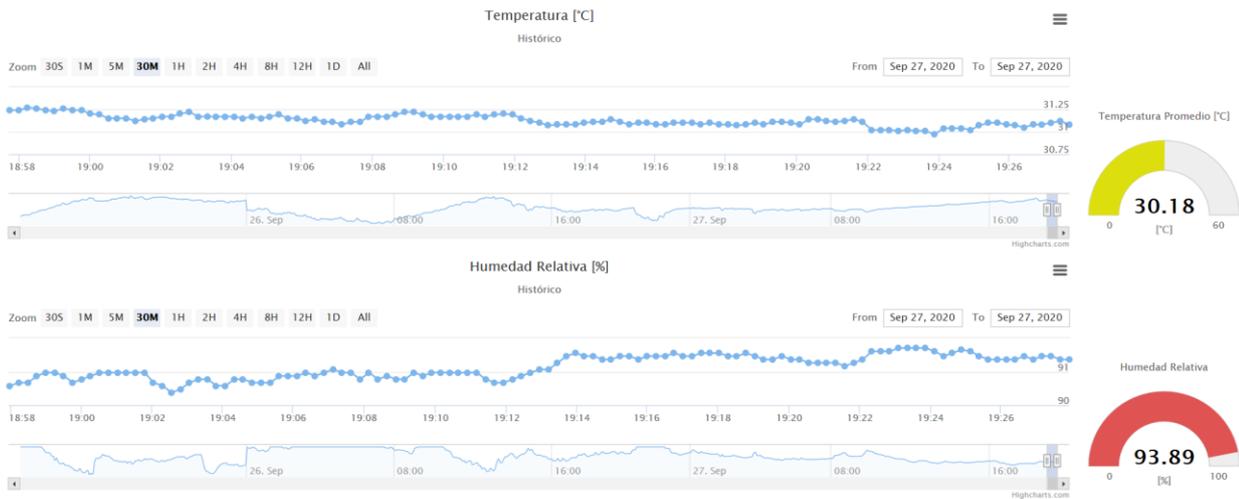


Figura 9: Visualización desde la plataforma de los datos adquiridos por un sensor del sistema.

En la Fig. 10 se aprecia la distribución de temperatura en distintos intervalos de tiempo. El código de color empleado sugiere el azul como temperaturas bajas y el naranja como las altas.

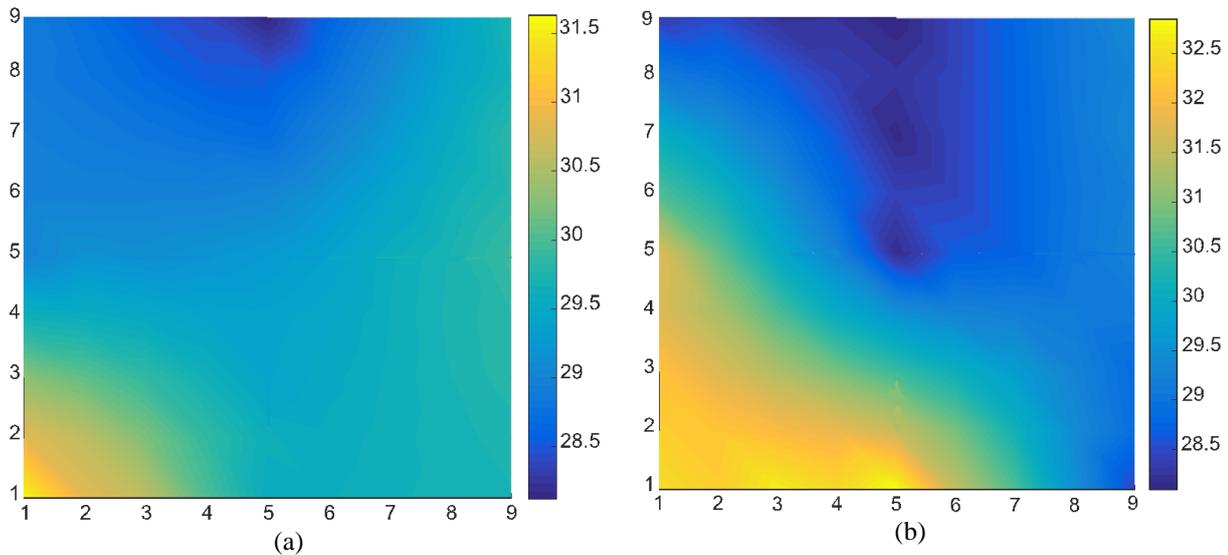


Figura 10: Distribución de temperatura en la maqueta en distintos intervalos.  
a) Tiempo inicial  $t_0$ . b) En  $t_0 + 3\Delta t$ .

En esta figura se observa que dicha distribución no es homogénea, siendo la esquina inferior izquierda la más cálida. El estudio de los datos adquiridos permite analizar las variaciones de los parámetros medioambientales en todo el volumen de una casa de curado.

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone un diseño alternativo de sistema de monitoreo en tiempo real, empleando técnicas de IoT, para su uso en el control y estudio de parámetros de los procesos de curado controlado de tabaco. El aporte fundamental radica en que la propuesta de equipo presentada puede ser materializada a costos significativamente inferiores a los de instrumentos comerciales con niveles de exactitud similares, que se emplean hoy en Cuba. Como elemento

ventajoso con respecto a las variantes comerciales, además del costo inferior, se tiene el hecho de que el diseño propuesto permite la conexión simultánea de hasta nueve sondas para el sensado de humedad y temperatura, lo cual facilita a productores e investigadores llevar de forma más precisa el control del proceso de curado de tabaco y realizar estudios sobre las variaciones de estos parámetros a lo largo de todo el proceso. Adicionalmente, la funcionalidad de registro remoto de la información censada en una plataforma IoT en la nube, en tiempo real, constituye un aporte importante y un incremento en el nivel de prestaciones ofrecidas por el diseño propuesto en comparación con el equipamiento importado del que se dispone actualmente en el país. La presente propuesta está siendo evaluada por el consejo científico del IIT, de resultar factible luego de la realización de pruebas al prototipo inicial, podría generalizarse su uso por productores y centros de investigación en el país, contribuyéndose de esta forma a la sustitución de importaciones y a la reducción de costos en divisas por este concepto en la industria tabacalera cubana.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al MSc. Noel A. Hernández González, investigador auxiliar y jefe de proyectos de investigación y desarrollo del IIT, por su experiencia, el tiempo dedicado y las numerosas atenciones y recomendaciones recibidas de su parte para la confección de la propuesta de equipo que se presenta en este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] ROTRONIC, «Humidity sensor Hygromer IN-1. The perfect sensor for industrial applications.» Accedido: 17 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pdf.directindustry.com/pdf/rotronic-ag/hygromer-in-1/14766-717309.html>
- [2] ROTRONIC, «Humidity sensor HygroMer HT-1. The perfect sensor for industrial applications.» Accedido: 17 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.rotronic.com/pub/media/productattachments/files/5/9/59043e\\_datenblatt\\_sensor\\_ht-1.pdf](https://www.rotronic.com/pub/media/productattachments/files/5/9/59043e_datenblatt_sensor_ht-1.pdf)
- [3] ROTRONIC, «Humidity sensor HygroMer HH-1/SK. The perfect sensor for rough chemical environments.» Accedido: 17 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.rotronic.com/pub/media/productattachments/files/5/9/59012e\\_sensor\\_hh-1\\_sk\\_1.pdf](https://www.rotronic.com/pub/media/productattachments/files/5/9/59012e_sensor_hh-1_sk_1.pdf)
- [4] H. Zhao, Z. Wang, Y. Li, y M. Yang, «Single-sided and integrated polyaniline/ poly(vinylidene fluoride) flexible membrane with micro/nanostructures as breathable, nontoxic and fast response wearable humidity sensor», *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 607, pp. 367-377, feb. 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.08.214.
- [5] H. Viles, S. Orr, y H. Zhang, «A Comparative Evaluation of Methods to Monitor Moisture in Historic Porous Masonry Materials», Historic England, London, UK, Report, Nov. 2022.
- [6] A. Sabuncu y K. Thornton, «Leveraging ThingsBoard IoT Service for Remote Experimentation», American Society for Engineering Education, jun. 2022.
- [7] D. Mohapatra y B. Subudhi, «Development of a Cost-Effective IoT-Based Weather Monitoring System», *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 11, n.º 5, pp. 81-86, sep. 2022, doi: 10.1109/MCE.2021.3136833.
- [8] A. B. Reyes y D. B. Rojas, «Sistema distribuido de IoT para la monitorización de la temperatura y la humedad en una casa de curado controlado de tabaco.», 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.27652.86406/1.
- [9] A. B. Reyes y D. B. Rojas, «Sistema IoT para monitoreo y control remoto del proceso de curado de tabaco de alto rendimiento», *Tono Rev. Téc. Empresa Telecomunicaciones Cuba SA*, vol. 18, n.º 1, Art. n.º 1, ago. 2022.
- [10] P. F. Pereira y N. M. M. Ramos, «Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments», *J. Build. Eng.*, vol. 60, p. 105151, nov. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105151.
- [11] Gilda Sagar S, Schober Joseph M, y McPherson Timothy, «Design and Performance of an Inexpensive Water Activity Meter», *Int. J. Pharm. Compd.*, vol. 25, n.º 1, pp. 48-51, feb. 2021.
- [12] «Cable de línea de sonda de Sensor de temperatura, Sensor de humedad, longitud de 1M, cabeza plana puntiaguda, SHT21, SHT40, SHT30, SHT31, SHT35, SHT11, SHT20, OEM - AliExpress». Accedido: 17 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/1005002861340818.html?spm=a2g0o.detail.1000023.6.651678c4PljV6M&gatewayAdapt=glo2esp>
- [13] «Taidacent Outdoor 3.3V 5V IIC I2C Digital Temperatura Humedad Atmosférica Barométrica Sensor de Presión de Aire Sonda BME280 (3.3 ft, Negro) : Industrial y Científico | Amazon.com». Accedido: 17 de diciembre de 2023.

## SOBRE LOS AUTORES

Dioen Biosca Rojas, Dr. C. profesor titular adjunto de la Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, [dioenbiosca@tele.cujae.edu.cu](mailto:dioenbiosca@tele.cujae.edu.cu), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5880-6718>

Ariel Baloiira Reyes, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, [ariel@tele.cujae.edu.cu](mailto:ariel@tele.cujae.edu.cu), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6021-325X>

## CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Autor 1:** 51% concepción, preparación, creación, desarrollo y organización del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo.
- **Autor 2:** 49% concepción, preparación, creación, desarrollo y organización del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

