

# IMPLANTACIÓN DE UNA LPWAN PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO

***José Ignacio Vega Luna***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Mario Alberto Lagos Acosta***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Gerardo Salgado Guzmán***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Víctor Noé Tapia Vargas***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Francisco Javier Sánchez Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

***José Francisco Cosme Aceves***

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

*vlji@correo.azc.uam.mx*

## Resumen

Se presenta la implantación de una LPWAN conectada a la Internet para monitoreo de temperatura y humedad de un invernadero. La LPWAN está formada por cinco nodos distribuidos en el invernadero y un gateway conectado a la Internet. Es una solución de IoT, donde cada nodo consta de un microcontrolador, un sensor de temperatura ambiente y humedad relativa y un transceptor de radio

LoRa. Periódicamente los nodos envían la información recabada por los sensores al gateway y éste a su vez la transmite a un servidor ubicado en la nube. Operando una interfaz de usuario, se puede acceder al servidor y monitorear los valores de temperatura y humedad enviados por los nodos. La interfaz de usuario puede acceder información de diferentes invernaderos en los que exista una LPWAN como la diseñada en este trabajo. El alcance de la LPWAN fue de 12.5 Kilómetros con línea de vista.

**Palabras Claves:** Gateway, IoT, LoRa, LPWAN, sensor de temperatura.

### **Abstract**

*This paper presents the implementation of a LPWAN connected to the Internet to monitor the temperature and humidity of a greenhouse. The LPWAN consists of five nodes distributed in the greenhouse and a gateway connected to the Internet. It is an IoT solution, where each node consists of a microcontroller, an ambient temperature and relative humidity sensor and a LoRa radio transceiver. Periodically the nodes send the information collected by the sensors to the gateway and this in turn transmits it to a server located in the cloud. By operating a user interface, you can access the server and monitor the temperature and humidity values sent by the nodes. The user interface can access information from different greenhouses in which there is an LPWAN as the one designed in this work. The scope of the LPWAN was 12.5 Kilometers with line of sight.*

**Keywords:** Gateway, IoT, LoRa, LPWAN, temperature sensor, transceiver.

## **1. Introducción**

Un invernadero es una instalación cerrada con infraestructura y equipamiento que protege las plantas y semillas de las inclemencias del medio ambiente, permitiendo cultivar flores, frutas y verduras durante todo el año. El mantenimiento y operación de un invernadero implica el monitoreo continuo de variables ambientales y la manipulación de dispositivos que controlan el valor de estas variables. Las principales variables monitoreadas en un invernadero son: temperatura, humedad e iluminación. Los dispositivos que controlar son sistemas

de calefacción, ventilación, riego y abonado. A pesar de que los costos de operación y mantenimiento de un invernadero han disminuido en los últimos años, puesto que se dispone de sensores de variables ambientales más eficientes, compactos, económicos y precisos, así como de dispositivos de comunicación de mayor alcance, en una gran cantidad de invernaderos la medida de variables ambientales sigue realizándose manualmente con los inconvenientes que esto genera. El personal del invernadero toma periódicamente las medidas de variables, las registra y, si es necesario y dependiendo de su experiencia, activa un sistema de riego, ventilación o iluminación. En algunos invernaderos los medidores de variables son anticuados e imprecisos, mientras que otros han incorporado tecnología y redes de sensores digitales de variables de ambiente.

El objetivo del trabajo aquí presentado fue implantar una red de área amplia de baja potencia (LPWAN-Low Power Wide Area Network) conectada a la Internet para monitoreo remoto de sensores de temperatura y humedad de un invernadero. Hoy en día, en muchos invernaderos el monitoreo de variables de ambiente se realiza de forma manual y las decisiones se basan en las mejores prácticas, a prueba y error y en experiencias de generaciones anteriores. La Internet de las cosas (IoT-Internet of Things), con la ayuda de las LPWAN, está cambiando la manera de operar industrias, ciudades, instituciones, agricultura y muchos campos más de la vida. Usando tecnología inalámbrica con sensores en invernaderos y campos agrícolas, se puede obtener información en tiempo real para tomar decisiones rápidamente basadas en las condiciones del clima, suelo, humedad y viento. La mayoría de los cultivos están alejados de redes celulares o aunque no lo estén, es costoso instalar un modem en cada sensor, lo que trae como consecuencia que no sea fácil obtener esta información hasta ahora desde la Internet [Athukorala, 2016]. Algunas LPWAN están basadas en el protocolo LoRa (Long Range). El protocolo abierto LoRa fue desarrollado por LoRa Alliance para crear LPWAN para el mercado de IoT. LoRa define la capa física del modelo OSI, o modulación inalámbrica, para realizar el enlace de comunicación de larga distancia. Las LPWAN que usan el protocolo LoRa se les conoce como LoRaWAN. Usan comunicación de radio de baja potencia que permite establecer

conexiones de largo alcance transmitiendo pequeñas cantidades de información a baja velocidad para lograr mayor tiempo de vida de baterías. Una red basada en tecnología LoRa proporciona mayor cobertura que las redes inalámbricas celulares existentes. Algunos operadores de redes móviles complementan su oferta de redes inalámbricas/celulares con LoRaWAN ya que es fácil de integrar a la infraestructura existente a fin de ofrecer a los clientes soluciones basadas en aplicaciones de IoT alimentadas por baterías. Proveedores de sensores y puntos de acceso de aplicaciones IoT han incorporado en sus soluciones transceptores RF LoRa para transmitir información a grandes distancias usando mínima potencia. Una LoRaWAN usa arquitectura de estrella, los nodos establecen el enlace inalámbrico con uno o más puntos de acceso o gateways conectados a la Internet. Los gateways transmiten información a un servidor de red central ubicado en la nube usando una conexión IP estándar. El gateway transmite paquetes recibidos desde los nodos al servidor de red vía un operador, ya sea celular, Ethernet, satélite o WiFi. El servidor administra la red y filtra paquetes redundantes recibidos, implanta además la seguridad y calendariza reconocimientos de paquetes transmitidos por los gateways. En el servidor de red se ejecuta un programa que realiza una tarea específica, como por ejemplo almacenar y procesar información y enviar un mensaje de texto o una señal al teléfono de un usuario para indicar que la temperatura es superior a su valor normal. La selección de velocidad implica compromiso entre alcance, consumo de energía y duración de baterías. El gateway administra la velocidad de comunicación con los nodos, permitiéndole llevar a cabo diferentes comunicaciones a distintas velocidades sin interferir una con otra y crear un conjunto virtual de canales para incrementar su capacidad. La velocidad de datos varía en el rango de 0.3 a 50 kbps. Un gateway o estación base LoRa puede cubrir ciudades completas o cientos de kilómetros cuadrados. Existen ciudades en Estados Unidos y Europa con infraestructura y cobertura de operadores de LoRaWAN públicas usadas por clientes para transmitir información de dispositivos IoT a un servidor conectado a la Internet [Wixted, 2016]. Por otra parte, también están disponibles soluciones LoRaWAN de diferentes proveedores que no necesitan acceso a una LoRaWAN pública.

Proporcionan gateways y transceptores para implantar una LPWAN. El gateway solo necesita una conexión a Internet para comunicarse al servidor de red del proveedor de la solución. Una de estas soluciones es Symphony Link, una especificación alterna a LoRaWAN. Es un protocolo estandarizado desarrollado por Link Labs para usuarios que necesitan comunicación inalámbrica de larga distancia con rendimiento no disponible en una LoRaWAN. Symphony Link está construido sobre la tecnología de modulación de la capa física de LoRa y no usa la arquitectura MAC estándar de LoRaWAN. Aunque es una solución propietaria, se eligió usar Symphony Link para implantar la LPWAN de IoT en este trabajo por las ventajas que presenta sobre una LoRaWAN:

- Symphony Link es un sistema inalámbrico para redes de sensores y controladores. Permite instalar puntos de acceso o gateways en áreas donde se necesita cobertura, generalmente uno en cada edificio o nave industrial. Los gateways son de 8 canales que trabajan a una frecuencia menor a 1 GHz. Los transceptores de Link Labs operan en la banda ISM de los 868 o 915 MHz que no requiere licencia. El gateway se comunica con un servidor ubicado en la nube de Amazon cuya disponibilidad y administración está bajo la responsabilidad de Link Labs, liberando de esta tarea al usuario de la LPWAN. La información recibida de los nodos de la LPWAN puede accederse desde la Internet a través de los servicios proporcionados por Conductor. Conductor es la plataforma de datos de Link Labs basada en la nube. La información de los nodos se puede obtener usando la página de Conductor o usando APIs proporcionados por Link Labs.
- Identificador de red. La operación de una red Symphony Link no requiere identificador de red de LoRa Alliance, el cual puede costar hasta \$20,000 USD por año. Symphony Link no interfiere con LoRaWAN y viceversa y no requiere costo de membresía a LoRa Alliance.

Recientemente se han realizado bastantes trabajos para monitorear inalámbricamente y controlar variables de ambiente en invernaderos y campos de cultivo. Algunos usan tecnología Bluetooth para transmitir la información de

sensores a una computadora ubicada al interior del invernadero o no más allá de 20 metros [Dayioglu, 2014]. Otras implantaciones utilizan tecnología ZigBee para transmitir información colectada en invernaderos a una estación de control [Luo, 2016], [Ismail, 2016]. También se han realizado trabajos que incorporan lógica difusa con algoritmos PID y ZigBee para manipular de forma predictiva actuadores en invernaderos [Li, 2016]. Inclusive se ha usado WiFi para monitorear variables y controlar actuadores desde un teléfono celular [Tian, 2016] o bien usando el teléfono celular como gateway para transmitir la información a un servidor conectado a la Internet [Hanggoro, 2013]. En otros casos los trabajos llevados a cabo se han usado en campos de cultivo extensos donde se usan robots [Durmus, 2016] y drones para colectar información y realizar la polinización de plantas [Abutalipov, 2016]. La mayoría de los trabajos usan tecnologías inalámbricas tradicionales como WiFi, Bluetooth y ZigBee, las cuales tienen alcance limitado y algunas como WiFi son costosas y consumen mucha energía eléctrica.

De manera similar, en los últimos años la cantidad y tipo de aplicaciones de IoT ha crecido aceleradamente, ya que este concepto permite conectar a la Internet objetos, dispositivos y máquinas de casi cualquier ambiente. Las aplicaciones de IoT realizadas actualmente son muy variadas y abarcan casi cualquier campo de la vida del ser humano. Han estado dirigidas a la automatización de: procesos industriales [Papadopoulos, 2017], dispositivos usados en hogares, agricultura [Cambra, 2017] y monitoreo de componentes de vehículos y salud de personas. Se está trabajando bastante en el desarrollo de aplicaciones enfocadas al concepto de ciudades inteligentes para proporcionar servicios oportunos y eficientes a la población [Yamakami, 2017]. Se estima que la cantidad de aplicaciones seguirá creciendo de forma inercial a una velocidad mayor a la actual. El estado del arte en la investigación y desarrollo de IoT se concentra actualmente en el uso de tecnologías y redes de comunicación de baja potencia que proporcionen cada vez mayor alcance [Bardyn, 2016], como la usada en este trabajo, y en el estudio y desarrollo de técnicas de seguridad para reducir las vulnerabilidades en la transmisión de información en estas aplicaciones, fundamentalmente en la autenticación de usuarios y cifrado de información

[Mavropoulos, 2017], ya sea usando llaves públicas y privadas o creación de software para la implantación de diferentes capas o niveles de seguridad [Leong, 2017].

La contribución de este trabajo consiste en que el monitoreo de los sensores de temperatura y humedad de un invernadero puede realizarse remotamente desde la Internet, a través de una red de bajo consumo de potencia conectada a un servidor ubicado en la nube. La red usa tecnología de reciente creación y largo alcance, siendo fácil de implantar, confiable, segura y escalable. Es una aplicación de IoT donde los nodos de la red son alimentados por baterías que pueden durar varios años. El alcance de la red es mucho mayor al de una red WiFi y Bluetooth y más efectivo en costo que las redes celulares. Otra aportación del trabajo es que los valores colectados de temperatura y humedad, transmitidos por los nodos de la red al servidor, pueden consultarse en cualquier momento, ya el servidor siempre está disponible.

## 2. Métodos

La metodología usada en el desarrollo de este sistema consistió dividirlo en dos partes: la implantación de la LPWAN y el desarrollo de la interfaz de usuario como se muestra en la figura 1.

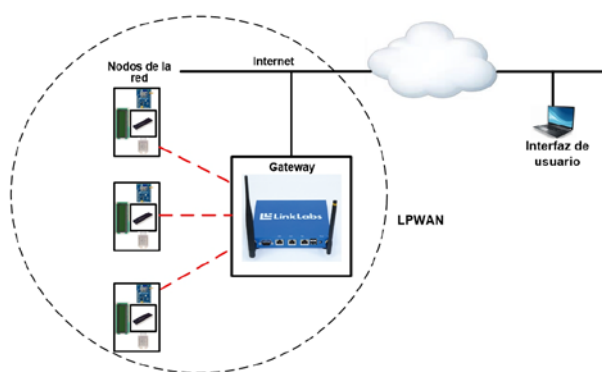


Figura 1 Diagrama de bloques del sistema.

La LPWAN está compuesta por los nodos de la red y el gateway y por medio de la interfaz de usuario, se pueden consultar los valores de temperatura y humedad de los nodos ubicados en el invernadero.

## Los Nodos de la Red

Se construyeron cinco nodos de la LPWAN con la arquitectura mostrada en la figura 2. Cada nodo está compuesto por un sensor de temperatura y humedad, un microcontrolador, un transceptor LoRa y un display LCD 16x2. La función de los nodos de la red es coleccionar periódicamente los valores de temperatura y humedad, por medio del sensor conectado al nodo, y transmitirlos al gateway. El periodo de recolección es por defecto 30 segundos y es configurable en la interfaz de usuario. El microcontrolador usado en los nodos es el PIC18F4550. Este dispositivo tiene 28 terminales que permitió construir nodos de tamaño compacto y cuenta con los siguientes recursos, suficientes para las funciones que realizan los nodos: CPU de 8 bits, 32 kB de memoria de programa, 2 kB de memoria RAM, 21 líneas de entrada/salida, convertidor analógico-digital de 10 bits y 13 canales, 4 temporizadores y un puerto USART.

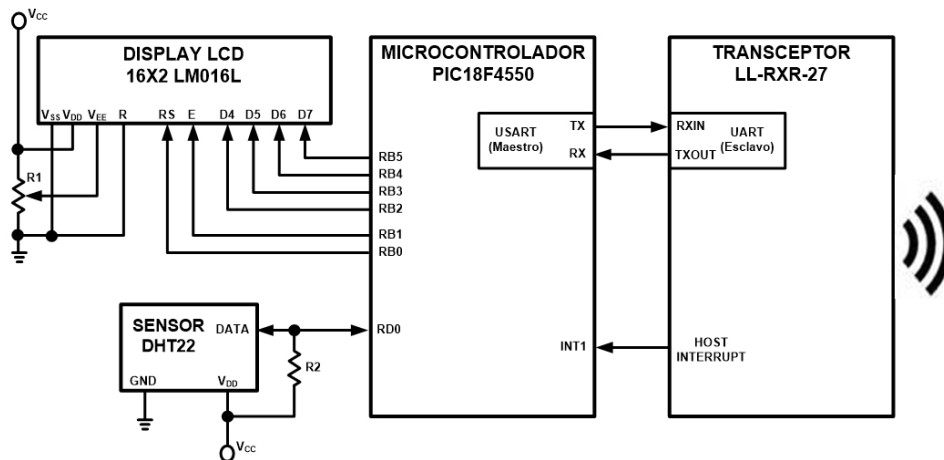


Figura 2 Diagrama de bloques de los nodos de la red.

El sensor de temperatura y humedad relativa usado es el dispositivo DHT22. Es un sensor de alta resolución, compensado en temperatura, capacitivo, de bajo consumo de energía y encapsulado plástico de cuatro terminales. El voltaje de alimentación del DHT22 es 3.3 a 5.5 V, el rango de temperatura medida es -40 °C a 80 °C, con una precisión de  $\pm 0.5$  °C, y el rango de humedad relativa es 0% a 100% con una precisión de  $\pm 2\%$  RH a 25 °C. De las cuatro terminales del sensor, dos son tierra, otra es para alimentación y la última es la línea de datos serie 1-



wire mediante la cual transmite el valor digital de temperatura y humedad en una palabra de 40 bits. Esta última terminal se conectó a la línea de entrada RD0 del microcontrolador. De estos 40 bits, los primeros 16 bits corresponden al valor de humedad relativa, los siguientes 16 bits son el valor de temperatura y los últimos 8 bits indican el checksum. Periódicamente, mediante el protocolo del bus 1-wire, el microcontrolador solicita al sensor realizar la lectura de temperatura y humedad. La temporización de eventos del bus 1-wire es realizada en su mayor parte por el microcontrolador como se indica en la figura 3.

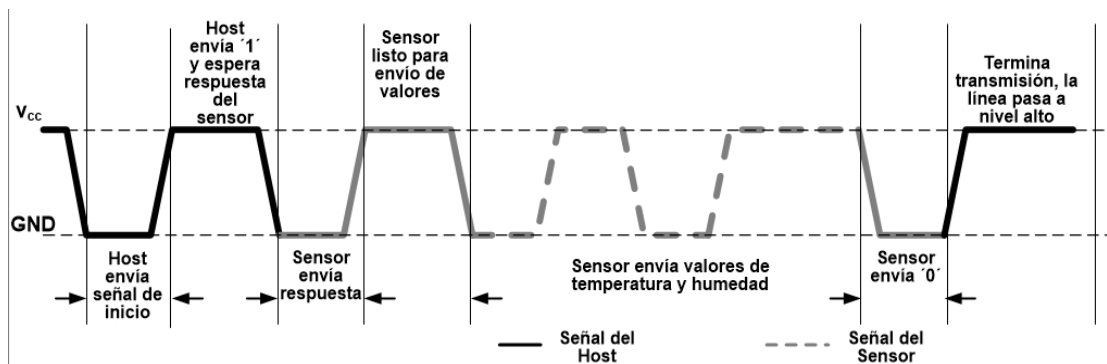


Figura 3 Temporización de señales 1-wire entre el microcontrolador y el LLRXR-27.

Una vez leídos los 40 bits que entrega el sensor, la programación que se ejecuta en el microcontrolador los convierte de binario a decimal y los transmite al transceptor LoRa a través del puerto USART. Adicionalmente, el microcontrolador del nodo de la red muestra los valores de temperatura y humedad en el display LCD 16x2 para que el usuario pueda consultarlos localmente. El display LCD 16x2 cuenta con dos líneas de 16 caracteres cada una. Se comunica con el microcontrolador usando como bus de datos las líneas RB2-RB5 de éste último y las terminales RB0 y RB1 como líneas de control de lectura (RD) y habilitación (E), respectivamente. El transceptor LoRa usado es el Symphony Link LL-RXR-27. Este transceptor es un radio multi-banda bidireccional de Link Labs, es compatible con redes públicas LoRaWAN 1.0 y con redes privadas de área amplia Symphony Link. Está optimizado para usarse en las bandas de frecuencia de 915 MHz ISM u 868 MHz. Usa modulación LoRa de Semtech para maximizar el alcance al mismo tiempo que minimiza el consumo de energía e interferencia. El transceptor LL-

RXR-27 integra un DSP Semtech SX1276, un microcontrolador de 32 bits Renesas R5F51116ADNE. El DSP SX1276 implanta la capa física usando modulación LoRa mientras que el firmware del microcontrolador RX111 implanta la pila de protocolos de red y la interface de comandos para la comunicación con el PIC18F4550. Las características principales de operación del transceptor LL-RXR-27 son las siguientes: alimentación de 3.5 a 5.5 V, consumo de corriente de <1 uA en reposo, 480 mA en transmisión, 40 mA en recepción, memoria flash de 256 KB, memoria RAM de 32 kB, potencia máxima de transmisión 23 dBm, velocidad de transmisión RF de 183 bps a 37.5 kbps y velocidad de transmisión del UART de 115,200 bps. La comunicación entre el PIC18F4550 y el transceptor LL-RXR-27 se implantó conectando el puerto USART del microcontrolador al puerto UART del LL-RXR-27 para usar el protocolo maestro/esclavo. El microcontrolador realiza las funciones de maestro y el transceptor LL-RXR-27 las de esclavo. El protocolo permite intercambiar dos tipos de mensajes: paquetes de comando y paquetes de respuesta. El maestro siempre envía paquetes de comando, mientras que el esclavo siempre transmite paquetes de respuesta. Los paquetes de comando consisten de los siguientes campos: preámbulo (4 bytes), inicio de trama (1 byte), tipo de comando (1 byte), número de mensaje (1 byte), longitud del mensaje (2 bytes), mensaje (hasta 256 bytes) y checksum para verificar la integridad del paquete (2 bytes). Cada vez que el microcontrolador solicita al transceptor LL-RXR-27 que transmita al gateway los valores de temperatura y humedad, le envía un paquete de comando indicando en el campo de mensaje estos valores. Tanto el sensor como el transceptor son dispositivos de bajo consumo de corriente que permitió crear la LPWAN con nodos de la red compactos y alimentados por baterías. Las tareas que realiza el microcontrolador, explicadas anteriormente, son llevadas a cabo por la programación que ejecuta en él y se indican en el diagrama de flujo de la figura 4.

## **El Gateway**

Los valores de temperatura y humedad transmitidos por el transceptor LL-RXR-27 son recibidos por el gateway de la LPWAN. El gateway usado es modelo LL-BST-

8 de Link Labs, el cual, conjuntamente con los transceptores LL-RXR-27 forman la LPWAN. La solución Symphony Link está compuesta por la LPWAN y el servidor en la nube de Link Labs. El gateway cuenta con dos puertos de red Ethernet. A través de un puerto Ethernet se conecta a la Internet y por medio del otro puerto se conecta localmente a una computadora. De esta forma, la red de sensores de temperatura y humedad puede ser accedida y monitoreada desde la Internet, implantando con esto la solución IoT en el invernadero.

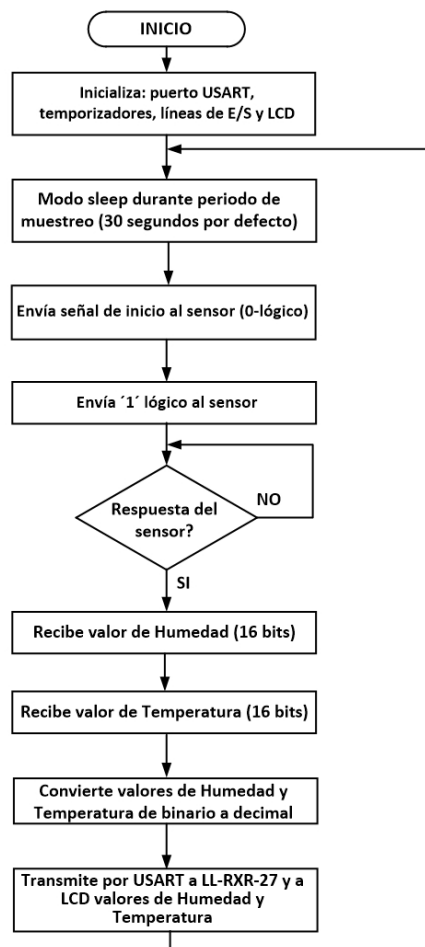


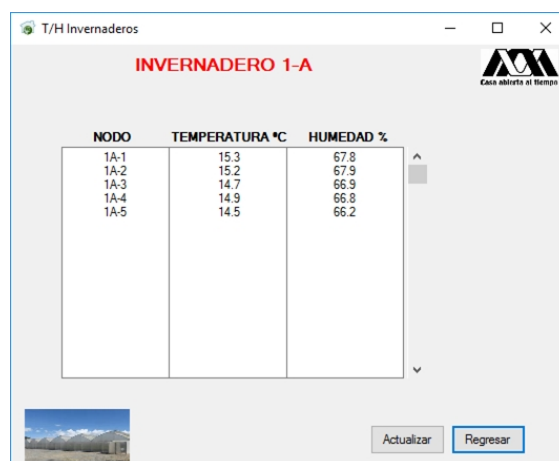
Figura 4 Diagrama de bloques de la programación del microcontrolador.

Para configurar y establecer el hostname del gateway, el método de conexión a la Internet, ya sea alámbrico o inalámbrico, y los parámetros de comunicación con los nodos de la red se usa la aplicación Prelude de Link Labs, la cual se ejecuta en una computadora y se comunica con el gateway través de un segmento de red

local. Cuando un transceptor LL-RXR-27 establece una sesión de comunicación con el gateway, la sesión se registra como aplicación de usuario en el gateway y en Prelude, y se le asigna un nombre o token usado para encriptar la información que envía el gateway al servidor de red de Symphony Link.

## La Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario se ejecuta en una computadora conectada al servidor de red a través de la Internet. El servidor de red está alojado en los servicios de nube de Amazon. La interfaz de usuario muestra los valores de temperatura y humedad recibidos periódicamente desde cada nodo del invernadero como se indica en la figura 5. En el servidor de red se ejecuta la aplicación Conductor de Link Labs. Conductor es la plataforma de servicios de datos en la nube que puede accederse a través de un portal conectándose a la página web de Conductor. Link Labs proporciona también un conjunto de APIs para acceder los servicios de Conductor desde una aplicación o programa. La interfaz de usuario se conecta al portal de conductor y usa estos APIs para desplegar los valores de temperatura y humedad en un formato más sencillo y claro que los mostrados en el portal de Conductor.



The screenshot shows a web application window titled 'T/H Invernaderos'. The main heading is 'INVERNADERO 1-A'. Below the heading is a table with three columns: 'NODO', 'TEMPERATURA °C', and 'HUMEDAD %'. The table contains five rows of data. At the bottom of the window, there is a small image of a greenhouse and two buttons labeled 'Actualizar' and 'Regresar'.

NODO	TEMPERATURA °C	HUMEDAD %
1A-1	15.3	67.8
1A-2	15.2	67.9
1A-3	14.7	66.9
1A-4	14.9	66.8
1A-5	14.5	66.2

Figura 5 Interfaz de usuario.

Ya que Conductor puede recibir información de diferentes gateways Symphony Link que pertenecen a una LPWAN como la implantada en este trabajo, en la interfaz de usuario se puede seleccionar el invernadero cuya LPWAN se desea

mostrar los valores de temperatura y humedad. Cada vez que un gateway Symphony Link se conecta por vez primera a Conductor, se registra en Conductor y puede ser accedido desde la interfaz de usuario.

### **3. Resultados**

Los cinco nodos de la red se ubicaron en distintos puntos de un conjunto de invernaderos. En el lugar de las pruebas existen oficinas, distantes a los invernaderos, donde se dispone de conexión a la Internet. La velocidad de transmisión inalámbrica fue establecida automáticamente por el gateway en un rango de 0.183 a 37.5 kbps, dependiendo la carga de datos que maneja el gateway en ese momento. Se ejecutaron cuatro grupos de pruebas, el primer grupo tuvo como objetivo medir el alcance de la LPWAN. En la primera prueba de este grupo se conectó el gateway a la Internet en una oficina fuera de los invernaderos. Se determinó que bajo estas circunstancias el alcance de la LPWAN fue 12.5 kilómetros con línea de vista. En la segunda prueba el gateway se ubicó en otra oficina localizada a la misma distancia que la prueba anterior, pero sin línea de vista, existiendo dos edificios entre la oficina y los invernaderos. El resultado fue que no se estableció comunicación del gateway con los nodos de la red. En la tercera prueba se conectó el gateway en una oficina ubicada a 8 Kilómetros, sin línea de vista, con dos edificios entre la oficina y los invernaderos, y si se realizó la comunicación del gateway con los nodos de la red. Como se esperaba, el alcance de la LPWAN disminuye, y depende del tipo y cantidad de obstáculos que existen entre el gateway y nodos de la red. El segundo grupo de pruebas tuvo como objetivo comprobar la exactitud de temperatura medida por el sensor DHT22. Para llevar a cabo estas pruebas, se varió la temperatura del sensor artificialmente con un calentador y se midió con un termómetro analógico para compararla con la reportada en la interfaz de usuario. El fabricante indica una exactitud de  $\pm 0.5$  °C, la cual se mantuvo hasta los 65 °C. Después de este valor, al aumentar la temperatura, la diferencia de temperatura entre la reportada por el sensor y la medida con el termómetro aumenta proporcionalmente como se muestra en la figura 6.

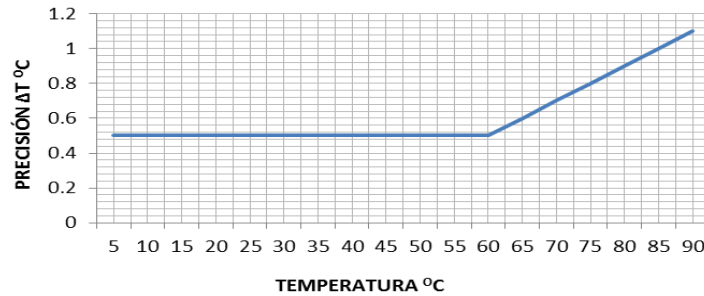


Figura 6 Exactitud en la temperatura medida por el sensor DHT22.

De manera similar, el tercer grupo de pruebas tuvo como objetivo comprobar la exactitud de la humedad relativa entregada por el sensor. En estas pruebas se varió artificialmente la humedad y se midió con un dispositivo adicional para compararla con el valor entregado por el sensor. El fabricante indica una precisión de  $\pm 2\%$  RH. Esta precisión se mantuvo hasta un valor de 80% RH y después de este valor aumentó proporcionalmente hasta la última medida realizada de 90% RH, como se indica en la figura 7. A pesar de que los valores de temperatura y humedad entregados por el sensor no son exactos al aumentar el parámetro medido, puede considerarse adecuado el sensor usado, ya que la temperatura en un invernadero no es mayor a 45 °C en la mayoría de los casos y la humedad comúnmente es menor a 70%.

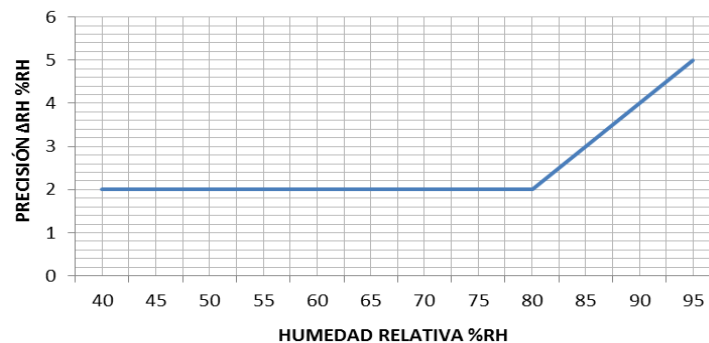


Figura 7 Exactitud en la humedad relativa medida por el sensor DHT22.

El último grupo de pruebas tuvo como objetivo medir el desempeño de la LPWAN en base a la velocidad de transmisión, cantidad de nodos y tramas perdidas en la transmisión entre el gateway y los nodos de la red. Para realizar estas pruebas inicialmente se usó solo un nodo de la LPWAN, el cual se ubicó a diferentes distancias del gateway y se modificó la velocidad de transmisión entre el nodo y el

gateway usando la aplicación Prelude. Se realizó además un programa, ejecutado por el microcontrolador del nodo, en el que el nodo transmitió continuamente cada segundo los valores de temperatura y humedad leídos desde los sensores. Los resultados mostraron que a menor velocidad de transmisión, el transceptor del nodo tiene mayor alcance. Al configurar la velocidad más baja de 183 bps se logró un alcance de 18 kilómetros con línea de vista, mayor al logrado en el primer conjunto de pruebas. Conforme se aumentó la velocidad el alcance disminuyó hasta 11.5 kilómetros usando la velocidad máxima de 37.5 kbps. Las velocidades utilizadas fueron 183, 366, 732, 1,464, 2,928, 5,856, 11,712, 23,424 y 37,500 bps, como se indica en los resultados mostrados en la figura 8.

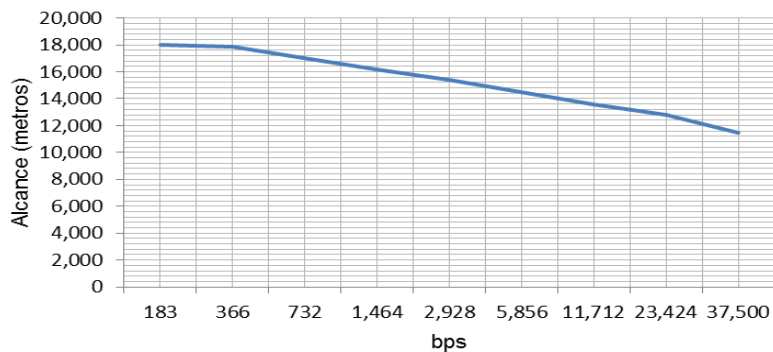


Figura 8 Alcance de la LPWAN.

Adicionalmente, durante este conjunto de pruebas se midió la cantidad de tramas perdidas en la transmisión usando el analizador de protocolos Wireshark configurado en modo promiscuo y ejecutándose en una computadora conectada inalámbricamente al segmento de la LPWAN. Los resultados indicaron que usando la velocidad de 183 bps se perdían 1 de cada 500 tramas transmitidas (0.2%). Esa cantidad aumentó hasta perder 8 de cada 500 tramas transmitidas (1.6%) al usar la velocidad de 37,500 bps, lo cual confirma que a mayor velocidad el alcance de la LPWAN disminuye. Finalmente, para complementar este grupo de pruebas, se incorporaron los cuatro nodos restantes a la LPWAN transmitiendo continuamente los valores de temperatura y humedad. La cantidad de tramas perdidas usando 183 bps fue 2 de cada 500 tramas transmitidas (0.4%) y 9 de cada 500 tramas transmitidas (1.8%) a la velocidad de 37,500 bps. Link Labs

recomienda que el gateway administre los parámetros de comunicación con los transceptores, sin embargo, se realizaron estas pruebas para mostrar que el aumento en la cantidad de nodos de la LPWAN no impacta significativamente en el rendimiento de esta y lo que impacta en el alcance es la velocidad.

#### **4. Discusión**

Es importante indicar dos puntos de este trabajo: el primero es que se usó una solución propietaria como lo es Symphony Link, lo cual permitió obtener una LPWAN de IoT de forma sencilla, rápida y eficiente, disminuyendo el tiempo y costo de implantación. Se dispone del servidor de red y soporte de Link Labs para desarrollos adicionales. Es una solución IoT adecuada para Latinoamérica donde no existen operadores de LPWAN públicas y la mejor forma de conectar a Internet una red LoRa es a través de un gateway. El segundo punto es la arquitectura de los nodos de la red. En este trabajo se instalaron nodos de la red en diferentes ubicaciones de un invernadero. Cada nodo de la red tiene un microcontrolador. El esquema alternativo sería colocar solo un nodo de red en un invernadero y conectar los sensores DHT22 al microcontrolador a través del bus serie 1-wire. El alcance del microcontrolador al sensor sería 100 metros y disminuiría el costo de la LPWAN. Sin embargo, la forma de cómo se diseñaron los nodos en este trabajo, permite que cada nodo tenga solo un sensor y pueda moverse e instalarse de manera independiente de los otros. La distancia entre el microcontrolador y sensor no es mayor a 1.5 metros y por lo tanto la ubicación del punto de medida puede determinarse con mayor exactitud que la solución alterna, ya que, en ésta última, los sensores estarían ubicados en un rango de 100 metros del microcontrolador.

#### **5. Conclusiones**

Se obtuvo un sistema que mide remotamente la temperatura y humedad, basado en una LPWAN fácil de instalar, usar y mantener. Es una solución escalable porque el gateway puede comunicarse con 64,536 nodos máximo. Si es necesario reportar temperatura y humedad de invernaderos localizados en otro lugar, solo tiene que instalarse una LPWAN, como la aquí desarrollada, en cada



invernadero. La interfaz de usuario mostrará la temperatura y humedad seleccionando el gateway correspondiente al invernadero deseado. Finalmente, una mejora a este trabajo es aumentar alcance del LPWAN, adicionando y configurando un módulo LL-RXR-27 repetidor entre gateway y nodos de la red.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Abutalipov, R. N., Bolgov, Y.V. & Senov, H. M. Flowering plants pollination robotic system for greenhouses by means of nano copter (drone aircraft). IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS) Proceedings. Nalchik, Russia, October 2016.
- [2] Athukorala, S., Weeraratne, S. & Jayathilaka, D. Affordable real-time environment monitoring system for greenhouses. Manufacturing & Industrial Engineering Symposium (MIES) Proceedings. Colombo, Sri Lanka, October 2016.
- [3] Dayioglu, M. A. Development of real-time wireless monitoring system for greenhouses: Industrial Bluetooth application. 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) Proceedings. Trabzon, Turkey, April 2014.
- [4] Durmus, H., Günes, E. O. & Kirci, M. Data acquisition from greenhouses by using autonomous mobile robot. Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) Proceedings. Tianjin, China, July 2016.
- [5] Mavropoulos, O., Mouratidis, H. & Fish, A. ASTo: A tool for security analysis of IoT systems. IEEE 15th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA) Proceedings. London, UK, June 2017.
- [6] Ismail, M. T., Ismail, M. N. & Sameon, S. S. Wireless Sensor Network: Smart greenhouse prototype with smart design. 2nd International Symposium on Agent, Multi-Agent Systems and Robotics (ISAMSR) Proceedings. Bangi, Malaysia, Agosto 2016.

- [7] Cambra, C., Sendra, S. & Lloret, J. An IoT service-oriented system for agriculture monitoring. IEEE International Conference on Communications (ICC) Proceedings. Paris, France. May 2017.
- [8] Bardyn, J. P., Melly, T. & Seller, O. IoT: The era of LPWAN is starting now. ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference Proceedings. Lausanne, Switzerland, September 2016.
- [9] Hanggoro, A., Putra, M. A. & Reynaldo, R. Greenhouse monitoring and controlling using Android mobile application. International Conference on QiR (Quality in Research) Proceedings. Yogyakarta, Indonesia, June 2013.
- [10] Leong, K. S., Chze, P. L. & Wee, A. K. A multi-factors security key generation mechanism for IoT. Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) Proceedings. Milan, Italy, July 2017.
- [11] Li, Y. W. & Pang, Y. Based on the ZigBee greenhouse grey trend prediction control. International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC) Proceedings. Jeju, South Korea, July 2016.
- [12] Luo, Q., Qin, L. & Li, X. The implementation of wireless sensor and control system in greenhouse based on ZigBee. 35th Chinese Control Conference (CCC) Proceedings. Chengdu, China, July 2016.
- [13] Papadopoulos, G. Z., Matsui, T., Thubert, P. & Texier, G. Leapfrog collaboration: Toward determinism and predictability in industrial-IoT applications. IEEE International Conference on Communications (ICC) Proceedings. Paris, France, May 2017.
- [14] Tian, Y. W., Zheng, P.H. & Shi, R. Y. The Detection System for Greenhouse Tomato Disease Degree Based on Android Platform. 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE) Proceedings. Beijing, China, July 2016.
- [15] Yamakami, T. A dimensional framework to evaluate coverage of IoT services in city platform as a service. International Conference on Service Systems and Service Management Proceedings. Dalian, China, June 2017.