

# Sistema IoT para monitoreo y control remoto del proceso de curado de tabaco de alto rendimiento

## IoT System to Monitor and Remotely Control the Top-quality Tobacco Curing Process

Ing. Ariel Balóira Reyes <sup>1\*</sup>, Dr.C. Dioen Biosca Rojas <sup>2</sup>

Recibido: 11/2021 | Aceptado: 01/2022

### Palabras clave

IoT  
Monitoreo  
Control remoto  
Arduino  
Raspberry Pi

### Resumen

El curado de las hojas de tabaco es un proceso de secado en condiciones controladas para que las hojas de las plantas mantengan el mayor tiempo posible su actividad biológica, a fin de conseguir un producto de alta calidad. La cura controlada consiste en emplear un sistema automatizado que permita a los operadores establecer un ambiente dentro de la casa estable con respecto a los tres factores climáticos que mayor influencia ejercen en el proceso de curado: la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire dentro de la casa. La calidad del producto final depende, en última instancia, de los procedimientos de monitoreo y control que se ejercen sobre estos factores. La mayoría de las casas de curado existentes requieren la presencia de un operador a tiempo completo en sitio. Se puede tener información de las variables del proceso en tiempo real, mediante instrumentos de mediciones, pero no de forma remota. Se propone un sistema que emplea las tecnologías del IoT para el monitoreo y control de los parámetros medioambientales en el volumen de la casa de curado. Con el empleo de IoT es posible proporcionar a la casa de curado la inteligencia suficiente para mantener el ciclo de secado en los parámetros óptimos, estudiar la distribución volumétrica de los parámetros mencionados y notificar a los operadores de cualquier variación de estos, para facilitar la toma de acciones preventivas o correctivas tempranas que sean necesarias.

### Abstract

Curing the tobacco leaves is a drying process under controlled conditions to make the tobacco plant leaves keep its biological activity as long as possible in order to obtain a top-quality product. The controlled curing consists in the use of an automated system allowing the operators to establish a steady environment inside the tobacco barn regarding the three weather factors which have a greater impact on the curing process: temperature, relative humidity and air flow inside the tobacco barn.

<sup>1\*</sup> Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), La Habana, Cuba. ariel@tele.cujae.edu.cu

<sup>2</sup> Empresa Mixta COPAL S.A., La Habana, Cuba. biosca@copalnet.co.cu

## Keywords

IoT  
Monitoring  
Remote Control  
Arduino  
Raspberry Pi  
Tobacco Curing

The quality of the final product ultimately depends on monitoring and control procedures on these factors. Most of the existing curing-oriented tobacco barns require presence of a full-time operator in situ. Information on the factors included in the process can be gathered in real time by using measurement instruments, but not remotely. A system using IoT technologies is proposed for monitoring and controlling environmental parameters across the curing-oriented tobacco barns. By using IoT, it is possible to equip the curing-oriented tobacco barns with enough intelligence to keep the drying cycle at their optimum parameters, study the volume distribution of the above-mentioned parameters and notify operators of any variation to facilitate early preventive or corrective action taking as may be needed.

## Introducción

La confección del tabaco comercial cuenta con varios pasos: el cultivo, el curado, la fermentación, escogida y clasificación de las hojas, entre otros. En el proceso de curado, las hojas se introducen en cámaras (casas) donde se controla la humedad y la temperatura durante un periodo determinado. Del monitoreo y control preciso del proceso, depende la calidad del producto final.

Tradicionalmente, la información de temperatura y humedad relativa de la casa de curado se reduce a un valor medido con instrumentos en un único punto dentro del gran volumen de la casa, esto no permite tener información acerca de la distribución volumétrica de temperatura y humedad relativa en su interior. En este sentido se inserta el trabajo desarrollado, al proponer un sistema automatizado para monitorear y controlar el comportamiento de estas dos variables medioambientales dentro de una casa de curado controlado.

En la propuesta se emplean las tecnologías y conceptos del Internet de las Cosas (IoT, siglas del término en inglés, *Internet of Things*) (ITU, 2012). La solución se basa en el empleo de *hardware* y *software* libre para cada uno de los componentes del sistema, como son las placas de desarrollo libre Arduino, ordenadores de placa simple Raspberry Pi, protocolos de comunicación abiertos y una plataforma de monitorización de desarrollo propio. Para probar y validar las funcionalidades del sistema se confecciona una maqueta a escala del escenario real de despliegue.

## Materiales y métodos

Se emplearon los métodos científicos de observación y experimentación que realizan una intervención

iterativa hasta lograr los objetivos propuestos. Se realizó un estudio sobre la teoría del proceso de monitorización y control durante el curado de las hojas de tabaco y el estado del arte en la materia. Luego se pasó a la primera etapa de diseño que se fue complementando con sucesivas iteraciones retroalimentadas por las pruebas en una maqueta construidas a ese fin. Por último, se depura la integración del *software* y la plataforma de gestión web con el *hardware* disponible que está compuesto por las placas de Arduino, un ordenador de placa simple Raspberry Pi y los sensores.

## Resultados y discusión

El paso preliminar constituye realizar un análisis de las diferentes variables que componen el proceso de curado de las hojas de tabaco. Con la estructura interna de una casa de curado, se diseña un sistema capaz de medir y accionar sobre las variables medioambientales para mantener estable el proceso de curado. Dicho proceso de diseño se explica a continuación.

### Estructura de las casas de curado

Las casas de curado existentes son diversas, pueden ser tradicionales o industriales, normalmente de fabricantes establecidos. Todas ellas comparten una estructura similar consistente en un pasillo central al que acompañan, a ambos lados de forma longitudinal, una serie de cubículos o cámaras llamados “aposentos” en los que se colocan los cujes con las hojas de tabaco en varios niveles, durante el periodo que dura el proceso de curado. La estructura típica de una casa de curado controlado puede apreciarse en las figuras 1 y 2 (ambas de elaboración propia).

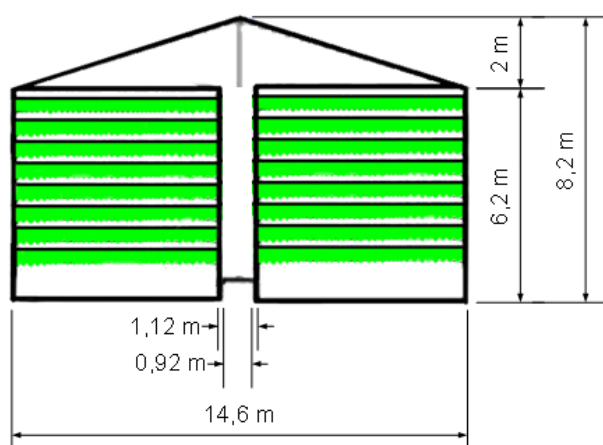


Figura 1. Vista frontal y dimensiones de una casa de curado típica

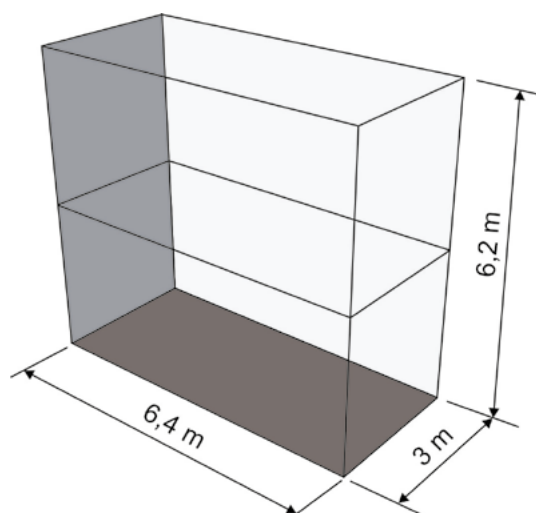


Figura 3. Dimensiones aproximadas de un aposento estándar para el almacenamiento de las hojas de tabaco durante el proceso de curado

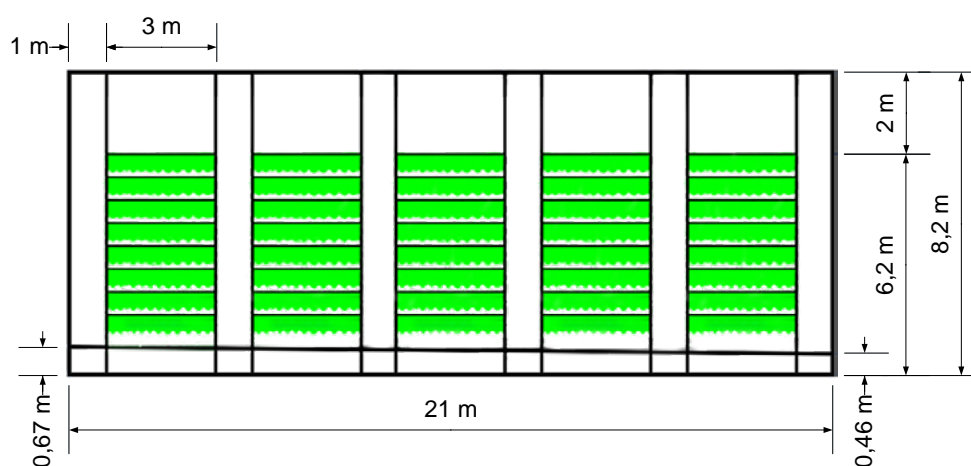


Figura 2. Vista lateral y dimensiones de una casa de curado típica de diez aposentos

La representación de las figuras anteriores corresponde a una casa de curado de diez aposentos, aunque, prácticamente, pueden encontrarse también de ocho o doce aposentos para el almacenamiento de las hojas de tabaco. En cualquier caso, el sistema propuesto puede adaptarse, como se verá a continuación a cualquier disposición estructural posible de casa de curado. Aproximadamente en cualquiera de los casos, los aposentos tienen unas dimensiones cercanas a las que se muestran en detalle en la figura 3, de elaboración propia. El aposento constituye el objeto sobre el que se despliegan los sensores del sistema en distintas configuraciones posibles, con el objetivo de recopilar la distribución de temperatura y humedad del volumen de hojas de tabaco almacenado durante el proceso de curado.

### Fases del proceso de curado controlado del tabaco

El proceso de curado del tabaco consta de tres fases que son:

- El amarillamiento.
- El curado del limbo.
- El secado de paños y venas.

Cada una de estas fases tiene una duración establecida y unos rangos de temperatura y humedad que deben garantizarse estrictamente durante todo el proceso con el objetivo de lograr la hoja de tabaco con la que se fabrican los mejores puros del mundo: los habanos cubanos. La figura 4, de elaboración propia, muestra las fases del proceso de curado y los rangos de temperatura y humedad establecidos para cada una de estas.

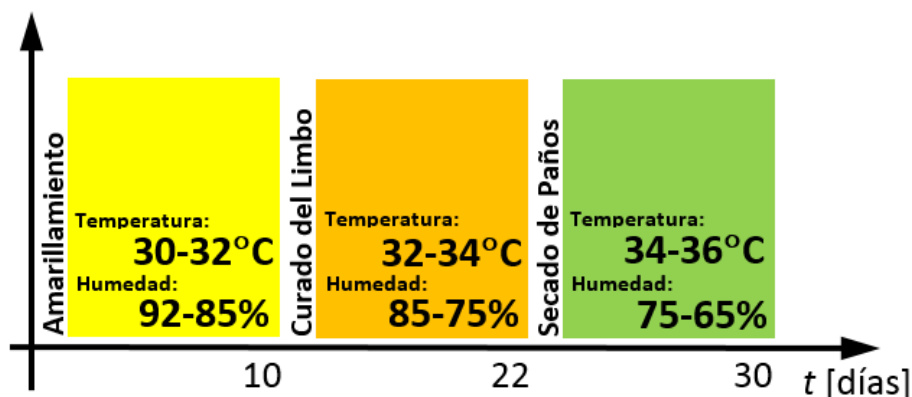
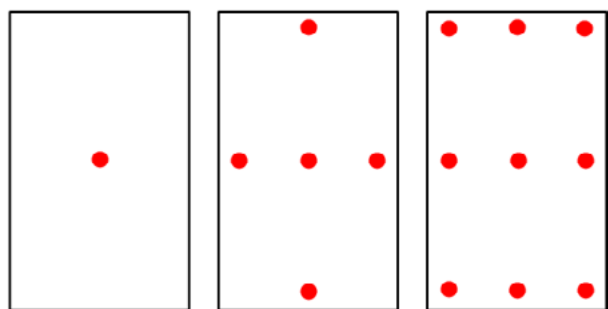


Figura 4. Fases del proceso de curado controlado del tabaco y rangos de temperatura y humedad requeridos

El curado controlado posibilita regular las condiciones ambientales en cada fase con el consiguiente incremento de la calidad de la hoja. Es posible duplicar y triplicar los porcentajes de “capas” de exportación cuando se compara esta técnica con la del curado tradicional.

### Arquitectura del sistema propuesto

El módulo elemental del sistema es el aposento, donde se almacenan las hojas de tabaco, y donde se requiere distribuir los sensores para la toma de las lecturas de temperatura y humedad relativas. En cada aposento se definen tres capas horizontales: una baja, una media y una alta. En cada una de estas se pueden disponer los sensores en una de tres posibles configuraciones, como muestra la figura 5, de elaboración propia.



Todos los sensores de cada una de las cámaras tienen que ser agregados por el sistema. Para ello se realiza una distribución de cableado desde el techo de la casa de curado. Los cables suspendidos con los sensores adosados en las puntas, sobre los cujes soportan los mazos de hojas de tabaco, proporcionando una estructura flexible que permite el fácil

despliegue y recogida de los sensores entre procesos de curado.

Para el proceso de curado controlado del tabaco se necesita poder medir temperatura en el rango de 30°C a 36°C y humedad relativa desde 65% a 92%. Teniendo en cuenta estos requisitos, se realiza una ponderación de nueve sensores de temperatura y humedad relativa existentes en el mercado internacional, de ellos se elige el PFMini72 (Baloira y Biosca, 2020).

El PFMini72 es una sonda de aire-gas de grado industrial la cual cuenta con protección contra el ingreso de polvo y chorros de agua de gran caudal. El sensor cuenta con dos tipos de conexiones eléctricas de las cuales se recomienda el cable de salida de cuatro hilos, dos para la alimentación y dos salidas de voltaje analógico (humedad relativa y temperatura, de 0 a 1V cada una) (Instrumart, 2021). La estructura de agregación de sensores para una casa de curado típica de diez aposentos se muestra en la figura 6, de elaboración propia.

### Diseño del Nodo Sensor

En la recomendación de la UIT-T Y.4105 se define un Nodo Sensor (en lo adelante NS) como un dispositivo compuesto de sensor(es) y opcionalmente de accionador(es) con capacidades de procesamiento de los datos detectados e interconexión (ITU, 2010).

Para realizar dicha función se emplea la placa de desarrollo libre Arduino<sup>1</sup>. Estas placas tienen la capacidad de ser reprogramadas cada vez que se necesite o se requiera actualizar alguna funcionalidad. La placa de desarrollo que presenta mayor cantidad de entra-

<sup>1</sup> Placa de E/S (Entrada/Salida) simple y con un entorno de desarrollo de código abierto.

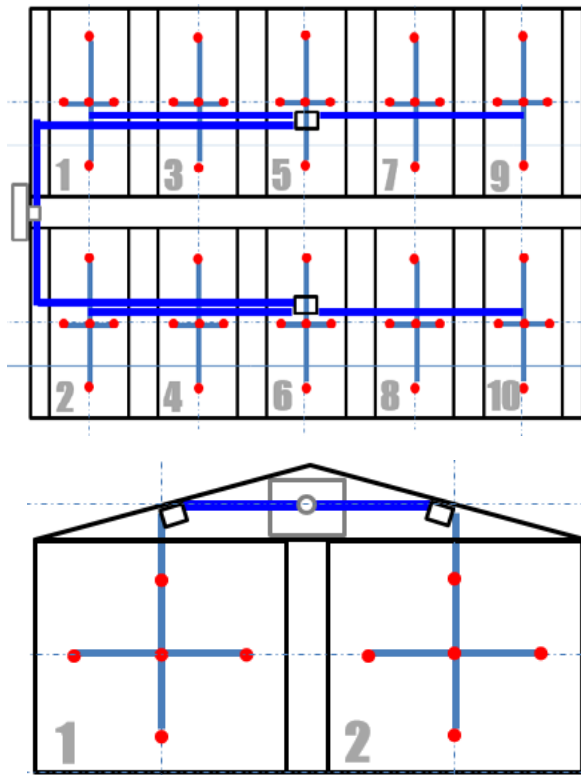


Figura 6. Agregación de sensores para una casa de curado típica de diez aposentos o cámaras

das analógicas es la de Arduino Mega 2560 (Arduino Online Shop, 2021). Cada sensor requiere dos entradas analógicas, esto equivale a un total de ciento cuarenta. Lo anterior implica la utilización de nueve placas Arduino de este modelo, hecho que impondría un costo adicional innecesario. Para abaratar los costos se debe implementar multiplexación.

Para ampliar la cantidad de entradas a la placa Arduino existe un dispositivo muy empleado en el mercado, el módulo 74HC4067 (figura 7). Este es un multiplexor/demultiplexor de dieciséis canales analógicos, el cual se alimenta con 5V y una corriente de 50mA máximo (Nexperia, 2015).

Al utilizar nueve módulos 74HC4067 se logran realizar las ciento cuarenta lecturas con una placa Arduino Mega 2560. Este último emplearía nueve entradas analógicas y treinta y seis entradas digitales. Para un mejor empleo y distribución dentro de la casa de curado, se sugiere dividirla en dos secciones y que sean atendidas por una placa Arduino Mega independiente. Cada placa Arduino atiende treinta y cinco sensores, lo que representa setenta señales analógi-

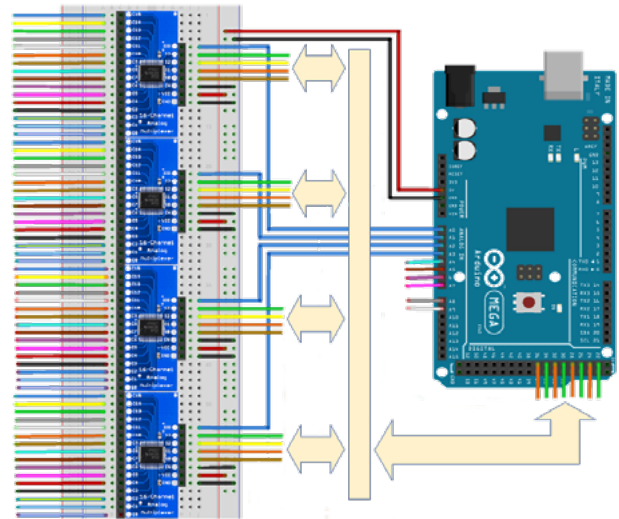


Figura 7. Esquema de conexión de cuatro módulos multiplexores analógicos 74HC4067 a la placa Arduino Mega

cas. Con cuatro módulos 74HC4067 se pueden atender sesenta y cuatro señales con solo cuatro entradas analógicas y dieciséis digitales, ver la figura 7. Las restantes seis señales analógicas pueden ser atendidas directamente por la placa Arduino Mega 2560.

El sensor de temperatura y humedad relativa, PFMMini72, entrega un valor de 0V a 1V proporcional al valor medido. Los conversores de señal analógica a digital (ADC, siglas del término en inglés, *Analog-to-Digital Converter*) internos de las placas Arduino tienen una resolución de 10 bits. Esto representa la cuantificación de un voltaje analógico de 0V a 5V en 1024 niveles. Si se emplean los sensores directamente en la placa Arduino Mega se pierde precisión y resolución. Para arreglar esto, las placas Arduino permiten la adición de un voltaje de referencia para los ADC: el pin Aref. Esta funcionalidad se activa a través del comando “AnalogReference(EXTERNAL)” en la configuración de las placas Arduino, lo que permitirá mantener la resolución de 10 bits (1024 niveles) al cuantificar el rango de 0V a 1V.

### Capacidad de Conectividad

Para que la placa Arduino Mega 2560 se comporte como NS necesita poseer capacidades de interconexión. No se conoce la influencia que podría tener la emisión de ondas electromagnéticas en el interior de la casa de curado, por esta razón se prefiere la variante de comunicación cableada a través del módulo



*Ethernet Shield*<sup>2</sup>, en vez de una variante de comunicación inalámbrica.

### Configuración de la Placa Arduino Mega para Funcionar como NS

La configuración de las placas Arduino se realiza con el *software* oficial del fabricante. El diagrama de flujo correspondiente se observa en la figura 8, de elaboración propia. Este se divide en cinco pasos fundamentales:

Carga de parámetros iniciales.

Conexión a la red *Ethernet*.

Conexión con el servidor MQTT (Banks et al., 2019).

Medición de la temperatura y la humedad.

Publicación de los datos de las mediciones.

2 Módulo de conectividad alámbrica para placas Arduino, emplea el protocolo de comunicación Fast Ethernet con una velocidad de 100Mbps y una distancia teórica de 100m.

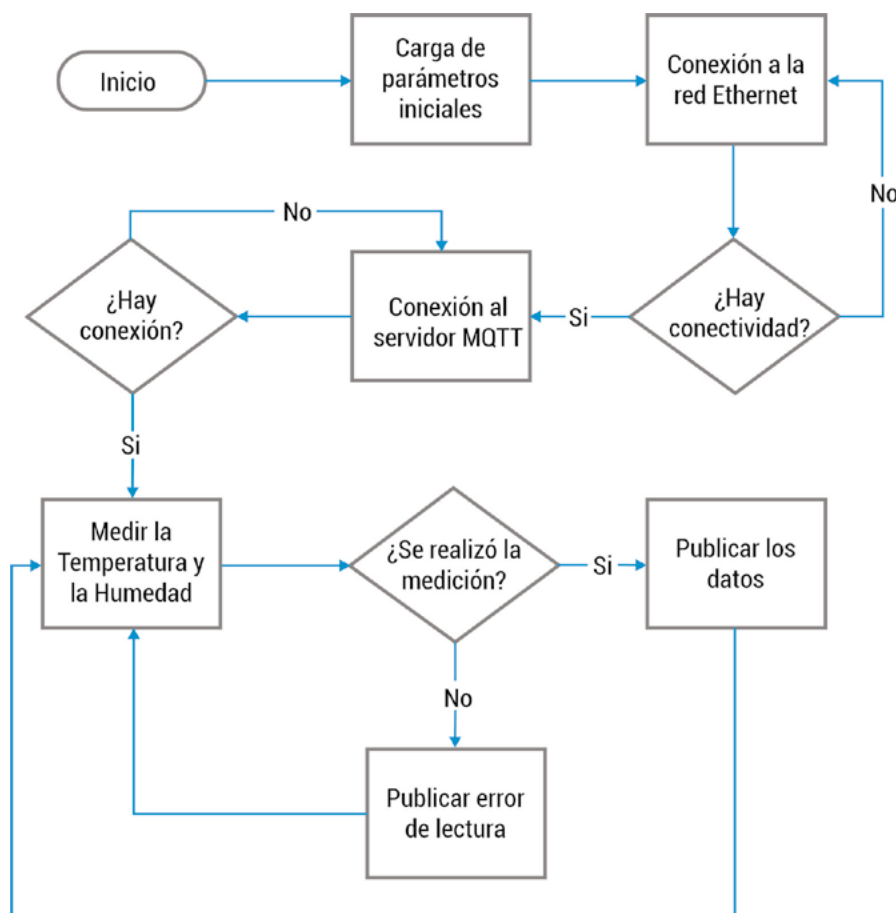


Figura 8. Diagrama de flujo de la configuración de las placas Arduino Mega como nodos sensores

En la carga de los parámetros iniciales se deben incluir los siguientes datos:

Librerías a emplear.

Configuración de la dirección IP estática.

Datos del servidor MQTT: Dirección IP, puerto, canal (tópico) de suscripción.

Datos de los sensores: Cómo y dónde están conectados.

Otras variables globales.

### Diseño de la Puerta de Enlace

Con la correcta configuración de los NS, se adquieren los valores de las mediciones y son enviados hacia un servidor. Las capacidades limitadas del NS impiden que se ejecuten algoritmos de seguridad complicados en el mismo, por lo que se vuelve vulnerable a ataques desde Internet. Por esta razón, se utiliza un intermediario entre la instalación donde se ubican los NS e Internet. El Nodo Intermedio (MN, siglas del término en inglés, *Middle Node*) se comporta como una puerta

de enlace o pasarela. El MN se implementa en una placa Raspberry Pi<sup>3</sup> en sus modelos 3B+ o 4B. Estos cumplen todos los requisitos necesarios para el proyecto, tanto de conectividad como de procesamiento. Entre las funcionalidades más importantes a emplear se encuentran:

Cortafuegos.

Control de los NS que interactúan con él e informar su estado a la plataforma.

Adición de estampa de tiempo a los mensajes hacia la plataforma.

Utilización de TLS para la comunicación segura por MQTT hacia la plataforma.

### Configuración de la Placa Raspberry Pi como MN

Los módulos Arduino emiten los resultados de las

3 Ordenador de placa simple de bajo costo desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation.

mediciones hacia la placa Raspberry Pi, la cual los publica en la plataforma donde son guardados y procesados. El MN separa el flujo de información local del que transita por Internet.

Para la configuración se empleará el Sistema Operativo Raspbian, que es una adaptación del *software* libre Debian para placas Raspberry Pi. El MN está compuesto por un servidor MQTT y dos clientes. El primero se conecta al servidor local para la interacción con los NS, el otro, con el servidor incluido en la plataforma. El servidor elegido es Mosquitto, por su facilidad en la instalación y puesta en marcha, además de ser de código abierto.

En el diagrama de flujo de la figura 9, de elaboración propia, se muestra el funcionamiento de la placa Raspberry Pi como puente o puerta de enlace entre los módulos Arduino y la plataforma en la nube. En la configuración de la placa Raspberry Pi se puede realizar una copia de seguridad de los datos enviados hacia

la nube. Lo que facilita realizar comparaciones si en algún momento se interrumpe la conexión hacia Internet.

Para la configuración del cortafuegos se emplea una herramienta nativa del sistema: *iptables* <sup>4</sup>. El procesamiento del MN se realiza empleando un programa escrito en Python <sup>5</sup>.

### Plataforma IoT desarrollada

El último elemento del ecosistema de IoT es la plataforma en la nube donde se almacenarán y procesarán los datos enviados por la placa Raspberry Pi. Al igual que en el Nodo Intermedio, la plataforma basa su funcionamiento en el lenguaje de programación Python. Para su implementación se elige como Sistema Operativo Ubuntu, en su última versión estable con soporte a largo plazo del tipo servidor, la 20.04 LTS. Este es libre y de código abierto, presenta una gran comunidad de desarrollo y aplicaciones de todo tipo.

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

En la actualidad, sobre todo en lo referente a los sistemas de IoT, la seguridad de la información es importante. Se opta como estrategia de seguridad informática la defensa en profundidad. Esta se basa en no depender de un único mecanismo de seguridad, independientemente de cuán fuerte parezca (Pérez, 2019).

En este sentido se presentan diferentes niveles para garantizar la seguridad de la información (ver Tabla 1). Se encriptan los datos desde que se transmiten hasta que son guardados en la base de datos de la plataforma.

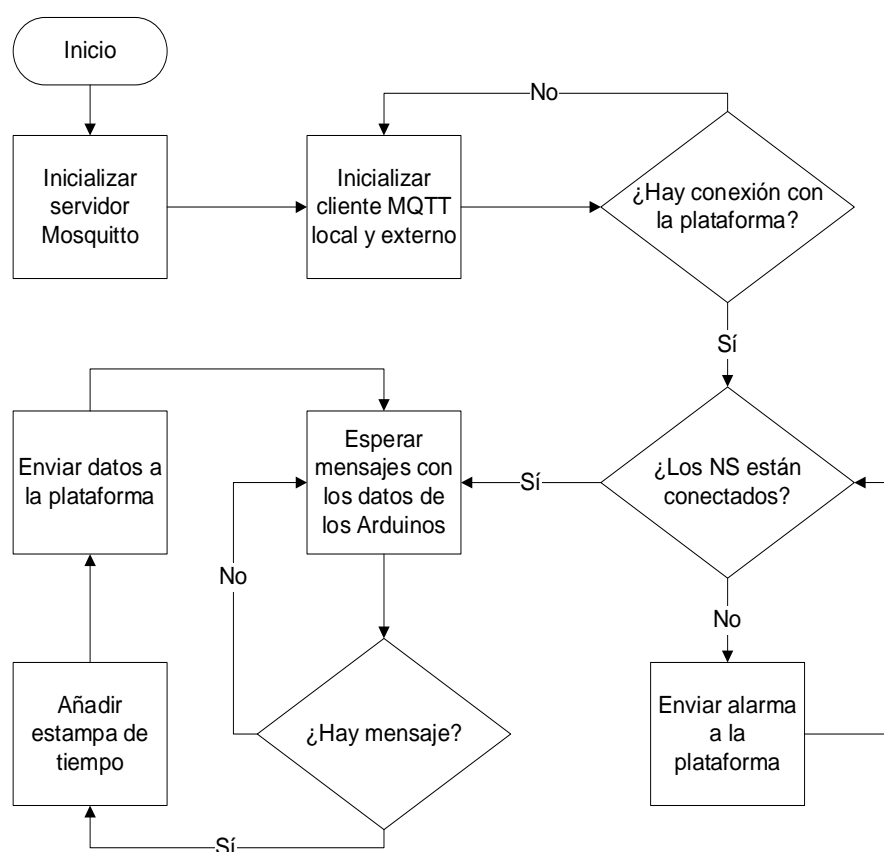


Figura 9. Diagrama de flujo del funcionamiento de la placa Raspberry Pi como nodo intermedio

<sup>4</sup> Programa de línea de comandos que se utiliza para configurar el cortafuegos interno del *kernel* de Linux.

<sup>5</sup> Lenguaje de programación de código abierto, multiplataforma e interpretativo.

Nivel	Dispositivos	Usuarios
1	VPN	VPN (Administ.)
2	MQTTS (SSL/TLS)	HTTPS (SSL/TLS)
3	Visualización por Roles	
4	Restricción de acceso a la Base de Datos	

Tabla 1. Niveles de seguridad de la plataforma

La comunicación, ya sea de un dispositivo (Raspberry Pi) o usuario, se encuentra bajo protocolos de encriptamiento para lograr la confiabilidad de la información que se transmite. Las Redes Privadas Virtuales (VPN, siglas del término en inglés, *Virtual Private Networks*) 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*.

#### Características de la plataforma desarrollada

La plataforma en cuestión es desarrollada a la medida de las necesidades del personal de operación, supervisión e investigación del sistema del tabaco. Almacena en una base de datos los valores provenientes de todos los sensores de humedad y temperatura desplegados en las casas monitorizadas. Esta presenta las siguientes funcionalidades:

**Gestión de usuarios:** Permite el registro de nuevos usuarios, la edición de su perfil, el cambio de contraseña y un mecanismo de recuperación de esta en caso de olvido.

**Configuración del proceso de monitoreo:** Los usuarios autorizados pueden crear un nuevo proceso de monitoreo, se pueden indicar las fechas de comienzo y culminación de cada etapa, donde se producirá el proceso y los valores umbrales que regirán la calidad del producto final.

**Generación de alertas y alarmas:** A partir de los valores umbrales definidos, la plataforma genera indicaciones de alertas inmediatas si los valores de temperatura o humedad se están acercando a los umbrales prefijados. De igual forma genera alarmas si cualquiera de los valores umbrales es cruzado tanto por exceso como por defecto.

**Monitoreo del proceso:** Un usuario autorizado podrá acceder a la vista de la evolución de los valores de temperatura y humedad de determinada instalación en tiempo real e histórico.

**Visualización de alertas/alarmas ocurridas:** Aquellos usuarios que sean autorizados, ya sean supervisores, directivos u otros, podrán acceder al archivo histórico de alertas y alarmas ocurridas durante determinado proceso de curado.

**Gestión y mantenimiento:** Los administradores cuentan con un módulo integrado para la gestión de todos los dispositivos, sensores y servicios. Esto posibilita el mantenimiento y control del estado del sistema. De igual forma, cuenta con la generación de alarmas por errores o fallos del equipamiento a través del servidor XMPP<sup>6</sup>.

#### Diseño del sistema

El diagrama en bloques del sistema propuesto se puede apreciar en la figura 10, de elaboración propia. Como se observa, los nodos sensores constituidos por las dos placas Arduino Mega, cada una con todos sus sensores asociados, se conectan vía *Ethernet* a la puerta de enlace, o nodo intermedio, el cual está constituido por la placa Raspberry Pi. El nodo intermedio será el encargado de sostener la comunicación MQTT entre los NS y la plataforma en la nube, para la lectura y almacenamiento de todos los valores de temperatura y humedad, a la razón de actualización que se fije por

6 Protocolo extensible de mensajería y comunicación de presencia, originalmente ideado para mensajería instantánea.



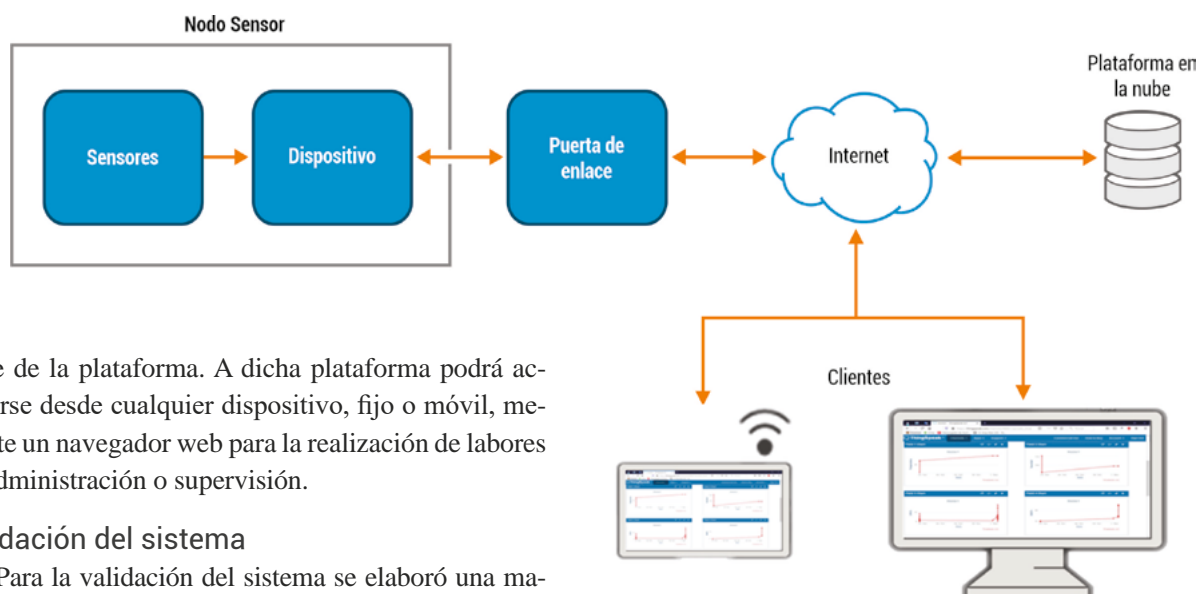


Figura 10. Diagrama en bloques del sistema propuesto

parte de la plataforma. A dicha plataforma podrá accederse desde cualquier dispositivo, fijo o móvil, mediante un navegador web para la realización de labores de administración o supervisión.

### Validación del sistema

Para la validación del sistema se elaboró una maqueta a escala. Esta representa la mitad de una casa de curado a una escala de 4 cm por metro. Se armaron dos cámaras cada una con dos sensores, desplegados en dos capas. Estos serán atendidos por una placa Arduino Mega 2560, quien envía los datos hacia una placa Raspberry Pi 3 Modelo B+. El esquema lógico de conectividad de la maqueta se puede apreciar en la figura 11, de elaboración propia.

#### Pruebas de adquisición de datos

La prueba de funcionamiento en maqueta consistió en la medición, de forma ininterrumpida de los parámetros medioambientales de temperatura y humedad relativa por un periodo de treinta días. La plataforma permite visualizar los valores en “tiempo real” mediante gráficos amigables. En la figura 12, de elaboración propia, se muestra un ejemplo de tal visualización.

Mediante el empleo de la simulación en MATLAB, se puede asumir la adquisición de los datos provenientes de los sensores de una casa de curado de diez aposentos, totalmente equipada, con el objetivo de mostrar la potencialidad que puede brindar un sistema como este en el estudio de las variaciones de temperatura y humedad en todo el volumen de una casa de curado.

El objetivo de un sistema como el propuesto sería, en primera instancia, proveer una herramienta para el estudio de las distribuciones de dichos parámetros en el interior de las casas de curado, buscando proponer las modificaciones estructurales que permitan obtener la mayor uniformidad en los mismos y por tanto una calidad óptima en la hoja de tabaco final.

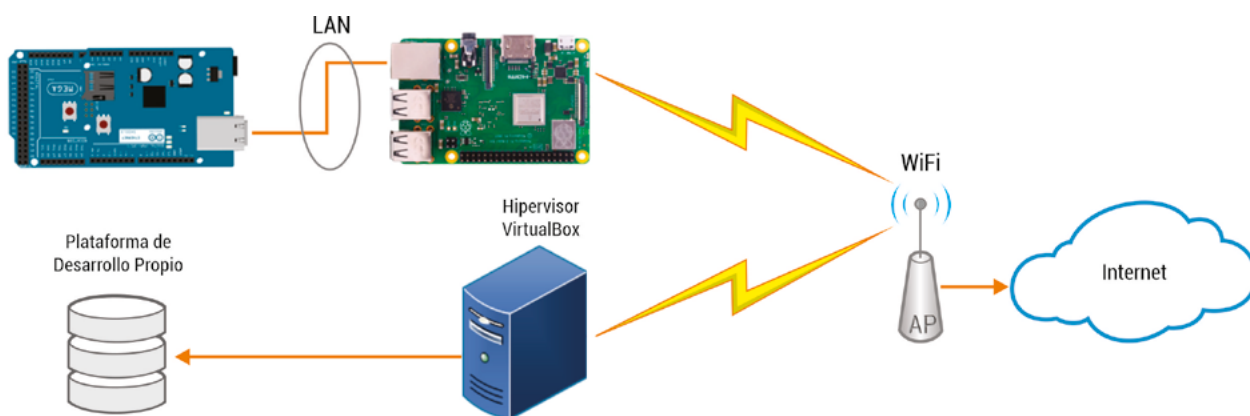


Figura 11. Esquema de conectividad de la maqueta

## Monitoreo de sensor: Casa/BM/Maqueta/A1/C1/s1

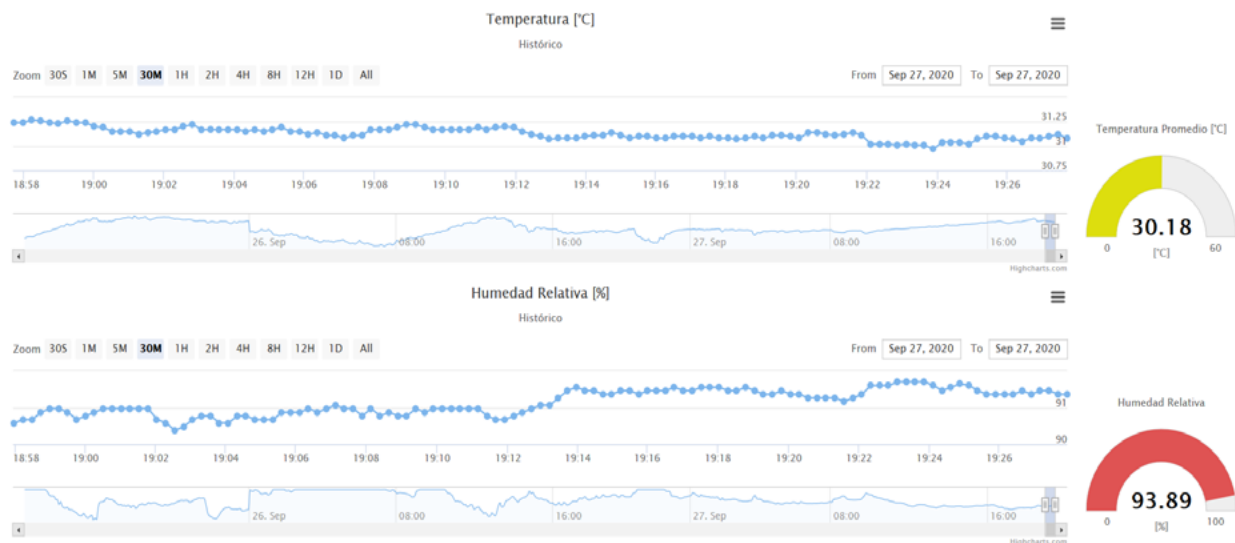


Figura 12. Visualización desde la plataforma de los datos adquiridos por el sistema

Disponiendo de un conjunto de datos, generados artificialmente, ya que no se dispone de un despliegue completo en una casa de curado real, la plataforma podría ofrecer visualizaciones como la mostrada en la figura 13, de elaboración propia.

En la figura 13 se aprecia la distribución de temperatura simulada, para la capa inferior de cada uno de los diez aposentos de una casa de curado. El código de color empleado sugiere el azul como las temperaturas más bajas y el naranja como las más altas. Los laterales interiores de cada una de las distribuciones indican el aumento de temperatura debido a la circulación normal de aire caliente dentro de la casa de curado por el pasillo central de la misma. En los aposentos superiores

se observan áreas más grandes de mayor temperatura, indicando la cercanía de estos aposentos al elemento calefactor principal de la casa de curado, ubicado en la zona central de la misma, al fondo.

Este tipo de gráficos se puede obtener interpolando la información de las lecturas de temperatura de los sensores disponibles por capa. La misma corresponderá más fidedignamente a la realidad en la medida que se incorporen más sensores por capa en el despliegue. En el caso de la simulación presentada se han empleado capas de nueve sensores cada una.

Análisis como este se pueden realizar para cada una de las capas definidas: la baja, la media o la alta; o incluso programar la plataforma para que sea

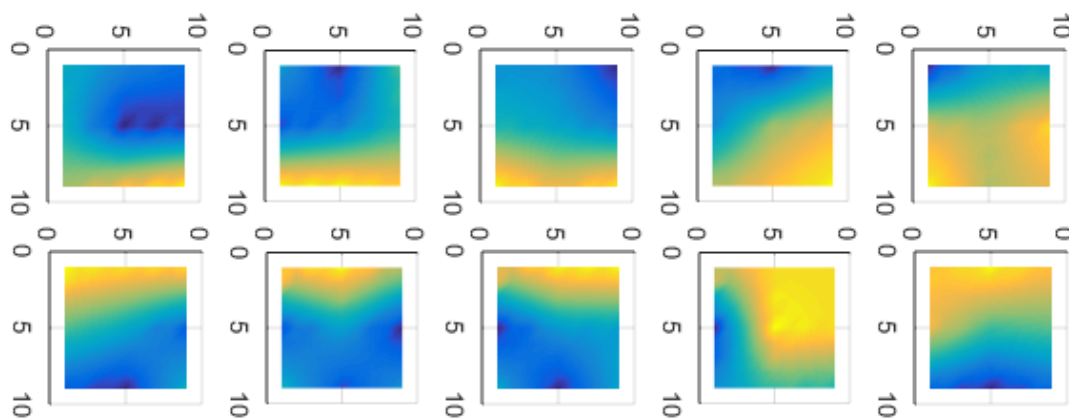


Figura 13. Emulación de la distribución de temperatura de la capa 1 en los diez aposentos de una casa de curado controlado. Se observa la franja de temperatura incrementada en la zona del flujo de aire caliente a lo largo del pasillo central

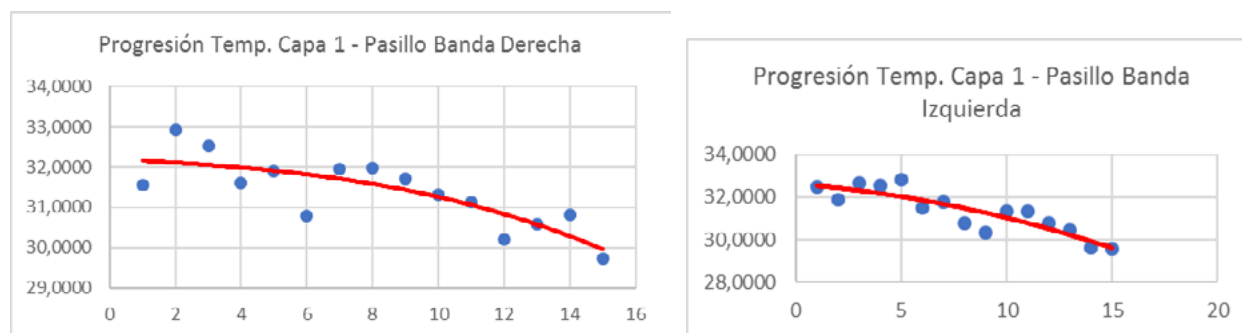


Figura 14. Emulación de la progresión de temperatura de la capa 1 a lo largo de ambas bandas del pasillo central de la casa de curado

capaz de estudiar cortes verticales, a partir de la información disponible, para estudiar las variaciones de temperatura o humedad en la altura de los distintos aposentos.

Pueden hacerse igualmente análisis como los que muestra la figura 14, de elaboración propia, en los que se puede obtener la progresión de temperatura, mediante interpolación también, a lo largo del pasillo central o de alguna dirección que se desee estudiar en el interior de la casa de curado.

## Conclusiones

El sistema propuesto constituye una herramienta realizada a partir de elementos de *hardware* y *software* libre que permite el monitoreo remoto, con una base de tiempo prefijada de antemano, de la variación de temperatura y humedad del proceso de curado de las hojas de tabaco de alto rendimiento en casas de curado controlado de tabaco.

La plataforma diseñada ofrece una doble función, la primera consiste en permitir el monitoreo a distancia del proceso de curado, con la configuración de alarmas y alertas que pueden generarse si se violan los

umbrales de temperatura y humedad establecidos para el proceso, sin la necesidad de que los operadores permanezcan a tiempo completo en las casas de curación. Esta funcionalidad permite humanizar el proceso de curado al tiempo que la progresión de los parámetros del proceso puede ser almacenada y consultada directamente sobre la plataforma de adquisición de datos de forma remota empleando un dispositivo móvil o el acceso por red fija.

La segunda función, ya descrita, es que sirve como herramienta para el estudio de las distribuciones de temperatura y humedad, en el interior de las casas de curado, permitiendo la propuesta de las modificaciones estructurales necesarias para intentar lograr la mayor uniformidad posible en dichos parámetros y, en consecuencia, optimizar el proceso de curado.

Con una herramienta como esta, debido al censo de los parámetros en múltiples puntos de la casa de curado, se pueden hacer análisis de las distribuciones volumétricas de temperatura y humedad en el interior de las casas de curado buscando zonas donde los rangos de valores observados puedan no ser adecuados para el proceso.

## Referencias bibliográficas

- Arduino Online Shop (2021). *Arduino Mega 2560 Rev3*. <http://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Balaira Reyes, A. y Biosca Rojas, D. (2020). *Sistema distribuido de IoT para la monitorización de la temperatura y la humedad en una casa de curado controlado de tabaco*. [Tesis de ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Unpublished]. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27652.86406/1>

- Banks, A., Briggs, E., Borgendale, K., & Gupta, R. (2019). *MQTT Version 5.0*. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>
- Instrumart (2021). *Humidity Meters. Michell Instruments PFMMini72 Relative Humidity and Temperature Probe*. <https://www.instrumart.com/products/47967/michell-instruments-pfmini72-relative-humidity-and-temperature-probe>
- ITU (2010). *ITU-T Recommendation. ITU-T Y.4105/Y.2221*. <https://handle.itu.int/11.1002/1000/10235>
- ITU (2012). *ITU-T Recommendation. ITU-T Y4.000/Y, 2060*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/es>
- Nexperia. (2015). *74HC4067; 74HCT4067 16-channel analog multiplexer/demultiplexer*.
- Pérez Estévez, E. (2019). *Curso Introductorio de Seguridad en Redes: Estrategias de Seguridad Informática*. LACNIC Campus. <https://campus.lacnic.net>

