

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diseño de Red de Sensores Inalámbricos para aplicación de Internet de las Cosas en casas de cultivos

Autor: Abel Alejandro Estevez Pérez

Tutores: Ms. C. Richar Sosa López

Dr. C. Iván Santana Ching

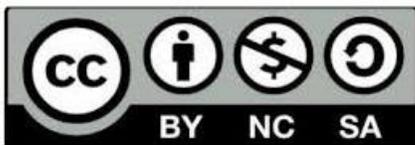
Ing. Diony Roely Castillo Rodríguez

Santa Clara, junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“Cuando el concepto de inalámbrico sea perfectamente aplicado, la tierra entera estará cubierta de un enorme cerebro, siendo todas las cosas partículas de un todo...”

Nikola Tesla, 1926

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermano

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por guiarme a través de los años por el camino correcto y haberme enseñado que todo sacrificio tiene un resultado satisfactorio.

A mi hermano Addiel, para quien siempre he querido ser un ejemplo... estoy muy orgulloso de ti.

A Daneisy, por estar presente de una forma especial desde la primera hasta la última palabra de esta tesis.

Al resto de mi familia, los que están y los que no: A mi abuela Milagros por haberme inculcado desde pequeño el interés por el estudio.

A mis tutores Richar, Ching y Diony, por la ayuda oportuna y los consejos.

Al profesor Algora y los estudiantes de tercer año por haber sido partícipes de este trabajo, en especial a Hendrys y Josué.

Al colectivo de profesores de Automática de la UCLV por la formación brindada en estos cinco años.

A los amigos del aula, por tantas vivencias, noches largas y experiencias: Richar, Annalie, Castellón, Ale el Pita, Eduardo, Mario, el Guille, Jose Raúl, Juan, el Gallego, Cossio, el Canti, al Flako (que le ganó a la muerte) y a los que faltan, ustedes también son parte de estas palabras.

A los que no son del aula...pero son de verdad: Idonis, Euler, Lary, el pati cuadra'o, Julio, Harold, Tommy, Rocío, Nail, Yurima, Adriana...en fin, una lista larga compuesta por los que saben y han sabido cómo ser mis amigos.

A todos muchas gracias

RESUMEN

El desarrollo de aplicaciones de visualización y almacenamiento de parámetros ambientales en cultivos protegidos, llevada a cabo a través de redes de sensores inalámbricos, ha demostrado ser una opción viable para el correcto desarrollo de las siembras. La UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de la provincia de Villa Clara cuenta con un sistema de invernaderos de alta productividad. A pesar de esto, carecen de un sistema para registrar el estado de las variables dentro de ellos, por tanto, la producción se lleva a cabo a través de la experiencia de los trabajadores. En este trabajo se diseña una red de sensores inalámbricos que brinda la posibilidad de realizar una aplicación de Internet de las Cosas, en aras de realizar un sistema de monitoreo de los parámetros del ambiente que rigen el crecimiento de las siembras. Las pruebas realizadas a través de un despliegue en dicha empresa demostraron la efectividad del diseño, almacenando en una base de datos toda la información transmitida desde diferentes lugares dentro de las casas.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	4
CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS EN APLICACIONES DE INTERNET DE LAS COSAS APLICADAS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	5
1.1 Análisis conceptual de IoT	5
1.1.1 Características generales de IoT	7
1.2 Redes inalámbricas.....	9
1.2.1 Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance	10
1.2.2 Estándares de comunicación en redes inalámbricas	11
1.3 Análisis de las redes de sensores inalámbricos.....	12
1.3.1 Características generales de las WSN.....	13
1.3.2 Topologías	14
1.3.3 Dispositivos para redes de sensores en aplicaciones de IoT.....	15

1.3.4	Sistemas operativos para WSN.....	20
1.4	Agricultura de precisión.....	22
1.4.1	Aplicaciones de las WSN e IoT en el sector de la agricultura.....	24
1.5	Conclusiones parciales.....	25
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA DE HARDWARE Y SOFTWARE DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.....		26
2.1	Descripción del hardware que compone la red.....	26
2.1.1	Sensores.....	26
2.1.2	Zolertia RE-mote.....	29
2.1.3	Raspberry Pi 3 Modelo B.....	30
2.2	Arquitectura de hardware de la red.....	31
2.2.1	Nodos de medición.....	31
2.2.2	<i>Gateway</i>	32
2.3	Arquitectura de software.....	33
2.3.1	Selección del sistema operativo para los nodos Zolertia RE-mote.....	33
2.3.2	Pila de protocolos utilizados.....	33
2.3.3	Base de datos.....	36
2.4	Conclusiones parciales.....	38
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DISEÑADA.....		39
3.1	Despliegue de la red.....	39
3.1.1	Gráficas de valores de las variables.....	41
3.2	Análisis energético del diseño.....	44
3.3	Análisis económico y medioambiental.....	46
3.4	Conclusiones parciales.....	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		50

Conclusiones	50
Recomendaciones	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	56

INTRODUCCIÓN

Hoy día, billones de personas en todo el mundo usan Internet para navegar por la Web, enviar y recibir correos electrónicos, acceder a contenido y servicios multimedia, jugar videojuegos, usar aplicaciones de redes sociales y muchas otras tareas. Si bien, cada vez más personas obtendrán acceso a una infraestructura global de información y comunicación, se avecina otro gran salto, relacionado con el uso de Internet como plataforma global para permitir que las máquinas y los objetos inteligentes se comuniquen, dialoguen, calculen y coordinen: el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, *Internet of Things*). Existen disímiles formas de obtener la información del medio físico y transportarla, una de ellas es mediante el despliegue de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés, *Wireless Sensor Networks*). El ámbito de aplicaciones de las WSN en aplicaciones IoT es amplio y en crecimiento y las aplicaciones que engloban trabajos relacionados con la agricultura de precisión en casas de cultivos se hacen cada día más novedosas.

Actualmente, las empresas, personas y entidades que manejan y controlan el entorno de un cultivo, obtienen resultados satisfactorios al hacer uso de WSN al visualizar y controlar variables y parámetros del ambiente, todo esto como parte de una aplicación IoT en muchos casos. Cuando se monitorea mediante una WSN parámetros ambientales como humedad del suelo, intensidad luminosa, temperatura y humedad relativa en una casa de cultivo, se tiene acceso constante y centralizado a estas variables que rigen el crecimiento de los cultivos. Al implementar este sistema, se elimina el trabajo que realiza un operador, que manualmente es el encargado de recoger el valor instantáneo de dichas variables por diferentes lugares de los canteros. De esta forma se eliminan los errores inherentes al factor humano en el proceso de obtención de los parámetros ambientales, esto implica que se reduzcan las pérdidas innecesarias de cultivos provocadas por condiciones anormales. También de una forma más

general, al detectar el estado de los goteros de regadío, la acidez en cada cantero y la presión de agua en las líneas, se dota al proceso productivo de disciplina en la detección de errores y averías, por consiguiente, se tendría la localización directa del problema a través de una interfaz hombre máquina en caso de ser implementada.

La UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de la provincia de Villa Clara, lugar insignia en la producción de alimentos en la provincia, cuenta con un sistema de casas de cultivos donde se cosechan ají, plátano, tomate, entre otras siembras. Dichas casas carecen en su totalidad de un sistema de monitoreo automatizado para el control de variables ambientales en el interior de las casas. Este proceso se realiza a través de la experticia de sus trabajadores y a estimaciones empíricas. Esta forma de llevar a cabo la producción es “funcional” dentro de la empresa, pero no garantiza un máximo de seguridad ni calidad de los sembrados teniendo en cuenta los parámetros ambientales dentro de las casas.

Por todo lo anteriormente dicho, se plantea el **problema científico** de esta investigación: la no existencia de una solución para llevar el monitoreo constante de parámetros ambientales en casas de cultivos de la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de Santa Clara.

Teniendo en cuenta lo mencionado hasta aquí, se plantean los objetivos de esta investigación: **Objetivo general:** diseñar la arquitectura de hardware y software de una red de sensores inalámbricos que permita la adquisición de variables ambientales de interés en una aplicación de IoT en casas de cultivos de la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú”.

Objetivos específicos:

- Analizar las diferentes tecnologías para el diseño de WSN como parte de aplicaciones IoT en la agricultura de precisión.
- Determinar los medios técnicos más adecuados para la adquisición y transmisión fiable de las variables medidas.
- Implementar la arquitectura de hardware y software para la red, a partir de los requisitos operacionales.
- Valorar la efectividad de la arquitectura implementada mediante pruebas experimentales.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente expuestos, se hace necesario la ejecución de las siguientes **tareas de investigación**:

1. Revisión bibliográfica sobre las WSN en aplicaciones de IoT en el sector de la agricultura de precisión.
2. Diseño de una arquitectura de hardware para la obtención de parámetros ambientales en casas de cultivos.
3. Diseño de la arquitectura de software para la obtención de parámetros ambientales en casas de cultivos.
4. Diseño de la red de sensores inalámbrica que permita la transmisión segura y fiable de la información dentro del sistema.
5. Valoración de la efectividad de la propuesta de diseño de arquitectura de software y hardware.

Con este proyecto se pretende la obtención de un sistema de monitoreo de parámetros ambientales en casas de cultivos de la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú”, a través de una Red de Sensores Inalámbricos como primer paso de una aplicación de Internet de las Cosas. Este diseño constituye finalmente un producto nacional a pesar que los componentes son importados, favoreciendo de esta forma la independencia tecnológica. Los componentes de hardware utilizados en esta investigación fueron suministrados por la Empresa de Automatización Integral CEDAI de Villa Clara, para proyectos de investigación con el Grupo de Internet de las Cosas, Automatización e Inteligencia Artificial de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Con la implementación de este sistema se consigue mejorar la calidad de la producción, ya que permite la detección de problemas en los canteros como son el déficit hídrico. Por otro lado, este sistema es aplicable a cualquier entidad que posea elementos que requieran del monitoreo de los parámetros ambientales que se tienen en cuenta en este diseño (temperatura, humedad relativa, iluminancia y humedad del suelo). Los elementos de hardware que componen la red, al ser elementos comerciales hacen viable la implementación del diseño, además, se cuenta con las fuentes del conocimiento para su explotación, lo cual garantiza una interconexión operativa. El costo de la aplicación del proyecto es recuperable debido a la reducción de pérdidas en los cultivos, producto a indisciplinas en el control del entorno de crecimiento y a errores humanos, además, se

obtendría un producto de mejor calidad, lo cual incrementaría el producto interno de la empresa.

Organización del informe

Esta investigación contiene tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Las temáticas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructuradas de la siguiente forma:

CAPÍTULO I: Se abordan los aspectos teóricos fundamentales respecto al IoT, específicamente en las WSN, donde se abordan conceptos, características y trabajos realizados sobre aplicaciones IoT orientadas a la agricultura de precisión. Además, se describen las tecnologías necesarias para el entendimiento en general del funcionamiento y puesta en marcha de una WSN.

CAPÍTULO II: Se describirán con detalles las tecnologías seleccionadas para el diseño de la red, así como su interconexión y arquitectura. Se presentará la arquitectura de software utilizada y las herramientas que se usaron para el diseño de la red.

CAPÍTULO III: Se presentarán el hardware y el software diseñados. Se dedicará además a la evaluación de la efectividad del dispositivo diseñado, a partir de los resultados de las pruebas del funcionamiento del software y hardware. Se finalizará con un análisis energético de la propuesta, además de un análisis económico y medioambiental.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS EN APLICACIONES DE INTERNET DE LAS COSAS APLICADAS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En los comienzos de la revolución de Internet, los usuarios se sorprendieron ante la posibilidad de contactar personas e información en todo el mundo y en diferentes husos horarios. El siguiente paso en esta revolución tecnológica (conectar personas en cualquier momento, en cualquier lugar) es conectar objetos inanimados a una red de comunicación. El internet ha ofrecido a varias esferas de la vida en general, múltiples capacidades que enriquecen y facilitan el acceso a información en nuestras vidas. El uso de nuevas soluciones relacionadas con las WSN e IoT, aplicadas al desarrollo agrícola, han permitido que con varias herramientas se pueda llegar a monitorear y controlar efectivamente los diferentes tipos de cultivos.

En este capítulo se recogen las bases teóricas necesarias para tener un acercamiento a las WSN orientadas a aplicaciones IoT, y específicamente en el sector de la agricultura de precisión.

1.1 Análisis conceptual de IoT

Los agigantados avances que se han producido en los últimos años en los campos de la electrónica y las comunicaciones han permitido la rápida extensión de los sistemas de telecomunicaciones inalámbricas, los dispositivos móviles, así como el desarrollo de servicios ubicuos que proporcionan conectividad en cualquier momento y lugar. Hoy, sin embargo, el papel que desempeñan los dispositivos ya no se limita a conectar a los usuarios

a través de Internet, sino que se ha convertido en una oportunidad para vincular los mundos físico y cibernético. En este proceso de simple concepto, pero de complicada puesta en marcha se introduce el fenómeno del IoT.

Internet de las Cosas fue referido con ese nombre por primera vez en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) por Kevin Ashton mientras realizaba trabajos relacionados con RFID, o sea, identificadores de radiofrecuencia (Ashton, 2009). Debido a que este es un fenómeno que está en constante apogeo y cambio, las definiciones existentes varían en cuanto a sus criterios, por tanto no existe una que esté en su totalidad acertada ni estandarizada, y seguirá en ese estado mientras esta tecnología se encuentre en transformación e incremento de aplicaciones y usos. Sin embargo, diferentes autores proponen su definición de IoT:

(Vermesan et al., 2011a) plantea que IoT es una parte integrada de la Internet del futuro y que podría definirse como una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de autoconfiguración basada en estándares y protocolos de comunicación interoperables, donde "cosas" físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos y personalidades virtuales, usan interfaces inteligentes, y están perfectamente integrados a Internet. La definición planteada por (Casagras, 2011) afirma que es una infraestructura de red global, que une los objetos físicos y virtuales a través de la explotación de captura de datos y capacidades de comunicación. Ofrecerá la capacidad de identificación específica al sensor y la capacidad de conexión como base para el desarrollo de servicios y aplicaciones de cooperación independientes. Por otro lado, (Atzori et al., 2010) define que la idea básica de este concepto es la presencia generalizada a nuestro alrededor de una variedad de cosas u objetos, como las etiquetas de Identificación de Radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), sensores, actuadores, teléfonos móviles, entre otros, a través de esquemas de direccionamiento únicos que pueden interactuar entre sí y cooperar con sus vecinos para alcanzar objetivos comunes. Como se puede observar, la mayoría de los autores presentan al IoT como el Internet del futuro o la evolución del Internet, y la definen como una infraestructura de red global, que une objetos físicos y virtuales, los cuales tienen una identidad propia, con autonomía para recoger datos y la capacidad de comunicarlos.

Según el IBSG (*Internet Business Solutions Group*) de Cisco, el IoT nace en el punto que en el mundo existían más objetos conectados a la gran red que personas en el planeta, se estima que fue aproximadamente en el 2009 (Figura 1.1)(Evans, 2011). En dicha figura se puede

presenciar que se estima que para el año 2020 existirán conectados a Internet aproximadamente 50 mil millones de dispositivos.

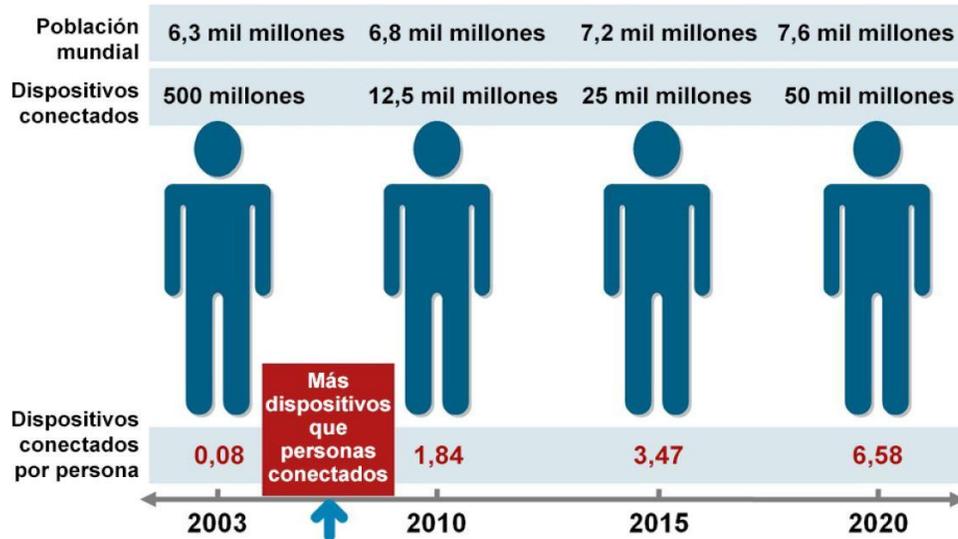


Figura 1.1 Cantidad de dispositivos conectados a Internet en diferentes años por cantidad de personas (Evans, 2011).

1.1.1 Características generales de IoT

Las características principales de IoT se describen a continuación:

- **Interconectividad:** IoT plantea que cualquier cosa puede estar interconectada con la infraestructura global de información y comunicación.
- **Heterogeneidad:** los dispositivos en el IoT son heterogéneos ya que se basan en diferentes plataformas y redes de hardware. Pueden interactuar con otros dispositivos o plataformas de servicio a través de diferentes redes.
- **Cambios dinámicos:** el estado de los dispositivos cambia dinámicamente, por ejemplo, conectados y/o desconectados, así como el contexto de los dispositivos, incluida la ubicación y la velocidad. Además, la cantidad de dispositivos puede cambiar dinámicamente.
- **Escala enorme:** la cantidad de dispositivos que deben administrarse y comunicarse entre ellos serán más que los dispositivos conectados a la Internet actual. Aumentará la gestión de los datos generados y su interpretación para fines de aplicación. Esto se

relaciona con la semántica de datos, así como con la eficiencia y el manejo de datos (SECTOR e ITU, 2012a).

Según lo planteado por (SECTOR e ITU, 2012a), la infraestructura esencial de IoT se construirá alrededor de una arquitectura multicapa, donde los objetos inteligentes se utilizarán para ofrecer diferentes servicios a través de las cuatro capas principales representadas en la Figura 1.2. Estas capas son: una capa de dispositivo, una capa de red, una capa de soporte y la capa de aplicación. En la capa de dispositivos, como indica su nombre, se encuentran los dispositivos (sensores, actuadores, etc) y las pasarelas utilizadas para recopilar las lecturas de los sensores para su posterior procesamiento. La capa de red proporciona las capacidades de transporte y red necesarias para enrutar los datos de la IoT a los lugares de procesamiento. La capa de soporte es una capa de *middleware* que sirve para ocultar la complejidad de las capas inferiores a la capa de aplicación y proporciona servicios específicos y genéricos como almacenamiento en diferentes formas (sistemas de administración de bases de datos y/o sistemas de computación en la nube) y muchos otros servicios como traducción.



Figura 1.2 Modelo de referencia de cuatro capas de IoT (SECTOR e ITU, 2012b).

Las cifras mostradas en la Figura 1.1, anuncian implícitamente que el dominio de aplicaciones de IoT está en una exponencial de crecimiento a nivel mundial, este dominio se puede enmarcar en tres grandes ramas, como muestra la Tabla 1.1 (Vermesan et al., 2011b).

Tabla 1.1 Dominios de aplicaciones de IoT (Vermesan et al., 2011b).

Dominio	Descripción	Ejemplos
Industria	Actividades que involucran finanzas o transacciones comerciales entre empresas, organizaciones y otras entidades.	Fabricación, logística, servicios, banca, sector financiero, autoridades gubernamentales e intermediarios.
Medio ambiente	Actividades relacionadas con la protección, monitoreo y desarrollo de todos los recursos naturales.	Agricultura y crianza de animales, reciclaje, servicios de gestión ambiental y gestión energética.
Sociedad	Actividades e iniciativas relacionadas con el desarrollo e inclusión de sociedades, ciudades y personas.	Servicios gubernamentales hacia ciudadanos y otras estructuras de la sociedad (por ejemplo, ancianos y discapacitados).

1.2 Redes inalámbricas

El término red inalámbrica se utiliza para designar la conexión de nodos que se da por medio de ondas electromagnéticas, sin necesidad de una red cableada o alámbrica. Una de sus principales ventajas es notable en los costos, ya que se elimina el cableado y conexiones físicas entre los nodos, pero también tiene una desventaja considerable ya que para este tipo de red se debe tener una seguridad mucho más exigente y robusta para evitar a los intrusos (Madrid Molina, 2006).

El sector de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, que coordina el uso mundial compartido del espectro radioeléctrico, ha reservado varias bandas de frecuencias para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*, por sus siglas en inglés). Las bandas de ISM no tienen licencia y varían ligeramente de un país a otro. Las bandas ISM populares en los últimos años son 433

MHz, 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, que son utilizadas por sistemas de comunicación inalámbricos como controles remotos, teléfonos inalámbricos y Wi-Fi respectivamente, siendo esta la más difundida por su uso a nivel mundial (Reiter, 2014). A continuación, se hará un análisis de las redes inalámbricas con respecto a su clasificación y estándares que utilizan.

1.2.1 Clasificación de las redes inalámbricas según su alcance

Las redes inalámbricas se pueden clasificar atendiendo a diferentes parámetros. Uno de ellos es con respecto a la distancia espacial a la que pueden estar ubicados los elementos que componen la red, o sea, su alcance.

WBAN (*Wireless Body Area Network*): las redes de área corporales son una red de sensores de propósito especial diseñada para operar de manera autónoma para conectar varios sensores y aparatos médicos o de otro tipo, ubicados dentro y/o fuera de un cuerpo humano (Khan y Yuce, 2010). Estas redes trabajan en el rango de frecuencia de la banda MICS (*Medical Implantable Communication Service* por sus siglas en inglés) de 402 – 405 MHz (Bernal, 2005). Las redes inalámbricas de área corporal son una de las tecnologías más adecuadas para construir sistemas de monitoreo de salud portátiles discretos, escalables y robustos (Otto et al., 2006).

WPAN (*Wireless Personal Area Network*): las redes inalámbricas de área personal están ideadas para cubrir un área del tamaño de una habitación aproximadamente. Tradicionalmente este tipo de redes fue basado en infrarrojos que permiten la comunicación entre dos elementos (ordenadores portátiles, PDAs, etc.) a baja velocidad y a una distancia cercana. Hoy por hoy, la tecnología de radio frecuencia denominada Bluetooth es el estándar en auge (Werchau y Nazar, 2013). En 2003, se publicó la Norma IEEE 802.15.3-2003 titulada "Parte 15: Control de acceso a medio inalámbrico (MAC) y Capa física (PHY) Especificaciones para redes de área personal de alta velocidad (WPAN)". Este estándar define los requisitos de MAC y PHY para una WPAN a 2.5 GHz que proporciona servicios de datos de hasta 54 Mb/s (Fisher, 2007).

WLAN (*Wireless Local Area Network*): Una red de área local inalámbrica es una red que cubre un área equivalente a la red local de una empresa, con un alcance aproximado de cien

metros. Permite que los nodos que se encuentren dentro del área de cobertura puedan conectarse entre sí. Existen varios tipos de tecnologías, entre ellas: IEEE 802.11 en sus variantes 802.11 a, b, g, las cuales ofrecían hasta el año 2009 una velocidad máxima de 54 Mbps. A partir de octubre del 2009 con el advenimiento del estándar 802.11 n supera los 100 Mbps (Werchau y Nazar, 2013).

WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*): las redes inalámbricas de área metropolitana, son redes no cableadas que cubren un área extensa de 15 Km aproximadamente en la práctica. Estas redes se rigen bajo el estándar IEEE 802.16 y su uso eficiente es orientado a trabajar en las bandas de frecuencia licenciadas entre 10 y 66 GHz y las no licenciadas entre 2 y 11 GHz. Dentro de las aplicaciones más importantes de estas redes está ofrecer servicios a zonas rurales de difícil acceso, a las que no llegan las redes cableadas (Gamboa Vargas, 2007).

1.2.2 Estándares de comunicación en redes inalámbricas

La selección de los estándares de comunicación son la primera decisión a tomarse cuando se desea diseñar una red inalámbrica de cualquier tipo, ya que de estos estándares dependerá toda la comunicación de la red (Castillejo Erviti, 2013).

Existen varios estándares de comunicación bajo los cuales se rigen las comunicaciones en diferentes tipos de redes inalámbricas, a continuación, se describen los más difundidos:

A. WiFi/802.11.

Es posible considerar como WiFi a todos aquellos dispositivos inalámbricos que utilizan los estándares IEEE 802.11. WiFi funciona en las bandas de 2.4 GHz y la de 5GHz. Usando medios convencionales, abarca un rango de hasta 100 metros en espacios sin obstáculos y 20 metros en edificios aproximadamente. WiFi utiliza un gran consumo energético debido a que permite la transmisión de datos a grandes velocidades, además permite implementar redes de topología ad-hoc, estrella y árbol (del Valle y David, 2014).

B. Bluetooth/802.15.1

Dentro de los estándares de las WPAN se encuentra es protocolo. Bluetooth funciona entre las frecuencias de 2.4 y 2.485 GHz, pudiendo alcanzar hasta 40 metros de alcance. Permite conectar solo 8 dispositivos y se despliega generalmente en topologías punto a punto o

estrella, siendo esta una tecnología de baja potencia y por tanto requiere baja demanda energética de los dispositivos. Posee un estándar de baja energía denominado Bluetooth *Low Energy* (BLE por sus siglas en inglés). BLE fue diseñado para una transmisión de datos más baja reduciendo significativamente el consumo. Con BLE se incrementa el número de dispositivos que pueden ser conectados hasta un número entre 10 y 20 (Martínez Carreras, 2016).

C. IEEE 802.15.4

Este estándar de comunicaciones especifica la capa física y la de acceso al medio para redes personales de bajo consumo y es la parte básica de tecnologías como ZigBee, MiWi o WirelessHART. Al contrario que WiFi, este estándar está específicamente diseñado para redes WPAN con dispositivos muy cercanos unos a otros, con poca o ninguna infraestructura y haciendo especial hincapié en velocidades de transmisión bajas y muy bajo consumo, lo cual la hace ideal para IoT. Tiene una frecuencia de funcionamiento de 868 MHz en Europa, de 902-928 MHz en Estados Unidos y de 2400-2483.5 MHz a nivel mundial (González García, 2017). Basado en este estándar se desarrolló el protocolo de más alto nivel ZigBee, el cual permite velocidades de transmisión de hasta 250 Kbps y opera en las frecuencias de 2.4 GHz, 868 MHz y 915 MHz. Es capaz de adoptar topologías de red en malla y estrella. Este protocolo es ideal para redes de sensores, debido a su bajo consumo de potencia, a la capacidad de hibernar durante largos periodos de tiempo y a los cortos ciclos de funcionamiento (Sánchez-Lagares, 2016).

1.3 Análisis de las redes de sensores inalámbricos.

Las WSN son una forma temprana de redes de información y comunicación ubicuas, además, son uno de los pilares del Internet de las cosas. Una red de sensores se compone de un gran número de nodos sensores que están densamente desplegados ya sea dentro del fenómeno o muy cerca de ello (Akyildiz et al., 2002a). El caso más significativo de las redes de sensores son las Redes de Sensores Inalámbricos.

Una WSN consiste una serie de dispositivos autónomos dotados de sensores, distribuidos espacialmente para monitorizar condiciones físicas o ambientales para transmitir

cooperativamente sus datos a través de la red a una ubicación principal (Akyildiz et al., 2002b).

Dicho dispositivo autónomo es nombrado en muchos trabajos como “*mote*”, palabra que proviene de la traducción al inglés de “mota de polvo”, de esta manera se deja implícito dos de sus características: el reducido tamaño y la idea de que pueden estar ubicados en cualquier lugar (Gascón, 2010).

1.3.1 Características generales de las WSN

Al poder formar parte de cualquier entorno, las WSN pueden poseer características muy específicas, pero hay una serie de ellas que son propias de todas (Cianca, 2012a) :

- **Topología Dinámica:** En una red de sensores, la topología siempre está en cambio constante y éstos tienen que ajustarse para poder comunicar nuevos datos adquiridos.
- **No se utiliza infraestructura de red:** Una red de sensores no tiene necesidad alguna de infraestructura para entrar en funcionamiento, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o enrutadores de la información.
- **Tolerancia a errores:** Un dispositivo sensor dentro de una red sensora debe tener la capacidad de seguir en funcionamiento incluso al tener errores en el sistema propio.
- **Consumo energético:** Es uno de los factores más delicados, debido a que en estos dispositivos se debe conjugar autonomía con capacidad de procesamiento, ya que actualmente cuentan con una unidad de energía limitada. Un nodo sensor tiene que contar con un procesador de consumo ultra bajo, así como de un transceptor radio con la misma característica, a esto hay que agregar un software que también consuma los recursos de necesarios, haciendo el consumo aún más restringido.
- **Limitaciones hardware:** Para poder conseguir un consumo limitado, se hace necesario que el hardware sea lo más sencillo posible, así como su transceptor de radio, esto nos deja una capacidad de procesamiento limitada.

1.3.2 Topologías

Las WSN también pueden ser categorizadas por su topología, o sea, la forma en que los nodos de la red se organizan y conectan entre sí. Las topologías que se pueden implementar en una red de sensores dependen de los protocolos de comunicación que se estén utilizando.

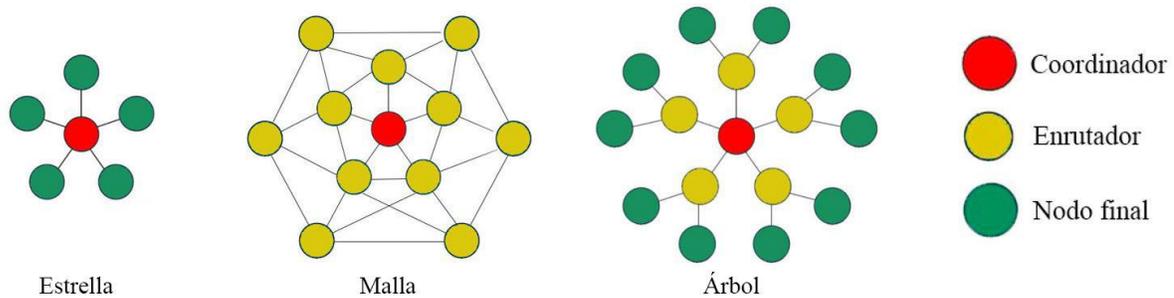


Figura 1.4 Topologías de las redes inalámbricas.

En una red de sensores pueden existir tres tipos de nodos, los cuales desempeñan un papel distinto en el sistema general y se ubican en diferentes partes de la red, estos nodos son: coordinador, enrutador y nodo final (Figura 1.4). El **nodo coordinador** es el nodo que desempeña la función de iniciar la formación de la red y del canal de comunicación. Como también debe recolectar y/o enviar al exterior los paquetes recibidos, suele ser un nodo con menos restricciones que los restantes (Martínez et al., 2009). El **nodo enrutador** se encarga de comunicar dispositivos que están fuera del alcance de la red, visto de otra forma, representa a un nodo que crea y mantiene la información de toda la red, además, tiene la capacidad de determinar la mejor ruta para enviar un paquete (Fernández Cruz, 2017). Por último, se encuentran los **nodos finales** o nodos de medición que desempeñan la función de obtener la información del medio físico mediante los sensores incorporados y transmitirla a través de la red hasta el coordinador de red (Fernández Cruz, 2017; Martínez et al., 2009).

Dentro de las varias topologías utilizadas se encuentran (Figura 1.4):

Estrella: en esta topología, todos los nodos están conectados a un nodo central, que también suele utilizarse como puerta de enlace a Internet. Las ventajas que presenta esta topología son su sencillez en la implementación y baja latencia; su desventaja principal es la poca escalabilidad y la alta posibilidad de colisiones (Reiter, 2014). Un ejemplo popular de una topología en estrella, a pesar de no ser una red de sensores, es una red Wi-Fi, donde el nodo central se llama punto de acceso y los otros nodos se llaman estaciones.

Malla: en esta configuración, existirá más de dos conexiones en al menos uno de los nodos. Estas redes están formadas por un coordinador, enrutadores y nodos finales, esto puede variar y no tener nodos finales, sino que todos sean enrutadores como el ejemplo de la Figura 1.4. Los nodos pueden establecer comunicación con cualquier otro dispositivo, mediante los enrutadores que actúan de repetidores. La ventaja de este tipo de redes es su flexibilidad, ya que la transmisión de datos es continua a pesar de que exista fallo en uno o varios nodos. El inconveniente principal del uso de esta topología es el incremento en la complejidad y el requerimiento de una mayor capacidad de cómputo al tener que elegir el camino más apropiado (Cianca, 2012b).

Árbol: la topología árbol presenta la característica de que existen varias subredes donde el coordinador forma el primer clúster. Los nodos finales en esta topología no se pueden comunicar entre sí, y los enrutadores preceden al coordinador desempeñando la función de enrutar la información recibida por los nodos finales hasta el coordinador. La ventaja más palpable de esta topología es su alta escalabilidad y la baja tasa de colisiones, a pesar de que si un enrutador falla, se pierde gran parte de la red, siendo esta su principal desventaja (Fernández Cruz, 2017).

Redes ad-hoc: La topología de las redes de sensores inalámbricas en muchos casos es dinámica y desconocida, debido al número variable de dispositivos que están conectados en un momento dado. Por tanto, en varios casos las WSN son redes malladas tipo ad-hoc. Estas redes no poseen infraestructura, son flexibles y todos los nodos ofrecen servicios de encaminamiento, o sea, todos los nodos además de realizar la función de nodos finales también son enrutadores. Esta capacidad permite hacer llegar paquetes muy distantes hasta el coordinador donde no hay cobertura directa, de esta forma se ofrece la posibilidad de incrementar en gran medida la movilidad y el tamaño de la WSN (Martínez et al., 2009).

1.3.3 Dispositivos para redes de sensores en aplicaciones de IoT

Una WSN se compone de varios dispositivos que en conjunto forman la red, dígame sensores, actuadores en algunos casos, transceptores de radio, fuentes de alimentación y el microcontrolador. Este último es el que más puede variar en el diseño de la red. En la actualidad, varias compañías producen dispositivos mucho más orientados al concepto de IoT. Estos se alejan de ser un simple microcontrolador, pues algunos incluyen antenas y

cuentan con gran capacidad de memoria y de procesamiento, convirtiéndolos en dispositivos idóneos para el diseño de una WSN en una aplicación de IoT. A continuación, se describen algunos dispositivos del mercado sobre los cuales se puede construir un nodo en una WSN:

A. TelosB

El TelosB TPR2420 de MEMSIC es una plataforma de código abierto para disímiles aplicaciones. El TPR2420 reúne todos los elementos esenciales para los estudios de laboratorio en una sola plataforma que incluye: capacidad de programación USB, una radio IEEE 802.15.4 con antena integrada, una MCU de baja potencia con memoria extendida y un conjunto de sensores opcionales. Este dispositivo tiene las siguientes características:



Figura 1.5 TelosB de MEMSIC.

- Transceptor compatible con IEEE 802.15.4.
- 2.4 a 2.4835 GHz, una banda ISM compatible globalmente.
- Velocidad de datos de 250 kbps.
- Antena integrada a bordo.
- Microcontrolador TI MSP430 de 8 MHz con 10kB de RAM.
- Bajo consumo de corriente.
- 1MB de flash externo para el registro de datos.
- Programación y recopilación de datos a través de USB.
- Conjunto de sensores que incluye sensor integrado intensidad luminosa, temperatura y humedad.
- Ejecuta el sistema operativo TinyOS 1.1.11 o superior.

Una de las grandes ventajas de esta plataforma es su precio considerando las aplicaciones y los sensores integrados que dispone. Todo ello con un muy bajo consumo de energía, convirtiendo la plataforma en un perfecto demostrador de tecnologías y una de las plataformas con más posibilidades para el estudio de rendimiento de los diferentes protocolos (del Valle y David, 2014).

Un ejemplo de una aplicación donde se realiza una WSN, donde la unidad de procesamiento de los nodos son dispositivos TelosB para el regadío inteligente, se muestra en (Angelopoulos et al., 2011). La arquitectura del sistema incluye sensores de humedad del suelo, electroválvulas accionadas por nodos que controlan el flujo de agua hacia las plantas, y una aplicación Java ejecutándose en una PC, que recoge datos de la red de sensores y los almacena en una base de datos MySQL.

B. Zolertia Z1

La plataforma Z1 ha sido desarrollada por la compañía Zolertia con base en Barcelona. Al igual que la plataforma TelosB, este es un dispositivo de desarrollo para WSN con fines de investigación fundamentalmente y comparte muchas de sus características. Sin embargo, el producto final puede ser usado también en entornos de producción ya que dispone de carcasa protectora. Algunas características técnicas del Z1 son (Tzounis et al., 2017):

- Dispone de un radio transmisor ampliamente usado (CC2420) y compatible tanto con IEEE 802.15.4 como con 6LoWPAN¹ y ZigBee.
- Dispone de antena integrada, con la posibilidad de instalarle una antena externa.
- Dispone de un microcontrolador MSP430 de segunda generación de 16 bits y ultra bajo consumo.
- Disponible con alimentación mediante USB, baterías (2 x AA o 2 x AAA) e incluso pila de moneda.
- Dos sensores integrados: acelerómetro de 3 ejes y sensor de temperatura.
- Compatibilidad con el sistema operativo TinyOS y Contiki.

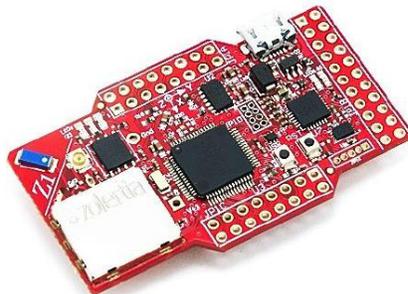


Figura 1.6 Zolertia Z1 sin carcasa.

¹ Protocolo que posibilita el uso de IPv6 sobre el protocolo IEEE 802.15.4.

El coste de esta plataforma es bastante superior a los de la plataforma TesloB, en cambio, está mucho más próxima a un producto final, siendo más sencilla la instalación y uso por parte de un cliente final (y no un desarrollador).

En el trabajo presentado por (Tzounis et al., 2016) se presenta un sistema WSN donde los nodos están formados por Zolertia Z1 a la cual se le realizaron pruebas. Este sistema es capaz de monitorear con precisión el clima y los factores de las plantas, instalado durante largos períodos en dos invernaderos comerciales similares. La aplicación registra y analiza gradientes climáticos relacionados con las características estructurales de las instalaciones disponibles y su efecto potencial sobre las plantas. La supervisión del estado de cultivo se logra a través de módulos de temperatura infrarrojos y de detección remota. Además, se presenta un análisis de los efectos del clima en la calidad de la comunicación.

C. Zolertia RE-mote

La Figura 1.7 muestra el Zolertia RE-mote de la compañía española Zolertia, este dispositivo cuenta con muchas de las características del modelo Z1, incluidas muchas mejoras como el incremento de la memoria y de la frecuencia del reloj.

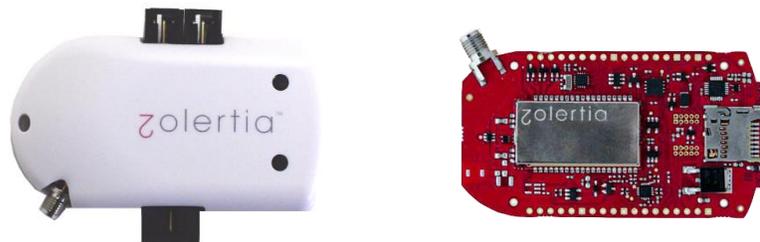


Figura 1.7 Zolertia RE-mote con carcasa (izquierda) y sin carcasa (derecha).

A continuación se mencionan las características fundamentales de este dispositivo (Colina et al., 2015a)

- Contiene un procesador CC2538 ARM Cortex-M3 con una frecuencia de reloj de 32 MHz y una memoria flash de 512 KB y 32 KB de RAM.
- Dos transceptores inalámbricos compatibles con IEEE 802.15.4 incorporados: 2.4GHz y 863-950MHz.
- Posee ranura para tarjeta Micro-SD.

- Es programable mediante USB.
- Consumo por debajo de 150 nA usando el modo de apagado.
- Reloj Calendario en Tiempo Real (RTCC, *Real Time Clock Calendar*) integrado.
- Amplio rango de voltaje de entrada, 3.3 a 16 Vdc.
- Soporte para sistemas operativos de código abierto como Contiki y TinyOS.

D. Wasmote

Wasmote es una plataforma de sensor inalámbrico de código abierto especialmente enfocada a la implementación de modos de bajo consumo para permitir que los nodos sensores sean completamente autónomos y alimentados por batería, ofreciendo una vida útil variable de 1 a 5 años dependiendo del ciclo de trabajo y la radio utilizada (Reyes Mena, 2014).

Características técnicas:

- Puede incluir módulos ZigBee, GSM, 3G/GPRS, GPS, tarjetas de memoria y módulos de sensores.
- Contiene el microcontrolador ATmega1281 a 14MHz.
- Posee una memoria EEPROM de 4Kb, una SRAM de 8Kb y una FLASH de 128Kb.

Esta plataforma tiene un precio relativamente elevado con respecto a las otras descritas (Izquierdo et al., 2017), pero tiene un mayor nivel de especialización para entornos agrícolas.



Figura 1.8 Dispositivo Wasmote.

En el Anexo I se puede apreciar la comparación de una serie de dispositivos usados en WSN e IoT.

1.3.4 Sistemas operativos para WSN

Un sistema operativo (Silberschatz et al., 1991) es un programa que actúa como intermediario entre el hardware y una aplicación. El objetivo fundamental de un sistema operativo es abstraer el uso del hardware, permitiendo desarrollar aplicaciones independientes al hardware utilizado. El segundo propósito es utilizar el hardware de manera eficiente, haciendo uso de los recursos de hardware disponibles de tal manera que se evite el mal uso del procesador, y como consecuencia, de la energía disponible. Entonces, para que se pueda manejar los recursos de las motas y se pueda ofrecer una interfaz con el hardware para que este sea independiente de las aplicaciones, es necesario la implementación de un sistema operativo.

Uno de los sistemas operativos libres con mayor penetración en dispositivos IoT es Contiki. Está especialmente diseñado para conectar microcontroladores de muy bajo consumo y bajo coste con internet, todo ello respetando los estándares de comunicación de IoT, como IPv6, IPv4, 6LoWPAN, RPL, CoAP. Otra de las características que definen a Contiki es la sencillez de desarrollo de aplicaciones al ser escritas en C y disponer de un simulador de redes que permite emular el diseño antes de ser impreso en el hardware (Colina et al., 2015a). Algunas de las características de este sistema operativo son:

- Eficiencia en la gestión de memoria: Al estar diseñado para sistemas con tan solo unos cuantos *kilobytes* libres dispone de varios mecanismos para ayudar con la gestión y manejo de memoria. Por ejemplo, el cargador de programas es una estructura dinámica donde se reemplazan los *drivers* en el tiempo de ejecución y sin necesidad de compilar todo el sistema nuevamente.
- Integración completa con redes IP: Contiki provee de una capa completa de red IP, soportando tanto los protocolos comunes tales como UDP, TCP y HTTP como los nuevos estándares como 6LoWPAN, RPL y CoAP.
- Implementación de los procesos por medio de *protothreads*. Los *protothreads* son hilos muy ligeros en cuanto a recursos que no requiere una pila propia para almacenar variables. Estos eliminan el uso de máquinas de estado, y esto a su vez incrementa la legibilidad y ligereza de los programas.
- Gestión de consumo de energía: Para ayudar al desarrollo de los sistemas de bajo consumo que requieren funcionar durante años con un par de baterías, Contiki

dispone de varios mecanismos para estimar el consumo energético y ayudar de esta manera a identificar los puntos críticos de consumo.

- Cargador dinámico de módulos: Otra de las características interesantes de Contiki es que dispone de soporte para modificar el comportamiento de los sistemas incluso después de la implantación mediante un cargador de módulos que puede cargar, recolocar y enlazar ficheros.
- Simulador de red Cooja: Uno de los puntos más críticos a la hora de desarrollar software para IoT proviene de depurar aplicaciones en instalaciones con un alto número de dispositivos. Contiki provee de un simulador que facilita la tarea de desarrollo y depuración de errores sin ser necesario realizar la impresión final del software en el dispositivo.

La gran flexibilidad de poder usar los protocolos Ipv4, Ipv6 o protocolos nuevos como 6LoWPAN, además que sea una plataforma de software libre con desarrollo comunitario lo convierte en una de las alternativas más potentes en el desarrollo de aplicaciones de IoT y con mayor futuro.

Uno de los primeros sistemas operativos creados para WSN fue TinyOS (Levis et al., 2005), fue desarrollado por la Universidad de Berkeley. Sus principales características son el uso de un reducido tamaño de memoria, su bajo consumo de energía (bastante optimizado) y la ejecución de operación de concurrencia intensiva (simultaneidad en la ejecución de múltiples tareas interactivas). El sistema TinyOS está basado en un modelo de programación controlado por eventos en lugar de multiprocesos. Los programas de TinyOS están compuestos por eventos y tareas guiadas, los cuales están escritos en el lenguaje de programación conocido como NesC (extensión del lenguaje de programación C). El diseño de TinyOS permite que los eventos se ejecuten rápidamente pudiendo interrumpir a las tareas, que llevaran una mayor carga computacional.

El sistema operativo MantisOS fue desarrollado en la Universidad de Colorado. Éste es un sistema operativo para redes de sensores que facilita la programación de nuevas aplicaciones con una aproximación completamente diferente. MantisOS utiliza un planificador multihilo que permite conmutar entre tareas. La posibilidad de tener diferentes tareas conmutando incrementa la cantidad de memoria RAM utilizada, además hace necesario realizar más operaciones que suponen más consumo energético. Posee un sistema de reprogramación

dinámica e incluye un sistema de control remoto que sirve para obtener información del nodo en tiempo real (Bhatti et al., 2005). MantisOS está programado en lenguaje C estándar, lo que implica una curva de aprendizaje menor y facilita la portabilidad de aplicaciones de terceros.

Tabla 1.6 Comparación entre algunos sistemas operativos para WSN (Derpsch, 2012).

Sistema operativo	Basado en Tareas	Soporte multitarea	Reprogramación inalámbrica	Compatibilidad TCP/IP
Contiki		X	X	X
TinyOS	X			
MantisOS		X	X	

En la tabla 1.6 se muestra una comparación entre los diferentes sistemas operativos para WSN, donde se aprecia que para aplicaciones donde se requiera acceso a Internet, conviene usar Contiki, ya que implementa TCP/IP en su distribución.

1.4 Agricultura de precisión

En los últimos años, han surgido nuevas tendencias en sector de la agricultura. Gracias a los desarrollos en el campo de redes de sensores inalámbricos, así como la miniaturización de los paneles de sensores, la agricultura de precisión comenzó a surgir. Este concepto en la agricultura se concentra en proporcionar los medios para observar, evaluar y controlar las prácticas agrícolas. Una faceta de la agricultura de precisión se concentra en el manejo de cultivos específicos. Esto abarca diferentes aspectos, como el monitoreo del suelo, los cultivos y el clima en un campo; generalizando los resultados a un paquete completo (Baggio, 2005). La aplicación de la agricultura de precisión consta de tres etapas fundamentales como muestra la Tabla 1.7 (Ortega et al., 1999). En esta tabla se evidencia el uso de sensores como tecnología involucrada. Estos sensores pueden ser de uso directo o remoto, para la medición de diferentes parámetros como el estado del suelo y de los cultivos; a su vez pueden formar o no, una red de sensores inalámbricos.

La puesta en marcha del concepto de agricultura de precisión, permite obtener resultados satisfactorios como son (García y Flego, 2008):

- Gestión optimizada de las explotaciones.

- Reducción de la aplicación de pesticidas y productos fertilizantes.
- Menor impacto sobre el medio ambiente.

Tabla 1.7 Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Ortega et al., 1999).

Etapa	Tecnología involucrada	Actividades
Recolección e ingreso de datos.	<p>Sistemas de posicionamiento global.</p> <p>Sistemas de información geográfica (SIG).</p> <p>Instrumentos topográficos.</p> <p>Sensores remotos.</p> <p>Sensores directos.</p>	<p>Medición de la topografía del suelo.</p> <p>Muestreo de suelos en grilla.</p> <p>Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades.</p> <p>Monitoreo de rendimientos.</p> <p>Medición directa de propiedades del suelo y cultivos.</p> <p>Medición remota de suelos y cultivos.</p> <p>Digitalización de mapas.</p>
Análisis, procesamiento e interpretación de la información.	<p>Programas de SIG.</p> <p>Sistemas expertos.</p> <p>Programas estadísticos.</p> <p>Experiencia del operador .</p>	<p>Análisis de dependencia espacial.</p> <p>Confeción de mapas de evaluación.</p> <p>Confeción de mapas de prescripción.</p>
Aplicación diferencial de insumos.	<p>Tecnología de dosis variables.</p> <p>Pulverización asistida por GPS.</p> <p>Programas computacionales.</p>	<p>Aplicación variable de nutrientes.</p> <p>Aplicación variable de plaguicidas.</p> <p>Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas.</p>

- Obtención de productos con mayor valor nutritivo.
- Obtención de información más precisa y de trazabilidad, muy importantes en las zonas con carencias de nitrógeno.

- Reducción de combustibles en los tractores, combinadas y otros medios y tecnologías que demanden combustible.

La conexión de los sensores y actuadores con los elementos de registro y visualización por parte de los operadores se puede realizar de forma cableada o inalámbrica. Si el diseño es cableado trae consigo una serie de desventajas en la instalación. Por ejemplo, el incremento del costo de la aplicación por el uso de varios metros de cable y por mantenimiento en caso que los cables sean dañados por la maquinaria agrícola. Por otro lado, las redes inalámbricas eliminan los anteriores problemas. Entonces no es de extrañar que, en la literatura científica de los últimos años, se mencione a las WSN como una tecnología prometedora en el campo de la agricultura de precisión.

1.4.1 Aplicaciones de las WSN e IoT en el sector de la agricultura

En (Carrasquilla-Batista et al., 2016) con el objetivo de aumentar la comprensión del crecimiento de las plantas en áreas de cultivos protegidos, se integraron las capacidades de IoT en un invernadero. Se proporcionó así una plataforma para los investigadores que les permitió tomar decisiones en el momento correcto sobre el riego, requisitos de humedad y de nutrientes. El sistema diseñado consiste en circuitos electrónicos, sensores, comunicación móvil, actuadores y software que se ejecutan en la nube. La funcionalidad del sistema fue probada en una producción de pepino vegetal en un invernadero, donde los datos adquiridos de las variables, las condiciones del sustrato y las mediciones del regadío son enviados por Internet para su análisis remoto por parte de los investigadores.

(Li et al., 2014) presenta un método para realizar la transmisión de los datos de una WSN e Internet. La puerta de enlace IoT se usa como parte del sistema de monitoreo del invernadero. El método de acceso a los datos es múltiple y compatible con el diseño, también los datos pueden almacenarse localmente. La puerta de enlace IoT usa STM32 como unidad microcontroladora, y Contiki como sistema operativo incorporado. La aplicación demuestra que la puerta de enlace es confiable, compatible y extensible. Debido a esta entrada, el sistema de monitoreo del invernadero se realizó en tiempo real, y mejoró la capacidad de automatización y la supervisión inteligente del invernadero (Li et al., 2014).

En el artículo de (Duquea, 2017) se describe el diseño de una plataforma de monitoreo remoto y control de variables ambientales para agricultura de precisión, flexible y de bajo costo. Para la construcción de dicha plataforma se emplearon tecnologías con WSN, basadas en el protocolo de comunicación Zigbee, utilizando el microcontrolador Arduino, mediante software y hardware libre. La red está compuesta por un nodo central (coordinador) y dos nodos donde se encuentran conectados los sensores para las lecturas de las variables medioambientales y estas se exhiben en un entorno gráfico. Finalmente, los datos son subidos a la nube para que el usuario pueda acceder a la información en tiempo real desde cualquier lugar.

En la región de Santiago de Cuba, específicamente en las casas de cultivos protegidos “San José” se realizó la simulación de una WSN con el propósito de visualizar en tiempo real parámetros como temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa. Las posibles plataformas para el diseño fueron Waspote de la compañía Libelium y eKo de Crossbow, donde se eligió esta última debido a la buena durabilidad de las baterías porque pueden ser recargadas con paneles solares. Crossbow fabrica 5 sensores: sensor de temperatura y humedad del suelo, un sensor que obtiene el contenido volumétrico de agua en el suelo, uno de humedad relativa y temperatura ambiente, un sensor que permite predecir enfermedades y proteger el dosel vegetal y un sensor de radiación solar. Se escogió la topología en árbol porque asegura una tolerancia a fallos razonable con mayor escalabilidad y eficiencia energética (Amondaray et al., 2018).

1.5 Conclusiones parciales

Se puede afirmar que las WSN son parte de las comunicaciones en un ecosistema IoT. Los nodos sensores inalámbricos recolectan la información que es transmitida a los demás componentes de una solución de IoT, para ser analizada y finalmente usada por las aplicaciones. Se evidencia en la revisión bibliográfica que en la actualidad es un baluarte el uso de WSN para el correcto monitoreo de las casas de cultivo. Las plataformas de la compañía Zolertia cuentan con una serie de características que la hacen ideal para el diseño de la red en cuestión, así como el sistema operativo Contiki.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA DE HARDWARE Y SOFTWARE DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

Las WSN en aplicaciones de IoT en casas de cultivos pueden tener varias configuraciones y arquitecturas. Estas se pueden realizar con varias tecnologías de cómputo y estándares de comunicación, las variantes existentes deben tener como objetivo final la transmisión fiable de la información a través de la red de sensores hasta el nodo coordinador para el posterior tratamiento de los datos.

En el presente capítulo se describen los elementos de hardware utilizados en el diseño de la red; se describen los diseños de la arquitectura de hardware y software de la red de sensores inalámbricos, además se argumenta el porqué de la selección de cada uno de dichos elementos.

2.1 Descripción del hardware que compone la red

2.1.1 Sensores

Los parámetros ambientales de interés para las casas de cultivos de la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de Santa Clara, basado en criterios de expertos son: humedad relativa, temperatura ambiente, intensidad luminosa y humedad del suelo. Para la medición de estas variables se equiparon cada uno de los nodos de medición con sensores para los cuales existen bibliotecas en la comunidad de software libre que facilitan su uso, y poseen una interfaz de fácil conexión y comunicación con placas microcontroladoras de compañías como Arduino, Raspberry Pi y Zolertia.

Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22

Este sensor (Figura 2.1) está compuesto de dos partes fundamentales: un sensor de humedad capacitivo y un termistor. Está dotado de un circuito integrado que acondiciona las señales leídas de cada variable y envía sus valores a través de un bus serie sincrónico bidireccional de una sola línea. El DHT22 posee las siguientes características técnicas (Aosong Electronics Co.Ltd, 2016) :

- Alimentación de 3.3V a 6VDC.
- Señal de salida: señal digital por un bus simple.
- Rango de operación: 0 a 100% para la humedad relativa(RH, *relative humidity*), -40 a 80°C para la temperatura.
- Resolución: 0.1% RH y 0.1°C.



Figura 2.1 Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22.

Dentro de la familia DHT de sensores, se encuentra el DHT22, que ofrece mejor precisión y tiene la misma interfaz y protocolo de comunicación que el DHT11.

Módulos de sensor de humedad del suelo YL-69 y YL-38

Este sensor se usa para medir la humedad del suelo. Se aplica una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69 y se hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y ésta depende directamente de la humedad. Por lo tanto, al aumentar la humedad, la corriente crece y al disminuir, la corriente disminuye. Necesita del módulo YL-38 que contiene un circuito comparador LM393 SMD, un led de encendido y otro de activación de salida digital. El YL-38 presenta dos pines de conexión hacia el módulo YL-69, dos pines para la alimentación y dos pines de datos (Sunrom Co., 2017).

Características de este sensor (Sunrom Co., 2017):

- Voltaje de entrada: 3.3 a 5Vdc.

- Voltaje de salida: 0 a 4.2V aproximadamente.

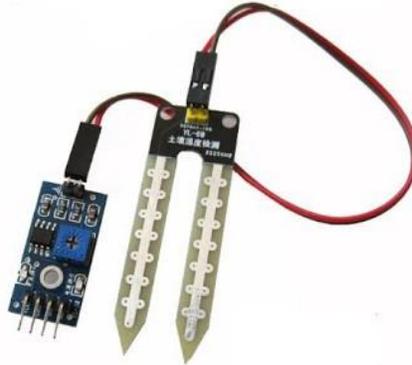


Figura 2.2 Módulos de sensor de humedad del suelo YL-38 (izquierda) y YL-69 (derecha).

Módulo de sensor fotosensible digital y analógico LM393

Este módulo (Figura 2.3) está integrado por una resistencia fotosensible, un circuito de acondicionamiento y cuatro pines (Alimentación, tierra, salida analógica y salida digital). Se utiliza para detectar la intensidad luminosa. Cuando las condiciones de intensidad de la luz alcanzan el umbral establecido, la salida digital del módulo es alta, en el caso contrario, esta salida permanece en estado bajo. La entrada analógica de este sensor permite obtener una medida más precisa de la intensidad luminosa cuando se usa en conjunto con la digital, además, brinda información continua de la intensidad luminosa (Sunrom Co., 2017).



Figura 2.3 Módulo de sensor fotosensible digital y analógico.

Especificaciones técnicas (Sunrom Co., 2017):

- Voltaje de operación: 3.3 a 5 Vdc.
- Corriente de operación: 15ma.
- Voltaje de salida digital: 0 o 5V con nivel de disparo ajustable.

- Salida Analógica: 0 a 5V en dependencia de la intensidad de la luz que incida sobre la fotorresistencia.

2.1.2 Zolertia RE-mote

Como unidad microcontroladora en los nodos de medición y en el nodo coordinador, se seleccionó el Zolertia RE-mote. Sus funciones dentro de la red son el tratamiento, el almacenamiento y transmisión de la información recibida de los sensores conectados a él. Este dispositivo posee un consumo de energía en el orden de las centenas de nano amperes cuando está en modo *sleep*, con un diseño de alto rendimiento, que cumple con las especificaciones de los recursos de procesamiento y la seguridad de este proyecto. Las características del RE-mote se muestran en el [subepígrafe 1.3.3](#).

El chip de radio CC2538 es el transceptor a bordo del Zolertia RE-mote. El CC2538 compatible con IEEE 802.15.4 es un transceptor de radio a 2,4 GHz de Texas Instruments (Instruments, 2015). Fue diseñado para aplicaciones inalámbricas de baja potencia y baja tensión. Este chip incluye un espectro digital extendido de secuencia directa y una efectiva transmisión de 250 kbps. El CC2538 está altamente integrado y ofrece una robusta solución para la comunicación inalámbrica en la banda ISM de 2,4 GHz. El CC2538 proporciona un amplio hardware de apoyo a la manipulación de paquetes, los búferes de datos, ráfagas de las transmisiones, la encriptación y autenticación de los datos y de paquetes de información.

Sus características principales son:

- Chip de 2,4 GHz compatible con IEEE 802.15.4.
- Bajo consumo (RX: 20 mA; TX: 24 mA).
- Baja tensión de alimentación (2,0 - 3,6 V) con regulador de voltaje integrado
- Potencia de salida programable.

La selección de la plataforma RE-mote para el diseño de la red se justifica a partir de los siguientes elementos:

- RE-mote permite incorporar sensores analógicos y digitales perfectamente.
- Posee soporte para el sistema operativo Contiki, diseñado especialmente para aplicaciones de WSN e IoT.

- La compatibilidad del transceptor CC2538 del RE-mote con el nivel físico del estándar IEEE 802.15.4, permite realizar mecanismos como el chequeo de redundancia cíclica (CRC, por sus siglas en inglés) y los reconocimientos a nivel físico. Esto permite incrementar la eficiencia computacional añ otorgarle al radio tareas desarrolladas con anterioridad por el microprocesador.
- Soporta el protocolo IPv 6, 6LoWPAN y RPL que lo hacen idóneo para aplicaciones de IoT a través de redes de bajo consumo.
- Maneja la energía de forma eficiente, lo que resulta crucial para aplicaciones de WSN.
- Posee soporte para el sistema operativo Contiki, diseñado especialmente para aplicaciones de WSN e IoT.

2.1.3 Raspberry Pi 3 Modelo B

La Raspberry Pi 3 Modelo B (Figura 2.4) es la tercera generación de Raspberry Pi. Esta computadora se puede utilizar en aplicaciones donde se requiera una potente unidad de cómputo de espacio reducido. Mientras mantiene el popular formato de tablero, Raspberry Pi 3 Modelo B le ofrece un procesador más potente, diez veces más rápido que la primera generación de Raspberry Pi. Además, agrega conectividad LAN inalámbrica y Bluetooth, lo que la convierte en la solución ideal para diseños robustos (Raspberry Pi Foundation, 2016).



Figura 2.4 Raspberry Pi 3 Modelo B.

A continuación se enuncian una serie de especificaciones de este dispositivo:

- Procesador a una velocidad de 1.2GHz de cuatro núcleos ARM Cortex-A53
- Conectividad inalámbrica 802.11 b/g/n, alámbrica LAN y Bluetooth 4.1
- GPU Dual Core VideoCore
- Memoria de 1GB LPDDR2

- Conector para tarjeta microSD.

Se selecciona este dispositivo como *Gateway* de la red por contar con una serie de prestaciones que lo hacen idóneo para esta función. Cuenta con soporte para tarjetas microSD para almacenar la información generada en una WSN. Cuenta con un puerto Ethernet, conectividad inalámbrica 802.11 b/g/n y Bluetooth, propiciándole varias opciones de conectividad a otras interfaces. Además, integra un procesador con la velocidad suficiente para realizar todas las funciones que realiza un Gateway.

2.2 Arquitectura de hardware de la red

La arquitectura de hardware define la interconexión entre los componentes que integran el diseño, de esta forma constituye un mecanismo para la descripción del sistema. En la Figura 2.5 se puede apreciar un esquema donde queda definida la arquitectura general para la red. En esta se aprecian los siguientes bloques fundamentales: nodos de medición distribuidos por lugares seleccionados dentro de las casas de cultivos y un nodo coordinador conectado vía serie al *Gateway* IoT,

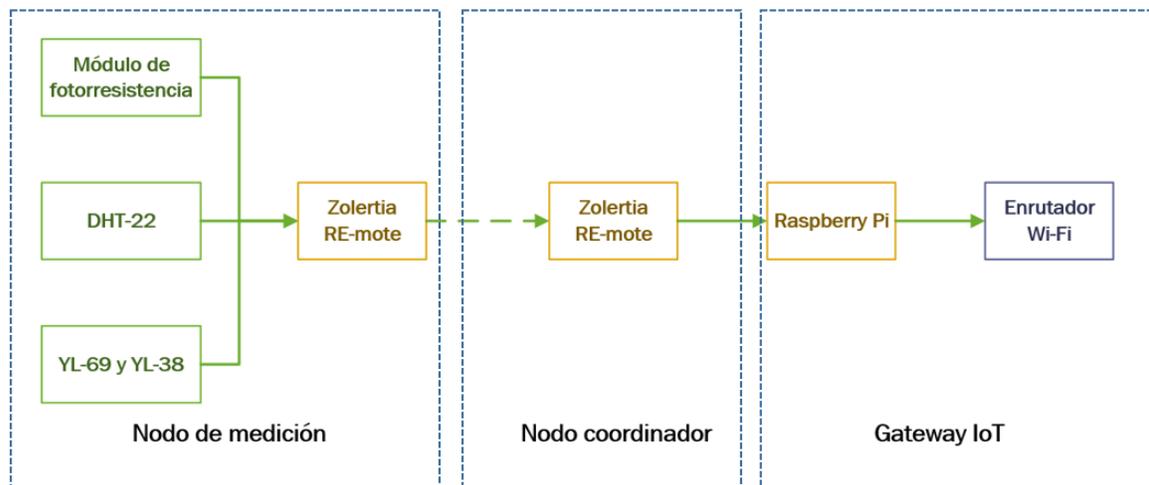


Figura 2.5 Arquitectura de hardware.

2.2.1 Nodos de medición

En los nodos de medición (Figura 2.6), los tres sensores se conectan directamente al Zolertia RE-mote y se alimentan de este mismo dispositivo. El módulo de sensor fotosensible LM393 se conecta a un pin analógico, y envía un voltaje equivalente a la intensidad luminosa en el interior de la casa de cultivo. El sensor DHT22 es conectado a una entrada digital del Zolertia

RE-mote para enviar los valores de temperatura y humedad relativa, por último, los módulos YL-69 y YL-38 se conectan a otra entrada analógica para brindar la información correspondiente a la humedad del suelo luego de ser correctamente colocado el YL-69 bajo tierra en los canteros. En todos los nodos de medición, los Zolertia RE-mote son alimentados con dos baterías AA de 1.5V.

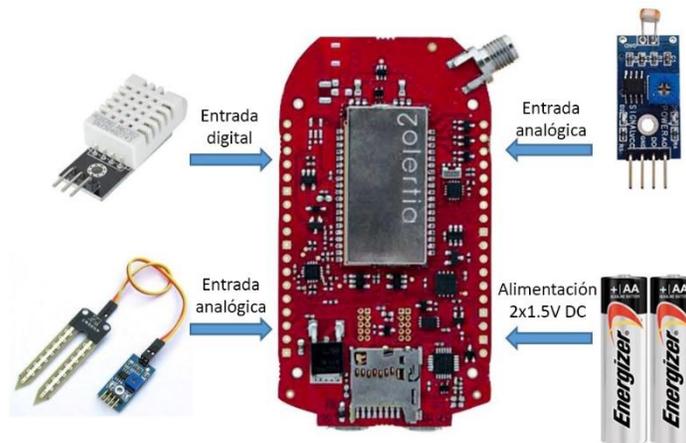


Figura 2.6 Arquitectura de los nodos de medición.

El nodo coordinador de la red está compuesto por un Zolertia RE-mote. Al coordinador llega la información transmitida de un nodo a otro a través de la red, en él se hacen configuraciones necesarias para el correcto funcionamiento de la red.

2.2.2 Gateway

Este bloque de la red está compuesto por una Raspberry Pi 3 Model B conectada vía Ethernet a un enrutador Wi-Fi (Figura 2.7) que puede brindar servicios de conectividad a usuarios que mediante aplicaciones accedan a los datos. Implementada en esta computadora, se encuentra una base de datos que almacena de forma ordenada los valores de las variables ambientales que envía hacia ella el nodo coordinador vía serie a través de USB.



Figura 2.7 Arquitectura del nodo coordinador y el Gateway.

2.3 Arquitectura de software

2.3.1 Selección del sistema operativo para los nodos Zolertia RE-mote

Existen requerimientos en un sistema operativo para WSN como son: trabajar en tiempo real, manejo eficiente de memoria, ahorro de energía y capacidad para el procesamiento multitarea (Colina et al., 2015b).

A partir de los elementos expuestos en el [subepígrafe 1.3.4](#), se selecciona el sistema operativo Contiki debido a que:

- Los *protothreads* le brindan a Contiki capacidad multitarea con un ahorro de memoria en comparación con los acercamientos multi-hilo tradicionales. De esta forma, el uso de esta técnica de programación contribuye a mantener una huella de memoria baja.
- El cargador de programas de Contiki garantiza el manejo eficiente de la memoria de programas.
- Para propiciar el ahorro energético, en Contiki los diferentes subsistemas de los nodos pueden pasar de manera independiente a un estado de bajo consumo.
- En Contiki existen eventos sincrónicos que pueden interrumpir un proceso en cualquier momento. De esta manera se brinda soporte para la operación en tiempo real.

2.3.2 Pila de protocolos utilizados

La evolución de los protocolos de control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés) para redes WPAN ha llevado a la inclusión en 2012 del protocolo MAC llamado TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*, por sus siglas en inglés) como una enmienda del IEEE 802.15.4 (De Guglielmo et al., 2014). La pila de protocolos utilizada en el diseño (Tabla 2.1) de este trabajo está basada en la arquitectura 6TiSCH descrita en (Thubert et al., 2015), a su vez esta define la capa MAC con TSCH y la capa física (PHY, *physical layer* por sus siglas en inglés) con IEEE 802.15.4 PHY. La pila de protocolos utilizada implementa UDP (*User Datagram Protocol*, por sus siglas en inglés) en la capa de transporte, en la capa de red el uso del protocolo 6LoWPAN como subcapa de adaptación para IPv6, y el Protocolo de Ruteo para Redes de bajo consumo (RPL, por sus siglas en inglés).

Tabla 2.1 Pila de protocolos usados en el diseño

Transporte	UDP, modelo cliente servidor
Red	IPv6, RPL, 6LoWPAN
MAC	TSCH
Física	IEEE 802.15.4 (Texas Instruments CC2538)

Capa IEEE 802.15.4 PHY

Las características generales de este protocolo han sido descritas en el subepígrafe

La capa PHY provee una interfaz entre la subcapa MAC y el canal físico de radio, esta es responsable de las siguientes tareas dentro de la red:

- Activación y desactivación del transceptor de radio: encienda el transceptor de radio uno de los tres estados, es decir, transmitir, recibir o desactivar (dormir) según la solicitud de la subcapa MAC.
- Selección del canal de frecuencia: Los enlaces inalámbricos bajo 802.15.4 pueden operar en 27 canales diferentes. Por lo tanto, la capa PHY debe ser capaz de sintonizar su transceptor en un cierto canal, recibiendo la solicitud de la subcapa MAC (Zheng y Lee, 2006).
- Transmisión y recepción de datos: Esta es la tarea esencial de la capa PHY. Las técnicas de modulación y difusión se usan en esta parte.

Protocolo TSCH

El estándar IEEE 802.15.4e-2012 define un número de protocolos MAC para IEEE 802.15.4 (Thubert et al., 2015). En la pila de protocolos del presente diseño se usa TSCH para definir la capa MAC. Este protocolo se enfoca principalmente para entornos industriales al utilizar comunicaciones sincronizadas en el tiempo y con saltos de canal para proporcionar a la red robustez frente a fenómenos espectrales como el *multipath fading* o desvanecimientos por trayectos múltiples. Este fenómeno puede resultar muy grave ya que puede llegar a destruir por completo las señales en el receptor.

El protocolo TSCH es el encargado de definir el estado del radio de los Zolertia RE-mote, esto lo realiza a través de supertramas o *slotframes*. Estas estructuras están compuestas por un conjunto de *timeslots* que se repiten en el tiempo, estos tienen asignada una transmisión y son configurados por una capa superior. Los nodos deben sincronizarse con la estructura de *slotframe* de la red. Si no están sincronizados con el resto de la red no podrán comunicarse con otros nodos. Cada uno de los nodos sigue un *Schedule*, el cual le indica qué debe hacer en cada *timeslot* (sus posibilidades son transmitir datos, recibir datos o dormir). En un *timeslot* en el que el nodo deba permanecer dormido no será necesario encender ninguna interfaz radio, esto conlleva un gran ahorro de energía ya que el uso de las interfaces radio en modo de transmisión o recepción representa el mayor consumo del nodo. En los *timeslots* activos, el *schedule* indica de qué nodo vecino debe un nodo recibir los datos o transmitir, y en qué canal.

Cuando un protocolo de capa superior de un nodo genera un paquete, este se pasa a la capa MAC del dispositivo, donde se guarda el paquete en una cola para ser transmitido. En cada *timeslot* de transmisión, la capa MAC comprueba si tiene algún paquete en la cola de transmisión para algún nodo vecino en ese preciso *timeslot*. En tal caso, la capa transmite el paquete. En caso opuesto, el nodo permanece dormido sin encender sus interfaces radio.

Protocolo 6LoWPAN

El estándar 6LoWPAN conocido como *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network* fue desarrollado por la IETF (*Internet Engineering Task Force*, por sus siglas en inglés) con el objetivo de encontrar una solución al transporte de paquetes IPv6 sobre tramas IEEE 802.15.4 (Shelby y Bormann, 2011). Es una alternativa al protocolo ZigBee, al implementar direccionamiento IPv6 (cumpliendo el propósito de IoT) en vez de IPv4, debido a que ofrece mayores ventajas (espacio, direccionamiento, escalabilidad, autoconfiguración, entre otras) y logra la interconexión directa de las WSN con otras redes externas. Sin embargo, su uso en este tipo de redes supone un incremento del tamaño de las direcciones IPv6 y del MTU en 1280 bytes. El motivo del surgimiento de este protocolo fue el gran tamaño de las direcciones IPv6, por esto, proporciona mecanismos de encapsulación y compresión de cabeceras para la transmisión de paquetes permitiendo adaptarse a las

restricciones del protocolo 802.15.4 (máximo 127 bytes) llegando a alcanzar un tamaño de 4 bytes.

Protocolo de enrutamiento RPL

El protocolo RPL fue creado por el organismo IETF en la búsqueda de desarrollar un protocolo de enrutamiento en IPv6 (Duquennoy et al., 2015). Este protocolo fue diseñado con el objetivo de cubrir las necesidades de enrutamiento en redes de baja potencia. RPL se caracteriza por ser un protocolo proactivo basado en vector de distancia, el cual define las rutas antes de que sean necesarias por los nodos de la red. Su modo de funcionamiento está basado en el intercambio de mensajes de control (enviados de forma periódica) para encontrar y propagar rutas en la red, estos mensajes pueden ser a nivel local o de enlace permitiendo el envío de información a los vecinos o a nivel global para propagar la información relacionada con la topología a todos los nodos de la red. El no tener una capa de enlace definida es una de las ventajas de RPL, por lo que está diseñado para soportar varias de ellas.

Protocolo de transporte UDP

El protocolo fue diseñado por David P. Reed en 1980 (Fenner y Flick, 2005). Con UDP, las aplicaciones informáticas pueden enviar mensajes, en este caso denominados datagramas, a otros *hosts* en una red de Protocolo de Internet (IP). No se requieren comunicaciones previas para configurar canales de comunicación o rutas de datos. UDP usa un modelo de comunicación sin conexión simple con un mínimo de mecanismo de protocolo. Proporciona sumas de comprobación para la integridad de datos y números de puerto para direccionar diferentes funciones en la fuente y el destino del datagrama. No tiene diálogos *handshake*, por lo tanto, expone el programa del usuario a cualquier falta de fiabilidad de la red subyacente; no hay garantía de entrega, pedido o protección duplicada. Este protocolo es adecuado para fines en los que la verificación y corrección de errores no son necesarios o se realizan en la aplicación; UDP evita la sobrecarga de dicho procesamiento en la pila de protocolos.

2.3.3 Base de datos

Posteriormente a que los datos de cada uno de los nodos llegan al coordinador, este los transmite al *Gateway* IoT a través de conexión serie USB. En este caso, dichos datos se

almacenan en una base de datos implementada en la Raspberry Pi 3 Modelo B a través del sistema de gestión de base de datos MariaDB.

MariaDB²

MariaDB es un sistema de gestión de bases de datos derivado de MySQL con licencia GPL (*General Public License*, por sus siglas en inglés). La compatibilidad de MariaDB con MySQL es prácticamente total, ya que posee las mismas órdenes, interfaces, APIs y bibliotecas, siendo su objetivo poder cambiar un servidor por otro directamente, además de contar con mejoras de rendimiento y funcionalidad. A pesar de ser MySQL el gestor de base de datos más difundido en el mundo, se elige a MariaDB en este diseño por los siguientes motivos:

- Presenta mejoras de rendimiento respecto a MySQL.
- La comunidad científica está dando un gran soporte a MariaDB.
- MariaDB está bajo licencia GPL que es menos restrictiva y totalmente gratuita.

Distribución de tablas

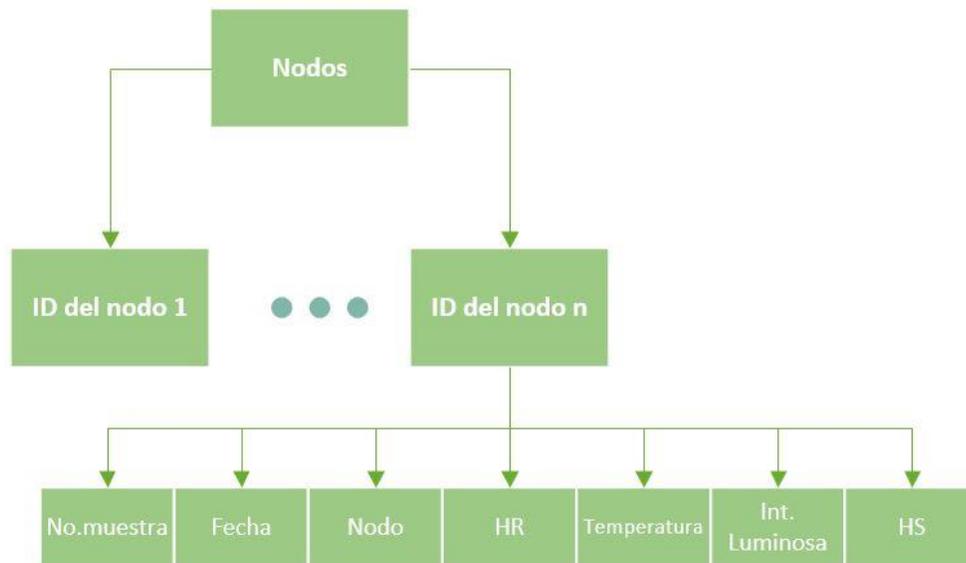


Figura 2.8 Distribución de las tablas en la base de datos.

² Información tomada de <http://www.vozidea.com/que-es-mariadb-y-ventajas-frente-mysql>

La base de datos diseñada en MariaDB y almacenada en la tarjeta microSD de la Raspberry Pi 3 Modelo B, cuenta con un sistema de tablas anidadas como muestra el diagrama de la Figura 2.6, para almacenar de forma organizada los valores de las variables ambientales.

Como se observa en la Figura 2.8, se creó una tabla raíz llamada “Nodos” que contiene una nueva tabla por cada columna en dependencia de la cantidad de nodos de medición desplegados por la red. Finalmente, dentro de cada tabla que identifique el ID del nodo, se distribuyen siete columnas que es donde finalmente se almacena la información de interés.

El proceso de almacenamiento en la base de datos, queda descrito en un diagrama de bloques en el Anexo II.

2.4 Conclusiones parciales

La arquitectura de hardware propuesta cuenta con el dispositivo Zolertia RE-mote como unidad de cómputo y al chip CC2538 como transceptor. El *Gateway* de la red está compuesto por la Raspberry Pi 3 Model B, su capacidad de cómputo y la posibilidad de almacenar datos en una tarjeta microSD permiten la creación de una base de datos dentro de la misma para almacenar los valores de humedad relativa, temperatura, intensidad luminosa y humedad del suelo; así como la fecha y hora del dato recogido. El sistema operativo Contiki instalado en cada uno de los nodos Zolertia, brinda la capacidad de procesamiento multihilo y de manejo eficiente de recursos de memoria. Se eligen una serie de protocolos para la arquitectura de red y de software basados en el modelo 6TiSCH, que garantizan la transmisión fiable de la información y un bajo consumo energético. Teniendo en cuenta estas consideraciones se hace necesario obtener resultados que validen el sistema diseñado.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DISEÑADA

En el presente capítulo se recojen una serie de experimentos realizados en un despliegue en la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de Santa Clara. Se presentan tablas donde se visualizan los valores de las variables ambientales almacenadas en correctamente en la Raspberry Pi. Además, es analizado el impacto medioambiental del diseño final y queda expuesto un análisis económico de la propuesta.

3.1 Despliegue de la red

Para evaluar la efectividad de la arquitectura propuesta, se realizaron experimentos reales en tres casas de cultivos de la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú” de Santa Clara. Se seleccionaron las casas de cultivos funcionales más cercanas a la caseta de fertirriego (Figura 3.1) debido a que se contaba con seis nodos de medición. Se ubicaron dos por cada invernadero distanciados equitativamente uno de otro. El experimento se realizó durante dos horas aproximadamente, donde los primeros minutos de funcionamiento fueron dentro de la caseta de fertirriego, con el objetivo de ver el comportamiento de los sensores ante diferentes condiciones climáticas (dentro de la caseta de fertirrigación y en el interior de la casa de

cultivo). La figura 3.2 muestra una vista general de un nodo de medición colocado funcionando en una de las casas en el momento del comienzo de la medición dentro del invernadero. Se puede observar la carcasa protectora que contiene parte del hardware del diseño de cada uno de los nodos.



Figura 3.1 Vista satelital del escenario de pruebas de la red.



Figura 3.2 Nodo de medición en funcionamiento en una de las casas de cultivos.

El esquema de la Figura 3.3 muestra el número del identificador (ID) de los nodos en las tres casas de cultivo y el nodo coordinador. Este número es obtenido en la Raspberry luego de la descomposición de la trama, y sirve para que el programa conozca de que nodo llegó la información, de esta forma es posible elegir la tabla correspondiente en la base de datos para que puedan ser almacenados los parámetros ambientales.

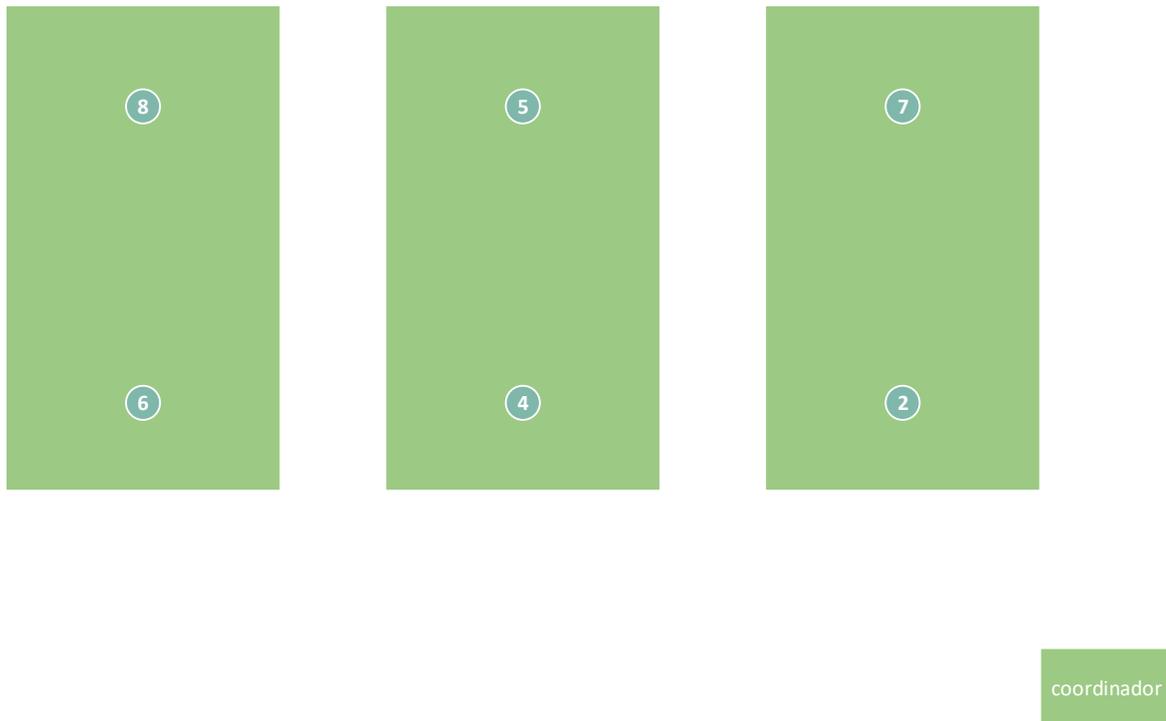


Figura 3.3 Esquema que muestra el número del identificador en los nodos de medición.

3.1.1 Gráficas de valores de las variables

Al terminar el experimento, quedaron en la base de datos del Gateway almacenados los valores de humedad relativa, intensidad luminosa, temperatura y humedad del suelo. A través de encuestas, se logró la extracción de dichos valores de las variables, demostrando de esta forma que la red se comunica de forma correcta con el coordinador y la Raspberry. A continuación se muestran los valores obtenidos del nodo 2 como ejemplo en la prueba realizada. Cabe recordar que al comienzo de la medición este nodo y el resto se encontraban dentro de la caseta de fertirriego.

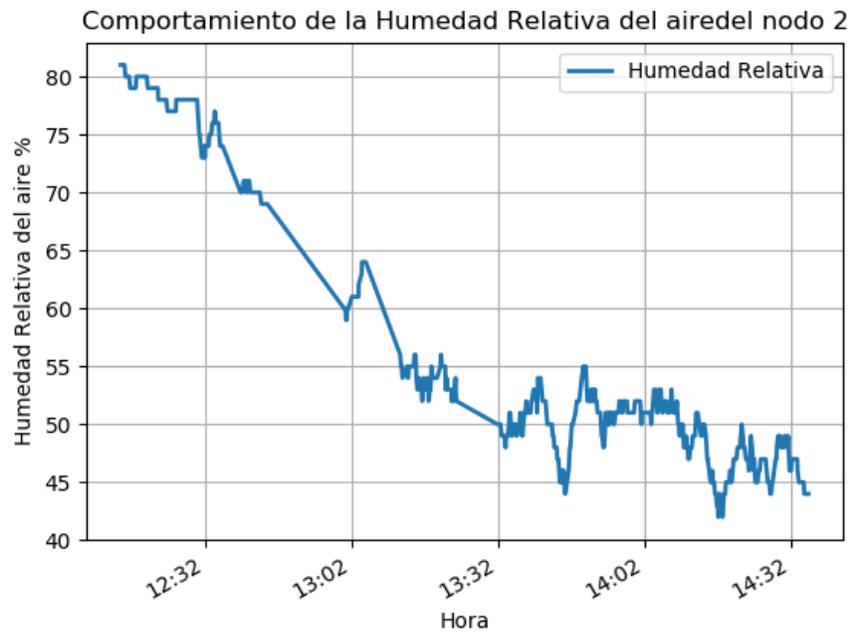


Figura 3.4 Valores de la humedad relativa del nodo 2.

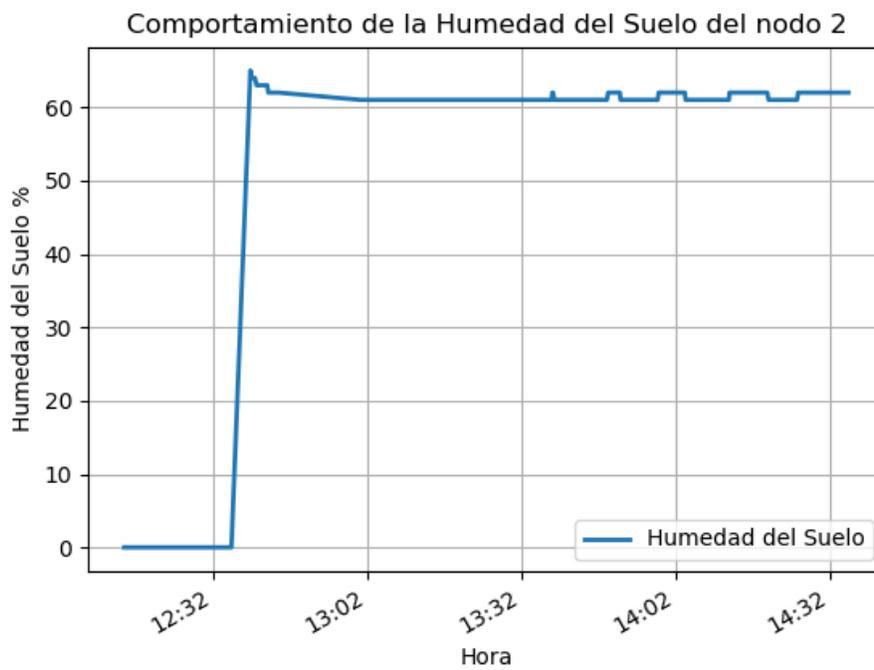


Figura 3.5 Valores de la humedad del suelo del nodo 2

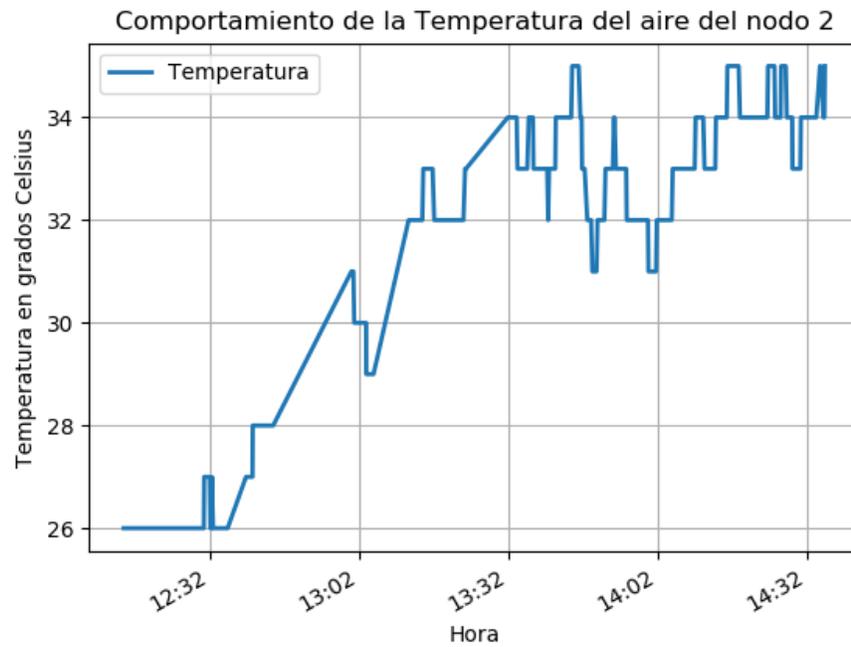


Figura 3.6 Valores de la temperatura del aire del nodo 2



Figura 3.7 Valores de la intensidad luminosa del nodo 2

El análisis de las gráficas anteriores arrojan varias conclusiones respecto a la obtención de los datos:

- Los sensores están propiciando valores lógicos de parámetros del ambiente, por ejemplo, el sensor de humedad del suelo permanece indicando 0% de humedad del suelo en la caseta hasta que se coloca bajo tierra; La temperatura comienza a aumentar de 26°C en adelante al entrar en contacto con la luz solar hasta llegar a 36°C, así como la intensidad luminosa.
- Se observa el cambio que experimentan todas las gráficas a partir de las 12:32 aproximadamente (hora de traslado de los nodos de la caseta a las casas de cultivo), evidenciando la rápida respuesta de los sensores ante cambios bruscos.

3.2 Análisis energético del diseño

En el diseño de WSN es de vital importancia optimizar la durabilidad de la fuente de alimentación de los dispositivos, con el objetivo de reducir las sustituciones y, por tanto, de ahorrar recursos. Para el análisis energético de la propuesta, se calcula a continuación el tiempo de vida útil de dos baterías AA de 3000 mAh de capacidad cada una, teniendo en cuenta aspectos fundamentales:

- Los valores de corriente utilizados en el análisis son valores nominales proporcionados por las hojas de datos de los fabricantes.
- El ciclo de vida útil de radio (RDC, por sus siglas en inglés) queda determinado por el protocolo TSCH, el RDC es la relación porcentual entre el tiempo total que el radio permanece encendido y el tiempo total de funcionamiento de la red, y para este diseño RDC tiende al 2%.
- Se considera despreciable para este cálculo el consumo generado por el tiempo que la radio permanece en *sleep*, ya que es del orden de los nanoamperes.
- La capacidad en conjunto de las dos baterías AA en serie es $C_{bat} = 6000$ mAh.

La Tabla 3.1 muestra el consumo total de cada nodo de medición en el momento que el radio está encendido.

Tabla 3.1 Consumo de los componentes que integran el nodo al estar la radio encendida.

Elemento de consumo	Corriente de consumo
Módulo de luz	0.1 mA
Sensor DHT22	1.5 mA
Módulo de humedad del suelo	0.05 mA
Radio	24 mA
Consumo total	25.65 mA

Si se definen:

V : Tensión de salida de las baterías.

E_T : Energía total entregada por las baterías.

C_{Bat} : Capacidad energética de las baterías.

P_N : Potencia consumida por el nodo.

I_N : Consumo de corriente del nodo.

Se pueden establecer las ecuaciones siguientes:

$$E_T = VC_{Bat} \quad (1)$$

$$P_N = VI_N \quad (2)$$

De (1) y (2) se obtiene:

$$t = \frac{E_T}{P_N}$$

$$t = \frac{C_{Bat}}{I_N}$$

Donde:

t : Tiempo de vida neto de las baterías de mantenerse activas con un RDC = 100%.

Por tanto, se debe multiplicar esta expresión por el $RDC = 2\%$, para obtener el valor real (3). Siendo el RDC el porcentaje de tiempo que permanece encendido el nodo. De este modo se obtiene el tiempo de vida real de las baterías (3).

$$t_{Bat} = \frac{C_{Bat} * 100}{I_N * RDC} \quad (3)$$

Si se sustituyen los valores de la Tabla 3.1 en esta expresión:

$$t_{Bat} = \frac{6000 \text{ mAh} * 100}{25.65 \text{ mA} * 2}$$

$$t_{Bat} = 11695.91 \text{ h}$$

$$t_{Bat} \approx 487 \text{ días}$$

Este es un valor teórico mediante el cual se puede tener una idea del tiempo de autonomía total que poseen los nodos de la red diseñada para un criterio de $RDC = 2\%$. Se puede concluir que la arquitectura de software que establece este valor de RDC es muy eficiente energéticamente, proporcionando a cada nodo dotado con dos baterías AA de 3000 mAh de capacidad un tiempo de funcionamiento de 487 días aproximadamente sin reemplazo de baterías.

3.3 Análisis económico y medioambiental

La solución planteada para el monitoreo y almacenamiento de los parámetros ambientales de casas de cultivo en este trabajo, posee una gran dimensión e impacto económico y medioambiental para nuestro país. Por tanto, es necesario dejar plasmado en cifras el coste total e individual de los elementos de la propuesta, así como la significación para el medio ambiente de la empresa UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú”, o para cualquier entidad que desee implementarlo.

Impacto económico y ahorro de recursos

La Tabla 3.2 muestra el precio en USD de cada uno de los componentes de la red para 9 nodos de medición (basado en la compra de 1 paquete de 10 Zolertia RE-mote).

Tabla 3.2 Precio de los componentes para un diseño de 9 nodos de medición

Componente	Vendedor	Costo/U (USD)	Cantidad	Importe (USD)
Módulo Zolertia RE-mote <i>Pack</i> (10 unidades)	https://www.zolertia.io	1136.15	1	1136.15
Raspberry Pi 3 Model B	https://www.adafruit.com	35	1	35
Módulos de de humedad del suelo YL-69 y YL-38	https://www.amazon.com	2.85	9	25.65
Modulo Sensor de humedad y temperatura DHT22	https://www.adafruit.com	9.95	9	89.55
Módulo de sensor fotosensible digital y analógico (5 unidades)	https://www.amazon.com	8	2	16
Baterías desechables AA de Energizer, modelo E91BP-24 (24 unidades)	https://www.amazon.com	12.35	1	12.35
Total				1314.70

Se aprecia en la Tabla 3.2 que, para un diseño de 9 nodos de medición, el costo total es de 1314.70 USD. Si se analizan los precios de plataformas profesionales como Waspnote³ de la compañía Libelium (293 USD), el presupuesto necesario para realizar el mismo diseño de 9 nodos con este dispositivo, sería de 2637 USD. A este valor hay que agregarle el costo del dispositivo Meshlium con función de *Gateway*, además de todos los sensores, superando los

³ Precio en <https://www.cooking-hacks.com/shop/waspnote>

3000 USD el precio final de todos los dispositivos de la red. Por tanto, se considera que este diseño implementado en este trabajo es una opción considerable en comparación con otros precios en el mercado.

Al conocer el estado de humedad del suelo, se evitarían períodos innecesarios de riego, ahorrando de esta forma tres elementos fundamentales que generan al país costos: el agua en el proceso de regadío, el fertilizante y el combustible de las bombas de riego. Se espera que disminuya el porcentaje de cultivos perdidos por el mal monitoreo de las condiciones ambientales, lo que aumentaría la eficiencia productiva de la empresa y por tanto los ingresos totales. Además, permitiría conocer el estado actual de las variables ambientales dentro de las casas que está siendo efectivo para la producción hasta el momento, para de esta forma mantener y mejorar dicho estado con el objetivo final de lograr una producción con menos pérdidas, con menos gastos de recursos y más eficiente.

Impacto medioambiental

Con el pasar de los años, el fenómeno del cambio climático puede provocar largos períodos de sequía, e irá creando problemas en todos los campos, especialmente en el sector agrícola, es por esto que urge una solución eficiente para el uso racional del agua en la agricultura. La propuesta diseñada en este trabajo, fomenta el ahorro del valioso recurso al detectar períodos innecesarios de regadío. Estos períodos pueden estar dados porque el suelo posea un porcentaje de humedad suficiente para la salud del cultivo (determinado por los expertos), por la necesidad de regar menos en zonas donde permanezca más tiempo la humedad elevada o por otra causa. Además, ninguno de los componentes que componen la red emite productos contaminantes ni sustancias nocivas al medio ambiente, lo cual hace de este diseño una propuesta sostenible y no contaminante.

3.4 Conclusiones parciales

La prueba real llevada a cabo mediante un despliegue de red en la UEB de Cultivos Varios “Valle del Yabú”, permitió obtener importantes resultados. Mediante la puesta en marcha de una red de 6 nodos se almacenó la información en la base de datos del *Gateway* correspondiente a dos horas de funcionamiento, obteniéndose valores de cada uno de los nodos sin pérdidas. Un cambio de ambiente durante la medición, comprobó que los sensores

responden adecuadamente a climáticos diferentes, validando el funcionamiento y la factibilidad de estos. El análisis energético aseguró la duración de las baterías por más de un año de funcionamiento, demostrando en conjunto con el análisis económico y medioambiental, la factibilidad del diseño.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Al haber terminado la elaboración de este trabajo, se arribaron a las siguientes conclusiones:

- De las tecnologías analizadas para el diseño de WSN dentro de aplicaciones IoT, los dispositivos de la compañía Zolertia son de los más utilizados debido a sus prestaciones; compatibilidad con sistemas operativos, protocolos de comunicación y sensores, todo esto a un costo factible.
- La utilización de la plataforma Zolertia RE-mote que incluye el radio CC2538 de Texas Instruments, en conjunto con el sensor de temperatura y humedad relativa DHT22, los módulos sensores de humedad del suelo YL-69 y YL-38 y el módulo de sensor fotosensible LM393; aseguran la adquisición y transmisión de las variables medidas.
- La arquitectura de red 6TiSCH implementada sobre el sistema operativo Contiki y basada en la arquitectura de hardware propuesta por la ITU permiten cumplir con los requisitos operacionales propuestos.
- El despliegue de la red diseñada con seis nodos de medición comprobó la comunicación con el coordinador y el *Gateway* IoT asegurando el almacenamiento de los valores medidos en cada uno de los nodos.
- El análisis energético de los nodos demuestra que con un ciclo útil del radio del 2% se garantiza una alta durabilidad de las baterías de los nodos sensores, extendiendo la vida útil de los mismos.

Recomendaciones

Se plantean las siguientes recomendaciones relacionadas con la WSN diseñada para investigaciones futuras:

1. Evaluar el desempeño de la red de sensores luego de varias cosechas y comparar los valores de los parámetros ambientales.
2. Realizar un sistema de inteligencia artificial para perfeccionar el mapa de ruteo del protocolo RPL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., 2002a. A survey on sensor networks. *IEEE Commun. Mag.* 40, 102–114.
- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., 2002b. Wireless sensor networks: a survey. *Comput. Netw.* 38, 393–422.
- Amondaray, L.R., Figueredo, F.M.P., Castilla, M.M.G., 2018. Red de sensores inalámbricos para las casas de cultivos protegidos “San José.” *Rev. Ing. Electrónica Automática Comun.* 39, 16–26.
- Angelopoulos, C.M., Nikolettseas, S., Theofanopoulos, G.C., 2011. A smart system for garden watering using wireless sensor networks, in: *Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*. ACM, pp. 167–170.
- Aosong Electronics Co.Ltd, 2016. Temperature and humidity module DHT11 Product Manual. Guangzhou.
- Ashton, K., 2009. That ‘internet of things’ thing. *RFID J.* 22, 97–114.
- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010. The internet of things: A survey. *Comput. Netw.* 54, 2787–2805.
- Baggio, A., 2005. Wireless sensor networks in precision agriculture, in: *ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN 2005)*, Stockholm, Sweden. Citeseer, pp. 1567–1576.
- Bernal, I., 2005. Comunicaciones Inalámbricas. Esc. Politécnica Nac.
- Bhatti, S., Carlson, J., Dai, H., Deng, J., Rose, J., Sheth, A., Shucker, B., Gruenwald, C., Torgerson, A., Han, R., 2005. MANTIS OS: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms. *Mob. Netw. Appl.* 10, 563–579.
- Carrasquilla-Batista, A., Chacón-Rodríguez, A., Solórzano-Quintana, M., 2016. Using IoT resources to enhance the accuracy of overdrain measurements in greenhouse horticulture, in: *Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, 2016 IEEE 36th. IEEE, pp. 1–5.
- Casagras, R., 2011. the inclusive model for the Internet of Things report. *EU Proj.* 16–23.
- Castillejo Erviti, M., 2013. Agricultura de precisión mediante redes inalámbricas de sensores.

- Cianca, K., 2012a. Las redes con sensores: julio 2012 [WWW Document]. URL http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012_07_01_archive.html (accessed 3.28.18).
- Cianca, K., 2012b. Las redes con sensores: CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES CON SENSORES. Las Redes Con Sensores.
- Colina, A.L., Vives, A., Bagula, A., Zennaro, M., Pietrosemoli, E., 2015a. IoT in 5 days. E-Book March.
- Colina, A.L., Vives, A., Bagula, A., Zennaro, M., Pietrosemoli, E., 2015b. IoT in 5 days. E-Book March.
- De Guglielmo, D., Seghetti, A., Anastasi, G., Conti, M., 2014. A performance analysis of the network formation process in IEEE 802.15. 4e TSCH wireless sensor/actuator networks, in: Computers and Communication (ISCC), 2014 IEEE Symposium On. IEEE, pp. 1–6.
- del Valle, B., David, J., 2014. IoT: Tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro.
- Derpsch, C., 2012. Sistema operativo para redes inalámbricas de sensores.
- Duquea, S.I.O., 2017. Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos.
- Duquennoy, S., Al Nahas, B., Landsiedel, O., Watteyne, T., 2015. Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled TSCH, in: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, pp. 337–350.
- Evans, D., 2011. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. CISCO White Pap. 1, 1–11.
- Fenner, B., Flick, J., 2005. Management Information Base for the User Datagram Protocol (UDP). Management.
- Fernández Cruz, L.F., 2017. Diseño e implementación de una red de sensores para el monitoreo de variables climáticas en un invernadero de orquídeas.
- Fisher, R., 2007. 60 GHz WPAN standardization within IEEE 802.15. 3c, in: Signals, Systems and Electronics, 2007. ISSSE'07. International Symposium On. IEEE, pp. 103–105.
- Gamboa Vargas, P.J., 2007. Estudio y diseño de una red de área metropolitana inalámbrica (wman) con tecnología ieee 802.16 para la zona comercial de la ciudad de Quito. SANGOLQUÍ/ESPE/2007.
- García, E., Flego, F., 2008. Agricultura de precisión. Rev. Cienc. Tecnol. Recuperado [Httpwww Palermo Eduingenier IaC IenciayTecnolog Iacienciaytecno8 Html](http://www.PalermoEduingenierIaCIenciayTecnologIacienciaytecno8.html).
- Gascón, D., 2010. Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible. Rev. MIT Technol. Rev. 53–55.
- González García, A.J., 2017. IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones.

- Instruments, T., 2015. CC2538 Powerful Wireless Microcontroller System-On-Chip for 2.4-GHz IEEE 802.15. 4, 6LoWPAN, and ZigBee Applications. CC2538 Datasheet April 2015.
- ITU, 2012b. SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS Next Generation Networks–Frameworks and functional architecture models. Int. Telecommun. Union Geneva Switz. Recomm. ITU-T 2060.
- Izquierdo, J.C., Ortiz, J.N., Compte, S.S., 2017. Diseño e implementación de un dispositivo IoT de bajo coste para entornos agrícolas.
- Khan, J.Y., Yuce, M.R., 2010. Wireless body area network (WBAN) for medical applications, in: *New Developments in Biomedical Engineering*. InTech.
- Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., 2005. TinyOS: An operating system for sensor networks, in: *Ambient Intelligence*. Springer, pp. 115–148.
- Li, G., Zhang, W., Zhang, Y., 2014. A design of the IOT gateway for agricultural greenhouse. *Sens. Transducers* 172, 75.
- Madrid Molina, J.M., 2006. Seguridad en redes inalámbricas 802.11.
- Martínez Carreras, R., 2016. Retos Tecnológicos en la IoT en el ámbito de las redes de sensores.
- Martínez, R.F., Meré, J.O., de Pisón Ascacíbar, F.J.M., Marcos, A.G., Elías, F.A., 2009. *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. Publicaciones Univ. Rioja.
- Ortega, R., Flores, L., INIA, C.Q., de Recursos Naturales, D., Ambiente, M., 1999. *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico*. Minist. Agric. Inst. Investig. Agropecu. CRI QuilamapuChile 13–46.
- Otto, C.A., Jovanov, E., Milenkovic, A., 2006. A WBAN-based system for health monitoring at home, in: *Medical Devices and Biosensors, 2006*. 3rd IEEE/EMBS International Summer School On. IEEE, pp. 20–23.
- Raspberry Pi Foundation, 2016. Raspberry Pi Hardware - Raspberry Pi Documentation [WWW Document]. URL <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md> (accessed 5.12.18).
- Reiter, G., 2014. Wireless connectivity for the Internet of Things. *Europe* 433, 868MHz.
- Reyes Mena, D.V., 2014. Diseño de la red de sensores inalámbricos mediante la evaluación del desempeño de las plataformas Arduino y Waspote bajo el protocolo de comunicaciones Zigbee para el monitoreo de los embalses de Agoyán y Pisayambo.
- Sánchez-Lagares, J., 2016. Estudio de Tecnologías inalámbricas de bajo coste para la extensión de The Internet of Things al hogar.
- SECTOR, S., ITU, O., 2012a. SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-

- GENERATION NETWORKS Next Generation Networks–Frameworks and functional architecture models. Int. Telecommun. Union Geneva Switz. Recomm. ITU-T 2060.
- Shelby, Z., Bormann, C., 2011. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet. John Wiley & Sons.
- Silberschatz, A., Galvin, P.B., Peterson, J.L., 1991. Operating system concepts. Addison-Wesley,.
- Sunrom Co., 2017. URL www.sunrom.com/p/light-sensing-module-ldr (accessed 3.10.18).
- Thubert, P., Watteyne, T., Struik, R., Richardson, M., 2015. An Architecture for IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15. 4. Work. Draft IETF Secr. Internet-Draft Draft-Ietf-6tisch-Archit.-08.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Kittas, C., 2017. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosyst. Eng. 164, 31–48.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Ferentinos, K.P., Bartzanas, T., Kittas, C., 2016. Development of a WSN for Greenhouse Microclimate Distribution Monitoring. Ann. Valahia” Univ. Targoviste-Agric. 10, 7–13.
- Vermesan, O., Friess, P., Guillemin, P., Gusmeroli, S., Sundmaeker, H., Bassi, A., Jubert, I.S., Mazura, M., Harrison, M., Eisenhauer, M., 2011a. Internet of things strategic research roadmap. Internet Things-Glob. Technol. Soc. Trends 1, 9–52.
- Vermesan, O., Friess, P., Guillemin, P., Gusmeroli, S., Sundmaeker, H., Bassi, A., Jubert, I.S., Mazura, M., Harrison, M., Eisenhauer, M., 2011b. Internet of things strategic research roadmap. Internet Things-Glob. Technol. Soc. Trends 1, 9–52.
- Werchau, P.J., Nazar, P., 2013. Estándar IEEE 802.11 X De Las WLAN. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional–edUTecNe, http://www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/standard_802_11.pdf, Fecha de consulta Marzo de.
- Zheng, J., Lee, M.J., 2006. A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4. Sens. Netw. Oper. 4, 218–237.

ANEXOS

Anexo I Tabla comparativa de algunos dispositivos existentes para redes de sensores

Nombre	Casa	Microcontrolador	Transmisor	Memoria Programas y datos	Memoria externa	Programación	Comentarios
EM250	Ember	12MHz XAP2b 16-bit	2.4GHz IEEE 802.15.4 Compliant Transceiver	5kB RAM	128kB Flash	C	
Mica	Crossbow	Atmel ATMEGA103 4 MHz 8-bit CPU	RFM TR1000 radio 50 kbit/s	128+4K RAM	512K Flash	nesC Programming	TinyOS Support
Mica2	Crossbow	ATMEGA 128L	Chipcon 868/916 MHz	4K RAM	128K Flash		TinyOS, SOS and MantisOS Support
Mica2Dot	Crossbow	ATMEGA 128		4K RAM	128K Flash		
MicaZ	Crossbow	ATMEGA 128	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	4K RAM	128K Flash	nesC	TinyOS, SOS, MantisOS and Nano-RK Support
Telos	Crossbow	Motorola HCS08		4K RAM			
TelosB	Crossbow	Texas Instruments MSP430 microcontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	10k RAM	48k Flash		Contiki, TinyOS, SOS and MantisOS Support
T-Mote Sky	Sentilla	Texas Instruments MSP430 microcontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	10k RAM	48k Flash		Contiki, TinyOS, SOS and MantisOS Support
IMote	Intel	ARM core 12 MHz	Bluetooth with the range of 30 m	64K SRAM	512K Flash		TinyOS Support
IMote 1.0	Intel	ARM 7TDMI 12-48 MHz	Bluetooth with the range of 30 m	64K SRAM	512K Flash		TinyOS Support
Iris	Crossbow	ATmega1281	Atmel AT86RF230 802.15.4/ZigBee compliant radio	8K RAM	128K Flash		nesC TinyOS, MoteWorks Support
SunSPOT	Sun Microsystems	ARM 920T	802.15.4	512K RAM	4 MB Flash		Java Squawk J2ME Virtual Machine Nano-RK RTOS Support
FireFly	Nano-RK	Atmel ATmega 1281	Chipcon CC2420	8K RAM	128K FLASH ROM, 4K EEPROM	C Programming	
BTNode rev.3	BTNode	Atmel ATmega 128L	Bluetooth subsystem: Zeevo ZV4002, supporting AFH/SFH	64+180 Kbyte RAM	128 Kbyte FLASH ROM, 4 Kbyte EEPROM	Standard C Programming	TinyOS Support
eyesIFXv2.1	BTNode	Texas Instruments MSP430F1611	Infineon TDA5250	10 KB RAM	48 KB FLASH		

Figura A.1 Tabla comparativa de algunos dispositivos existentes para redes de sensores.

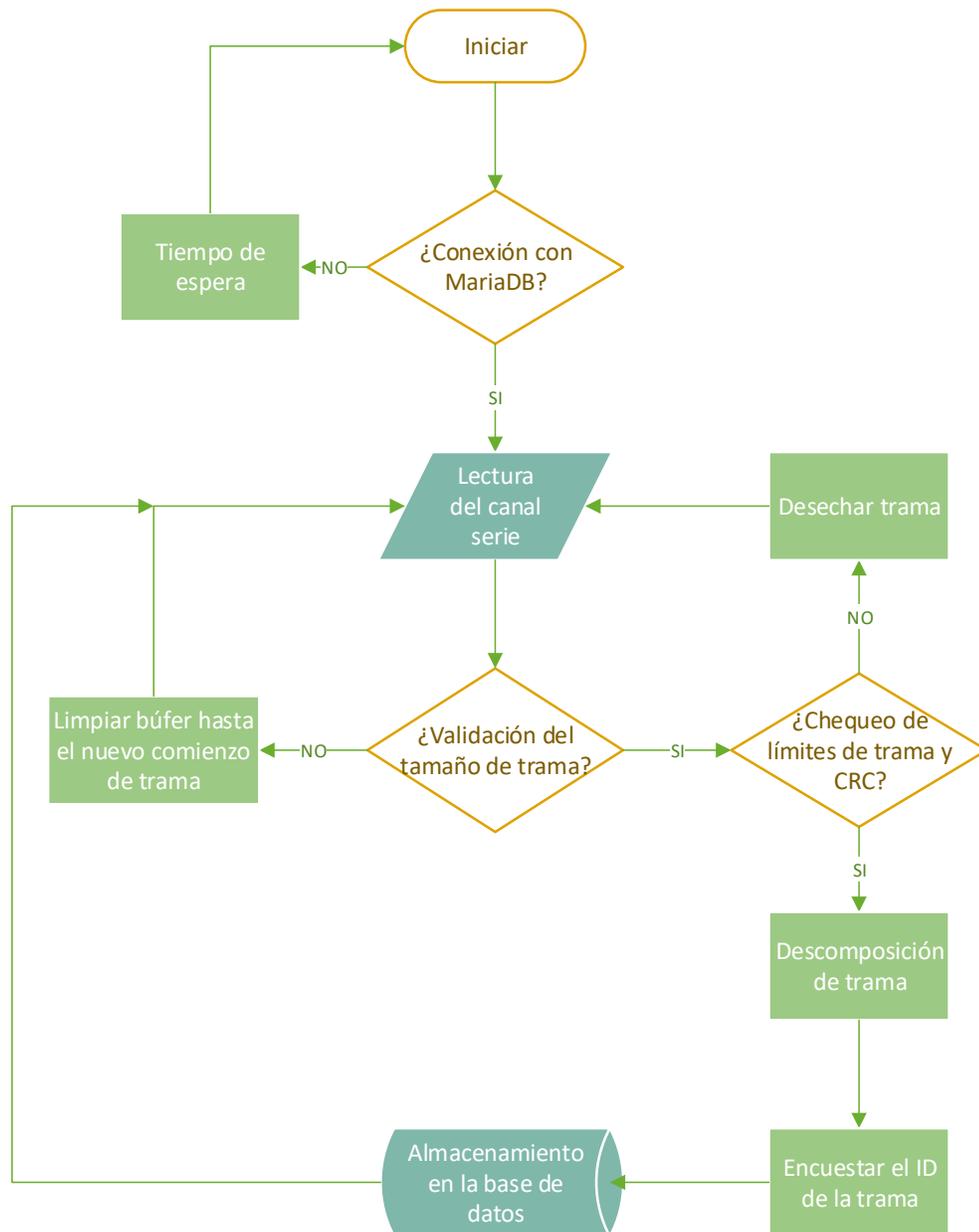
Anexo II Diagrama en bloques del proceso de almacenamiento en la base de datos

Figura A.2 Proceso de almacenamiento en la base de datos.

Anexo III Gráficas de los parámetros temperatura, humedad relativa, intensidad luminosa y humedad del suelo de los nodos restantes.

1. Gráficas pertenecientes a la temperatura

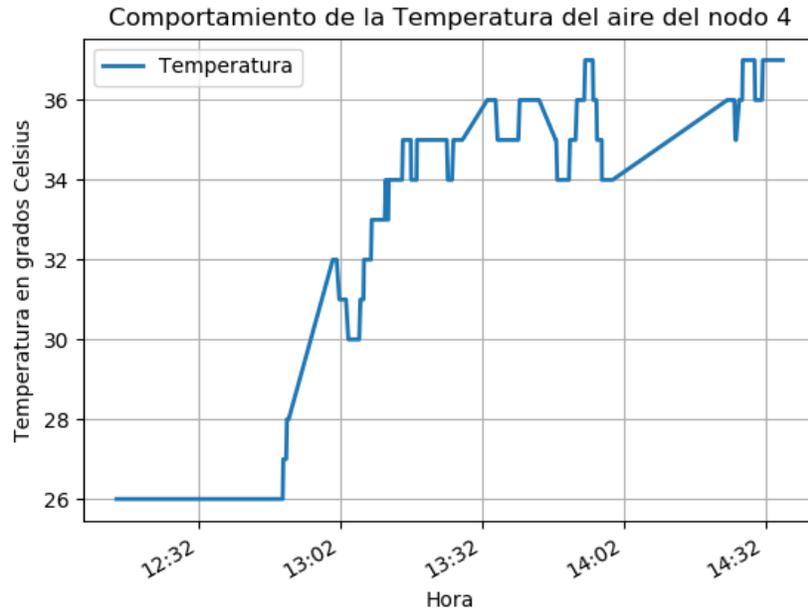


Figura A.3 Temperatura en el nodo 4.

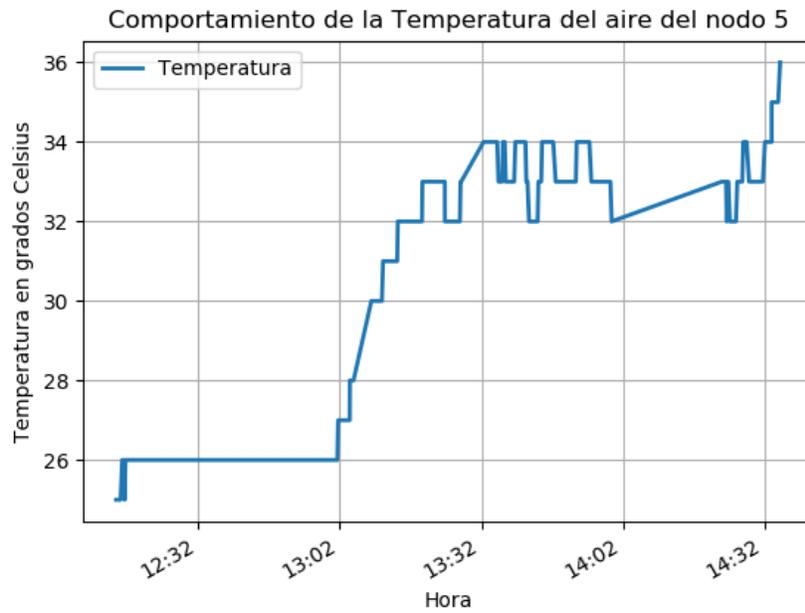


Figura A.4 Temperatura en el nodo 5.



Figura A.5 Temperatura en el nodo 6.

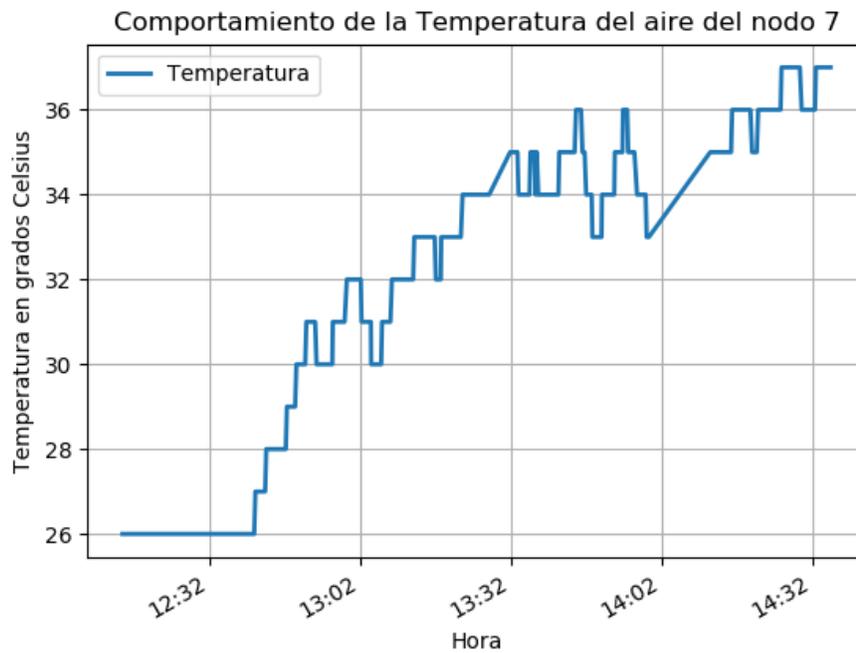


Figura A.6 Temperatura en el nodo 7.

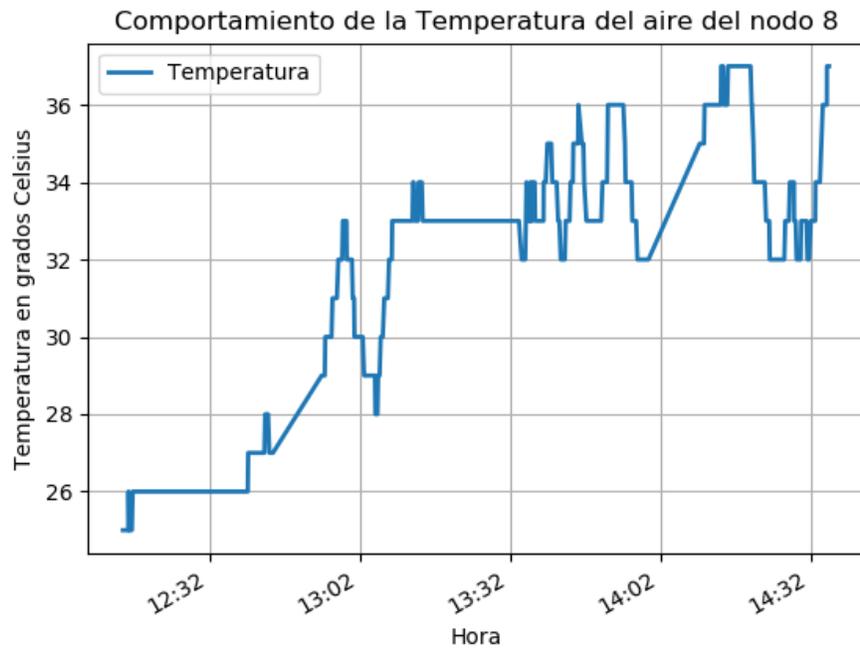


Figura A.7 Temperatura en el nodo 8.

2. Gráficas pertenecientes a la humedad relativa

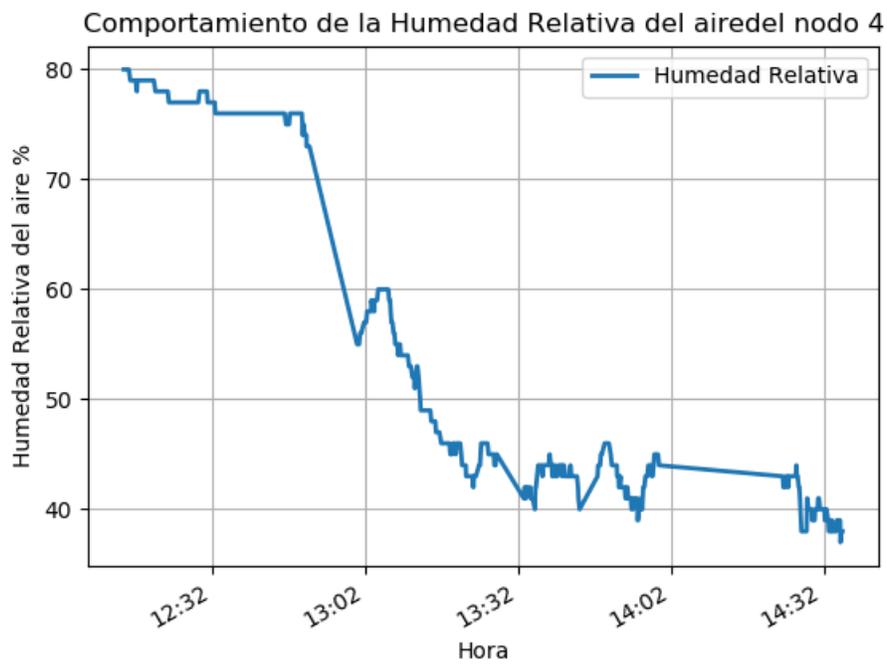


Figura A.8 Humedad relativa en el nodo 4.

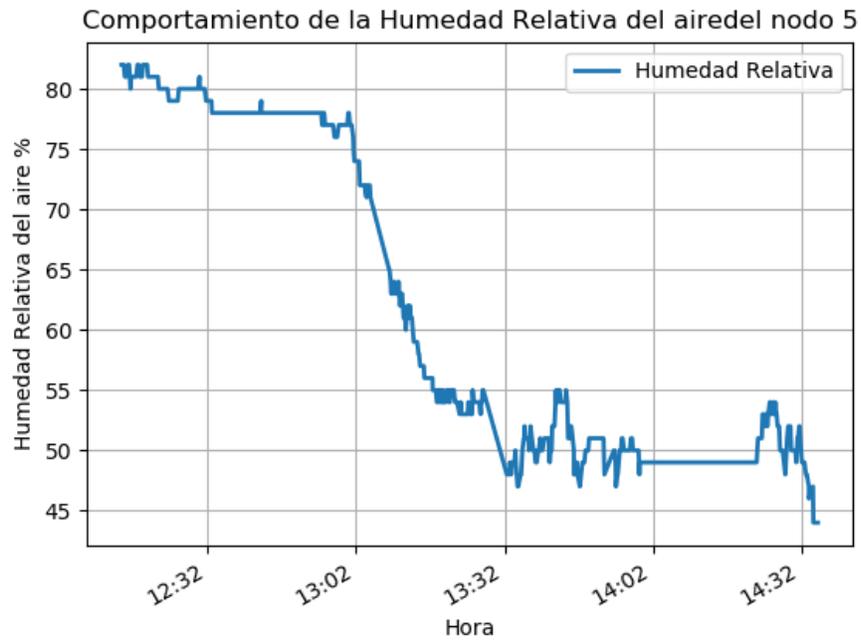


Figura A.9 Humedad relativa en el nodo 5.

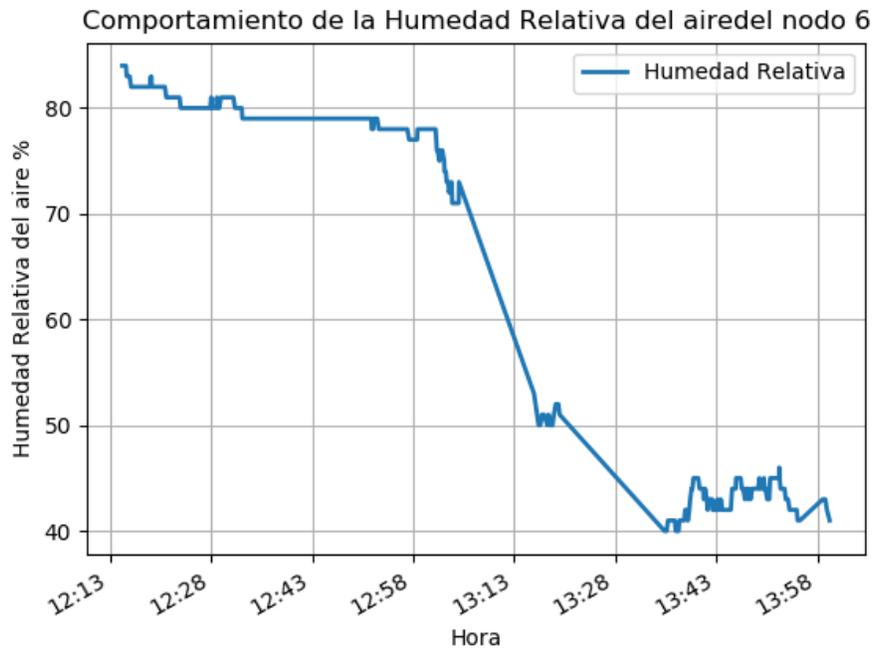


Figura A.10 Humedad relativa en el nodo 6.

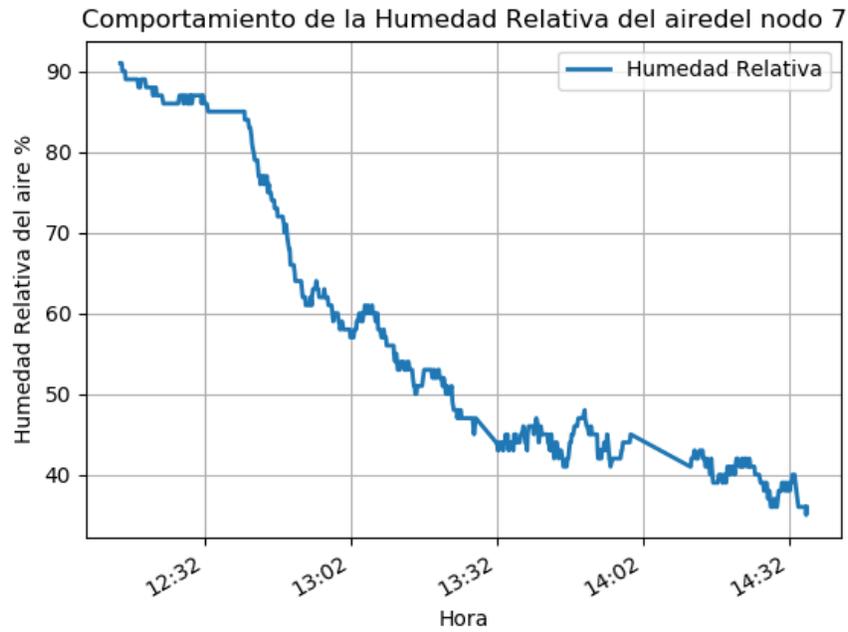


Figura A.11 Humedad relativa en el nodo 7.

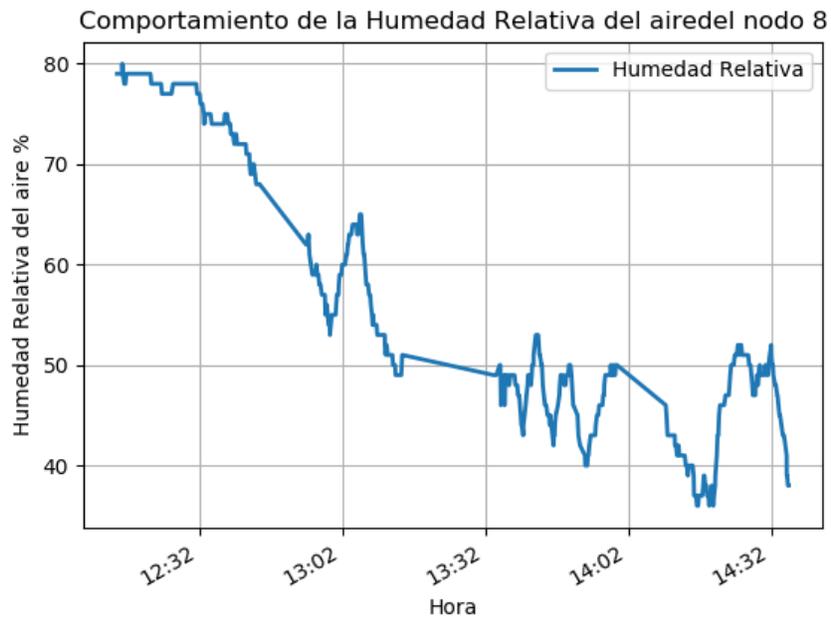


Figura A.12 Humedad relativa en el nodo 8.

3. Gráficas correspondientes a la intensidad luminosa



Figura A.13 Intensidad luminosa en el nodo 4.



Figura A.14 Intensidad luminosa en el nodo 5.



Figura A.15 Intensidad luminosa en el nodo 6.

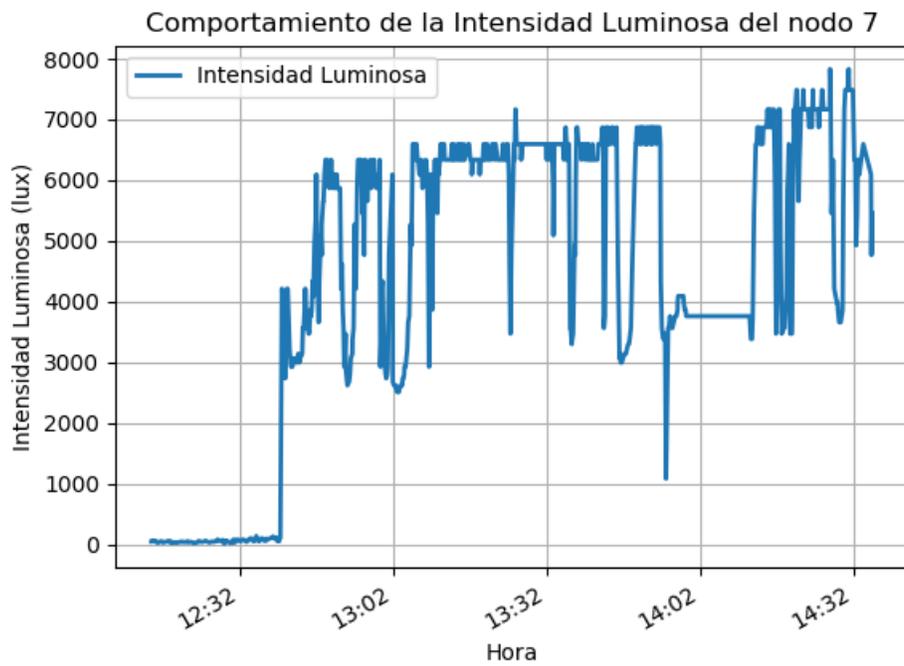


Figura A.16 Intensidad luminosa en el nodo 7.



Figura A.17 Intensidad luminosa en el nodo 8.

4. Gráficas correspondientes a la humedad del suelo⁴

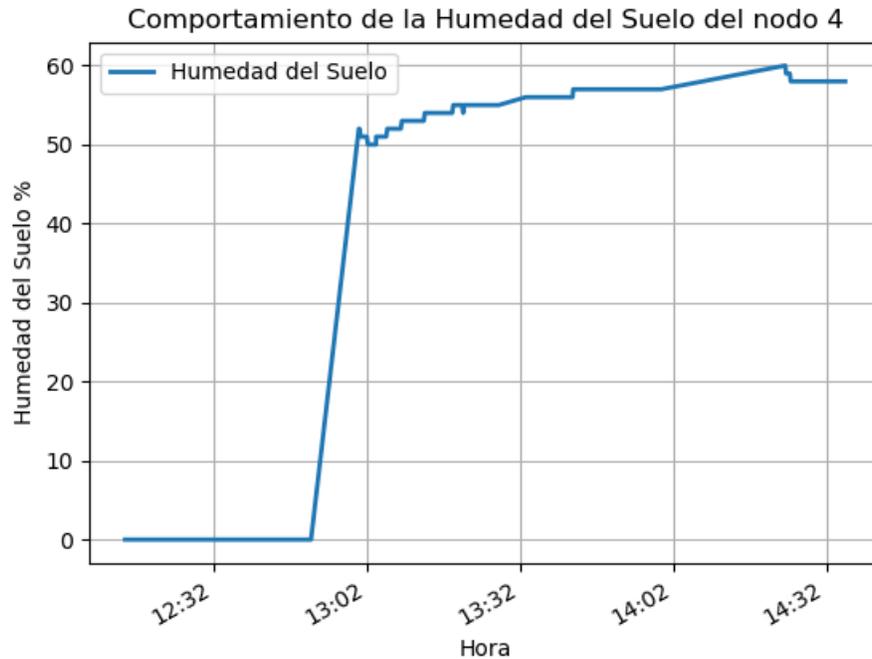


Figura A.18 Humedad del suelo en el nodo 4.

⁴ Se muestra solo la gráfica del nodo 4 (y la del nodo 2 en el subepígrafe 3.1.1) porque los sensores YL-69 de los nodos 5,6,7,8 fueron dañados en el proceso de introducción al suelo en las casas de cultivo.

Anexo IV Imágenes del despliegue de la red

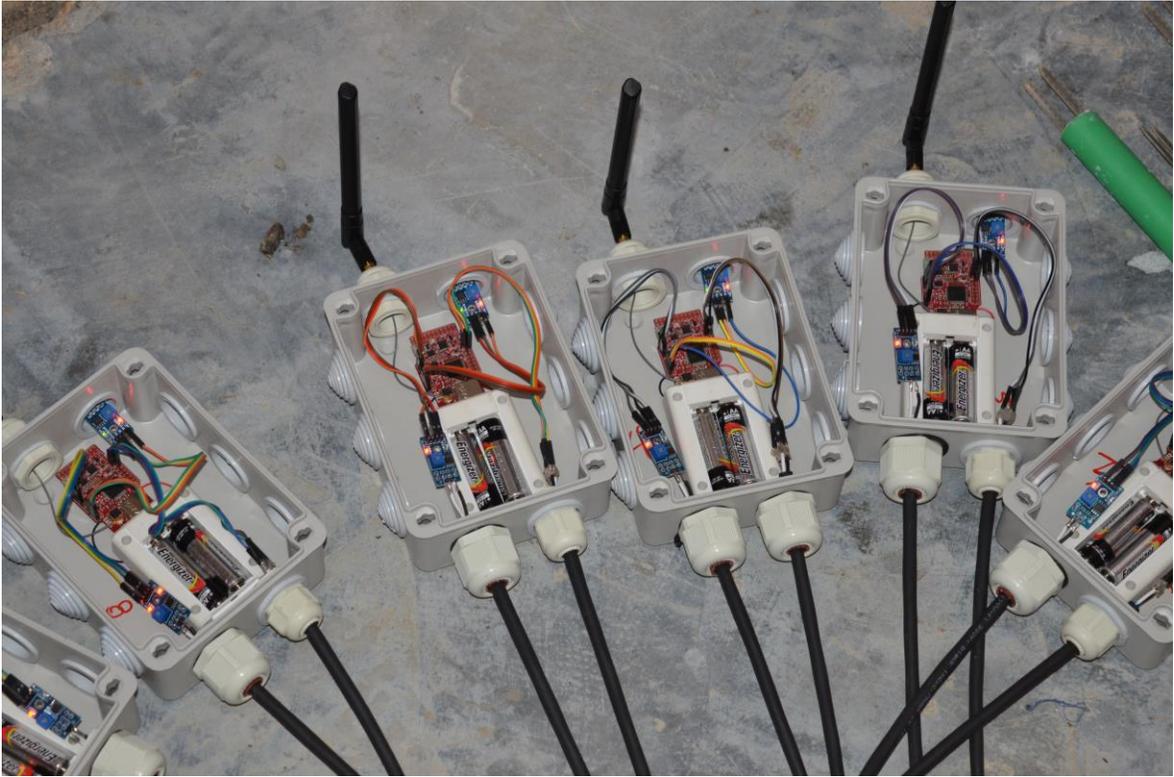


Figura A.19 Nodos de medición funcionando.

En la Figura A.19 se observan los seis nodos de medición en funcionamiento dentro de la caseta de fertirriego en la primera fase del despliegue.



Figura A.20 Nodo de medición en la casa de cultivo.

La figura A.20 muestra el modo de conexión del nodo de medición 2 en la casa de cultivo, se observa a la derecha el sensor YL-69 acoplado a una protección introducido en el suelo.