

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño de red de sensores inalámbricos para aplicaciones de riego agrícola.

Autor: Darian Zubizarreta Luján

Tutores: MsC. Richar Sosa López

Dr. Iván Santana Ching

Ing. Héctor Enrique Socarrás Cabrera

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño de red de sensores inalámbricos para aplicaciones de riego agrícola.

Autor: Darian Zubizarreta Luján

dzubizarreta@uclv.cu

Tutor: MsC. Richar Sosa López

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, UCLV
rslopez@uclv.edu.cu

Dr. Iván Santana Ching

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, UCLV
ching@uclv.edu.cu

Consultante: Ing. Héctor Enrique Socarrás Cabrera

Especialista Superior en TICAES, CEDAI División Villa Clara
hectorenrique@cedai.com.cu

Santa Clara

2017

" Año 59 de la Revolución "

PENSAMIENTO

“Ser el hombre más rico del cementerio no es lo que más me importa... Ir a la cama en la noche diciendo: “hemos hecho algo maravilloso”, es lo que realmente me preocupa.”

Steve Jobs

DEDICATORIA

*A toda mi familia y amigos,
en especial a mis padres.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: a quienes es imposible reflejar en este papel cuanto tengo que agradecerles, pero no puedo pasar por alto esta oportunidad, gracias por su confianza plena en mí y en mis capacidades; por todo su sacrificio; por apoyarme en todo momento y en todas mis decisiones, aun cuando en ocasiones no fueran las más correctas; por pensar siempre en lo mejor para mí; por darme todo lo necesario, haciendo hasta lo imposible, para poder cumplir mis sueños; por entregarse por completo cuando más necesario era y más difícil fueron los tiempos; por ser mis guías a lo largo del camino; por convertirme en un hombre de bien. Gracias por todo.

A mi hermana querida y al resto de mi familia: por su preocupación constante, por toda su ayuda y apoyo a lo largo de estos años.

A Alfredo e Ivón, mis segundos padres, y al resto de su familia: a quienes les debo más de lo que jamás podré pagarles, gracias por estar siempre ahí cuando los necesité, ahora espero poder devolverles el favor.

A Lina, Pablito y el famión: por adoptarme en Santa Clara cuando no tenía a nadie y hacerme sentir como en casa, por soportarme en muchas ocasiones cuando iba a hacerles la visita o necesitaba de su ayuda, muchísimas gracias a todos, siempre pueden contar conmigo.

A Richar, y a todos en su casa: mentor, educador, amigo y una de las personas más visionarias, emprendedoras y perseverantes que he conocido. Gracias por creer siempre en mí y aceptarme desde un principio; por llevarme y exigirme siempre al límite de mis potencialidades; por el apoyo desinteresado y el seguimiento constante de mi progreso; por ayudar a convertirme en el profesional que quiero ser y darme la guía necesaria para llegar al profesional que debo ser. *A Ching,* por toda su ayuda y enseñanzas brindadas en este proceso y por sus recomendaciones y consejos siempre oportunos.

A mis amigos de siempre: Dannier, Leonel, Luis Miguel, Jeisy, Salvador, Alejandro, Yoandris, Nelson, Kendrys, no quiero problemas si se me quedó alguien, y a mi gente del barrio, gracias todos por los buenos momentos compartidos y los que faltan por venir y por su seguimiento constante de mi formación profesional.

A Selma: por estar a mi lado, entenderme y soportarme durante los últimos dos años, gracias por toda mi vida, *a Lida:* que, aunque fuiste la última gran adquisición del aula, no pasaste desapercibida y te ganaste toda mi confianza y mi cariño, y que aún con tus días buenos y otros no tanto, siempre supiste buscar un

lugarcito para mí; y a **Dayanis**, compañera y amiga que también estuvo a mi lado en las buenas y en las malas en estos últimos dos años; muchas gracias por el placer y el privilegio de su compañía.

A mis compañeros de aula: gracias por compartir conmigo durante estos 5 años de entrega, dificultades, sacrificios y buenos momentos.

A mi grupo de viajeros por Cuba: es imposible mencionarlos a todos, los que empezaron, los que se incorporaron luego, pero quiero agradecerles por estar a mi lado en los mejores momentos de mi Universidad y compartir esas experiencias que jamás olvidaré y me marcarán de por vida. Cuando me necesiten solo llamen y ahí estaré para lo que haga falta, y más teniendo ahora también mi Título de Oro en Ingeniería Industrial.

A mis chicas de agropecuaria: en especial a Yanara, Jessy, Gissell, Elizabeth, Celia y a mi titi Annetis: gracias a todas por su preocupación constante y su amistad desinteresada, son muy importantes para mí, espero que nuestros caminos se vuelvan a cruzar.

A mis amistades en la facultad: a los que nos sacrificamos durante los festivales, a los que compartimos en los Criollos, y en especial a mis amigos de Eléctrica con los que conviví durante mucho tiempo en estos años, gracias a todos.

A todos mis profesores: gracias por sus enseñanzas, sus consejos, su guía, su apoyo y por lograr mi formación como un profesional competente y digno de esta institución universitaria.

Al resto de mis amistades de la Universidad: a aquellos que ya no están cerca, por un motivo u otro, los que ya se graduaron, los que quedaron en el camino y a los que terminarán en los próximos años, a los que les deseo éxitos, gracias a todos por compartir conmigo, de una forma u otra, la mejor etapa de mi vida, saben que siempre los recordaré, no importa el tiempo que pase o la distancia que nos separe.

A todas aquellas personas, que son muchísimas y en varias zonas de Cuba, por ayudarme a lograr hacer este sueño realidad, sobre todo a los que estuvieron en las buenas y en las malas, cuando más lo necesitaba, muchísimas gracias a todos y por todo.

RESUMEN

Las redes de sensores inalámbricos constituyen una alternativa viable para la automatización de las aplicaciones de riego distribuido en la actualidad. En la presente investigación se realizó la propuesta de arquitectura de hardware y software inherente a una aplicación de este tipo.

Se establecieron modos de trabajo para los nodos, la transmisión y el almacenamiento de datos, brindados estos por el sensor de humedad de suelo YL-69 y el de humedad y temperatura ambiente DHT22, que fueron procesados por el microcontrolador Arduino. La Raspberry Pi se utilizó como coordinador de la red. Cada elemento posee un módulo de radio Xbee, el cual utiliza el estándar 802.15.4 destinado al bajo consumo de las redes inalámbricas.

El uso de hardware y software de código abierto posibilitó que el costo del sistema sea bajo, aportando también al medioambiente gracias al ahorro de recursos hídricos y energéticos. Se brindaron pruebas de estabilidad, calidad y rango de la red en diferentes ambientes. El desarrollo exitoso del sistema puede considerarse como un prototipo que debería ser ampliado para aplicaciones a gran escala. Con el montaje en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón”, en Jagüey Grande, se validan los resultados de esta investigación.

Índice General

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN.....	1
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	4
1.1 Redes de sensores inalámbricos.....	4
1.1.1 Evolución y fuentes de interferencias.....	5
1.1.2 Principales características:.....	6
1.2 Ámbito de aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos.	7
1.3 Comunicación por Radiofrecuencia.....	19
1.3.1 Espectro electromagnético.....	19
1.3.2 Zona de Fresnel	21
1.3.3 Aplicaciones	22
1.4 Zigbee como tecnología inalámbrica.....	22
1.4.1 Estándar IEEE 802.15.4.....	22
1.4.2 Características de Zigbee.....	23
1.4.3 Arquitectura de Zigbee.	24
1.4.4 Topología.....	26
1.4.5 Comparación de tecnologías inalámbricas.	27
1.5 Posible esquema de solución generalizada.	27
1.6 Consideraciones del capítulo.	28

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL HARDWARE Y EL SOFTWARE	29
2.1 Diseño de la arquitectura de hardware.....	29
2.1.1 Arduino.....	30
2.1.2 Raspberry Pi	31
2.1.3 Módulos Xbee.....	32
2.1.4 Sensores.....	38
2.2 Diseño de la arquitectura de software.....	39
2.2.1 Funcionamiento de la aplicación.....	39
2.2.2 Software Arduino IDE.....	43
2.2.3 Arquitectura de software del coordinador.....	44
2.2.4 Software profesional XCTU.....	44
2.3 Arquitecturas finales desarrolladas.....	46
2.4 Consideraciones del capítulo	47
CAPÍTULO 3. PRUEBAS Y RESULTADOS	48
3.1 Pruebas realizadas.....	48
3.1.1 Pruebas de alcance de la red.....	48
3.1.2 Pruebas de comunicación de la red.....	49
3.1.3 Pruebas de velocidad de transmisión de la red.....	50
3.1.4 Pruebas de estabilidad de la red.....	51
3.2 Análisis energético realizado.....	53
3.3 Implementación del sistema.....	55
3.4 Análisis económico, medioambiental y político de la aplicación.....	55
3.5 Consideraciones del capítulo.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59

Conclusiones	59
Recomendaciones	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	67
Anexo I Estándares relacionados a la tecnología Zigbee.	67
Anexo II Comparación entre tecnologías inalámbricas.	68
Anexo III Principales características de la Raspberry Pi.....	69
Anexo IV Configuración de pines del Xbee.....	70
Anexo V Comparación entre las series de los módulos Xbee.....	71
Anexo VI Principales características del sensor DHT22.....	72
Anexo VII Diagramas UML de las subrutinas del sistema.....	73
Anexo VIII Topología en malla implementada en la red.....	77
Anexo IX Implementación de la red en Jagüey Grande.	78

Índice de Figuras

1.1 – Principales protocolos de red inalámbrica conocidos.....	5
1.2 – Espectro electromagnético.....	20
1.3 – Espectro de Zigbee frente a otras tecnologías.....	23
1.4 – Capas que conforman la pila de protocolos Zigbee.....	24
1.5 – Principales topologías que permite Zigbee.....	26
2.1 – Elementos que componen el nodo sensor.....	29
2.2 – Elementos que componen el nodo actuador.....	30
2.3 – Raspberry Pi 3 B.....	31
2.4 – Diagrama de pines de Xbee, vista superior.....	32
2.5 – Formato general de un mensaje en el modo API2.....	35
2.6 – Diagrama de casos de uso de la red.....	40
2.7 – Diagrama de actividades del coordinador.....	41
2.8 – Diagrama de actividades del nodo sensor.....	43
2.9 – Diagrama de actividades del nodo actuador.....	43
2.10 – Arquitectura del nodo sensor.....	46
2.11 – Arquitectura del nodo actuador.....	46
2.12 – Arquitectura del coordinador.....	47
3.1 – Prueba de rango en línea de visión directa.....	48
3.2 – Prueba de rango entre arbustos.....	49
3.3 – Prueba de comunicación en línea de visión directa.....	50
3.4 – Prueba de comunicación entre arbustos.....	50
3.5 – Prueba de velocidad entre línea de visión directa.....	51
3.6 – Prueba de velocidad entre arbustos.....	52

Índice de Tablas

1.1 – Principales interferencias en las redes.....	6
1.2 – Bandas del espectro de radiofrecuencia.....	20
2.1 – Configuraciones realizadas a los módulos de radio Xbee	45
3.1 – Prueba de estabilidad de la red.....	52
3.2 – Consumo típico de los componentes del nodo sensor.....	53
3.3 – Consumo en modo ahorro de los componentes del nodo sensor.....	54
3.4 – Listado de precios de los componentes del nodo sensor.....	56
3.5 – Listado de precios de los componentes del nodo actuador.....	56
3.6 – Listado de precios de los componentes del coordinador.....	56

INTRODUCCIÓN

La última década ha visto un aumento rápido de la investigación en la informática ubicua y las áreas monitoreadas por redes de sensores, y un componente importante de prototipos y despliegues de ensayos han demostrado la disponibilidad económica para dispositivos sensores de fácil uso. Las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks) son producidas por fabricantes comerciales en el formulario de equipos de desarrollo o componentes individuales. También hay un número importante de universidades y laboratorios de investigación dedicados al estudio de estas.

Con el aumento de los diseños de innovación, para mover de los laboratorios al mercado, se crea un problema para grupos de investigación más pequeños a los que les gustaría tener acceso continuado para abrir plataformas de investigación donde puedan experimentar con las arquitecturas, aplicaciones, hardware y software sin el gasto de desarrollar su propia plataforma desde el principio, y sin el alto costo y las restricciones inevitables de unir su investigación a un sistema comercial relativamente cerrado.

Estas redes se basan en tecnologías que ofrecen una gran flexibilidad al sistema de comunicaciones. De forma más detallada, no requieren ningún tipo de infraestructura fija ni administración centralizada, donde las estaciones, además de ofrecer funcionalidades de estación final deben proporcionar también servicios de encaminamiento, retransmitiendo paquetes entre aquellas estaciones que no tienen conexión inalámbrica directa. (Benítez et al., 2015)

En la mayoría de los casos, la información obtenida por los nodos de la red es utilizada para llevar a cabo posteriormente acciones correctivas que permitan el control de un proceso o ambiente. Estas redes de sensores, donde se emula el comportamiento cíclico de percepción-razonamiento-acción, son útiles para una gran cantidad de aplicaciones. Lo que hacen es

recolectar y diseminar información de los sensores en tiempo real, procesar la información a través de tareas colaborativas entre los diferentes sensores, y propagar señales de control a los actuadores correspondientes para controlar el comportamiento de los sistemas físicos.

Las redes de sensores inalámbricos son útiles para una amplia variedad de aplicaciones, como pueden ser: industriales, militares, médicas, domóticas, agrícolas, etc.

Las WSN pueden usar diferentes tecnologías inalámbricas para la comunicación, como: Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth, y los Sistemas Globales para las Comunicaciones Móviles (GSM).

En los sistemas de irrigación instalados actualmente a nivel mundial, existen problemas en la aplicación y supervisión de la operación, manifestándose ello en un incorrecto manejo del riego, volúmenes de agua que se pierden, lo que deriva en bajas eficiencias de regadío. En el mundo se dan importantes pasos en la planificación del riego, donde se define una metodología específica para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos y las técnicas de riego a utilizar, así como su interrelación con los rendimientos agrícolas.

Para lograr la aplicación de un riego eficiente hay que dominar desde las técnicas de cuándo y cuánto regar, hasta la selección de las tecnologías que se identifican con el cómo regar, tratándose de buscar una mejor identificación con las de mayor eficiencia. Cuba es uno de los principales países de América Latina que se encuentra inmerso en buscar nuevos métodos y técnicas que mejoren las condiciones del trabajo en el campo (Carrazana Pérez, 2016).

Por todo lo planteado anteriormente el problema científico es que el país no cuenta actualmente con una solución de riego automatizada estandarizada acorde a los ambientes agrestes y terrenos de cultivos sumamente extensos que le brinde mayores beneficios, ya que una solución cableada convencional resultaría demasiado costosa. Por lo que se considera que la mejor solución sería la implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de las condiciones del campo y a partir de los datos procesados, llevar a cabo un control del riego en el terreno.

El objetivo general de esta investigación es diseñar una arquitectura de hardware y software para redes de sensores inalámbricos, orientada a realizar el riego automatizado.

Como **objetivos específicos** se plantean:

- Analizar la bibliografía existente acerca del tema.

- Diseñar la arquitectura de hardware y software para la red.
- Evaluar la eficiencia energética de los nodos.
- Evaluar el monto económico de los componentes de la red.
- Seleccionar la topología a implementar en la red de sensores.
- Establecer los modos de operación de dicha red.

Organización del informe

El presente documento se encuentra dividido en tres capítulos. El primero de ellos servirá para abordar todo lo relacionado al marco teórico: situación del problema, antecedentes, justificación, entre otros aspectos importantes, así como para analizar los posibles esquemas de solución a implementar.

El capítulo dos está dedicado al estudio de los elementos de hardware que se utilizarán para diseñar el sistema: dígame sensores, microcontroladores y elementos de cómputo, así como al estudio de la arquitectura de software implementada y las herramientas que se usaron para el diseño de la red.

El tercer y último capítulo abordará los contenidos relacionados a estudios que se realizarán al sistema implementado: pruebas de rango, de comunicación y gráficos de comportamiento de la red; mostrándose además los análisis energéticos, económicos y medioambientales correspondientes, así como el montaje realizado, para validar la aplicación, en una entidad perteneciente a la rama agrícola.

Por último, se realizarán una serie de conclusiones y recomendaciones acerca del proyecto y se mostrarán en forma de anexos otros elementos de interés.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Con el desarrollo tecnológico actual y los avances en investigaciones acerca del tema abordado en este trabajo, ha aumentado considerablemente la bibliografía disponible a consultar, principalmente en la red de redes, en todas partes del mundo. De ahí que este capítulo se dedique a realizar una revisión de la literatura existente, posibilitando de esta manera poder seleccionar las mejores herramientas y el mejor diseño para el proyecto.

1.1 Redes de sensores inalámbricos.

A nivel mundial se hace extensiva la investigación y aplicación de las redes de sensores inalámbricos, debido a que los entornos inteligentes representan el siguiente paso en la evolución de los servicios en edificios, hogares o sistemas automáticos de transporte. Diversos países dedican tiempo y recursos a este tema, gracias a las diversas ventajas que ofrece. En un principio sus aplicaciones fueron militares, pero actualmente su uso se está ampliando significativamente para aplicaciones civiles.

Para hablar de las redes de sensores inalámbricos es necesario tener clara su conceptualización. En (Zennaro, 2010) se definen las WSN como una red de característica auto-configurable integrada por un pequeño número de nodos sensores también llamados motes distribuidos espacialmente y comunicados entre sí, para lo que se usan señales de radio, con la finalidad de monitorizar y entender el mundo físico para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y el movimiento, o los contaminantes (Adam and Frey, 2006). El nombre mote o nodo, dado a este tipo de dispositivos, cumple con la finalidad de indicar en una sola palabra dos de los conceptos principales: su pequeño tamaño y la idea de que pueden estar distribuidos en cualquier lugar, cosa que es posible gracias a que son dispositivos autónomos

que funcionan con baterías muy similares a las de los teléfonos celulares y que permiten ser cargadas por paneles solares en el momento que así se requiera, además del hecho de que sus comunicaciones se basan en protocolos de bajo consumo como es el caso de Zigbee, gracias al cual pueden pasar de un estado de inactividad a realizar una transmisión y luego regresar a su estado inicial evitando el desgaste de energía. Los motes a su vez tienen la capacidad de comunicarse entre sí gracias a la creación de redes mesh (topología malla) y retransmitir la información hasta un punto destinado al control donde incluso se pueden tomar decisiones. Estos nodos se organizan en ciertos intervalos de tiempo y pueden determinar cuáles rutas están disponibles para la comunicación (D. Gascó, 2010).

1.1.1 Evolución y fuentes de interferencias.

En la Fig. 1.1 se puede observar cuál ha sido la evolución de las redes inalámbricas a lo largo de estos años, y dentro de qué familia de redes se encuentra cada uno de los protocolos que se muestran en la figura.

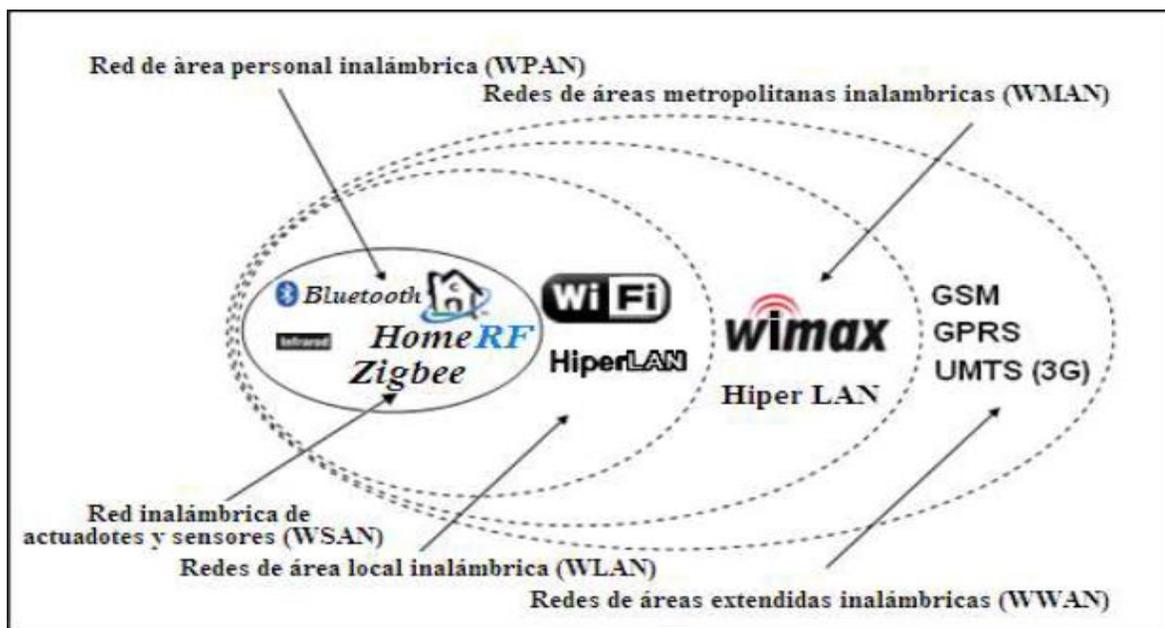


Fig. 1.1 – Principales protocolos de red inalámbrica conocidos y grupo o familia a la que pertenecen (Dordoigne, 2015).

Por otra parte, se muestra a continuación, en la Tabla 1.1, cuáles son las principales fuentes de interferencias que pudieran afectar a estas redes:

Interferencias de gran Ancho de Banda	Interferencias de Ancho de Banda angosto
Motores	Transmisores de radio y TV
Inversores, Circuitos SCR	Zumbido de líneas eléctricas
Interruptores eléctricos	Generadores de señales
Computadoras, ESD	Osciladores locales
Sistemas de ignición	Sistemas UPS
Reguladores de voltaje	Equipos de medición
Pulsos electromagnéticos (Rayos)	Equipos microondas y de ultrasonido
Lámparas de arco o vapor	Balastros electrónicos
Generadores de pulsos	Equipos médicos
Termostatos	Sistemas con microprocesadores
Aparatos de soldadura	Transmisores celulares y localizadores
Convertidores de frecuencia	Generadores de alta frecuencia

Tabla 1.1 - Principales interferencias en las redes (Cayani et al., 2012).

1.1.2 Principales características:

- **Topología dinámica:** En una red de sensores la topología siempre es cambiante, por lo que tiene que adaptarse para poder comunicar nuevos datos adquiridos.
- **Variabilidad del canal:** El canal radio es muy variable, en el que existen una serie de fenómenos como pueden ser la atenuación, desvanecimientos rápidos, desvanecimientos lentos e interferencias, que puede producir errores en los datos.
- **No se utiliza infraestructura de red:** No tiene necesidad alguna de infraestructura para poder operar, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o enrutadores de la información. Sin embargo, hay que destacar en el concepto de red sensora la figura del nodo dedicado a recolectar los datos y por el cual se recoge la información generada, normalmente en tiempo discreto. Esta información generalmente es adquirida por una

computadora o microcontrolador conectado a este nodo y es sobre este que recae la posibilidad de transmitir los datos.

- **Tolerancia a errores:** Un dispositivo sensor tiene que ser capaz de seguir funcionando a pesar de tener errores en el sistema propio.
- **Comunicaciones multisalto o *broadcast*:** En aplicaciones sensoras siempre es característico el uso de algún protocolo que permita comunicaciones multi hop, aunque también es muy común utilizar mensajería basada en *broadcast*.
- **Consumo energético:** Es uno de los factores más sensibles debido a que tienen que 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 módulo de radio con la misma característica, a esto hay que agregar un software que también conjugue todo lo anterior, haciendo el consumo aún más restrictivo.
- **Limitaciones de hardware:** Para poder conseguir un consumo ajustado, se hace indispensable que el hardware sea lo más sencillo posible, así como su módulo de radio, esto nos deja una capacidad de procesamiento limitada.
- **Costos de producción:** Dada que la naturaleza de una red de sensores tiene que ser en número muy elevada, para poder obtener datos con fiabilidad, los nodos sensores una vez definida su aplicación, son económicos de hacer si son fabricados en grandes cantidades (Cianca, 2012).

Las redes de sensores inalámbricos prometen cambiar la forma de obtener la información a nivel global. Se prevé que las redes de sensores estarán formadas por miles de nodos sensoriales diminutos y que no serán redes cerradas a una aplicación concreta, sino que estarán todas entrelazadas y conectadas a Internet.

1.2 **Ámbito de aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos.**

Las redes de sensores inalámbricos pueden ayudarnos allí, donde se requiera recoger lecturas, sin el costo de implementar una infraestructura. Estas pueden ser en un entorno inaccesible u hostil como también en empresas, fábricas, oficinas o incluso el propio hogar, para así

detectar cambios, tendencias etc. y poder generar alguna acción o intervención de forma rápida y flexible si es conveniente.

Como se ha señalado, estas redes respaldan un amplio espectro de aplicaciones, que van desde la detección ambiental a la localización de vehículos, desde la seguridad perimetral hasta la gestión de inventarios, y desde la supervisión del hábitat hasta la gestión de los campos de batallas. Por ejemplo, se pueden desplegar grandes campos de sensores para detectar y controlar la propagación de incendios forestales, detectar y rastrear vehículos enemigos, o apoyar el monitoreo ambiental, incluida la agricultura de precisión. Las partes interesadas ahora se centran en el desarrollo de aplicaciones que ofrecen un valor comercial mensurable. Con las redes de sensores se puede monitorear y controlar fábricas, oficinas, casas, vehículos, ciudades, el ambiente y el medio ambiente. Se pueden detectar defectos estructurales (por ejemplo, grietas inducidas por fatiga) en buques, aeronaves y edificios; lugares de reunión pública pueden equiparse para detectar toxinas y rastrear la fuente de la contaminación; la erupción volcánica, la detección de terremotos, y las aplicaciones de alerta de tsunami generalmente requieren redes desplegadas remotamente, incluso en lugares difíciles de alcanzar, se pueden crear sistemas útiles de monitoreo ambiental (Sohraby et al., 2007).

Existen grandes grupos de desarrollo de aplicaciones usando las redes de sensores, los cuales se analizarán a continuación:

El primero de estos ámbitos en el que resulta interesante la aplicación de redes es en la gestión urbana. Las urbes necesitan de gran cantidad de equipos e infraestructuras que requieren monitorización. Un ejemplo muy ilustrativo sería la medida de tráfico que puede alertarnos de las congestiones o atascos, o bien algún sistema que nos indique las plazas de aparcamiento disponibles en una determinada zona de la ciudad.

Las redes de sensores urbanísticas aparecen como una herramienta para la mejora de la gestión municipal en la entrega de información al ciudadano. Una ciudad con esta tecnología interconecta gente, información y elementos del lugar, hace la ciudad más competitiva y la gestión y mantenimiento más eficientes.

En (Aguirre Solvez, 2009) se aborda la implementación de un sistema de información acústica en determinadas playas, que almacena luego sus registros en una base de datos para, finalmente, publicarla en un espacio Web o sitio equivalente.

Otra aplicación se usa en la gestión del sistema de alumbrado público basado en LEDs. La intensidad de la luz es controlada, o bien, por una computadora de forma inalámbrica por módulos de radiofrecuencia basados en protocolo Zigbee, o bien, por un detector de presencia (Plaza, 2015).

Se puede encontrar además aplicaciones para la regulación y optimización de valores de temperaturas en locales u oficinas, donde se propone la arquitectura de la red (Stojkoska et al., 2014), así como métodos que favorecen al sistema y proporcionan gran rendimiento energético reduciendo la cantidad de transmisiones, así como las técnicas para la localización de los nodos. Otro caso parecido es el de la creación de una aplicación experimental usando tecnología de hardware y software libre de bajo costo y comunicación por radiofrecuencia para el monitoreo de la temperatura en un local interior. El algoritmo diseñado ayuda a rastrear e identificar la situación de los nodos individuales y también el valor del parámetro medido durante un período de tiempo definido (Sarmah et al., 2014).

Por otra parte, en (Boonsawat et al., 2010) se desarrolla una red de sensores inalámbricos que supervisa la temperatura de un edificio. Esta se usa para el direccionamiento de los sistemas de aire acondicionado, buscando como objetivo final ayudar a la economía mediante el ahorro de energía eléctrica. El sistema proporciona una interfaz de usuario que posibilita acceder a los valores de temperatura y consumos de todos los locales.

El segundo grupo de aplicaciones que se aborda será el relacionado con la domótica, que no es más que el conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, y cuyo control goza de cierta ubicuidad, desde dentro y fuera del hogar.

Una de las aplicaciones es la implementación de un sistema domótico para una casa inteligente (de Marcos Peirotén, 2013). Este se divide en cuatro partes importantes: el sistema de seguridad, el de iluminación, el de climatización y el de ocio; con sus respectivos sensores (temperatura, luz, ...) y actuadores (persianas, calefacción, ...). El maestro se encarga de

coordinar el sistema domótico y el sistema gestor de energía, además de formar un puente entre el usuario y ambos sistemas. El usuario puede gestionar estos sistemas a través de la interfaz de control, que muestra la información relevante del sistema, que se almacena en la base de datos.

La creación de un sistema domótico completo para el control de diferentes elementos de una vivienda y para la obtención de parámetros de interés es otro ejemplo de aplicación (Rodríguez Cerezo, 2014). Se lleva a cabo el diseño y construcción de un nodo de control de red y otro periférico, de tal manera que este último se pueda conectar y pueda controlar elementos habituales en una vivienda (luces, ventiladores, calefacción, etc.) y que, a través de sensores, sea capaz de recoger información de interés para el usuario (temperatura, humedad, etc.). Se desarrolla una aplicación Web que sirve de interfaz para que el usuario acceda al sistema y lo controle, permitiendo interactuar con cada uno de los dispositivos.

Otro gran campo de aplicaciones es el relacionado con las mediciones de parámetros medioambientales, tal es el caso de la implementación de una red sensorial para medir distintas variables y transmitir la información de todos los nodos que integran la red hasta un coordinador mediante dispositivos de radiofrecuencia (Girod Fortuño, A, 2012). Además, en (Li, 2014) se propone un sistema sensorial de bajo costo, usando hardware y software libre, así como transmisión por radiofrecuencia para enviar los datos. La red será capaz de almacenar y manejar los resultados de las mediciones para su uso local o remoto y está concebida para su implementación en hogares. Hay otras aplicaciones que, usando la misma tecnología de hardware y software libre abordada anteriormente, también implementan redes de sensores inalámbricos para la medición de variedad de parámetros (Ferdoush and Li, 2014). El sistema es muy económico y escalable debido al tipo de sensores utilizados y al número de nodos implementados que lo hacen adaptable a una amplia variedad de aplicaciones de supervisión de parámetros y control de actuadores.

Otra variante de aplicación de este tipo es la creación de una red que continúa usando como base la misma tecnología abordada en los ejemplos anteriores y que se encarga de la medición de la variable temperatura, siendo un sistema de muy bajo costo y escalable. Para manejar el consumo de la batería se emplean sensores de voltaje. Los datos son transmitidos por

radiofrecuencia y almacenados en un servidor HTTP en la estación receptora, además, se creó una interfaz de usuario para el acceso remoto (Ngajieh, 2015).

Se puede encontrar también que una WSN puede tributar sus registros a un Centro de Datos (Rodriguez et al., 2011). En este caso se mantiene el uso de hardware y software libre como centro de la aplicación y tiene como fin mejorar la eficiencia energética y perfeccionar la actuación del *data center* la hora de la supervisión de los parámetros medioambientales medidos. La red, con una topología malla, consiste en una colección de nodos sensores, un *router* y un coordinador que maneja la red, recibe y procesa los datos. Se monitorean además los parámetros de humedad y temperatura dentro del local.

A continuación, se relacionan otras aplicaciones para diferentes escenarios, desarrollados a nivel mundial:

En (Suryadevara, 2014) se desarrolla una metodología para el desarrollo de una aplicación eficaz capaz de obtener y procesar en tiempo real los datos sobre el estado de una persona mayor. El objetivo es determinar a través de un sistema inteligente, robusto y flexible el bienestar de una persona mayor que vive exclusivamente en su propia casa, basado en los datos de los sensores, actualizando diariamente la base de datos y ejecutando simultáneamente tareas para explorar las complejidades del modelo obtenido.

Otro ejemplo relacionado con el anterior es (de Ávila et al., 2012), donde se presenta una arquitectura basada en redes inalámbricas de sensores para el cuidado de la salud. Se muestran en él las estructuras propuestas del sistema llevable que debería ser portado por el paciente a monitorizar, las variables fisiológicas que se tienen implementadas bajo la arquitectura propuesta y los resultados que se tienen hasta el momento. El sistema está integrado por un conjunto de nodos sensores que serán los encargados de medir las variables fisiológicas a tener en cuenta. Para el desarrollo de la arquitectura se tuvieron en cuenta dos posibles escenarios, con el fin de evitar en la mayor medida posible la necesidad de usar cables. En el primer escenario se establece una forma de red de área corporal inalámbrica, donde cada sensor se comunica a un concentrador y éste es el responsable de enviar toda la información recolectada a un puente “IEEE 802.15.4/802.11” (WSN/Wi-Fi). En el segundo escenario cada nodo sensor se comunica directamente con el puente WSN/Wi-Fi, lo que implica que, si existen n usuarios, cada uno con m nodos sensores, se tendrán $n \times m$ enlaces.

Mientras que en (Medina Bello, 2011) se busca como objetivo principal el desarrollo de un prototipo funcional de una red electrocardiógrafo para medir las señales cardíacas de los deportistas y que transmita la señal inalámbricamente para posteriormente visualizar las señales en un computador.

Existen también redes de sensores para detección de incendios forestales, tal es el caso de (Erazo and Hervas, 2016), donde mediante el uso del protocolo de comunicaciones Zigbee se diseñan motas sensoriales receptoras de información ambiental tal como temperatura, humedad y presencia de humo; así como una base central encargada de recolectar toda la información enviada de forma inalámbrica por los dispositivos sensoriales, ésta información será visualizada en una aplicación de escritorio y en donde se podrá detectar una posible alerta de incendio forestal bajo los parámetros previamente programados; y como un plus se ha diseñado una página Web en la cual se muestran reportes estadísticos acerca del área forestal monitoreada.

Algo parecido al caso anterior se propone en (Bermúdez et al., 2007), donde el sistema diseñado tiene como objetivo realizar un monitoreo de áreas en riesgo de sufrir incendios forestales. Este proyecto presenta tres tipos de dispositivos: la red de sensores (WSN), la estación base y uno o varios vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle*), donde los sensores son protegidos contra el fuego y resistentes a golpes, pero evitando que impidan las comunicaciones. Estos componentes son extendidos sobre la zona afectada por el incendio mediante los UAVs, después de ubicados los sensores constituyen una red inalámbrica interconectada con total autonomía y auto configurable. Cada sensor se encarga de monitorear el terreno más cercano registrando las mediciones continuas de variables físicas como es el caso de la temperatura, la presión, la humedad y la velocidad y dirección del viento.

Otro ejemplo de aplicación muestra el proceso de estudio, diseño y creación de prototipos de redes de sensores inalámbricos para proveer a los sensores de cierta inteligencia, con el fin de examinar diferentes clases de vibraciones ya sean de máquinas eléctricas donde se estudian desajustes en sus vibraciones o en estructuras civiles, donde se estudia su estado y/o presencia de sismos. Para ello se ha creado un prototipo hardware/software, con un protocolo de comunicación síncrono, sencillo y que busca ahorrar energía, el aporte es crear WSNs que

trabajen en forma eficiente y ayuden a evaluaciones estructurales de obras civiles o evaluaciones de máquinas eléctricas (Martell, 2011).

Debido al creciente interés despertado en el ámbito de la seguridad en la construcción y a que las técnicas que más se utilizaban eran puramente de observación directa por parte de un operario y en las cuales muchas veces no se podían detectar fallas, se planteó la necesidad de diseñar una red de localización de patologías en edificios y estructuras, a partir de dispositivos embebidos, sensores y tecnología Zigbee, buscando lograr: facilidad de uso, tolerancia a fallos, escalabilidad, bajo consumo y flexibilidad. El sistema propuesto está formado por una serie de nodos sensores especializados en la detección de patologías, distribuidos a lo largo de la estructura de un edificio. Estos nodos se comunican de forma inalámbrica mediante una red mallada Zigbee, a uno de estos nodos se le asigna la función de ser el coordinador y tiene la tarea de recoger y almacenar las muestras que envían los nodos sensores. Por su parte, los nodos sensores están alimentados con batería, lo que les proporciona mayor autonomía, pero a costa de utilizar un diseño que minimice su consumo mediante algún tipo de plan energético (Torres and Cascón, 2009).

Existe el caso también de (Almansa, 2013), donde se busca controlar el nivel de llenado de los contenedores situados en la calle de forma remota, permitiendo así una gestión de recogida de residuos óptima y eficiente. Para ello se usará el mismo protocolo de comunicación del caso anterior y tecnología de hardware libre.

A nivel industrial también se puede observar el uso de WSN, tal es el caso de la creación de una aplicación Web interactiva que permite monitorear, analizar y controlar, con placas de hardware libre y un dispositivo móvil, a un sistema automatizado. Se describe un sistema genérico que monitorea los valores de voltaje y corriente, y el control de las cargas activadas con fines de ahorro energético (Galicia et al., 2015).

El último gran grupo de aplicaciones a tener en cuenta, y el cual tiene como objetivo final este trabajo, es el referido al uso de las redes de sensores inalámbricos en el sector agroalimentario, específicamente en el área del riego automatizado.

Uno de los usos dados a las WSN dentro de este sector es el de la mejora en los sistemas de transporte de alimentos y productos, esto debido a que en la mayoría de los casos el lugar de producción y cultivo está alejado del lugar de consumo, por lo cual se hace necesario

establecer una optimización a los sistemas de transporte lo cual garantice que sean eficientes, flexibles, amigables con el ambiente, y que además se provea información del producto y de su conservación.

Uno de estos casos es la monitorización de la condición de animales en explotaciones ganaderas, a través de la colocación de nodos en los collares del ganado para tener monitorizada su ubicación y facilitar la identificación mediante etiquetas de lectura por radiofrecuencia (Ketprom et al., 2007). Cabe destacar también la aplicación tratada en (J. Valverde, 2010) para la medida de parámetros medioambientales mediante una red de sensores inalámbricos en una fábrica de café con el fin de mantener controlados aspectos importantes como la ágil variación que se puede presentar en la concentración de determinadas sustancias como el monóxido de carbono (CO).

Otro proyecto, presenta un prototipo de un sistema proyectado utilizando técnicas de mecanización electrónica y tecnologías referentes a la comunicación inalámbrica, con el fin de recolectar datos funcionales y somáticos que permiten la monitorización e inspección de los rebaños bovinos, sin afectar el comportamiento natural de los animales, lo que es de interés para la zootecnia de precisión (Arce et al., 2009). La aplicación de las WSN en esta investigación se fundamentó en la construcción de una infraestructura empleando tecnologías de instrumentación electrónica y comunicación por radiofrecuencia. Se empleó el protocolo *floating base sensor network* que implementa la topología ad hoc con selección aleatoria de nodos.

Por otro lado, se tiene el control de parámetros importantes en los invernaderos como lo es la temperatura y la humedad lo que contribuye a que cada vez estos estén más automatizados y sus condiciones más controladas para garantizar la correcta maduración de los alimentos (Cao et al., 2008).

Dentro de este grupo, cobra vital importancia la agricultura de precisión. Los países involucrados en proyectos de este tipo pueden encontrarse en las más diversas zonas del planeta, debido a la importancia que tiene hacer un uso racional de los recursos hídricos. La mayor parte de las investigaciones se hallan en los países asiáticos, debido a la alta dependencia agrícola de estos pueblos.

Se pueden encontrar aplicaciones en Iraq (Rhman et al., 2014), donde se usan arquitecturas de hardware libre, módulos de radiofrecuencia para la comunicación con protocolo Zigbee y dos modos de trabajo, manual o automático. Algo parecido se desarrolló en Taiwán (Sung et al., 2014). Usando los mismos componentes del ejemplo anterior se diseñó una red para monitorear el crecimiento de los cultivos.

Por otra parte, en Malasia (Ho et al., 2015) se diseñó una aplicación que acciona un relé, que actúa sobre una electroválvula cuando los valores de los sensores de humedad de suelo indican que están por debajo del 60%. Se utilizan los módulos de radio Xbee para la comunicación y para el caso de (Keshtgari and Deljoo, 2012) en Irán, se diseñó una red para recopilar información local y tomar decisiones globales sobre el entorno físico. Se implementaron dos topologías, basadas en el estándar IEEE 802.15.4 y se utilizaron nodos profesionales.

La India es uno de los territorios que con más empeño ha trabajado en el tema y de los que más investigaciones presenta, de ahí que:

En (Sahu and Behera, 2015) se implementó un sistema de riego de bajo costo, permitiendo que un agricultor de clase media pueda usarlo en su granja. Se controla el motor automáticamente y se selecciona la dirección del flujo en la tubería con la ayuda del sensor de humedad del suelo. Finalmente se envía la información (operación del motor y dirección del agua) del campo al móvil del usuario mediante SMS y a su cuenta de correo.

En (Jadhav and Hambarde, 2013) se desarrolló un sistema de riego automatizado que permite el control y monitoreo de los parámetros mediante una aplicación Android. Los objetivos de este proyecto son controlar el abastecimiento de agua para cada planta automáticamente a merced de valores de temperatura y de los sensores de humedad del terreno. También monitorea el crecimiento de la planta usando parámetros diversos, como la altura y la anchura. La aplicación tiene como núcleo central la computadora Raspberry Pi.

En (Chaudhary et al., 2011) se realiza una aplicación de red de sensores inalámbricos para agricultura de precisión en casas de cultivo. Se lleva a cabo un análisis de diversos parámetros en los invernaderos, debido a que los agricultores tienen que soportar grandes pérdidas financieras debido a predicciones erráticas del clima y a métodos incorrectos de riego.

En (Awati and Patil, 2012) se realiza un control automático del riego usando redes de sensores inalámbricas. El propósito de la aplicación es proveer más facilidades en el campo de la agricultura usando el protocolo de comunicaciones inalámbrico Zigbee. Se describe una aplicación sensorial de bajo costo controlando y monitoreando los aspersores, evitando la necesidad del método de inundación.

En (Hussain et al., 2013) se llevó a cabo un control automático del riego mediante WSN. Se usaron dos dispositivos para medir los parámetros del suelo (potasio, fósforo, nitrógeno). Después de medir la fertilidad, se propone un sistema de riego automático por goteo utilizando sensores unidos a microcontroladores para medir la humedad del suelo.

En (Nagaraja and Kurian, 2016) se muestra una WSN que se desarrolla utilizando la plataforma de hardware de código abierto Raspberry Pi (RPI). El sistema es de bajo costo y altamente escalable tanto en términos de tipo de sensores como de número de nodos, lo que lo hace muy adecuado para una amplia variedad de aplicaciones relacionadas con la monitorización ambiental. Se utilizan módulos de radio Xbee para la comunicación mediante protocolo Zigbee.

En (Angal, 2013) se diseñó un sistema de riego automatizado de bajo costo en una casa de cultivos usando una aplicación Android, microcontroladores Arduinos, protocolo Zigbee, relés y la RPI, la cual actúa como bloque de control del sistema para controlar el flujo del motor. El módulo Xbee se utiliza para la comunicación y se usan sensores de humedad para determinar los parámetros a monitorear y controlar.

En (Baviskar et al., 2014) se propone un sistema basado en una red de sensores inalámbricos usando el protocolo de red Zigbee para el control remoto de los parámetros de un invernadero. Se emplea topología malla y sistemas embebidos.

En (Agrawal and Singhal, 2015) se creó un sistema de riego inteligente por goteo de carácter rentable, escalable y robusto. Se utilizaron microcontroladores Arduino para recibir los comandos de on/off de la RPI utilizando Zigbee, columna vertebral de la comunicación entre el coordinador de la red y los dispositivos finales. El diseño se puede utilizar tanto en campos agrícolas grandes como en pequeños jardines. Se usaron sensores y válvulas de solenoide para la confección del sistema. Se explica la instalación completa, incluyendo aspectos de hardware y software, así como la puesta a punto experimental realizada.

En (LakshmiPrasanna et al., 2015) se monitorea y controla la calidad del agua en el campo de riego. El control se realiza usando un sensor de humedad. Si la humedad disminuye, automáticamente el motor se encenderá y si la humedad alcanza su nivel de umbral, el motor se apagará automáticamente. Estos datos se recogerán de cada nodo y se enviarán a la estación central utilizando la tecnología Zigbee.

Por último, en (Tarange et al., 2015) se presenta una propuesta de automatización del sistema de riego agrícola. El sistema proporciona una interfaz Web al usuario para controlar y supervisar de forma remota. Se utiliza el protocolo Zigbee para las comunicaciones. Cada nodo sensor consta de sensor de humedad del suelo y temperatura y un dispositivo Xbee para la comunicación con el nodo coordinador. La Raspberry Pi hace un registro de los eventos en una base de datos y posteriormente los analiza. El sistema funcionará según el algoritmo desarrollado para regar el cultivo. La aplicación permite al usuario monitorear los datos desde un navegador Web y este puede activar o desactivar remotamente el sistema de riego.

Además de los casos ya mencionados, se pueden encontrar proyectos e investigaciones similares en otros países como son los casos de:

Hungría (Szilágyi and Tóth, 2015): Se describe una arquitectura basada en Arduino y sensores de temperatura y su conexionado. Se analizó brevemente la arquitectura de software. Todo el sistema puede ser actualizable. El sistema tiene varias limitaciones: el número de sensores conectados, el tipo de conexión, el suministro de energía del sistema, la pérdida de datos, la creación de una interfaz amigable para el usuario y la tolerancia al fallo del sistema.

Letonia (Elsts et al., 2012): Se crea un sistema de red de sensores inalámbricos (WSN) para la recolección de datos de microclima en agricultura de precisión. Se describe la solución de hardware para esta aplicación y el software que ha sido creado y adaptado, que incluye MansOS, un sistema operativo para nodos de WSN. Sin embargo, el punto principal de este documento es sobre dos despliegues pilotos de red de sensores llevados a cabo en el huerto del Instituto Estatal de Cultivos Frutícolas de Letonia. Se discute y analiza esta experiencia de implementación.

Suecia (Zografos, 2014): Esta publicación aborda la creación de un sistema de monitoreo agrícola basado en una red de sensores inalámbricos. Los sensores estarán conectados a una red de computadoras para supervisar los parámetros medioambientales y enviarán a los

granjeros en tiempo real los resultados. El sistema presenta una base de datos con las peticiones de cada granjero y el conjunto de información resultante puede resultar valiosa para usos futuros.

Nueva Zelanda (Hedley et al., 2012): Se realiza una aplicación para controlar el estado de humedad del suelo relacionado con los eventos de riego, minimizando el drenaje y los eventos de escorrentía y mejorando la eficiencia del uso de nutrientes. El hardware usado permite que el riego y los insumos de nutrientes sean variados a pequeñas zonas de manejo definidas bajo el irrigador.

México: Tanto en (Gutiérrez et al., 2014) como en (Tamayo et al., 2010) se proponen diseños de redes de sensores para aplicaciones de riego. En el primero se desarrolló un sistema inalámbrico de monitoreo de humedad del suelo. Se seleccionaron los componentes necesarios: sensores, protocolos de comunicación, adquisidor de datos y se integraron después para realizar una calibración en laboratorio que arrojó una ecuación correspondiente al tipo de suelo. Mientras que en el segundo trabajo se lleva a cabo el desarrollo y la implementación de una interfaz gráfica de usuario para gestión de los dispositivos de la red. Integra diferentes tecnologías y herramientas para realizar dicha interfaz, la cual permite el control y la supervisión de los sensores/actuadores en el medio.

Ecuador (Vásconez Cuzco and Chamba Tenemaza, 2013): Con un microcontrolador se realiza toda la operación de control de la red. El sistema cuenta con 2 sensores de nivel, estos controlan el reservorio y el pozo, y el encendido de las bombas es por comunicación inalámbrica. Cuenta además con un módem para generar mensajes de texto cada vez que se encuentre activo el sistema. Se implementaron además transductores para poder censar la humedad del suelo. El sistema puede trabajar de forma manual, en caso de que se requiera.

Estados Unidos: En (Kim et al., 2008) se desarrolla una aplicación para el control de los sistemas de riego usando WSN. Se describe la confección del sistema y el software que permite el monitoreo en tiempo real de los parámetros que mide la red. Las condiciones del campo son supervisadas por seis estaciones distribuidas basado en un mapa de la tierra. Una máquina de riego fue usada para ser controlada electrónicamente y que pone al día los equipos usando GPS. La interfaz gráfica que se usa ofrece acceso remoto a las condiciones y mando en tiempo real. Mientras que en (Manikantan et al., 2016) se ofrece una solución

económica de WSN que puede ayudar a agricultores a monitorear sus granjas a distancia. La investigación examina la viabilidad de implementar este sistema en los países en desarrollo. Además, se da una visión general del análisis realizado para la implementación de un prototipo mediante diferentes tecnologías inalámbricas que podrían ser utilizadas.

En Cuba, la principal propuesta de aplicación conocida para la agricultura de precisión basada en hardware y software libre está dedicada a dar soluciones de automatización para sistemas de riego en caña de azúcar. En ella se identifican las técnicas clásicas de riego, se caracterizan las más utilizadas en la caña de azúcar y se proponen soluciones de automatización para lograr un mejor funcionamiento (Carrazana Pérez, 2016). Se conoce además de un estudio realizado para crear un sistema de adquisición de datos, aplicable al monitoreo remoto de parámetros ambientales con una estación de sensores utilizando módulos de radio Xbee con protocolo Zigbee (Pérez et al., 2013).

1.3 Comunicación por Radiofrecuencia

La radiofrecuencia, también denominada espectro de radiofrecuencia, es un término que se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre los 3 kilohercios (KHz) y 300 gigahercios (GHz). El hercio es la unidad de medida de la frecuencia de las ondas, y corresponde a un ciclo por segundo. Las ondas electromagnéticas de esta región del espectro, se pueden transmitir aplicando la corriente alterna originada en un generador a una antena.

1.3.1 Espectro electromagnético

Las ondas de radio son una porción del espectro electromagnético (Véase Fig. 1.2). La radiofrecuencia se puede dividir en distintas bandas del espectro (Véase Tabla 1.2).

A partir de 1 GHz las bandas entran dentro del espectro de las microondas. Por encima de 300 GHz la absorción de la radiación electromagnética por la atmósfera terrestre es tan alta que la atmósfera se vuelve opaca a ella, hasta que, en los denominados rangos de frecuencia infrarrojos y ópticos, vuelve de nuevo a ser transparente.

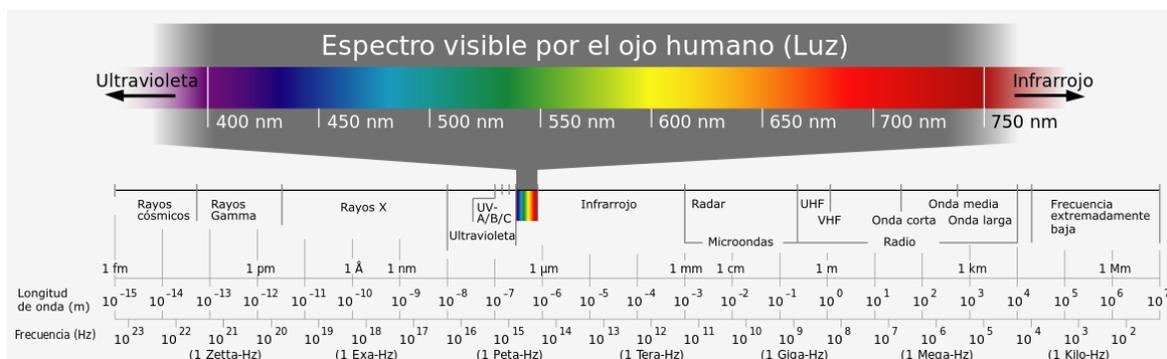


Fig. 1.2 – Espectro electromagnético (Fontal et al., 2005).

Nombre de frecuencia	Abreviatura inglesa	Banda UIT	Frecuencias	Longitud de onda
-	-	-	< 3 Hz	> 100.000 km
Frecuencia extremadamente baja	ELF	1	3-30Hz	100.000-10.000 km
Súper baja frecuencia	SLF	2	30-300Hz	10.000 - 1.000 km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300-3000Hz	1.000 - 100 km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3-30KHz	100 - 10 km
Baja frecuencia	LF	5	30-300KHz	10 - 1 km
Media frecuencia	MF	6	300-3000KHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia	HF	9	3-30MHz	100 – 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	11	30-300MHz	10 – 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	10	300-3000MHz	1 m – 100 mm
Súper alta frecuencia	SHF	11	3-30GHz	100 – 10 mm
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30-300GHz	10 – 1 mm

Tabla 1.2 – Bandas del espectro de radiofrecuencia (Campos et al., 2011).

Las bandas ELF, SLF, ULF y VLF comparten el espectro de la AF (audiofrecuencia), que se encuentra entre 20 y 20.000 Hz aproximadamente. Sin embargo, estas últimas son ondas de presión, como el sonido, por lo que se desplazan a la velocidad del sonido sobre un medio material. Mientras que las ondas de radiofrecuencia, al ser ondas electromagnéticas, se desplazan a la velocidad de la luz y sin necesidad de un medio material.

1.3.2 Zona de Fresnel

Se denomina zona de Fresnel al volumen de espacio entre el emisor de una onda electromagnética, acústica, etc. y un receptor, de modo que el desfase de las ondas en dicho volumen no supere los 180° (Zambrano, 2015).

Así, la fase mínima se produce para el rayo que une en línea recta al emisor y el receptor. Tomando su valor de fase como cero, la primera zona de Fresnel abarca hasta que la fase llegue a 180°, adoptando la forma de un elipsoide de revolución. La segunda zona abarca hasta un desfase de 360°, y es un segundo elipsoide que contiene al primero. Del mismo modo se obtienen las zonas superiores.

La obstrucción máxima permisible para considerar que no hay obstrucción es el 40% de la primera zona de Fresnel. La obstrucción máxima recomendada es el 20%. Para el caso de radiocomunicaciones depende del factor K (curvatura de la tierra) considerando que para un $K=4/3$ la primera zona de Fresnel debe estar despejada al 100% mientras que para un estudio con $K=2/3$ se debe tener despejado el 60% de la primera zona de Fresnel.

Para establecer las zonas de Fresnel, primero se debe determinar la línea de vista de radiofrecuencia, que, de forma simple, es la línea recta que une los focos de las antenas transmisora y receptora.

La fórmula genérica de cálculo de las zonas de Fresnel se muestra en la Ecuación 1.1:

$$R_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1.1)$$

Donde:

- R_n = radio del elipsoide de Fresnel en metros ($n=1,2,3\dots$)
- d_1 = distancia desde el transmisor al centro del elipsoide en metros.
- d_2 = distancia desde el centro del elipsoide al receptor en metros.
- λ = longitud de onda de la señal transmitida en metros.

1.3.3 Aplicaciones

Los principales campos donde se puede encontrar el uso de la radiofrecuencia son:

Radiocomunicaciones, radioastronomía, radares, resonancia magnética nuclear, medicina, fuerza mecánica, metalurgia (templado de metales y soldaduras) e industria alimentaria (esterilización de alimentos).

1.4 Zigbee como tecnología inalámbrica

Las comunicaciones inalámbricas propagan la información en condiciones de espacio libre, por medio de ondas electromagnéticas. Las redes inalámbricas facilitan la instalación, ya que transmiten vía radio la información a la central, permiten a los dispositivos remotos conectarse sin dificultad y sin realizar cambios en la infraestructura del lugar donde se va a instalar. El interés de mejorar la eficiencia energética puede desempeñar un papel fundamental en introducir a los consumidores el valor de las soluciones de automatización del hogar, para esto fue creado Zigbee.

Zigbee, conocido como “*HomeRF Lite*”, es una tecnología inalámbrica, basada en el estándar IEEE 802.15.4. El objetivo es el de crear comunicaciones seguras con bajas tasas de transmisión de datos y maximización de la vida útil de las baterías. Este se expande a una serie de dispositivos haciendo que trabajen más eficientemente entre sí. Es esencialmente útil para redes de sensores en entornos industriales, médicos y domóticos (Vásquez Cuzco and Chamba Tenemaza, 2013).

1.4.1 Estándar IEEE 802.15.4.

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos. La actual revisión del estándar se aprobó en 2006 y el grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo.

También es la base sobre la que se define la especificación de Zigbee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes, construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

En la Tabla A.1 del Anexo I se pueden observar los estándares relacionados a Zigbee.

1.4.2 Características de Zigbee.

Zigbee utiliza las bandas libres ISM (*Industrial, Scientific & Medical*) de 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos), con velocidad de transmisión de 250 Kbps a un rango de cobertura de 10 a 75 metros.

A pesar de asociarse con otro tipo de redes como Wi-Fi o Bluetooth su trabajo no se ve afectado, debido a su baja tasa de transmisión, y a características del estándar IEEE 802.15.4, como se puede observar en la Fig. 1.3.

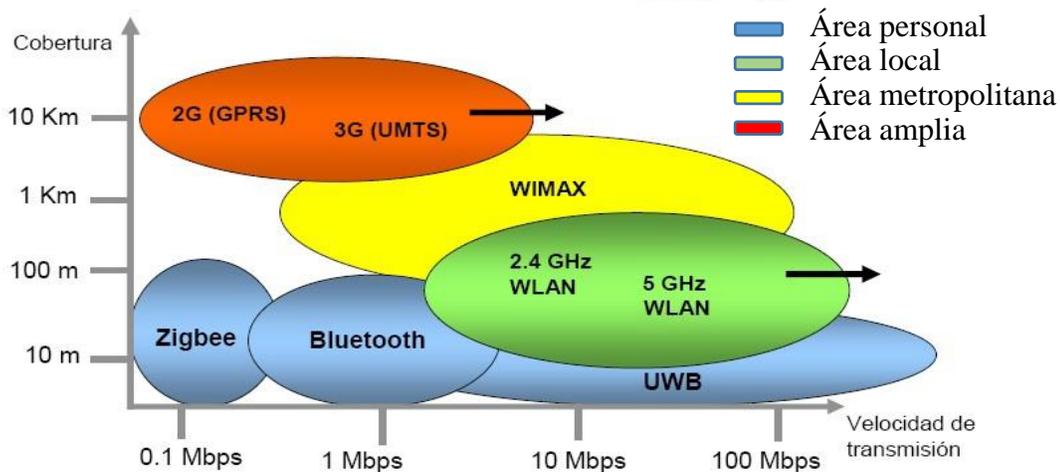


Fig. 1.3 - Espectro de Zigbee frente a otras tecnologías (Rodríguez Cerezo, 2014).

Presenta capacidad de operar en redes de gran densidad, esta característica ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que mientras más nodos existan dentro de una red, entonces mayor será el número de rutas alternas para garantizar que un paquete llegue a su destino. Cada red Zigbee presenta un identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicaciones sin ningún problema.

Ventajas:

- Ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto.
- Fue creado para el direccionamiento de información y el refrescamiento de la red.
- Opera en la banda libre de ISM 2.4 GHz para conexiones inalámbricas.
- Es óptimo para redes de bajas tasas de transferencias de datos y rebaja tiempo de espera en el envío y recepción de paquetes.
- Proporciona larga duración de la batería.
- Presenta soporte para varias topologías de red y permite hasta 65000 nodos en una red.

- Provee conexiones seguras entre dispositivos.

Desventajas:

- La tasa de transferencia es muy baja.
- Manipula solo textos pequeños comparado con otras tecnologías.
- Trabaja de modo que no puede ser compatible con bluetooth en todos sus aspectos porque no llegan a tener las mismas tasas de transferencias, ni la misma capacidad de soporte para nodos.
- Posee menor cobertura porque pertenece a redes inalámbricas de tipo área personal.

1.4.3 Arquitectura de Zigbee.

Zigbee es una fuente de protocolos, que de manera similar al modelo OSI está constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de las otras. En la Fig. 1.4 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para Zigbee.

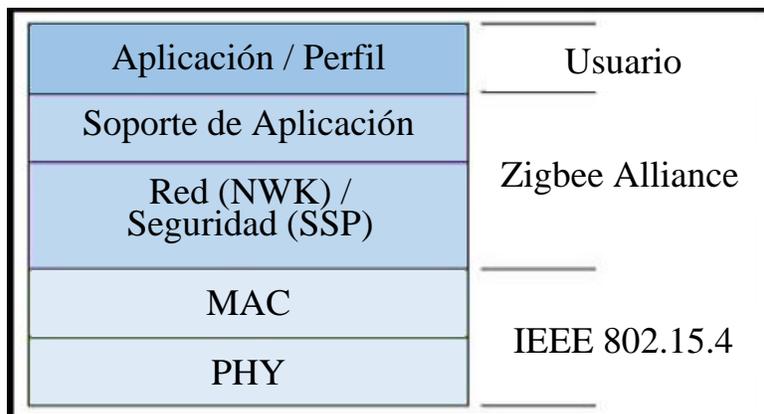


Fig. 1.4- Capas que conforman la pila de protocolos Zigbee (Acosta, 2016).

La capa que tiene más bajo nivel es la capa física (PHY), que conjuntamente con la capa de acceso al medio (MAC), ofrecen los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4.

El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado, donde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se emplean radios con un espectro de propagación de secuencia directa, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen del entorno.

La capa de red tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Se debe tener en cuenta que el algoritmo de enrutamiento que se usa es el de enrutamiento de malla, el cual se basa en el protocolo ad hoc.

Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que Zigbee soporta.

La capa que continúa es la de soporte a la aplicación que es la responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de red y de soporte a la aplicación es definida por la Zigbee Alliance.

En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los ZDO (*Zigbee Device Objects*) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si él actuará como coordinador, ruteador o dispositivo final; la subcapa APS y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores (Acosta, 2016).

Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos:

- Módulo de seguridad, que es quien provee los servicios para cifrar y autentificar los paquetes.

- Módulo de administración del dispositivo Zigbee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

1.4.4 Topología.

Zigbee permite varias topologías de red, entre las que se encuentran (Véase Fig. 1.5):

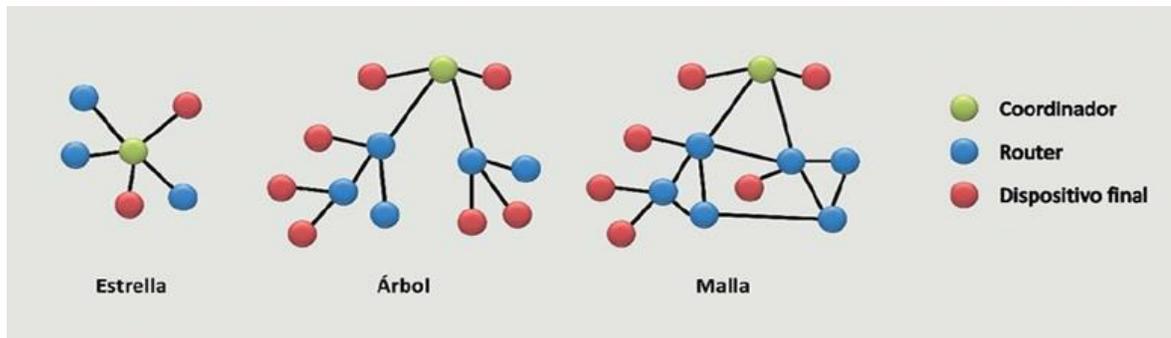


Fig. 1.5 – Principales topologías que permite Zigbee (Rodríguez Cerezo, 2014).

Topología en estrella (*Star*): El coordinador se sitúa en el centro. La red está compuesta por dispositivos finales conectados únicamente al coordinador central por el que pasan todas las comunicaciones. El alcance máximo de la red viene determinado por el alcance del coordinador, el cual necesita alimentarse a través de la red eléctrica. El resto de dispositivos finales pueden emplear baterías (Cianca, 2012).

Topología en árbol (*Cluster Tree*): El coordinador será la raíz del árbol. Los diferentes componentes de esta red están organizados en una estructura jerárquica. La red está formada por un coordinador y por un grupo de *routers* de los que pueden colgar, a su vez, otros dispositivos denominados hijos. Éstos pueden actuar como *routers* con más hijos o como dispositivos finales. Cada nodo sólo puede tener un único padre y los dispositivos finales no pueden tener ningún nodo hijo. Esta topología, al igual que la de malla, permite expandir la cobertura de la red (Cianca, 2012).

Topología de malla (*Mesh*): Al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones. Estas redes están formadas por un coordinador, *routers* y dispositivos finales. Los nodos pueden establecer comunicación con cualquier otro dispositivo, mediante *routers* que actúan de repetidores. La ventaja de este tipo de redes es su flexibilidad, al disponer de caminos alternativos y no depender de un único nodo. Tiene como inconveniente el incremento en la

complejidad y requiere una mayor capacidad de cómputo al tener que elegir el camino más apropiado (Cianca, 2012).

1.4.5 Comparación de tecnologías inalámbricas.

Se realizó una comparación de las principales tecnologías inalámbricas (Véase Anexo II Tabla A.2). Se observa como Zigbee presenta diversas características como el consumo eléctrico, el precio, la complejidad y el número de dispositivos que pueden integrar la red, que sobresalen por encima de las otras tecnologías comparadas. Estos son aspectos fundamentales a la hora de escoger este protocolo para implementar el sistema deseado.

1.5 Posible esquema de solución generalizada.

Dispositivos finales: No tienen capacidad de enrutar paquetes. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un coordinador o un *router*, es decir, no pueden enviar información directamente a otro dispositivo final. Normalmente estos equipos van alimentados con baterías. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento (Zennaro, 2010).

Componentes del nodo: microcontrolador.

- Capacidad de memoria y procesamiento limitado, pero suficiente.
- Modos de bajo consumo de energía (reduciendo velocidad, voltaje o apagando periféricos sin uso).
- En ocasiones embebidos en un mismo chip con la radio.

Componentes del nodo: módulo de radio.

- El componente que más consume.
- Diferentes modos de operación.
- Diferentes potencias de transmisión.
- Soportan la capa física del estándar 802.15.4
- Opera en las bandas libres de licencia (2,4 GHz).

Componentes del nodo: sensores.

- Analógicos o digitales.
- Baterías (generalmente 2 baterías tipo AA).

- Tener en cuenta:
 - ✓ El efecto capacitivo (uso de capacitores o supercapacitores).
 - ✓ La obtención de energía (paneles solares) (Iacono et al., 2010).

El *router*: Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para enrutar un paquete de información. Lógicamente un *router* debe unirse a una red Zigbee antes de poder retransmitir paquetes de otros *routers* o de dispositivos finales.

El Coordinador: Es el nodo de la red que tiene la única función de formarla. Es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red) para toda la red. Una vez establecidos estos parámetros, el coordinador puede formar una red, permitiendo unirse a él a dispositivos *routers* y dispositivos finales. Una vez formada, el coordinador hace las funciones de *router*, esto es, participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información.

1.6 Consideraciones del capítulo.

Las redes de sensores inalámbricos son en la actualidad uno de los principales campos de investigación. Sus características permiten el desarrollo de una aplicación dinámica, variable, escalable, de bajo consumo y normalmente de bajo costo. Su ámbito de aplicaciones abarca una extensa gama de sectores, destacando las relacionadas con la agricultura de precisión, principalmente en aras de tener un riego automatizado. El protocolo Zigbee permite comunicaciones seguras con bajas tasas de transmisión de datos a muy bajo consumo energético. Este protocolo presenta varias topologías que permiten seleccionar uno u otro modo de trabajo de la red y en varias de sus características es superior a otras tecnologías inalámbricas, por lo que es el más utilizado para estas redes. Las redes de sensores inalámbricos están compuestas por dispositivos finales, *routers* y un coordinador. En relación a todo lo anterior expuesto, se analizará a continuación la propuesta de arquitectura de hardware y software para la red a diseñar.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL HARDWARE Y EL SOFTWARE

El desarrollo de redes basado en nodos sensores ha impactado y ha cambiado nuestra vida cotidiana. En este capítulo se aborda lo relacionado a la propuesta de arquitectura de hardware y software necesaria para el diseño de la red, así como de las configuraciones correspondientes.

2.1 Diseño de la arquitectura de hardware

Para el caso de este proyecto se decidió implementar una red con topología malla usando el protocolo de comunicaciones Zigbee.

El nodo sensor (Véase Fig. 2.1), estará compuesto por un Arduino Pro Mini, el cual presenta un microcontrolador Atmel328P, que será el encargado de recibir y procesar los datos. Los sensores a utilizar serán los de humedad de suelo, humedad relativa y temperatura ambiente. Para la transmisión de datos se usarán los módulos de radiofrecuencia Xbee S2 y para la alimentación contará con baterías.

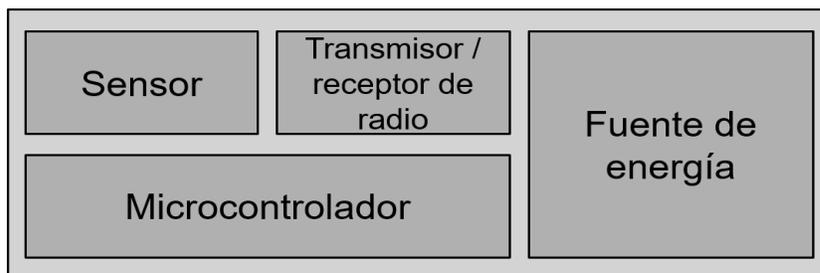


Fig. 2.1 – Elementos que componen el nodo sensor (Fuente: Autor).

En el caso del nodo actuador (Véase Fig. 2.2), estará compuesto por el mismo microcontrolador que los nodos sensores. Presentará un relé encargado del control on-off de las válvulas y se utilizarán nuevamente los módulos Xbee S2 para la comunicación. La alimentación dependerá directamente de la red eléctrica local.

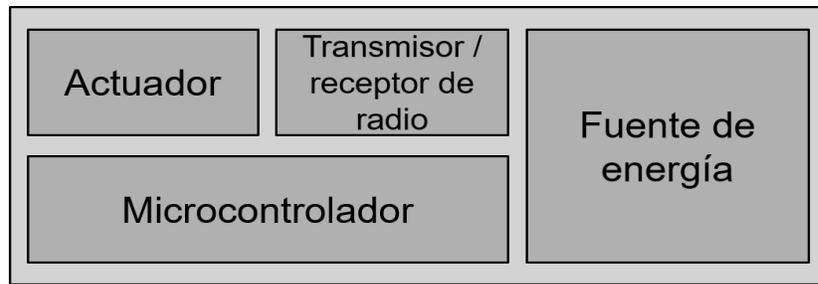


Fig. 2.2 – Elementos que componen el nodo actuador (Fuente: Autor).

Mientras que el Coordinador estará compuesto por el computador Raspberry Pi, como núcleo de la red. Este también contará con el módulo Xbee para la transmisión y/o recepción de los paquetes y estará conectado al sistema eléctrico local.

2.1.1 Arduino

Arduino se refiere a una placa con un microcontrolador sencillo de la gama ATMEGA o CORTEX como elemento central para uso de estudiantes y en hobbies para aficionados, y al sistema de software que se usa para programarlo, es una plataforma de hardware libre que puede ser usada para el desarrollo de cualquier aplicación de sistemas embebidos. Este proyecto se empezó a ver en Italia en 2005 para proporcionar placas simples y fáciles de usar, y se ha informado, según el sitio Web oficial (www.arduino.cc), que hasta el año 2013, 700 000 unidades habían sido vendidas.

La comunidad de Arduino ha desarrollado un rango grande de diferentes periféricos para el uso con la placa madre. Estas placas, llamadas escudos, encajaron bien para los requisitos de modular el procesador por separado de las comunicaciones y el suministro de energía, y permite la exploración de un rango más ancho de configuraciones del microcontrolador.

Para la aplicación se utilizará el Arduino Pro Mini y sus principales características son:

- Microcontrolador: ATmega328.
- Voltaje de operación: 3.3V o 5V.
- Pines de entrada/salida: 14 digitales (de ellos seis son salida PWM) y seis analógicos.
- Corriente por cada pin: 40 mA.
- EEPROM: 1KB.
- SRAM: 2KB.
- Velocidad del reloj: 16MHz.

2.1.2 Raspberry Pi

Esta computadora de placa reducida nació con el objetivo de animar a los niños a aprender informática en las escuelas y se desarrolló en el Reino Unido gracias a la Fundación Raspberry Pi y a su administrador, Eben Upton. Este proceso contó con los primeros diseños en el año 2006 y posteriormente se incrementaron con la creación de la fundación en 2009. No obstante, no fue hasta seis años después del origen del proyecto, año 2012, que se pusieran a la venta las primeras placas. Vendieron quinientas mil unidades durante los primeros seis meses posteriores al lanzamiento oficial. En la Fig. 2.3 se muestra la versión más reciente de este hardware y en el Anexo III Tabla A.3 sus principales características.

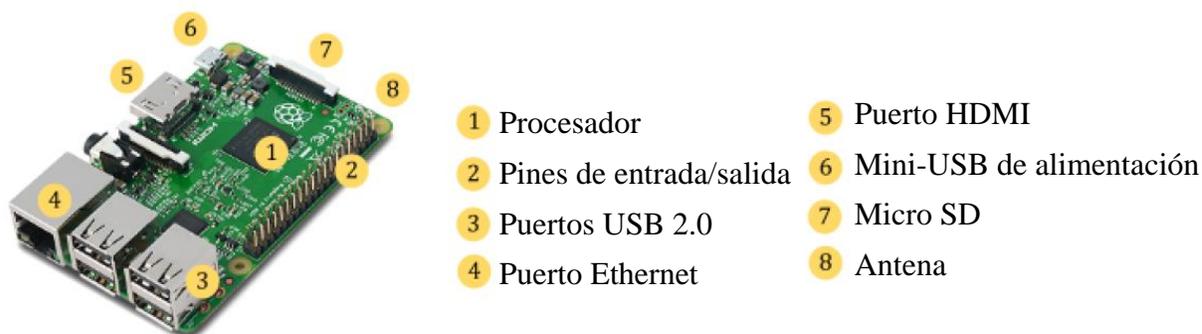


Fig. 2.3 – Raspberry Pi 3 B (Santamaría, 2016).

Centrándose en el hardware, la propiedad de estas tarjetas se encuentra registrada, en cambio su uso es completamente libre. Esto quiere decir que cualquiera puede convertirse en revendedor o redistribuidor de las placas Raspberry Pi. Por lo general, su hardware cuenta con un microprocesador, puertos USB, Ethernet, memoria RAM, entradas y salidas de vídeo, salidas de audio, almacenamiento integrado (mediante tarjetas SD), etc. Además, tiene un conjunto de pines de entrada y salida de propósito general (GPIO, por sus siglas en inglés) para permitir la programación de los mismos por parte de los usuarios. Actualmente cuenta con tres actualizaciones de su hardware.

Por otro lado, el software oficial es código abierto, ya que utiliza una versión adaptada de Debian, la denominada Raspbian. También se permite usar otros sistemas operativos, algunos de ellos con soporte oficial para las descargas por parte de la fundación como las distribuciones Pidora (derivado de Fedora) y Arch Linux ARM (derivado de Arch Linux) o la propia Raspbian (derivada de Debian). Otros, en cambio, tienen un desarrollo y soporte

exclusivo de la propia comunidad. Entre estos se puede destacar Minibian (versión minimalista de Raspbian), Kano (enfocado a los niños, incluye software educativo) y Retropie (emulador de consolas antiguas) (Hoy et al., 2014).

2.1.3 Módulos Xbee

Son dispositivos de radio frecuencia que trabajan con banda de 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por MAXSTREAM. Vienen en una especie de chip, están compuestos por microcontrolador, un emisor y un receptor de radiofrecuencia, con una alimentación de 3.3V.

Funcionamiento y conexiones básicas

Los dispositivos fueron diseñados para ser montados sobre un zócalo, sin requerimiento de soldadura. Se dispone de dos hileras de pines separadas entre ellas por 22 mm. La separación entre pines es de 2 mm.

Se requiere de una alimentación desde 2.8 V a 3.3 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal) (TX y RX) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún conversor adecuado para los niveles de voltaje.

Configuración de pines del módulo Xbee

En la Fig. 2.4 se muestra un diagrama del dispositivo Xbee en una vista superior para facilitar la ubicación de los pines.

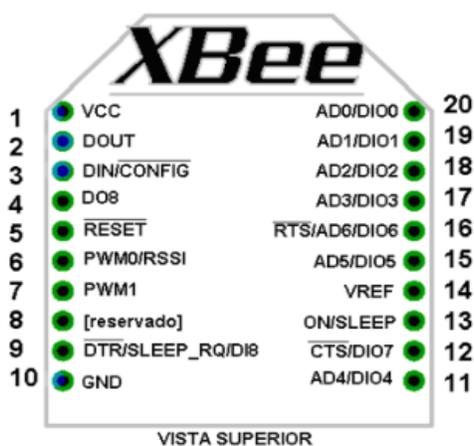


Fig. 2.4 - Diagrama de pines del módulo Xbee en vista superior

(Vásconez Cuzco and Chamba Tenemaza, 2013).

En los anexos (Véase Anexo IV Tabla A.4) se muestra de manera detallada la configuración de pines del módulo Xbee.

Principales características:

- Dimensiones:

Ancho: 24.38 mm.

Largo: 32.94 mm.

Alto de antena: 25 mm.

- Buen alcance: hasta 100 metros en línea de visión directa para los módulos Xbee y hasta una milla (1.6 km) para los módulos Xbee Pro.
- Nueve pines entrada/salidas con entradas analógicas y digitales.
- Bajo consumo, menor que 50mA cuando están en funcionamiento y menor que 10 μ A cuando están en modo *sleep*.
- Interfaz serie.
- 65000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener muchos de estos dispositivos en una misma red.
- Fáciles de integrar.

Características técnicas:

- Frecuencia de operación: ISM 2.4GHz.
- Potencia de salida: 1mW (0 dBm) para rangos mayores de 100m.
- Conector RPSMA, conector U.FL, opciones de antena Chip o Whip.
- Rango de temperatura: -40°C a 85°C.
- Soporte para redes avanzado y de bajo costo.

Actualmente la compañía Digi, empresa encargada de comercializar estos dispositivos, tiene en el mercado tres grandes familias de estos radios: las Series 1, 2 y 900. Las principales diferencias entre estos dispositivos se pueden ver en el Anexo V Tabla A.5.

Modo de transmisión/recepción API.

El objetivo del modo de comunicación API (Interfaz de programación de aplicaciones) es transmitir los datos de una manera segura y estructurada, como alternativa al modo Transparente. Es más complejo, pero ofrece mayores posibilidades en cuanto al control de la

red y al aprovechamiento de las capacidades de los Xbee. Además, permite la configuración de los módulos y el ruteo de la información. Para trabajar en este modo, el parámetro AP del módulo Xbee debe configurarse con el valor 1 o 2.

En el modo API, la información que entra y sale del Xbee tiene que seguir una estructura específica y debe de estar empaquetada en tramas, que definen operaciones y eventos dentro del módulo. Si el módulo se encuentra en modo API, todos los datos recibidos y enviados por el UART deben ser tramas de comando API.

En el caso de que los datos que entran al Xbee no cumplan las especificaciones de las posibles tramas API o que el *checksum* de la trama no sea correcto, los datos son descartados y no son enviados.

Hay dos tipos de tramas para la transmisión y tres para la recepción de datos y comandos:

- Trama de datos para transferir por radiofrecuencia.
- Trama de comando, donde va contenido alguno de los comandos AT.
- Trama de recepción de los datos.
- Trama de respuesta de un comando.
- Trama de notificación de eventos.

Cada trama contiene un campo con la dirección de destino, lo que permite que los datos puedan ser enviados a diferentes dispositivos sin tener que cambiar la dirección de destino mediante la configuración del módulo. En cuanto a la recepción de paquetes, es posible identificar al Xbee emisor, ya que la trama también incluye un campo con la dirección de éste. Estas dos características convierten al modo API en la opción idónea para aplicaciones informáticas que controlan una red de nodos con topología en malla, como es el caso de este proyecto, y por lo tanto ha sido el primer motivo por el que ha sido seleccionado.

Por otro lado, el modo API es el único que permite controlar remotamente los dispositivos que forman los nodos de la red, lo que posibilita realizar lecturas y escrituras de los pines de entrada/salida de dichos dispositivos. Por ejemplo, es posible activar los pines de salidas digitales y también realizar lecturas de los sensores conectados a los ADC del módulo remoto. Los resultados de estas lecturas son enviados al otro módulo a través de tramas API.

Esta capacidad de control remoto junto con la facilidad de comunicación con múltiples nodos, han sido determinantes para la elección del modo de comunicación API para realizar

este proyecto. A modo de resumen, se podría decir que las principales ventajas de trabajar en modo API son:

- Permite identificar el origen y destino de las tramas.
- Sencillez para transmitir a diferentes destinos.
- Los datos pueden contener comandos AT.
- Permite configurar los módulos de manera remota.
- Permite recibir confirmación de cada paquete transmitido (ACK).
- Aviso de error en caso de fallo en la transmisión.
- Facilita información de la comunicación (potencia de la señal de recepción).

Por el contrario, podríamos decir que sus inconvenientes son:

- Mayor complejidad, ya que al transferir los datos es necesario estructurarlos en tramas.
- Es necesario emplear más bits para enviar la información.

Al ser API el modo en el que trabajan todos los Xbee del sistema a diseñar, a continuación, se analizarán en detalle las tramas API.

Tramas API

Las tramas API que se envían a través del UART deben cumplir con una secuencia específica de bytes que indicarán al Xbee el tipo de operación a realizar. De igual manera, los módulos responderán enviando por el pin DOUT del UART secuencias específicas que pueden ser desde datos recibidos de un dispositivo remoto hasta información acerca del estado del Xbee o del estado de la comunicación. En cualquier caso, todas las tramas deben cumplir una serie de especificaciones y tener la estructura que se indica en la Fig. 2.5.

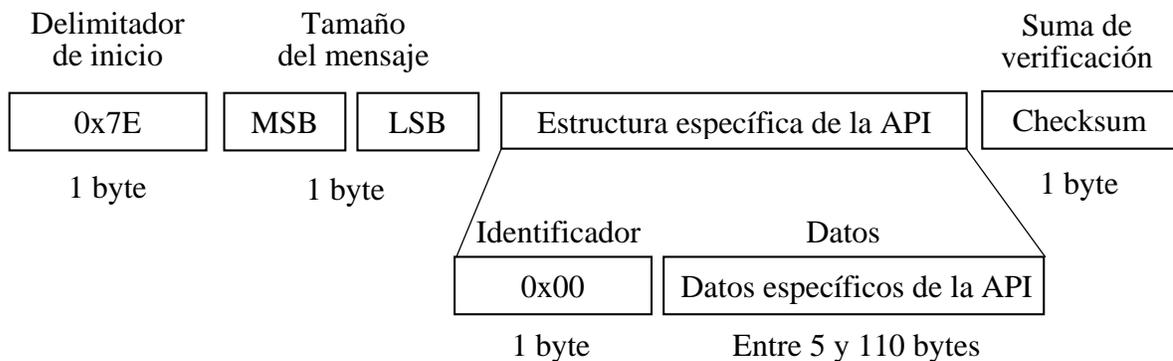


Fig. 2.5 – Formato general de un mensaje en el modo API2 (Rodríguez Cerezo, 2014).

- Delimitador de inicio:

Cada trama API comienza con un byte de inicio, denominado delimitador de inicio. Este es un único número que indica que se está al comienzo de una trama de datos y su valor es siempre 0x7E (en formato hexadecimal). Cuando se reciben datos desde el puerto serie de Xbee, lo primero que hay que hacer es buscar el citado byte de inicio. Una vez recibido, se sabe que a continuación se encuentra el paquete de datos y el resto de la información.

- Tamaño del mensaje:

Los siguientes dos números después del byte de comienzo indican el tamaño en bytes del campo Trama de Datos. Esto permite conocer la longitud que se debe de leer para obtener la información. Para la mayoría de las tramas, que no suelen tener un tamaño muy grande, es habitual que el segundo byte, denominado MSB (Byte Más Significativo) sea cero.

- Trama de datos:

Esta trama de datos es específica de cada tipo de mensaje recibido o enviado desde un módulo Xbee y es donde se encuentra contenida la información, así como los distintos tipos de estructuras de los comandos del modo API. Existen tramas con gran cantidad de datos mientras que las más pequeñas pueden llegar a contener sólo dos bytes. Como se observa este campo está compuesto por el byte “Identificador” que es el identificador del tipo de comando API que se envía o se recibe y por el subcampo “Datos” donde van contenidos el resto de datos del comando API y que es de longitud variable.

- *Checksum*

El último byte de la trama es siempre el “*checksum*” y sirve para comprobar la integridad de la información recibida o enviada. Se calcula sumando todos los bytes de la trama (sin incluir los delimitadores ni la longitud) y quedándose únicamente con los 8 bits menos significativos del resultado de esa suma, que serán restados a 0xFF. Para verificar el resultado, se suman todos los bytes (incluyendo *checksum*, pero excluyendo los delimitadores y la longitud) y el byte menos significativo del resultado debe ser igual a 0xFF. Este cálculo aritmético está diseñado para ser muy eficiente en los procesos de cómputo (Rodríguez Cerezo, 2014).

Direccionamiento de red

Dentro de una red Zigbee, los dispositivos tienen varios identificadores para poder saber a qué red pertenece y cómo comunicarse entre sí. Entre estos identificadores se encuentran:

- Pan ID – Identificador de red. Los que tengan el mismo identificador podrán comunicarse entre sí dado que pertenecen a la misma red.
- SH – Parte alta de la dirección del dispositivo (común a todos ellos por defecto).
- SL – Parte baja de la dirección del dispositivo.

Una vez configurados estos parámetros, hay dos posibilidades para enviar información: *unicast* y *broadcast*.

Unicast

Si se quiere enviar información de esta forma, es decir, a otro nodo de la red en particular, se han de configurar los siguientes parámetros:

- DH – Parte alta de la dirección del dispositivo al que se quiere enviar. Es decir, aquí iría el SH del dispositivo al que se quiere enviar.
- DL – Parte baja de la dirección del dispositivo al que se quiere enviar. Es decir, aquí iría el SL del dispositivo al que se quiere enviar.

Para ver qué nodos hay alrededor y así poder enviar la información que se desee al nodo que se quiera, existe el comando ND. Este devuelve los siguientes parámetros para cada nodo descubierto en su rango.

- MY – La dirección corta que usará el módulo.
- SH – Parte alta del número de serie.
- SL – Parte baja del número de serie.
- DB – Intensidad de la señal.
- NI – Identificador ASCII de hasta 20 caracteres.

Configurando el DH y DL del nodo con el SH y SL de uno de los nodos descubiertos, los mensajes que se envíen, se enviarán únicamente al nodo escogido.

Broadcast

Si se quiere enviar el mensaje por *broadcast*, es decir, a todos los dispositivos que formen la red, que estén a rango, se han de configurar estos dos parámetros de la siguiente manera:

DH = 0

DL = 0xFFFF

En el caso de este proyecto, se ha decidido que se van a enviar los mensajes por *broadcast*, ya que el objetivo es que los mensajes lleguen a todos los dispositivos de la red para compartir la información con todos y que todos los dispositivos estén al tanto de lo que está ocurriendo en la red en cada momento, de ahí la configuración en topología malla.

Además, los dispositivos van a estar uniéndose y saliéndose de la red continuamente debido a los períodos en que se encontrarán en modo *sleep* los nodos, por lo que no tiene sentido intentar enviar a cada dispositivo individualmente ya que no está claro si el dispositivo va a estar aún en la red, y supone una pérdida de tiempo intentar enviar a algún nodo que ya no está ahí, resultando en un nuevo escaneo para ver qué nodos están unidos en ese momento.

2.1.4 Sensores

Sensor de humedad relativa y temperatura ambiente: Se utiliza para recolectar los valores de humedad y temperatura del ambiente. Es un sensor de bajo costo y buena exactitud. Los pines uno y cuatro se conectan a los pines VCC y GND respectivamente. El pin dos puede ser conectado a cualquiera de los puertos digitales de entrada/salida del Arduino para recopilar los datos leídos. Es relativamente lento ya que toma cerca de dos segundos realizar cada lectura. Para más información, ver en Anexo VI Tabla A.6 las principales características de este dispositivo sensor.

Sensor de humedad de suelo: Este sensor tiene la capacidad de medir la humedad del suelo. Aplicando una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69 hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y ésta depende mucho de la humedad. Por lo tanto, al aumentar la humedad, la corriente crece y al bajar, la corriente disminuye. Necesita del módulo YL-38 que contiene un circuito comparador LM393 SMD muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital. Este último presenta dos pines de conexión hacia el módulo YL-69, dos pines para la alimentación y dos pines de datos. En el Anexo VI Tabla A.7 se muestran las principales características de este sensor.

2.2 Diseño de la arquitectura de software.

Para lograr el correcto funcionamiento de la red fue necesario elaborar una fuerte arquitectura de software, que abarca la elaboración de los diagramas UML correspondientes a la metodología de trabajo que se propone en la aplicación, la programación de los microcontroladores de los nodos, según su función, y de la Raspberry Pi como elemento central de la red, así como la configuración de los módulos de radio, según su función.

Para la confección de los diagramas UML se utilizó el software profesional Visual Paradigm V6.0. Para la programación de los microcontroladores se usó el software Arduino IDE V1.6.11. En el caso de la RPI se trabajó con los IDE Eclipse y Qt5 para Linux, montados sobre el sistema operativo de código abierto Raspbian. Por último, para la configuración de los módulos de radiofrecuencia se utilizó el software profesional de Digi XCTU V6.3.1. A continuación se abordarán estos tópicos con mayor profundidad.

2.2.1 Funcionamiento de la aplicación

El Lenguaje Unificado de Modelado (UML, por sus siglas en inglés) es una de las herramientas más emocionantes en el mundo actual del desarrollo de sistemas. Esto se debe a que permite a los creadores de sistemas generar diseños que capturen sus ideas en una forma convencional y fácil de comprender para comunicarlas a otras personas (Schmuller, J., 2000).

Diagrama UML de casos de uso.

El caso de uso es un poderoso concepto que ayuda a un analista a comprender la forma en que un sistema deberá comportarse. Le ayuda a obtener los requerimientos desde el punto de vista del usuario (Schmuller, J., 2000).

En la Fig. 2.6 se muestra el diagrama de casos de uso previsto para esta red. Como se puede observar el sistema presenta 3 elementos principales: el coordinador, el nodo sensor y el nodo actuador y presentan una estrecha relación de dependencia entre ellos, la cual se aborda a continuación.

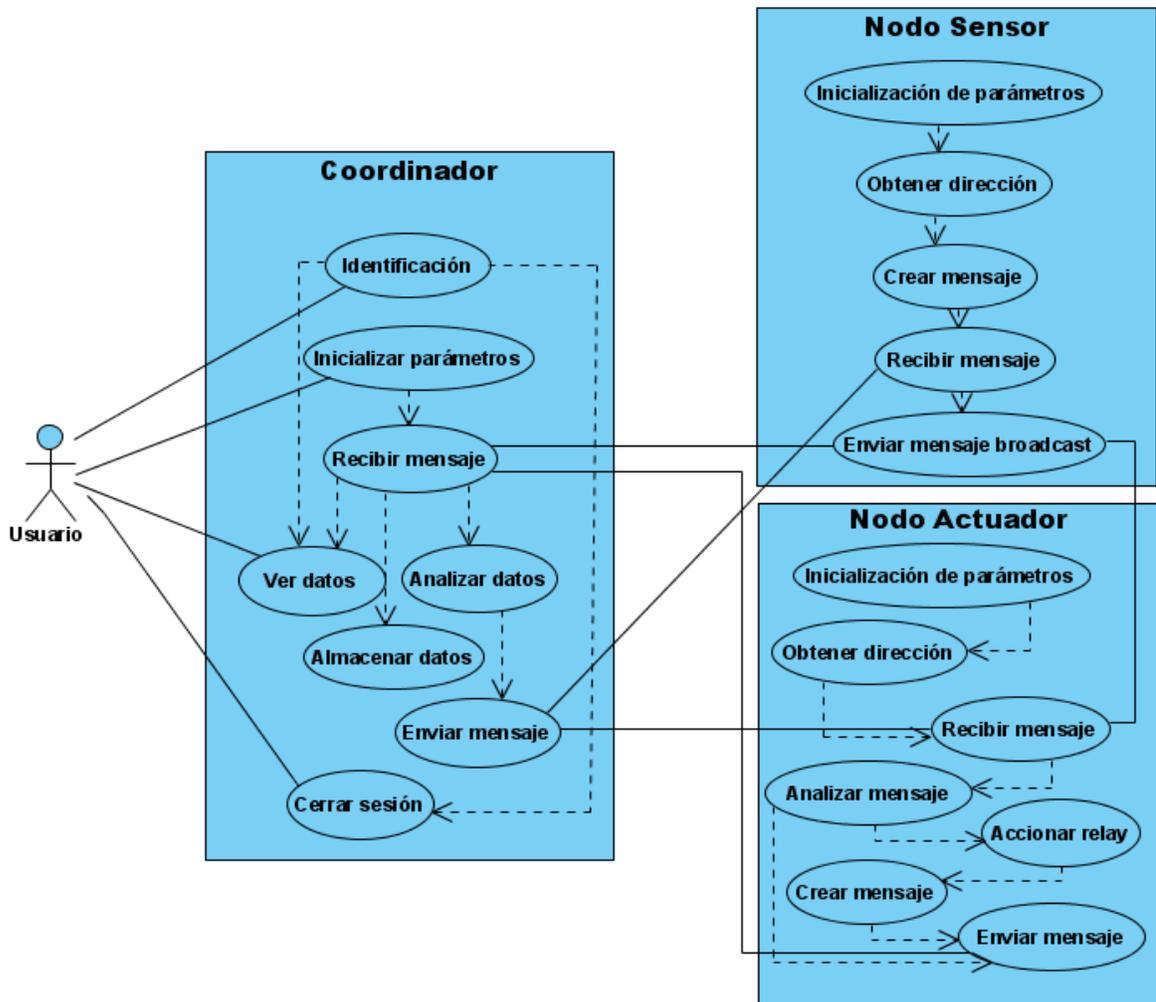


Fig. 2.6 – Diagrama de casos de uso que muestra la interrelación de los elementos que conforman la red implementada (Fuente: Autor).

El nodo sensor se encargará de tomar los datos de las mediciones y enviarlos. Debido a la configuración malla y el modo *broadcast* implementado, los paquetes de datos se enviarán tanto al coordinador como al nodo actuador. Solo recibirá paquetes de configuración del nodo coordinador, si verifica que no proviene de esa dirección o que ya había recibido o enviado esa trama, entonces dicha trama será descartada.

El nodo actuador se encargará de accionar el relé cuando el coordinador se lo indique y enviará un mensaje de confirmación luego de realizada la acción. Si el mensaje proviene del nodo sensor entonces la trama entrante será descartada.

El usuario solamente interactúa con el coordinador de la red para autenticarse, lo que le permitirá ver los datos que está registrando en esos momentos la Raspberry Pi. El coordinador

además de recibir los mensajes provenientes de ambos nodos y procesarlos, enviará un mensaje al nodo sensor para cambios en la configuración y al nodo actuador para accionar el relé que controla la válvula.

Diagramas UML de actividades.

El diagrama de actividades es muy parecido a un diagrama de flujo. Este muestra los pasos (conocidos como actividades), así como los puntos de decisión y bifurcaciones. Es útil para mostrar lo que ocurre en un proceso de negocios u operación. Se encontrarán como parte integral del análisis de un sistema (Schmuller, J., 2000).

A continuación, se realiza un análisis de cada uno de los diagramas de actividades desarrollados.

La Fig. 2.7 corresponde al diagrama de actividades del coordinador. En él se observa cómo el usuario mediante una correcta identificación puede tener acceso a ver los datos en la computadora y cómo esta después de inicializar sus parámetros comienza a recibir los mensajes de ambos nodos. Si son tramas, con valores de mediciones, estos se pueden visualizar, almacenar y procesar. Para este último caso, si estos valores no están dentro de los rangos permitidos se tomarán las medidas pertinentes enviando un mensaje al nodo actuador con la acción a realizar. Por otra parte, si el mensaje es una confirmación de una acción realizada por el nodo actuador, solamente será almacenado en el registro.

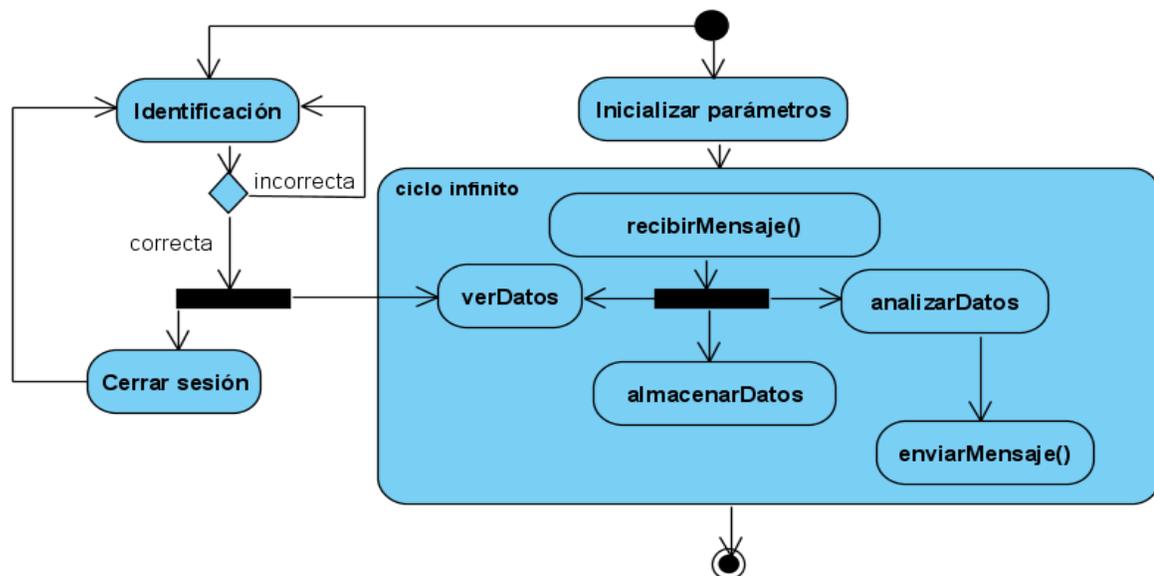


Fig. 2.7 - Diagrama de actividades que muestra el funcionamiento secuencial del coordinador de la red (Fuente: Autor).

En la Fig. 2.8 se muestra el diagrama de actividades correspondiente al nodo sensor. Se observa que al iniciar el sistema se ejecuta la creación de las variables globales, e inicialización de estas, del puerto serie y de los sensores. Luego se ejecuta el procedimiento `InitStaticData()`, cuya función es obtener mediante comandos AT la dirección de 64 bits del dispositivo, si no es correcta esta dirección vuelve a llamarse al procedimiento hasta que se cumpla dicha condición (Véase Anexo VII Fig. A.1). Una vez se logre este paso entonces se inicia un ciclo infinito donde se ejecutan otros tres procedimientos: `recibirMensaje()`, que verificará si hay algún mensaje nuevo de configuraciones entrando desde el coordinador (Véase Anexo VII Fig. A.2); `crearMensaje()`, que a partir de las mediciones de los sensores y la dirección del dispositivo creará un arreglo de datos que se adjuntará a una trama (Véase Anexo VII Fig. A.3), que el otro procedimiento: `enviarMensaje()`, tomará y enviará hacia los demás elementos de la red (Véase Anexo VII Fig. A.4).

En la Fig. 2.9 se observa el diagrama de actividades del nodo actuador, donde, al igual que en el caso anterior, primeramente se ejecutan las inicializaciones y cuando se cumpla la misma condición se ejecutará el ciclo infinito (Véase Anexo VII Fig. A.1), que implica las llamadas a los mismos procedimientos: `recibirMensaje()` (Véase Anexo VII Fig. A.2) y `enviarMensaje()` (Véase Anexo VII Fig. A.4), así como a nuevas acciones. Por ejemplo, después de recibido el mensaje, este se analizará para saber de dónde proviene, si es de un nodo sensor pasará directamente a reenviar el mensaje y si es una orden del coordinador se accionará el relé, abriendo o cerrando la válvula y posteriormente se creará un mensaje de confirmación que se enviará al coordinador.

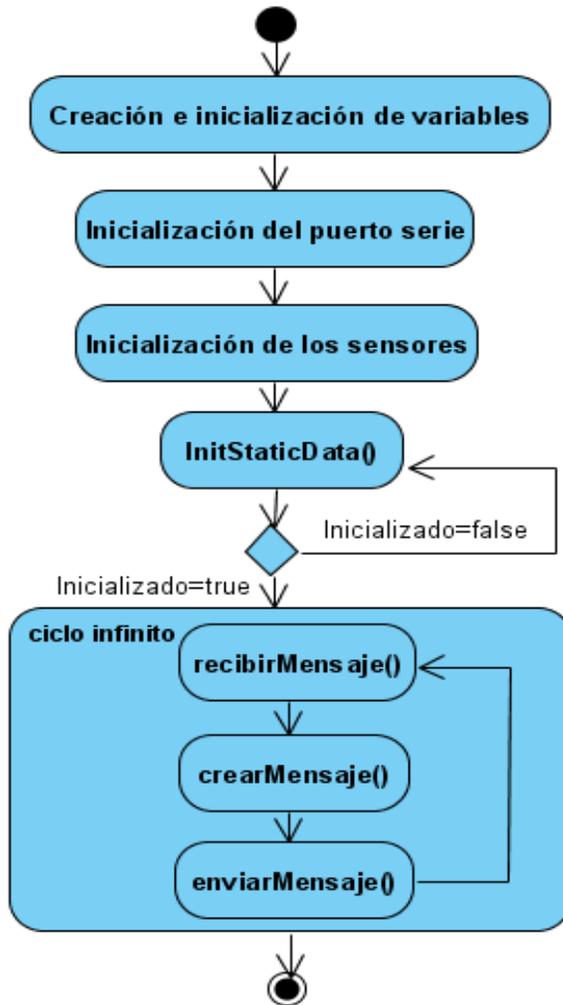


Fig. 2.8 - Diagrama de actividades que muestra el funcionamiento secuencial del nodo sensor (Fuente: Autor).

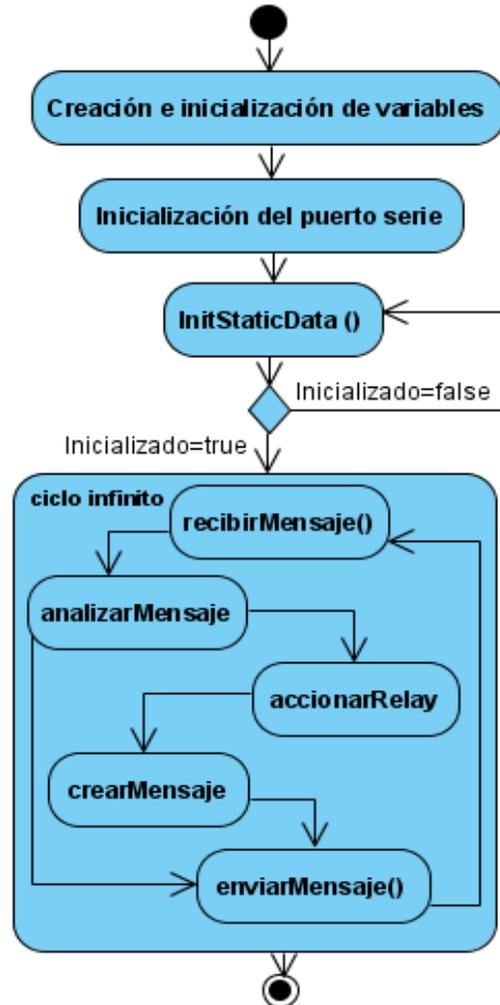


Fig. 2.9- Diagrama de actividades que muestra el funcionamiento secuencial del nodo actuador (Fuente: Autor).

2.2.2 Software Arduino IDE

Normalmente el software de Arduino es desarrollado usando una interfaz de programación simplificada y un Ambiente de Desarrollo Integrado simple (IDE, por sus siglas en inglés). El sistema acepta los códigos simplificados. Estos son expandidos automáticamente en programas completos de C/C++, y son compilados usando cadenas de herramientas GNU estándar y un simple cargador envía los datos al procesador. Para este caso fue utilizado este software, en su versión más actual 1.6.11, para programar los microcontroladores Arduino presentes en ambos nodos, siguiendo la estructura previamente diseñada mediante los diagramas UML de actividades de los elementos de la red.

2.2.3 Arquitectura de software del coordinador.

Sistema operativo Raspbian

Raspbian es una distribución del sistema operativo GNU/Linux y por lo tanto de código abierto. Está basado en Debian Wheezy (Debian 7.0) para la placa computadora Raspberry Pi, orientado a la enseñanza de informática. La distribución contiene herramientas de desarrollo como IDE para el lenguaje de programación Python o Scratch, y diferentes ejemplos de juegos usando los módulos Pygame.

Destaca también el menú "raspi-config" que permite configurar el sistema operativo sin tener que modificar archivos de configuración manualmente. Permite expandir la partición *root* para que ocupe toda la tarjeta de memoria, configurar el teclado, aplicar *overclock*, entre otras funcionalidades.

Al ser una distribución de GNU/Linux las posibilidades son infinitas. Todo software de código abierto puede ser recompilado en la propia Raspberry Pi, para que pueda ser utilizado en el propio dispositivo en caso de que el desarrollador no proporcione una versión ya compilada para esta arquitectura. Además, esta distribución, como la mayoría, contiene repositorios donde el usuario puede descargar multitud de programas como si se tratase de una distribución de GNU/Linux para equipos de escritorio.

Qt4 y Eclipse

Estos softwares fueron instalados en su versión para Linux sobre el sistema operativo Raspbian, para poder trabajar en la Raspberry Pi. Ambos IDEs fueron usados indistintamente, de acuerdo a las funcionalidades que presenta cada uno en un momento determinado, pero ambos con el mismo fin: desarrollar la aplicación encargada de que funcione como es debido el coordinador de la red.

2.2.4 Software profesional XCTU.

XCTU es un software desarrollado por la compañía Digi que permite interactuar con el firmware de las radios. En el caso de este proyecto, permite configurar las radios con los parámetros necesarios.

Según el modo de funcionamiento, la radio se puede configurar de una o dos maneras:

- Si el radio está configurado en modo API, únicamente se podrá configurar el radio mediante la pestaña de *Modem Configuration*. Una vez en esta pestaña, el programa permite leer la configuración y firmware del radio y hacer los cambios que se consideren necesarios.
- Si el radio está configurado en modo AT, además de la forma anterior, existe otra forma de configuración: por comandos AT. Con los comandos AT se puede interactuar con el firmware de la radio. De esta manera, se puede configurar también. Por ejemplo, poniendo el siguiente comando, se puede cambiar la DH (parte alta de la dirección de destino) del radio a 0013A200: ATDH 0013A200. Hay comandos AT para cada uno de los parámetros, pero no se limitan a eso nada más, sino que nos permite recuperar información además de los parámetros en sí. Por ejemplo, con el comando ATPP, se recibirá la potencia de la señal de salida cuando la potencia máxima esté seleccionada.

Además de configurar los radios, este programa permite, por terminal, ver qué información están enviando y recibiendo. Incluso permite enviar información a través de ella.

Para el caso de este proyecto, teniendo en cuenta que la comunicación se realizará en *broadcast*, los módulos fueron configurados según se observa en la Tabla 2.2:

Parámetro	Coordinador	Dispositivo Final	Router
ID	1234	1234	1234
DH	1	0	0
DL	0	0	0
AP	2	2	2
EE	1	1	1
KY	*****	*****	*****

Tabla 2.1 - Configuraciones realizadas a los módulos de radio Xbee según su función en la red mediante el software XCTU para implementar comunicación en *broadcast* (Fuente: Autor).

Los parámetros ID (identificador de la red), AP (modo de trabajo de API), EE (encriptación de la red) y KY (clave de encriptación) tienen que ser iguales para todos los dispositivos. Mientras que DH y DL presentan esta configuración para implementar el *broadcast*.

2.3 Arquitecturas finales desarrolladas.

A continuación, se muestran las arquitecturas que presentarán los principales elementos de la red, a partir de todos los análisis realizados anteriormente en este capítulo. En la Fig. 2.10 se representa la solución de arquitectura prevista para el caso del nodo sensor, mientras que la Fig. 2.11 y la Fig. 2.12 se corresponden a las arquitecturas del nodo actuador y el coordinador respectivamente.

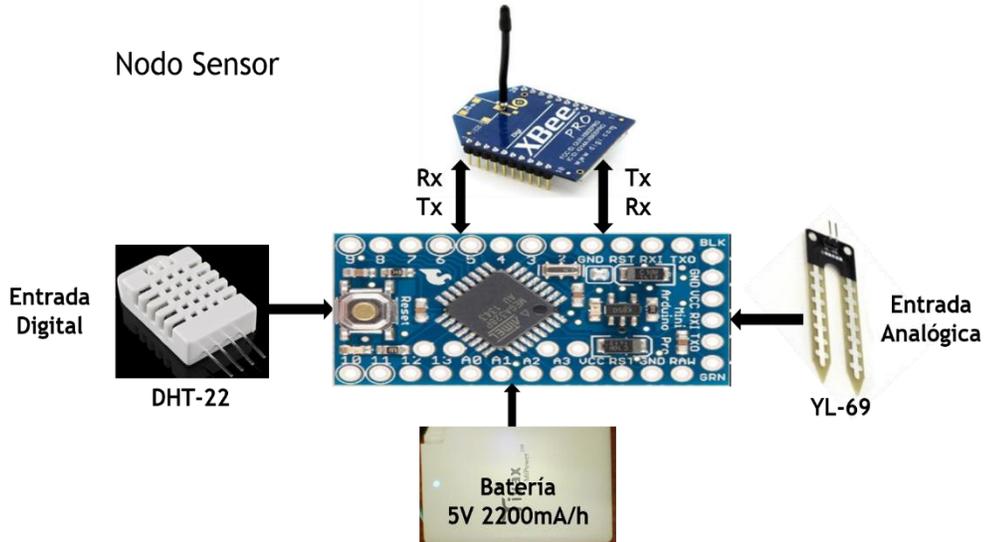


Fig. 2.10 – Arquitectura del nodo sensor (Fuente: Autor).

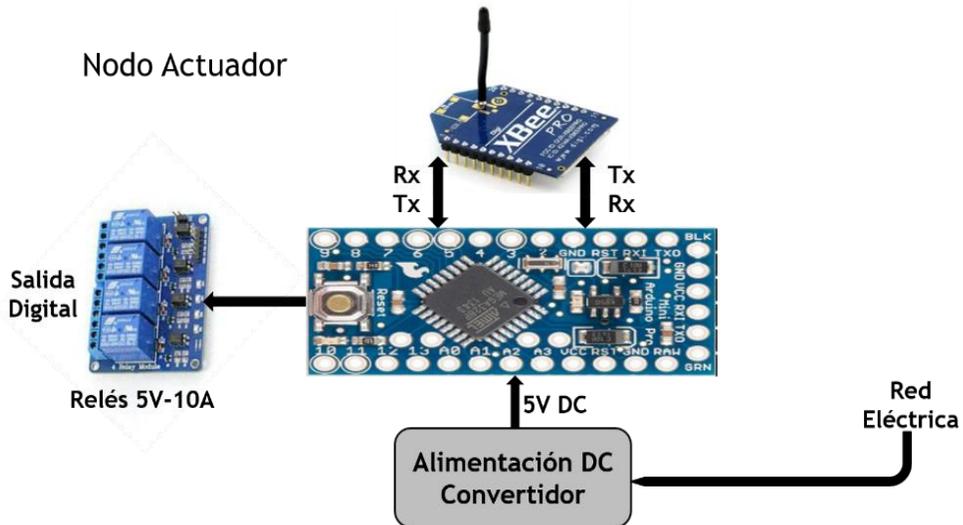


Fig. 2.11– Arquitectura del nodo actuador (Fuente: Autor).

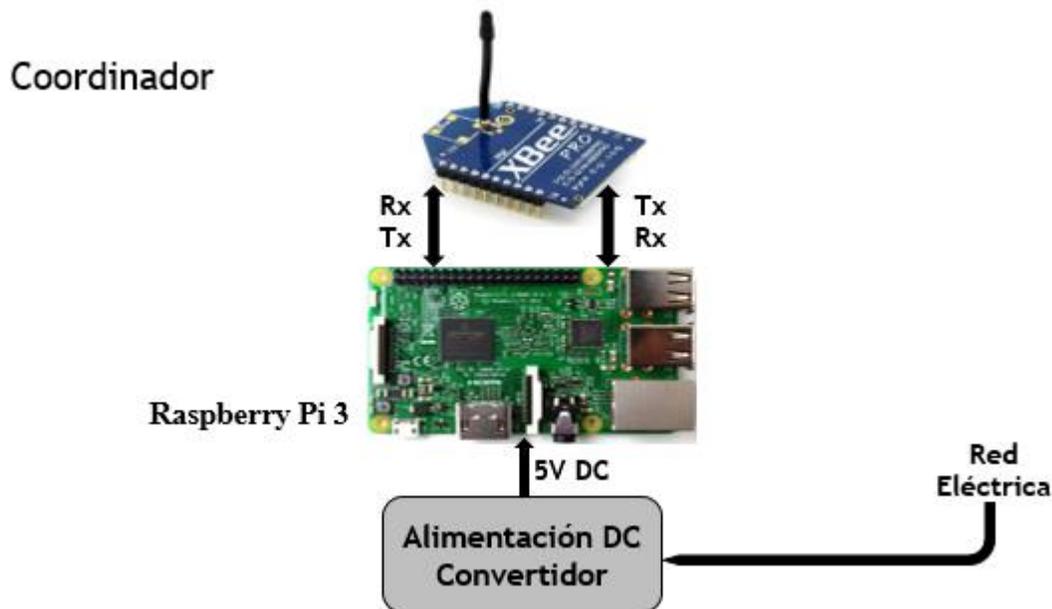


Fig. 2.12 – Arquitectura del coordinador (Fuente: Autor).

2.4 Consideraciones del capítulo

La arquitectura propuesta cuenta con el microcontrolador Arduino Pro Mini como principal elemento de los nodos y la computadora Raspberry Pi 3 como núcleo de la red, mientras que los módulos de radio Xbee S2 serán los elementos de hardware encargados de la comunicación entre los integrantes de la red. La serie Xbee S2 no es la más potente dentro de la gama de productos de Digi, pero cumple con los objetivos primarios propuestos. El modo de trabajo de los módulos de radio para realizar la comunicación es API2. Los sensores seleccionados fueron el DHT22 y el YL-69, acorde a los requerimientos del sistema. La arquitectura de software realizada es muy potente, utilizándose varias herramientas computacionales para organizar el trabajo y darle funcionalidad a la red. La configuración en topología malla permite que se pierdan menor cantidad de paquetes, ya que todos los elementos se comunican entre sí (Véase Anexo VIII Fig. A.5). Teniendo en cuenta estas consideraciones se hace necesario obtener resultados que validen el sistema diseñado.

CAPÍTULO 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Existen diversas formas de obtener resultados de una investigación. En este capítulo se reflejan varias pruebas realizadas a la red diseñada utilizando softwares profesionales y se analizan cuestiones importantes de la aplicación como son costo y posibles impactos.

3.1 Pruebas realizadas.

Utilizando el software profesional XCTU se lograron realizar una serie de pruebas que validan el correcto funcionamiento de la aplicación.

3.1.1 Pruebas de alcance de la red.

Se realizaron dos pruebas de rango bajo diferentes circunstancias. En la primera de ellas (Véase Fig. 3.1), se logró establecer comunicación hasta los 120 metros aproximadamente en línea de visión directa. Se enviaron un total de 100 paquetes desde el nodo sensor hasta el coordinador, obteniéndose un 100% en la recepción como indica la línea de color gris en la parte superior de la figura. Se observa además cómo a medida que aumenta la distancia disminuye la calidad de la transmisión (líneas rojas y verdes), pero sin llegar al estado crítico, entre los -90 y los -95 dB, por lo que no se pierden datos.

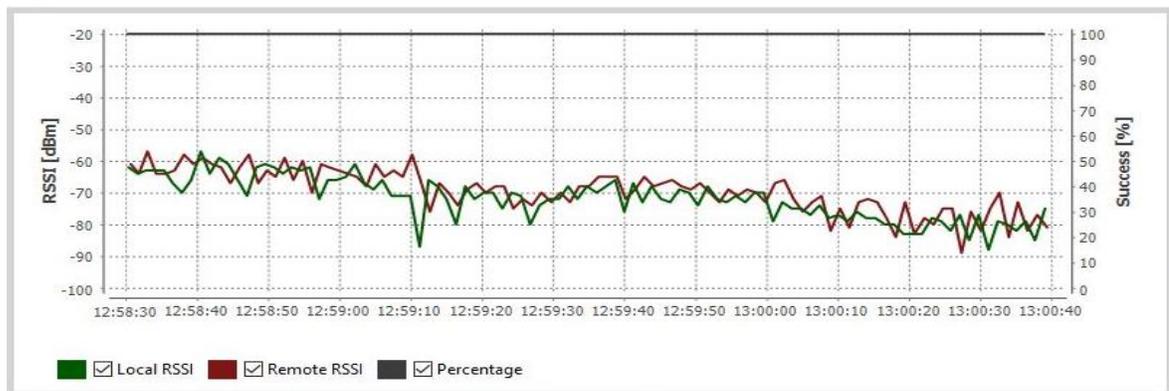


Fig. 3.1 – Prueba de rango realizada en visión directa, sin obstáculos, donde las líneas verde y roja indican la potencia de la señal y la línea gris el por ciento de paquetes recibidos (Fuente: Autor).

El segundo experimento (Véase Fig. 3.2) se realizó en un ambiente más agreste, con gran cantidad de arbustos interfiriendo en la transmisión. Se realizó la prueba con una distancia que estaba alrededor de los 25 metros, obteniéndose los siguientes resultados: de un total de 100 paquetes enviados desde el nodo sensor hasta el coordinador, 19 no alcanzaron su destino final, lográndose un 81% de paquetes enviados, como demuestra la línea de color gris, resultados bastante buenos para nuestra aplicación, mientras que la calidad de la transmisión estuvo entre los -80 y los -95 dB, debido a estos picos superiores a los -90 dB ocurrió la pérdida de algunos datos. Es importante tener en cuenta que la mayor parte de las pérdidas de paquetes ocurrió al inicio de la transmisión, luego de estabilizarse la red la proporción entre envío/recepción aumentó de forma progresiva.

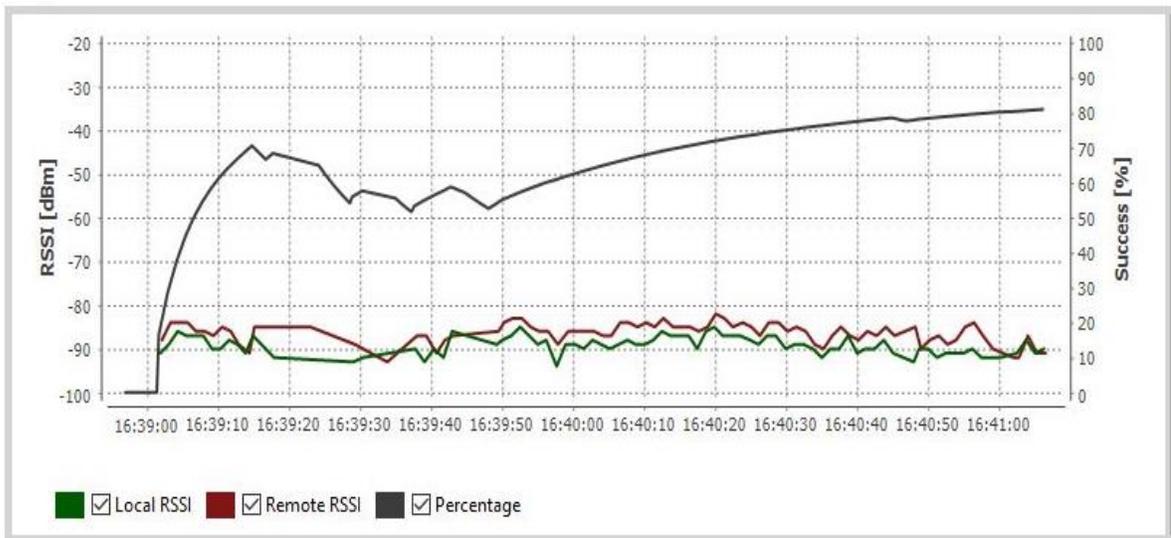


Fig. 3.2 – Prueba de rango entre el nodo sensor y el coordinador realizada entre arbustos, donde las líneas verde y roja indican la potencia de la señal y la línea gris el por ciento de paquetes recibidos

(Fuente: Autor).

3.1.2 Pruebas de comunicación de la red.

Para el caso de las pruebas de comunicación, estas están muy relacionadas con las de rango ya explicadas, debido a que, teniendo en cuenta las distancias de la prueba anterior se llevó a cabo un estudio para determinar cómo era el flujo de datos en ese momento. En la Fig. 3.3 se observan los paquetes recibidos por el coordinador desde el nodo sensor cuando se alcanzó la distancia máxima. Nótese que se fueron recibiendo paquetes a medida que aumentaba la distancia, llegando a sobrepasar los 240, y aún el tiempo entre cada recepción, a esa distancia máxima, seguía siendo muy pequeño, y por ende muy bueno.

ID	Time	Length	Frame
238	16:35:51.014	28	Receive Packet
239	16:35:58.551	28	Receive Packet
240	16:35:59.292	28	Receive Packet
241	16:36:00.582	28	Receive Packet
242	16:36:01.286	28	Receive Packet
243	16:36:03.517	28	Receive Packet
244	16:36:03.768	28	Receive Packet
245	16:36:04.571	28	Receive Packet

Receive Packet (API 2)

7E 00 1C 90 00 7D 33 A2 00 40 E4 32 CE 9E 35
 02 00 7D 33 A2 00 40 E4 32 CE BA 24 26 01 00
 00 00 00 E3

Start delimiter

7E

Length

00 1C (28)

Fig. 3.3 – Prueba de comunicación realizada en línea de visión directa que muestra la consecutividad de los paquetes recibidos (Fuente: Autor).

En el segundo caso, para la prueba en ambiente agreste, se muestra en la Fig. 3.4 la relación de comunicación entre ambos dispositivos, observándose en la línea roja que los uno cómo de una proporción de 255/255 se logra un 153/127, valores aún buenos para la transmisión, lo que evidencia el 81% de paquetes recibidos en la prueba de rango mostrada anteriormente. Se hace necesario aclarar que la relación envío/recepción entre los dispositivos pudiera ser aún más baja sin tener grandes pérdidas de paquetes, lo que trae como beneficio que pudiera aumentar la distancia entre cada elemento de la red usando esta serie de módulos de radio.

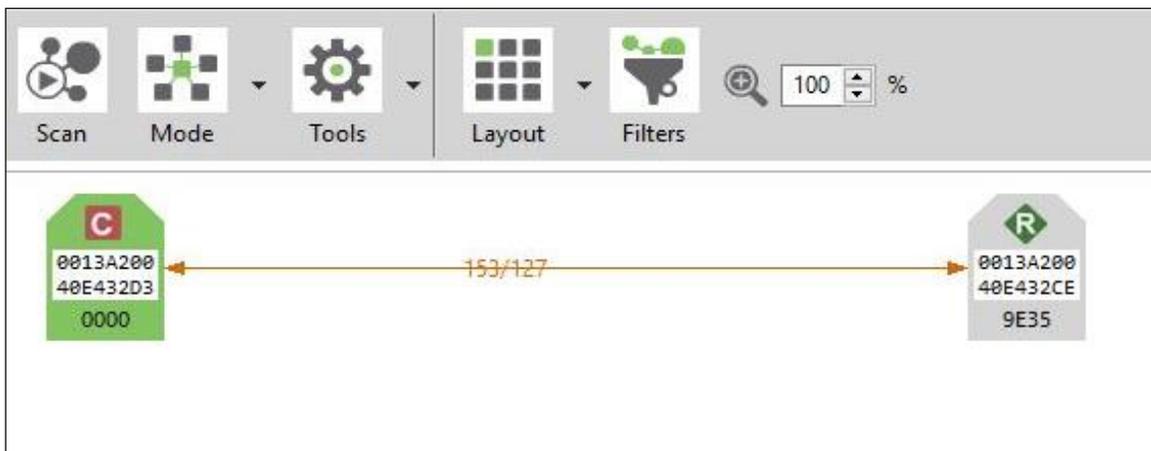


Fig. 3.4 – Prueba de comunicación realizada entre arbustos a 25m aproximadamente donde se muestra la proporción de envío/recepción de un máximo de 255/255 (Fuente: Autor).

3.1.3 Pruebas de velocidad de transmisión de la red.

La tercera y última prueba realizada utilizando XCTU, consiste en determinar la velocidad de transmisión del módulo de radiofrecuencia bajo las mismas circunstancias analizadas en las simulaciones anteriores. De ahí que:

Para el caso de línea de visión directa (Véase Fig. 3.5), se realizó la prueba por 60 segundos, donde se enviaron 58 paquetes, a una velocidad promedio de 1.97 Kbps. El color azul claro representa la velocidad alcanzada en el instante de la transmisión, mientras que la línea de color azul oscuro muestra cual es el promedio de velocidad a medida que va transmitiendo. Como se observa la velocidad se mantuvo mayormente constante, con buena estabilidad en la transmisión.

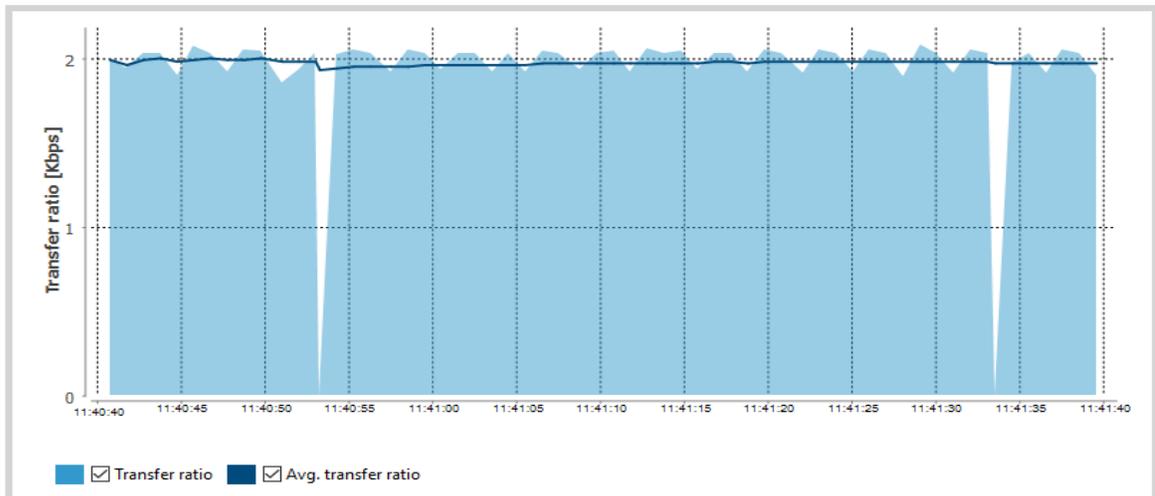


Fig. 3.5 – Prueba de velocidad realizada en línea de visión directa donde se muestra en color azul claro la velocidad en el instante de transmisión y la línea de color azul oscura muestra el promedio durante los 60 segundos de la prueba (Fuente: Autor).

Por otra parte, en la Fig. 3.6 se observa la prueba de velocidad realizada para la transmisión entre los arbustos. En este caso, en 120 segundos se recibieron 51 paquetes, por lo que se observa que se necesitó el doble de tiempo para recibir aproximadamente la misma cantidad de paquetes que en la prueba anterior. La velocidad promedio fue de 0.87 Kbps como indica la línea de color azul oscura, a la par que se observan picos y fallos de envío en el instante de transmisión (color azul claro), lo que demuestra que la aplicación funciona correctamente, porque se envían las tramas, aunque no con buena estabilidad.

3.1.4 Pruebas de estabilidad de la red.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados experimentales para la prueba de estabilidad de la red durante 24 horas continuas de trabajo. La prueba se ha iniciado a las 7:00 pm ubicando el nodo sensor en un recipiente con tierra en un espacio abierto, para que el DHT22 tomara mejor los valores ambientales e inicialmente la tierra estaba seca.

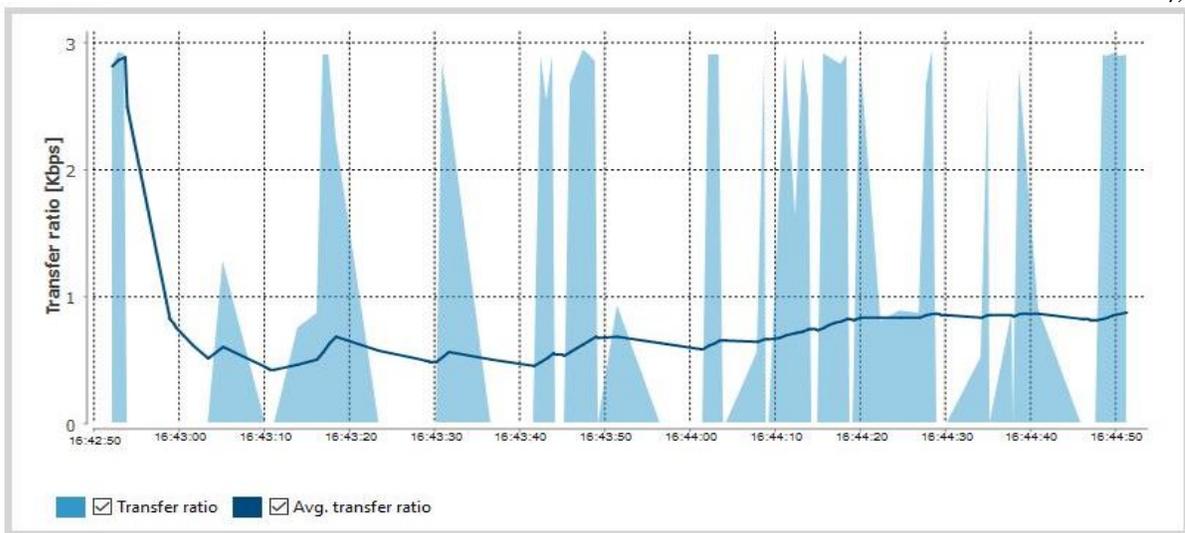


Fig. 3.6 – Prueba de velocidad realizada en línea de visión directa donde se muestra en color azul claro la velocidad en el instante de transmisión y la línea de color azul oscura muestra el promedio durante los 60 segundos de la prueba (Fuente: Autor).

Hora	Temp. (°C)	Hum. R.(%)	Hum. S(%)	Hora	Temp. (°C)	Hum. R.(%)	Hum. S(%)
19:00	28	75	26	05:00	23	96	68
19:10	28	76	68	06:00	22	96	67
19:20	28	75	72	07:00	24	96	67
19:30	28	77	71	08:00	26	89	66
19:40	27	79	71	09:00	29	77	64
19:50	27	80	70	10:00	31	64	62
20:00	26	81	70	11:00	32	58	60
21:00	25	86	70	12:00	32	57	59
22:00	25	91	69	13:00	32	57	57
23:00	24	94	69	14:00	32	54	55
00:00	24	96	69	15:00	33	52	55
01:00	24	96	69	16:00	33	50	54
02:00	23	95	69	17:00	33	49	52
03:00	23	96	70	18:00	31	53	51
04:00	23	96	68	19:00	30	61	51

Tabla 3.1 – Resultados del experimento realizado a la red durante 24 horas para analizar el comportamiento de los sensores y su estabilidad (Fuente: Autor).

Como se observa el sensor de humedad del suelo tomó una primera muestra de 26%, mientras que el otro sensor daba un estimado del 75% de humedad relativa y 28°C de temperatura ambiente. Se procedió a aplicar agua sobre la tierra donde se encuentra el nodo y se realizó una nueva medición a los 10 minutos.

Después de transcurrido este tiempo la medición del YL-69 es de 68%, mientras que la humedad relativa se encuentra en un 76% y la temperatura se mantuvo sobre los 28°C. Esta comprobación volvió a realizarse en varias ocasiones, al mismo intervalo de tiempo, con el fin de comprobar cuánto demoraba aproximadamente el sensor en detectar los cambios de humedad del suelo a medida que el agua era absorbida.

Luego se realizó un seguimiento cada una hora hasta completar las 24 para monitorear el funcionamiento del sensor DHT22 a través de las variaciones de las variables humedad relativa y temperatura ambiente a lo largo de toda la noche y todo el día siguiente.

3.2 Análisis energético realizado.

Teniendo en cuenta los valores de consumo del módulo Xbee y del microcontrolador nos arroja a una de las principales problemáticas del sistema, el tiempo de vida promedio de las baterías. Tomando en consideración el procedimiento realizado en (Li, 2014) se lleva a cabo un estudio energético del consumo del nodo sensor. Como se observa en la Tabla 3.2, donde se muestran los consumos típicos de cada uno de los componentes, el consumo total estimado se encuentra sobre los 60.1 mA, este dato nos brinda la posibilidad de obtener un valor estimado del tiempo de funcionamiento del nodo, teniendo en cuenta el valor de la batería instalada (Véase Ecuación 3.1).

Componente	Consumo promedio
Microcontrolador Arduino	20 mA
Módulo de radio Xbee	40 mA
Sensor YL-69	0.05 mA
Sensor DHT22	0.05mA
Total	60.1 mA

Tabla 3.2 – Consumo promedio de los componentes del nodo sensor (Fuente: Autor).

$$Tv = 2200mA/60.1mA = 36.605 \approx 36 \text{ horas} \quad (3.1)$$

Donde:

Tv : Tiempo de vida útil de la batería.

Este valor de Tv es muy bajo de acuerdo con los requerimientos y concepción del proyecto.

Además, el envío/recepción de un paquete de datos toma aproximadamente un segundo en realizarse, y enviando un paquete cada cinco segundos, se tienen 299 segundos de consumo innecesarios entre cada ciclo. Esto implica que el sistema presente solamente un 0.33% de eficiencia energética (Véase Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3), valor sumamente bajo.

$$C = 300 * 60.1mA = 18030mA \quad (3.2)$$

Aplicando proporción se obtiene:

$$E = 60.1mA * 100/18030mA = 0.33\% \quad (3.3)$$

Donde:

C: Consumo durante cinco minutos.

E: Eficiencia de la red bajo estas condiciones.

Tomando en consideración todo lo anterior se hace evidente la búsqueda de modos de trabajo de los dispositivos que permitan minimizar lo más posible su consumo, ya que un cambio de batería no resolvería el problema para lograr los parámetros deseados. De ahí que se usen procedimientos de bajo consumo tanto para el módulo Xbee, mediante su biblioteca correspondiente, como para el Arduino con la biblioteca *Low-Power*. Estas implementaciones de software arrojan nuevos datos (Véase Tabla 3.3) que permitirán realizar un nuevo análisis energético, como se aprecia a continuación:

Componente	Consumo promedio
Microcontrolador Arduino	0.5 mA
Módulo de radio Xbee	0.01 mA
Sensor YL-69	0.05 mA
Sensor DHT22	0.05mA
Total	0.61 mA

Tabla 3.3 – Consumo en modo ahorro de los componentes del nodo sensor (Fuente: Autor).

Teniendo en cuenta estos nuevos valores, la eficiencia de nodo aumenta considerablemente hasta un 25% aproximadamente (Véase Ecuación 3.4 y Ecuación 3.5), mientras que la vida útil de la batería aumenta hasta unos 6 meses aproximadamente (Véase Ecuación 3.6).

$$C = 1 * 60.1mA + 299 * 0.61mA = 242.1mA \quad (3.4)$$

Aplicando proporción se obtiene:

$$E = 60.1mA * 100/242.1mA = 0.33\% \quad (3.5)$$

$$Tv = 2200mA/0.61mA = 3606 \text{ horas} \approx 150 \text{ días} \quad (3.6)$$

Donde:

C: Consumo durante cinco minutos.

E: Eficiencia de la red bajo estas condiciones.

Tv: Tiempo de vida útil de la batería.

Con la implementación de los modos de bajo consumo mediante software, en los principales elementos de hardware del sistema, se logra un rendimiento cercano al 25% y una vida útil de una batería de 2200 mA cercana a los seis meses de trabajo.

3.3 Implementación del sistema.

Con el objetivo de validar los resultados de esta investigación, se llevó a cabo un montaje del sistema diseñado en la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” en el municipio Jagüey Grande, provincia de Matanzas. Todo lo referente a la visita realizada a esta entidad se muestra en el Anexo IX.

3.4 Análisis económico, medioambiental y político de la aplicación.

Debido a la significación que posee para el país, el desarrollar una tecnología viable para aplicaciones de monitoreo y control del riego en grandes extensiones de cultivos en el Ministerio de la Agricultura, resulta indispensable dentro del marco de esta investigación tomar en cuenta los posibles impactos de la misma en las dimensiones política, económica y ambiental. Para ello se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

Bajo costo de los elementos de hardware

Aunque en Cuba no existe un desarrollo de redes sensoriales, sí se hace necesario contar con esta tecnología debido a la gama de beneficios que aportaría en diversas ramas de la producción y los servicios. Teniendo en cuenta esto, se hace vital buscar la solución más factible a implementar debido a la situación actual de la economía cubana, de ahí que se lleve a cabo este estudio para demostrar el ahorro considerable que ofrece esta solución con respecto a la compra de nodos sensores profesionales. Para evaluar la propuesta brindada, es

necesario desagregar el costo unitario de cada uno los elementos presentes en la misma, mostrando a continuación los precios de los componentes de cada elemento según su función en la red, dígame: el nodo actuador (Véase Tabla 3.4), el nodo sensor (Véase Tabla 3.5) y el coordinador (Véase Tabla 3.6).

Componente	Vendedor	Precio (USD)
Arduino Pro Mini	https://www.sparkfun.com/products/11113	10
Módulo Xbee	https://www.sparkfun.com/short/10414	27
Relay	http://www.hobbytronics.co.uk/5v-relay-module	4
Cables, conectores y caja.	https://www.amazon.com/dp/B0040DEI9M https://www.amazon.es/gp/product/B01D9JFTJU/	20
Total	-	61

Tabla 3.4 – Listado de precios de los componentes del nodo actuador (Fuente: Autor).¹

Componente	Vendedor	Precio (USD)
Arduino Pro Mini	https://www.sparkfun.com/products/11113	10
Módulo Xbee	https://www.sparkfun.com/short/10414	27
Batería 2200 mA	https://www.sparkfun.com/products/11856	13
Sensor DHT22	https://www.amazon.es/dp/B00CKJIB2I	6
Sensor YL-69 + YL-38	https://www.amazon.es/dp/B015T8BBX2	7
Conectores y caja.	https://www.amazon.com/dp/B0040DEI9M	10
Total	-	73

Tabla 3.5 – Listado de precios de los componentes del nodo sensor (Fuente: Autor).¹

Componente	Vendedor	Precio (USD)
Raspberry Pi 3 B	https://www.adafruit.com/product/3055	40
Módulo Xbee	https://www.sparkfun.com/short/10414	27
Cables y caja.	https://www.amazon.es/gp/product/B01D9JFTJU/	15
Total	-	82

Tabla 3.6 – Listado de precios de los componentes del coordinador (Fuente: Autor).¹

¹ Todos los precios corresponden a búsqueda realizada el día 2/06/2017.

Como se observa, el nodo sensor ronda los 75 USD y el nodo actuador los 60 USD, sin tener en cuenta la compra al por mayor, donde los componentes saldrían a precios más bajos; y aun así son menores que si comparamos con uno de los nodos profesionales más usados: *Waspnote*, el cual presenta precios que rondan los 245 USD, según el vendedor del sitio digital de Libelium², lo que representa una diferencia sumamente notable y más cuando se refiere a la creación de toda una red que necesita decenas de estos dispositivos.

Ahorro de recursos

Con un exceso de agua se pierde calidad en el suelo debido al arrastre de nutrientes que trae consigo, por lo que siempre es recomendable realizar un control del riego sobre cada zona de cultivo. Además, no todas las plantaciones requieren la misma cantidad de agua, pudiendo afectar la calidad de los cultivos en caso de un exceso del líquido, y un mayor tiempo de riego, implica también mayor gasto energético y por ende mayor consumo de combustibles fósiles. Esta plataforma va a mejorar los métodos de manejo del riego, lográndose regar donde haga falta y cuando haga falta, ahorrando recursos hídricos, ya que la gran mayoría de las entidades dedicadas a la agricultura en nuestro país, riegan periódicamente y no según las condiciones del terreno en ese momento.

Impacto e interacción con el medio ambiente

Mediante los datos obtenidos se puede tener una información meteorológica de los campos, gracias al monitoreo de las condiciones del medio en el que se encuentra. El sistema, debido a su arquitectura y objetivo final para el que fue creado, puede ser perfectamente escalable para el uso en fertirrigación, propiciando así una manera de racionalización del sistema de producción agrícola moderno. Si es correctamente administrado optimizará la cantidad de insumos a utilizar en el campo (fertilizantes, herbicidas, nutrientes, etc.), consiguiendo con esto reducir los costos de producción y la contaminación ambiental. Todo esto permite como resultado final una mejora en la calidad de las cosechas.

²<https://www.amazon.es/Electr%C3%B3nicaLibelium/s?ie=UTF8&fieldbrandtextbin=Libelium&page=1&rh=n%3A599370031>, consultado el 29/05/2017.

Impacto político de la implementación de la red.

Gracias al uso en el diseño del sistema de software y hardware libre, en su gran mayoría, existe la posibilidad de realizar una implementación masiva de esta red de sensores inalámbricos en casi cualquier región agrícola del territorio nacional, con gran independencia tecnológica para nuestro país.

3.5 Consideraciones del capítulo.

Con la tecnología de hardware propuesta para el diseño de la WSN se logra la implementación de un sistema de bajo costo y alta eficiencia energética. El sistema contribuye al ahorro de recursos hídricos y por ende a la protección del medio ambiente. Las pruebas realizadas bajo diferentes ambientes de trabajo, posibilitan la validación del correcto funcionamiento de la red, arrojando resultados muy buenos y prometedores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Finalizada la elaboración de este Trabajo de Diploma se arriba a las siguientes conclusiones:

- 1 Del análisis de la bibliografía consultada se determina que la mejor propuesta para el diseño de la arquitectura de hardware y software de la red es un coordinador basado en la computadora Raspberry Pi con sistema operativo Raspbian, nodos basados en microcontroladores Arduino y módulos de radio Xbee con protocolo de red Zigbee para las comunicaciones, pues se logran muy buenos resultados en su desempeño.
- 2 La red funciona la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo, por lo que envía paquetes de datos a través de cada elemento de la red durante intervalos previamente definidos. De esta forma se asegura la eficiencia energética del sistema.
- 3 La eficiencia energética de la red cumple con los estándares propuestos, por lo que propicia gran autonomía a los nodos para su correcto funcionamiento durante largos períodos de tiempo.
- 4 Se establece una topología en malla para la red, logrando que lleguen al coordinador los paquetes desde todos los nodos sensores involucrados, por lo que se aseguran buenos resultados en la comunicación.
- 5 Los componentes del sistema desarrollado presentan costos muy bajos, lo que permite que su implementación sea factible para cualquier entidad de la agricultura, en especial para la empresa “Victoria de Girón”.

Recomendaciones

La presente investigación constituye el inicio de una serie de trabajos relacionados con el tema propuesto que permitirán darle una mayor profundidad a la red diseñada y una serie de mejoras con el fin de lograr un sistema más robusto y eficiente. Debido a esto se proponen los siguientes aspectos a desarrollar en un futuro:

- 1 Diseñar una base de datos en la Raspberry Pi con el fin de tener un mayor control sobre la lectura de los nodos sensores durante largos períodos de tiempo.
- 2 Implementar una aplicación sobre un servidor Web en el coordinador que permita a todo el personal calificado y autorizado, no importa donde se encuentren, tener una visualización de las mediciones de los nodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta Ponce, M. C. (2006). Estudio del estándar IEEE 802.15.4 ZIGBEE para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación en el estándar IEEE 802.15.1 BLUETOOTH. QUITO/ EPN/ene-2006.

Adam, N., and Frey, J. (2006). Redes de sensores inalámbricos. Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. Rev. ABB 2.

Agrawal, N., and Singhal, S. (2015). Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino. In Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference on, (IEEE), pp. 928–932.

Aguirre Solvez, L. (2009). Estudio de una red de sensores sin hilos basada en la tecnología Arduino bajo protocolos de comunicaciones Zigbee. Universitat Politècnica de Catalunya. EPSC 18/11.

Angal, S. (2013) Raspberry pi and Arduino Based Automated Irrigation System. International Journal of Science and Research (IJSR). ISSN (Online): 2319-7064. Index Copernicus Value (2013): 6.14 | Impact Factor (2015): 6.391.

Arce, A.I.C., Tech, A.R.B., Silva, A.C.S., and Costa, E.J.X. (2009). Monitorización de rebaños de bovinos a través de redes de sensores inalámbricos. Arch. Zootec. 58(222), 253–263.

de Ávila, H.C., Hipólito, J.I.N., López, J. de D.S., Rosas, M.E.M., and Calvo, A.H. (2012). Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores. Rev. Divulg. Científica. ISSN 2007-3585. 6(2).

Awati, J.S., and Patil, V.S. (2012). Automatic Irrigation Control by using wireless sensor networks. J. Exclus. Manag. Sci. 1, 1–7.

Baviskar, J., Mulla, A., Baviskar, A., Ashtekar, S., and Chintawar, A. (2014). Real time monitoring and control system for green house based on 802.15. 4 wireless sensor network. In Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2014 Fourth International Conference on, (IEEE), pp. 98–103.

Bell, Charles. (2014) Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi. Apress.

- Benítez, V.H., Hermosillo, S., Pacheco-Ramírez, M.J., and Armas-Flores, M.R.V. (2015). Propuesta para la implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para un sistema de concentración solar con tecnología de torre central. *Sistemas, Cibernética e Informática*. ISSN: 1690-8627. 12(2).
- Bermúdez, A., Casado, R., García, E.M., Gómez, A., Quiles, F.J., and Ruiz-Gallardo, J.R. (2007). Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales. En 4ª Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales. *Wildfire*, pp. 13–17.
- Boonsawat, V., Ekchamanonta, J., Bumrunghet, K., and Kittipiyakul, S. (2010). Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring. In *The Second Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010)*, Chon Buri, Thailand.
- Campos Argudo, Karina Pamela; Iturralde Piedra, Daniel Esteban. (2011) Diseño e implementación de un sistema de control basado en radiofrecuencia para la gestión del centro de investigaciones de la facultad. Tesis de Licenciatura. Universidad del Azuay.
- Cao, W., Xu, G., Yaprak, E., Lockhart, R., Yang, T., and Gao, Y. (2008). Using wireless sensor networking (WSN) to manage micro-climate in Greenhouse. In *Mechtronic and Embedded Systems and Applications, 2008. MESA 2008. IEEE/ASME International Conference on*, (IEEE), pp. 636–641.
- Carrazana Pérez, J.A. (2016). Soluciones de automatización para sistemas de riego en caña de azúcar. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- Cayani, J., San Román, E., Chilo, J., and Stenumgaard, P. (2012). Caracterización de Ambientes Industriales Para Aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos en la Región Arequipa. *CIP CDA CIE ELECTRO D 1*, 3.
- Chaudhary, D.D., Nayse, S.P., and Waghmare, L.M. (2011). Application of wireless sensor networks for greenhouse parameter control in precision agriculture. *Int. J. Wirel. Mob. Netw. IJWMN Vol 3*, 140–149.
- Cianca, K. (2012). Topologías de las redes con sensores. http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012_07_01_archive.html.
- Dordoigne, J. (2015). *Redes informáticas-Nociones fundamentales (5ª edición): (Protocolos, Arquitecturas, Redes inalámbricas, Virtualización, Seguridad, IP v6...)*. Ediciones ENI.
- Elsts, A., Balass, R., Judvaitis, J., and Selavo, L. (2012). SAD: wireless sensor network system for microclimate monitoring in precision agriculture. In *Proceedings of the 5-Th International Scientific Conference Applied Information and Communication Technologies (AICT 2012)*, pp. 271–281.
- Erazo, J.K., and Hervas, C.A. (2016). Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee). *Maskana* 1–11.

- Ferdoush, S., and Li, X. (2014). Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Comput. Sci.* 34, 103–110.
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Reproducción.
- Galicia, R.H., Rincón, R.M., and de Tuxtla Gutiérrez, I.T. (2015). Aplicación Web interactiva para monitoreo, análisis y control de procesos con Arduino y Raspberry. *Rev. Technol. Digit.* Vol 5, 1–20.
- Gascón, D. (2010). Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible. *Revista MIT Technology Review*, 53-55.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A., and Porta-Gándara, M.Á. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 63, 166–176.
- Hedley, C., Ekanayake, J., and Roudier, P. (2012). Wireless soil moisture sensor networks for precision irrigation scheduling. In *Workshop Abstracts, Advanced Nutrient Management: Gains from the Past-Goals for the Future*, p. 85.
- Ho, A.M., Jaafar, H.Z., Grozescu, I.V., and Zaharin, M.Z.A.B. (2015). Solar Powered Gravity-Feed Drip Irrigation System Using Wireless Sensor Network. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 6, 970.
- Hoy, R.M., Rohrer, R., Liska, A., Luck, J.D., Isom, L., and Keshwani, D.R. (2014). Agricultural Industry Advanced Vehicle Technology: Benchmark Study for Reduction in Petroleum Use. U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy Under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-05ID14517. INL/EXT-14-33118.
- Hussain, R., Sahgal, J., and Riyaj, M. (2013). Control of irrigation automatically by using wireless sensor network. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*. ISSN: 2231-2307. 3(1).
- Iacono, L., Godoy, P., Marianetti, O., and García Garino, C. (2010). Estudio de plataformas de hardware empleadas en redes de sensores inalámbricos. In *XVI Congreso Argentino de Ciencias de La Computación*, p.
- Jadhav, S., and Hambarde, S. (2013). Android based Automated Irrigation System using Raspberry Pi. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. ISSN (Online): 2319-7064. Index Copernicus Value (2013): 6.14 | Impact Factor (2014): 5.611.
- Keshtgari, M., and Deljoo, A. (2012). A wireless sensor network solution for precision agriculture based on Zigbee technology. Published Online January 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/wsn>). *Wirel. Sens. Netw.* 4, 25-30.

- Ketprom, U., Mitrpant, C., and Lowjun, P. (2007). Closing digital gap on RFID usage for better farm management. In *Management of Engineering and Technology*, Portland International Center for, (IEEE), pp. 1748–1755.
- Kim, Y., Evans, R.G., and Iversen, W.M. (2008). Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 57(7), 1379–1387.
- LakshmiPrasanna, G., Prasad, S.R., Naidu, D.C., and Reddy, D.R. (2015). Water Quality Monitoring and Controlling in Irrigation using Zigbee Technology. *Int. J. Sci. Eng. Technol. Res. IJSETR* Volume 4, Issue 1.
- Li, X. (2014). A low-cost wireless sensor network system using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. University of North Texas.
- de Marcos Peirotén, R.A. (2013). Sistema domótico para una casa inteligente. Universidad Pontificia Comillas. Madrid.
- Martell, C.V., and en Telecomunicaciones, I.C. (2011). Redes de sensores inalámbricos para el análisis de vibraciones. Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Chile.
- Medina Bello, J.I. (2011). Prototipo funcional de un electrocardiógrafo implementado por medio de redes de sensores inalámbricos (WSN). Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia.
- Nagaraja, M., and Kurian, M.Z. (2016). Design of environmental monitoring applications system using temperature sensor and Zigbee. *International Journal of Science Technology and Management*. ISSN 2394-1537. 5(5).
- Ngajieh, F.N. (2015). Arduino Dynamic Wireless Sensor Network System. Blekinge Institute of Technology. School of Engineering. Sweden.
- Olalla, M., & Alberto, E. (2014). Red inalámbrica de sensores a través de 6loWPAN para una agricultura de precisión aplicado en la Hacienda Cananvalle de la Ciudad de Ibarra (Bachelor's thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador).
- Pérez Roque, F., Valdés Zaldívar, E., & Arias de Fuentes, O. (2013). Sistema de Adquisición de Datos con comunicación inalámbrica. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, ISSN: 1815-5928. 34(3), 63-73.
- Plaza, S.P. (2015). Enlace Zigbee para la Gestión de un Sistema de Alumbrado Basado en LEDs. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria. España.
- Rhman, Z.-A.S., Ali, R.S., and Jasim, B.H. (2014). Wirelessly Controlled Irrigation System. *Iraq J. Electrical and Electronic Engineering*. 10(2).

- Rodriguez, M.G., Uriarte, L.E.O., Jia, Y., Yoshii, K., Ross, R., and Beckman, P.H. (2011). Wireless sensor network for data-center environmental monitoring. In Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on, (IEEE), pp. 533–537.
- Rodríguez Cerezo, M. (2014). Sistema de control remoto para aplicaciones domóticas a través de internet. (Bachelor's thesis). Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones. UAM.
- Sahu, C.K., and Behera, P. (2015). A low cost smart irrigation control system. In Electronics and Communication Systems (ICECS), 2015 2nd International Conference on, (IEEE), pp. 1146–1152.
- Santamaría Bomboi, G. (2016). Diseño de una red de monitorización del entorno basada en Arduino, Raspberry Pi y Xbee. Departament d'Enginyeria i Ciència dels Computadors. Universitat Jaume I. España.
- Sarmah, M.J., Venketeswaran, P.R., Kini, N.G., Sundaresan, C., and Chaitanya, C.V.S. (2014). Intelligent Localization Algorithm for Temperature Monitoring using Wireless Sensor Networks. *Int. J. Comput. Appl.* 94.
- Schmuller, J. (2000). Aprendiendo UML en 24 horas. Pearson educación, México. ISBN: 968-444-463-X. 448p.
- Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007). Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications (John Wiley & Sons, Inc., Publication). ISBN 978-0-471-74300-2. 326p.
- Stojkoska, B.R., Avramova, A.P., and Chatzimisios, P. (2014). Application of wireless sensor networks for indoor temperature regulation. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* Hindawi Publishing Corporation. Volume 2014, Article ID 502419, 10 pages.
- Sung, W.-T., Chen, J.-H., Hsiao, C.-L., and Lin, J.-S. (2014). Multi-sensors Data Fusion Based on Arduino Board and Xbee Module Technology. In Computer, Consumer and Control (IS3C), 2014 International Symposium on, (IEEE), pp. 422–425.
- Suryadevara, N.K. (2014). Real-time fusion of wireless sensor network data for wellness determination of the elderly in a smart home: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Science and Engineering at Massey University, Manawatu, New Zealand. Massey University.
- Szilágyi, R., and Tóth, M. (2015). Development of an open source agricultural mobile data collector system. *J. Agric. Inform.* ISSN 2061-862X. 6(2). 54-61.
- Tamayo, R.A.C., Ibarra, M.L., and Macías, J.A.G. (2010). Better crop management with decision support systems based on wireless sensor networks. In Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010 7th International Conference on, (IEEE), pp. 412–417.

Tarange, P.H., Mevekari, R.G., and Shinde, P.A. (2015). Web based automatic irrigation system using wireless sensor network and embedded Linux board. In *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2015 International Conference on*, (IEEE), pp. 1–5.

Tejada, E. P., Portugal, A. M., & Falcón, E. V. C. (2015) Termo higrómetro y logger para el registro de humedad y temperatura con DHT22. XX11 Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXII-SPES), Arequipa, 17-21.11. 2015.

Torres, S.J.B., and Cascón, C.J.E. (2009). Sistema Sensorial Inalámbrico para la Detección de Patologías en la Construcción. Facultad de Informática. Universidade da Coruña. 15071 Campus de Elviña.

Vásconez Cuzco, J.C., and Chamba Tenemaza, F. de J. (2013). Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica para una finca ubicada en el sector popular de Balerio Estacio. Universidad Politécnica Salesiana. Sede Guayaquil. Ecuador.

Zambrano Zambrano, H. A. (2015). Diseño e Implementación de un enlace de comunicaciones con tecnología WIMAX entre el Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas y el Centro de Telecomunicaciones de la FAE CETEL (Bachelor's thesis, Universidad Israel).

Zennaro, M., Bagula, A., Gascon, D., & Noveleta, A. B. (2010, August). Planning and deploying long distance wireless sensor networks: The integration of simulation and experimentation. In *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless* (pp. 191-204). Springer Berlin Heidelberg.

Zografos, A. (2014). Wireless Sensor-based Agricultural Monitoring System. Master's Thesis. School of Information and Communication Technology (ICT). KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

ANEXOS

Anexo I Estándares relacionados a la tecnología Zigbee.

Estándar	Descripción
Capa física y MAC:IEEE 802.15.4	Optimizadas para el bajo costo, baja potencia y desempeño inalámbrico robusto.
Zigbee (2004)	Construido sobre 802.15.4 e incluye un stack de protocolo de red completo para WSN focalizado en redes de sensores y control.
Zigbee Pro (dic. 2007)	Mejora algoritmos de direccionamiento y ruteo.

Tabla A.1 - Estándares de redes de sensores inalámbricos (P. Tarrío Alonso, 2008).

Anexo II Comparación entre tecnologías inalámbricas.

Características	Wifi	Bluetooth	Zigbee
Bandas de frecuencias	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 915 / 868 MHz
Tamaño de pila	~ 1MB	~ 1MB	~ 20 KB
Tasa de transferencia	54 Mbps	1 Mbps	250 Kbps (2.4 GHz) 40 Kbps (915 MHz) 20 Kbps (868 MHz)
Número de canales	11-14	79	16 (2.4 GHz) 10 (915 MHz) 1 (868 MHz)
Tipo de datos	Digital	Digital, Audio	Digital (Texto)
Rango de nodos internos	100 m	10 – 100 m	10 – 100 m
Número de dispositivos	32	8	255/65535
Requisitos de alimentación	Media Horas de batería	Media Días de batería	Muy Baja Años de batería
Introducción al mercado	Alta	Media	Baja
Arquitecturas	Estrella	Estrella	Estrella, Malla y Árbol
Mejoras de aplicación	Edificio con internet en el interior	Computadora y teléfonos	Control de bajo costo y monitoreo
Consumo de potencia	400 mA transmisión 20 mA en reposo	400 mA transmisión 0.2 mA en reposo	30 mA transmitiendo
Precio	Costoso	Accesible	Bajo
Complejidad	Complejo	Complejo	Simple

Tabla A.2 - Comparación entre las principales tecnologías inalámbricas
(Vásconez Cuzco and Chamba Tenemaza, 2013).

Anexo III Principales características de la Raspberry Pi.

Característica	Descripción
Procesador	BCM2837 64 bits x4 núcleos ARMv8 a 1,2 GHz
Chip gráfico	Dual Core Video Core IV Multimedia
Voltaje de operación	1,5-5V
Voltaje de entrada máximo	3,3 v
Corriente continua por pines GPIO	16 - 50 mA
RAM	1 GB
Pines de entrada-salida	x27 pines GPIO. UART Bus 12C Bus
Puertos USB 2.0	x4
Puerto Full HDMI	x1
Puerto Ethernet	x1
Audio jack 3.5 mm	x1
WIFI	802.11n
Bluetooth	4.1 y LE (<i>Low Energy</i> / Baja energía)
Slot micro SD	x1 hasta 32 GB
Temperatura de trabajo	-40°C a 85°C

Tabla A.3 – Ficha técnica de la Raspberry Pi 3 B (Santamaría, 2016).

Anexo IV Configuración de pines del Xbee.

Pin	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Alimentación
2	Dout	Salida	Salida UART
3	Din	Entrada	Entrada UART
4	DIO12	E/S	Entrada/Salida Digital 12
5	RESET	Entrada	Módulo de reinicio
6	PWM0/RSSI/DIO10	E/S	PWM Salida / Indicador de la intensidad de la señal recibida / Digital E/S 10
7	DIO11	E/S	Digital E/S 11
8	Reservado	-	No conectar
9	DTR / SLEEP_RQ /	E/S	Pin <i>Sleep Control Line</i> o Digital E/S 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	E/S	Entrada Analógica 4 o Digital E/S 4
12	CTS/DIO7	E/S	Control de Flujo o Digital E/S 7, si CTS se encuentra habilitado este es una salida.
13	ON/SLEEP	Salida	Indicador del estado del módulo. Se recomienda conectar este pin a un voltaje referencial si se desea muestreo analógico, de lo contrario conectarse a GND.
14	VREF	Entrada	
15	Asociado/DIO5	E/S	Indicador asociado, Digital E/S 5
16	RTS/AD6/DIO6	E/S	Control de Flujo Request-to-Send, Digital E/S 6. Si RTS se encuentra habilitado es una entrada.
17	AD3/DIO3	E/S	Entrada Analógica 3 o Digital E/S 3
18	AD2/DIO2	E/S	Entrada Analógica 2 o Digital E/S 2
19	AD1/DIO1	E/S	Entrada Analógica 1 o Digital E/S 1
20	AD0/DIO0	E/S	Entrada Analógica 0 o Digital E/S 0

Tabla A.4 - Configuración detallada de pines del módulo de radiofrecuencia Xbee

(Vásconez Cuzco and Chamba Tenemaza, 2013).

Anexo V Comparación entre las series de los módulos Xbee.

Características	Xbee Series 1	Xbee Series 2	Xbee 900
Distancia en Interiores	30m	40m	370m
Distancia en Exteriores (en línea visual)	100 m	120 m	3-10 km
Potencia de Transmisión	1 mW (0dbm)	2 mW (+3dbm)	693 mW (+28.4dbm)
Velocidad de Transmisión	250 Kbps		230 Kbps
Sensibilidad de Recepción	-92dbm	-98dbm	-106dbm
Voltaje	2.8 - 3.4 V	2.8 - 3.6 V	3.0 - 3.6 V
Corriente de Transmisión	45 mA (3.3 V)	40 mA (3.3 V)	265 mA (3.3 V)
Corriente de Recepción/Reposo	50 mA (3.3 V)	40 mA (3.3 V)	80 mA (3.3 V)
Corriente apagado	10 uA	1 uA	60 uA
Frecuencia	2.4 GHz		900 MHz
Dimensiones	0,24cm x 2,76cm		
Temperatura	De -40 °C a 85 °C		
Opciones de Antena	Chip, Antena integrada, U.FL	Chip, Antena integrada, UFL, RPSMA	Chip, Antena integrada, uFL, RPSMA
Topologías de Red	Punto a punto, Estrella	Punto a punto, Estrella, Malla	Punto a punto, Estrella
Número de Canales	16 Canales de Secuencia Directa	16 Canales de Secuencia Directa	8 salto en 12 canales o 7 saltos compartiendo 25 frecuencias
Opciones de Filtrado	PAN ID, Canal & Origen/Destino		

Tabla A.5 – Comparación entre dispositivos Xbee (Bell, 2014).

Anexo VI Principales características del sensor DHT22.

Características	Descripción
Potencia	Ultra baja
Tipo de sensor	Capacitivo
Salida	<i>Standard digital single-bus</i>
Voltaje de funcionamiento	3.3 V ~ 5.5 V
Corriente en medición	50 uA típicamente
Precisión	± 0.5 °C típicamente para la temperatura ± 2 %RH para humedad
Resolución:	Temperatura: 0.1 °C típicamente; Humedad: 0.1 %RH
Rangos de operación:	Temperatura: -40°C ~ 80°C Humedad: 0 ~ 99.9 %RH

Tabla A.6 – Datos técnicos sensor DHT22 (Tejeda et al., 2015).

Características	Descripción
Voltaje de entrada	3.3 – 5 VCD
Voltaje de salida	0 ~ 4.2 V
Corriente de entrada	35 mA
A0	Salida analógica que entrega una tensión proporcional a la humedad.
D0	Salida digital; este módulo permite ajustar cuándo el nivel lógico en esta salida pasa de bajo a alto mediante el potenciómetro.
Dimensiones YL-38	30 x 16 mm
Dimensiones YL-69	60 x 30 mm

Tabla A.7 – Datos técnicos sensor YL-69.³

³ Datos tomados de <https://es.scribd.com/doc/233114065/Modulo-YL69-y-YL38>

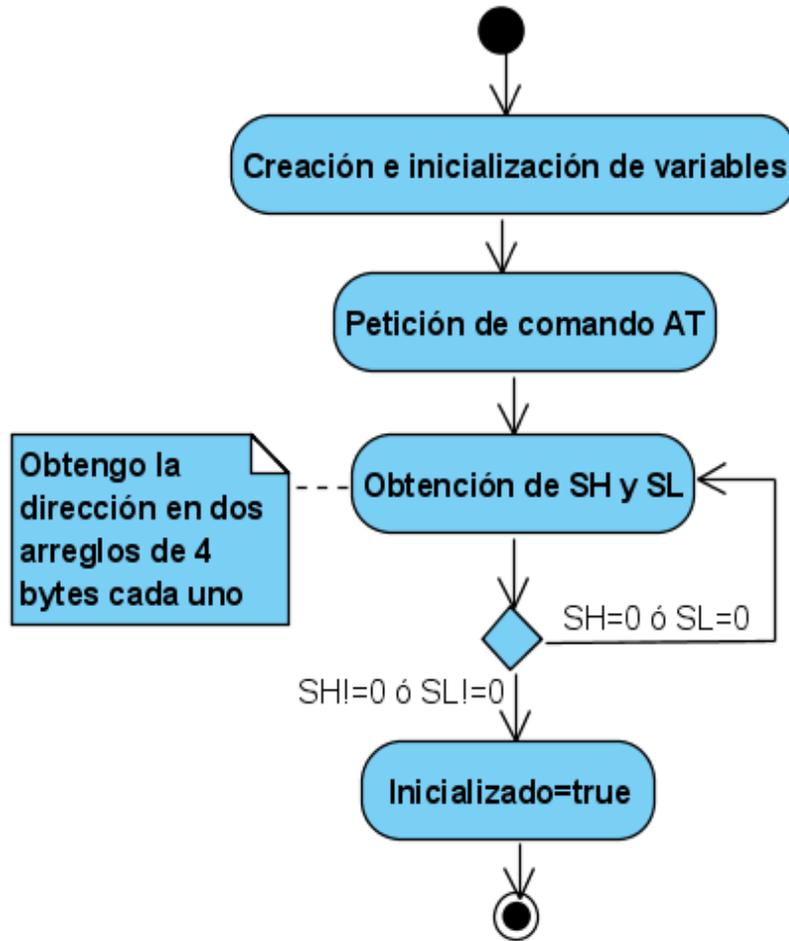
Anexo VII Diagramas UML de las subrutinas del sistema.

Fig. A.1 - Diagrama UML que muestra la secuencia de trabajo del procedimiento `InitStaticData()` tanto para el nodo sensor como para el nodo actuador (Fuente: Autor).

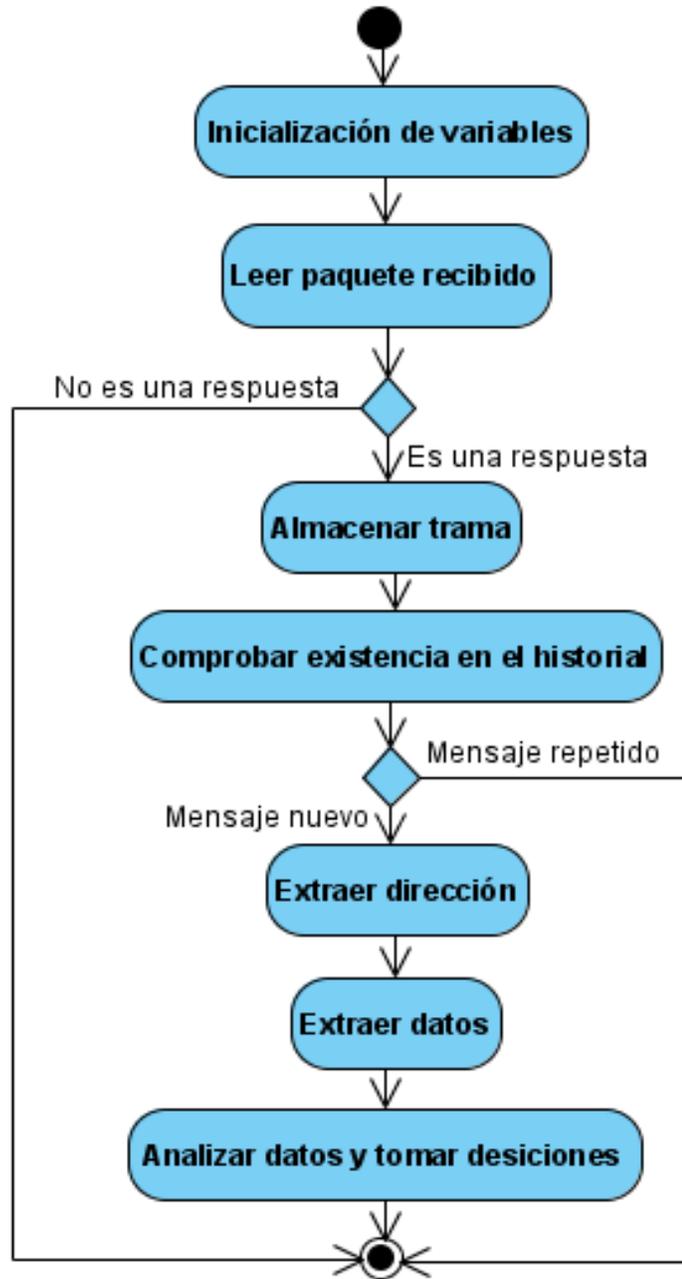


Fig. A.2- Diagrama UML que muestra la secuencia de trabajo del procedimiento `recibirMensaje()` tanto para el nodo sensor como para el nodo actuador (Fuente: Autor).

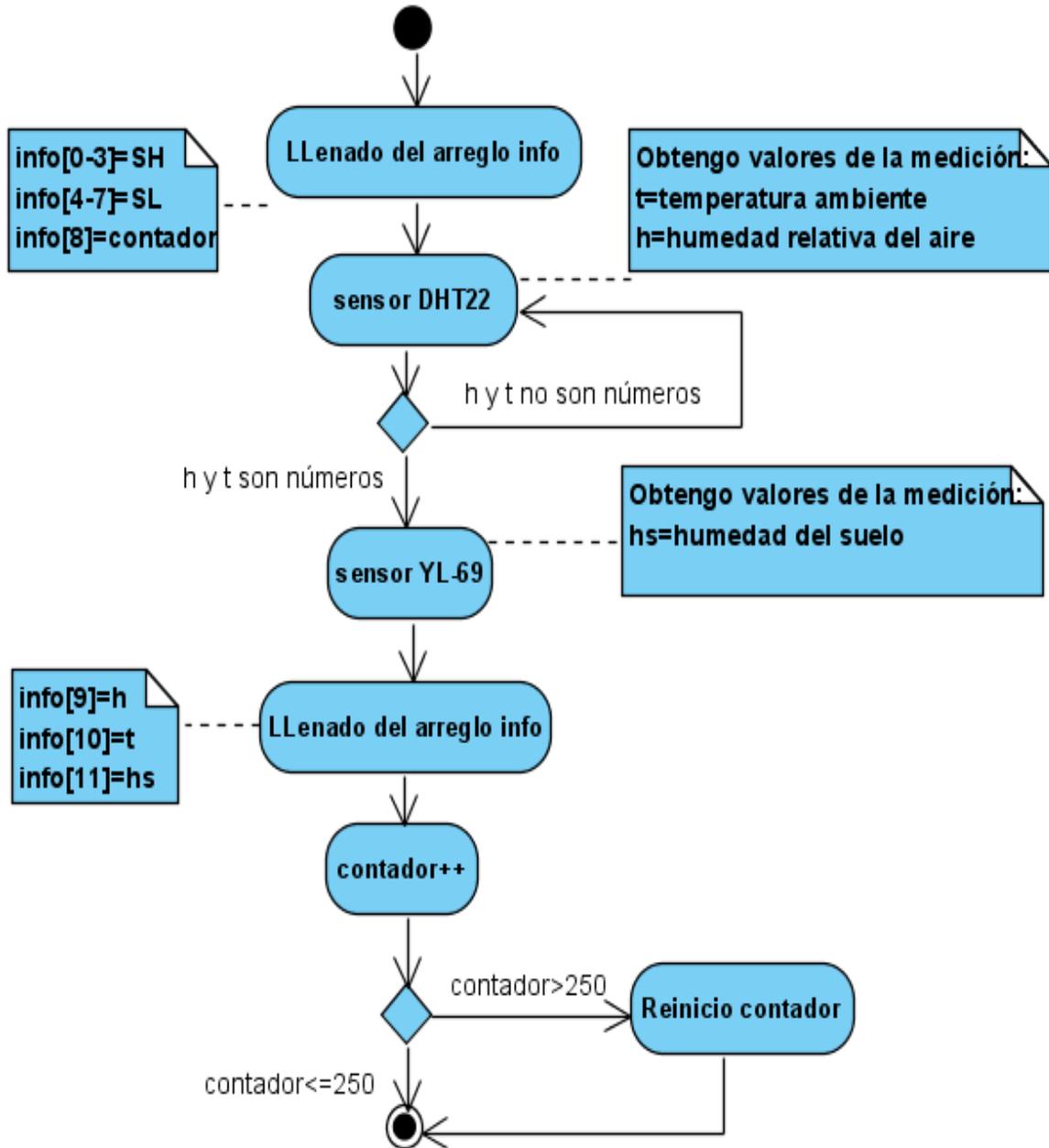


Fig. A.3 - Diagrama UML que muestra la secuencia de trabajo del procedimiento crearMensaje() para el funcionamiento del nodo sensor (Fuente: Autor).

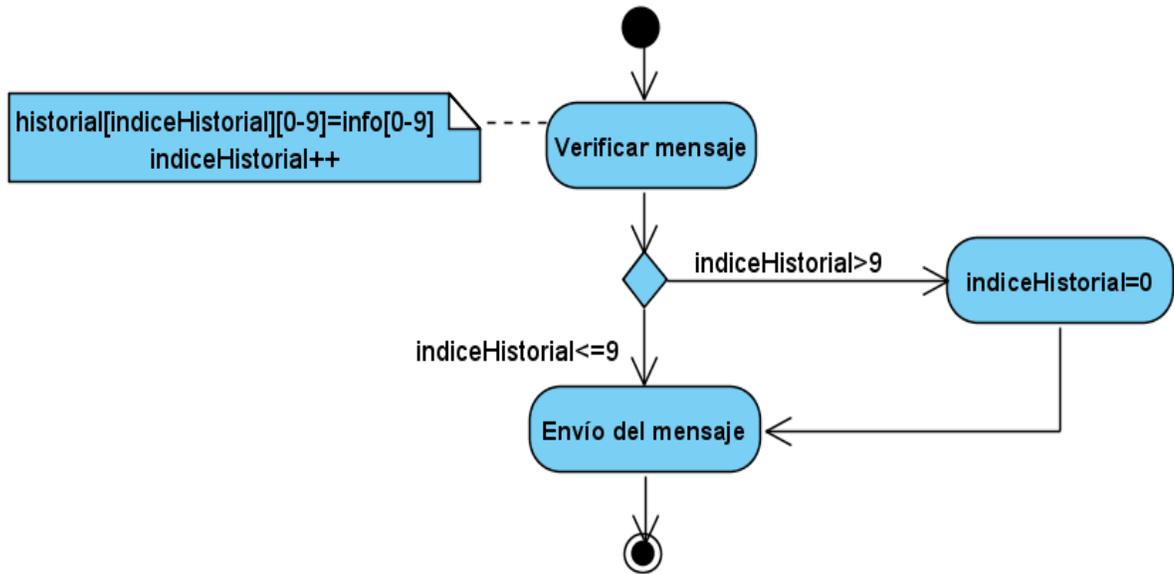


Fig. A.4 - Diagrama UML que muestra la secuencia de trabajo del procedimiento `enviarMensaje()` tanto para el nodo sensor como para el nodo actuador (Fuente: Autor).

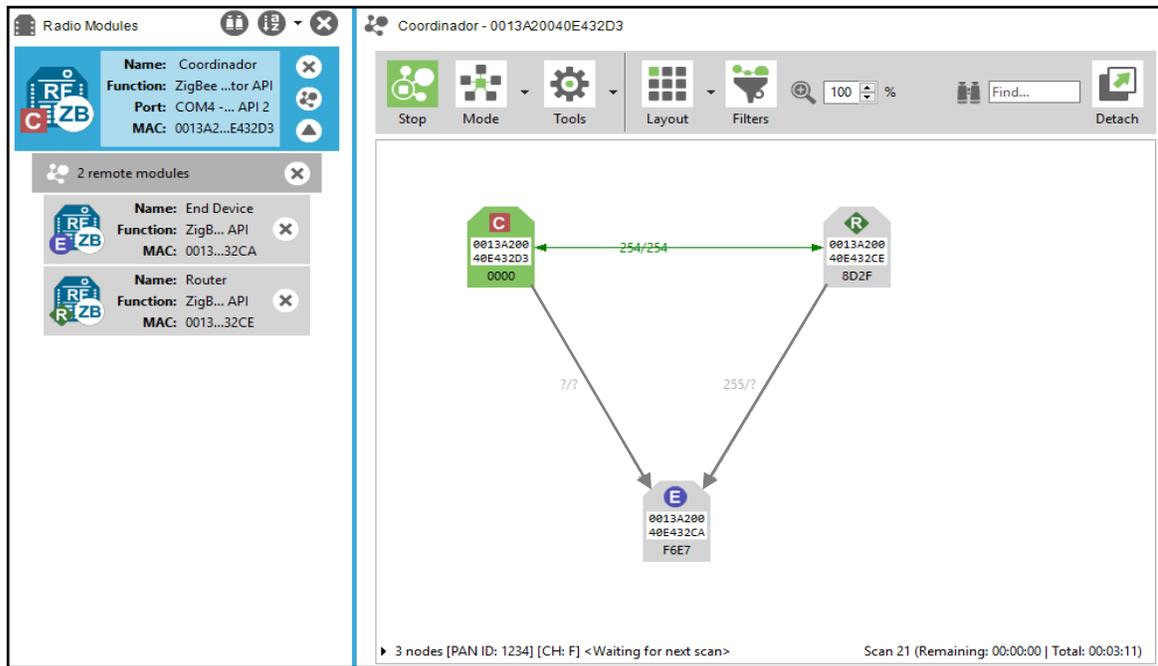
Anexo VIII Topología en malla implementada en la red.

Fig. A.5 – Esquema de topología en malla diseñado y comprobado mediante la simulación de la red con el uso del software XCTU (Fuente: Autor).

Anexo IX Implementación de la red en Jagüey Grande.

La empresa agroindustrial “Victoria de Girón” en el municipio de Jagüey Grande, provincia de Matanzas, con 35mil hectáreas cultivables, 11 mil de ellas dedicadas al cítrico, fue fundada por el Comandante en Jefe Fidel Castro, el 14 de junio de 1967, por lo que está muy próxima a celebrar sus 50 años de creada siendo la encargada de aportar alrededor del 75% de los cítricos que cultiva el país, así como grandes cantidades de frutales, viandas y hortalizas.

La entidad presenta desde hace algunos años un sistema de riego por goteo en todas sus plantaciones (Véase Fig. A.6). El riego por goteo aplica un conjunto de técnicas que permiten dar un óptimo nivel de humedad en la zona radicular de la planta, aprovechando de mejor manera el agua de riego. El agua llega a la planta por unas tuberías de conducción y a través de unos goteros proporciona la humedad a la planta, la descarga de los emisores fluctúa en un rango de 2 a 4 litros por hora por goteo (Olalla, M., 2014).



Fig. A.6 – Sistema de riego por goteo implementado en las fincas de la Empresa Agroindustrial Victoria de Girón (Fuente: Autor).

Actualmente, la aplicación del riego en la empresa tiene muchas variantes debido al tipo de plantación, tipo de suelo y edad de los cultivos, principalmente. Este se aplica a intervalos continuos periódicamente, es decir, no se tiene en cuenta como es la humedad del suelo antes de regar, sino lo que está establecido en ese momento. Todo esto possibilitó que el personal de la entidad viera con buenos ojos poder tener un registro constante de los valores de las variables proporcionadas por los sensores, ya que se evitaría ejecutar el riego de no hacer falta, así como ejecutarlo en caso de que el cultivo lo necesitara antes del tiempo previsto, lo que aumentaría la calidad del producto final, y que la comunicación se estableciera por vía inalámbrica, debido a la extensión de los terrenos (aproximadamente de 324x960 metros cada campo, según datos de los directivos).

Debido a la petición de la entidad, se ejecutó el montaje usando el coordinador y dos nodos sensores, ya que les era más importante en estos momentos el monitoreo de las plantaciones que tener un control automático sobre las válvulas. En las Fig. A.7 y A.8 se muestran los nodos sensores desarrollados y en la Fig. A.9 se observa el coordinador de la red. En el caso de la Fig. A.10, esta corresponde a la interfaz gráfica desarrollada en el software Qt para el coordinador, apreciándose los valores de las mediciones de los sensores momentos previos al montaje en el campo.

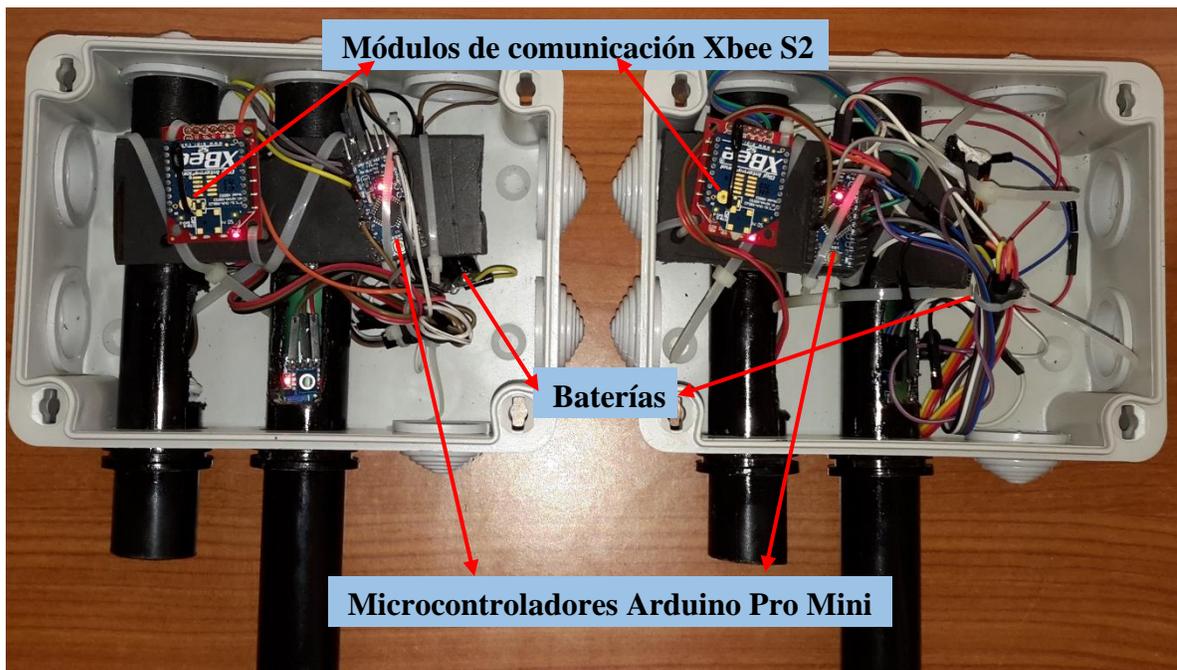


Fig. A.7 – Nodos sensores, donde se observan el Xbee, el Arduino y las baterías (Fuente: Autor).



Fig. A.8 – Nodos sensores desarrollados encapsulados, donde se observan la posición de los sensores incorporados (Fuente: Autor).

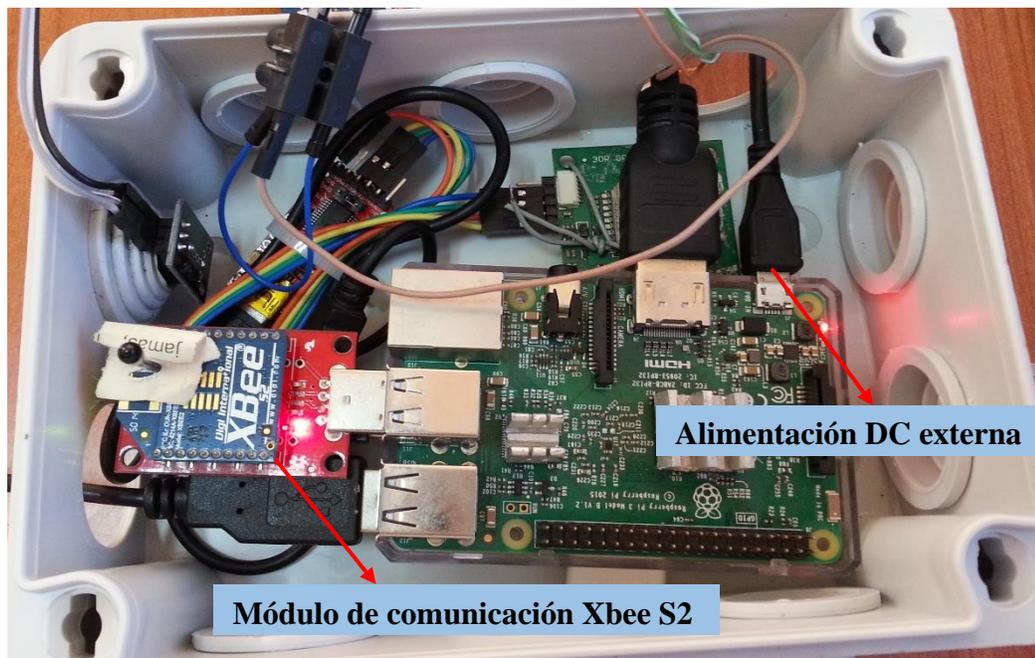


Fig. A.9 – Coordinador de la red, donde se observan todos sus componentes (Fuente: Autor).

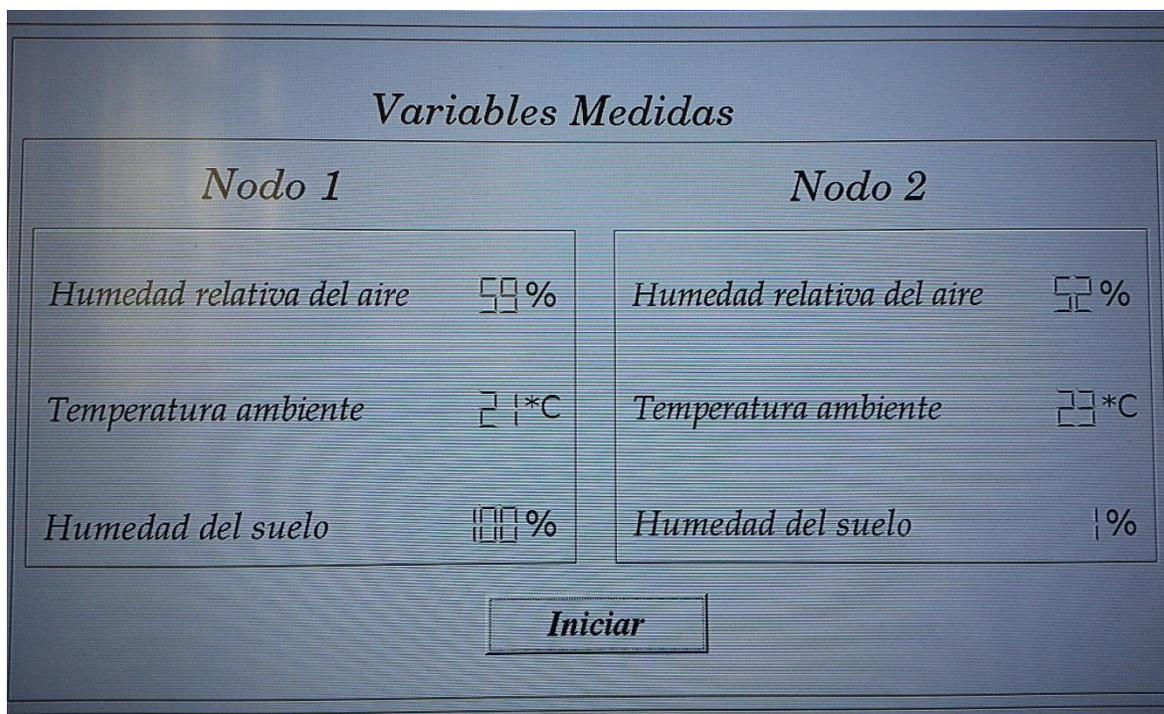


Fig. A.10 – Interfaz gráfica desarrollada para mostrar valores de las mediciones de los nodos sensores (Fuente: Autor).

A continuación, se muestra un documento elaborado por la dirección de la Empresa Agroindustrial “Victoria de Girón” que avalan la propuesta y los resultados obtenidos durante la implementación del sistema en esta entidad.

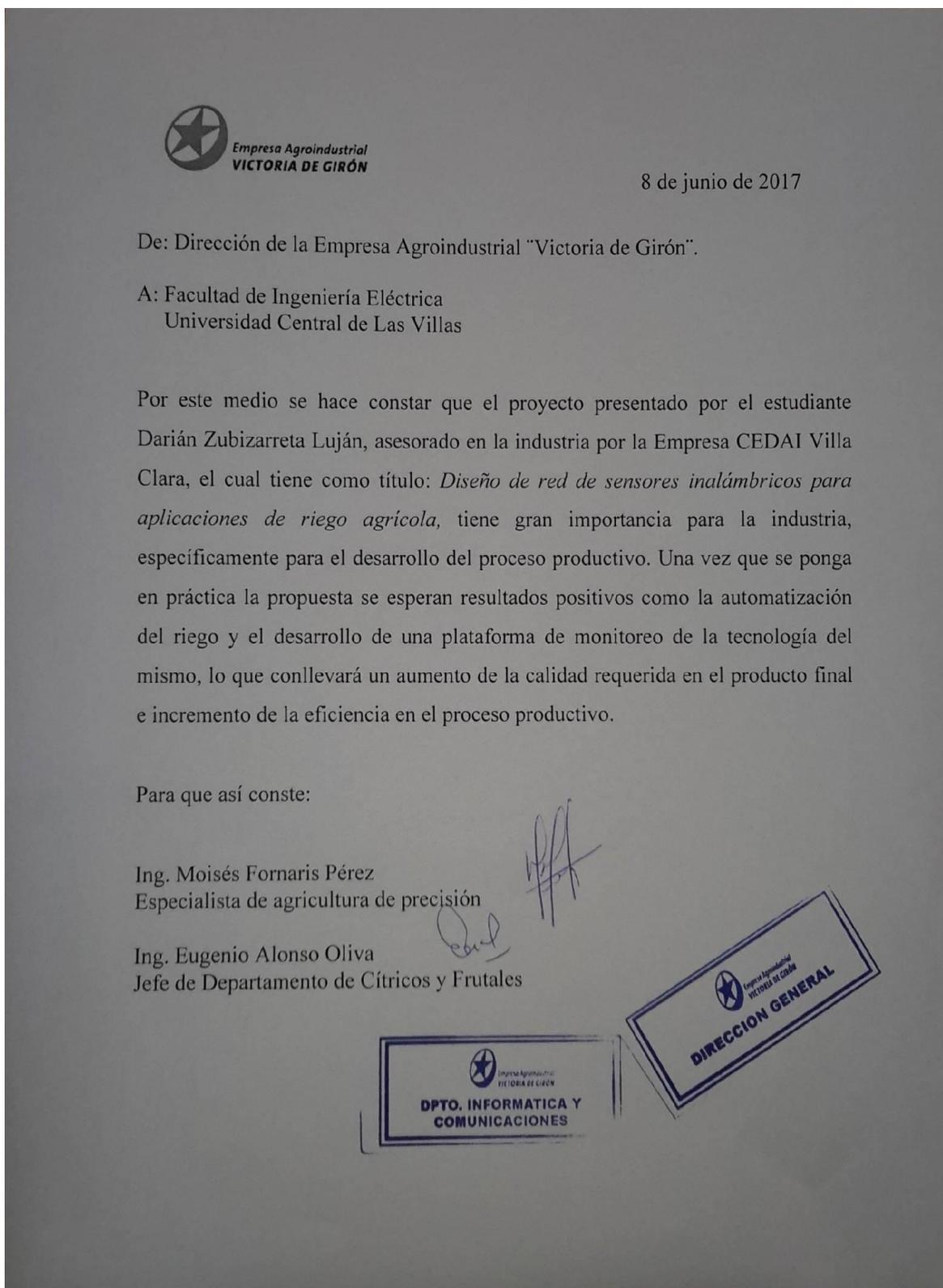


Fig. A.11 – Documento proporcionado por la empresa “Victoria de Girón” que avala la propuesta implementada (Fuente: Autor).