



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Red de sensores inalámbricos para el cultivo de la uva en la provincia de Granma

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría en Telemática

Autor: Ing. Yusmani Rojas Pérez

Tutor: Dr. C. Félix F. Álvarez Paliza

Santa Clara, Cuba, 2017

AGRADECIMIENTOS

Al colectivo de profesores de la Maestría por su dedicación.

Al tutor Dr. C. Félix F. Álvarez Paliza por sus orientaciones precisas.

A la Dr. C. Ileana Moreno Campdesuñer por su gran ayuda y apoyo.

A ETECSA por darme esta oportunidad de superación profesional.

Al colectivo de trabajadores del Centro Regional de Capacitación de Santa Clara.

A mis compañeros de trabajo por cumplir las tareas asignadas en mi ausencia.

Al grupo de Maestría donde siempre prevaleció un clima de compañerismo y cooperación.

A todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido con esta investigación.

DEDICATORIA

A toda mi familia por estar al alcance en todo momento

RESUMEN

En los últimos años, la tecnología inalámbrica ha revolucionado la manera de ver y entender las comunicaciones, eliminando restricciones y dando más flexibilidad a la hora de implantar una red. Gracias a esta evolución tecnológica se han desarrollado diferentes tipos de redes de sensores inalámbricos que hacen posible la captación de datos en casi cualquier localización. Estas redes están compuestas de nodos inalámbricos que permiten captar de manera constante diversas medidas a través de diferentes tipos de sensores y hasta un nodo central. En la investigación se realiza una revisión de las características de las redes de sensores inalámbricos, los factores que afectan su diseño y el impacto que estas tienen en la agricultura de precisión. Se exponen los principales parámetros agrometeorológicos que pueden ser supervisados y se explica la realización de mediciones en viñedos de humedad del suelo y temperatura ambiente, al ser estos determinantes en la aparición de plagas y la disminución de los rendimientos de la cosecha. Se propone el diseño de red para el área de cultivo seleccionada de la Cooperativa de Créditos y Servicios Oscar Montano, con la utilización del equipamiento de tres proveedores; realizando los cálculos correspondientes para el establecimiento de los enlaces. Se analiza la factibilidad de la propuesta de solución mediante simulación de la red y una valoración económica general.

Palabras Clave: redes de sensores inalámbricos, agricultura de precisión.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS UTILIZADAS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	5
1.1 Caracterización de las WSN	5
1.1.1 Elementos que componen las WSN.....	7
1.2 Eficiencia energética.....	9
1.3 Estándar ZigBee	10
1.3.1 Arquitectura.....	11
1.3.2 Dispositivos ZigBee.....	12
1.3.3 Direcciones físicas y direccionamiento dinámico	14
1.3.4 Proceso de asociación	14
1.3.5 Comunicación entre dispositivos.....	15
1.3.6 Seguridad.....	16
1.3.7 Topologías	16
1.4 Solución de ZigBee al problema de las colisiones.....	17
1.5 Los problemas del nodo oculto y del nodo expuesto	18
1.6 Protocolo basado en tramas piloto	20
1.7 Factores que afectan al diseño de una WSN.....	21
1.8 Parámetros agrometeorológicos fundamentales	22
1.9 Casos prácticos de utilización de WSN en viñedos	24
1.10 Conclusiones del capítulo	26
CAPÍTULO 2: DISEÑO DE LA WSN PARA LA SUPERVISIÓN DE PARÁMETROS AGROMETEOROLÓGICOS	27
2.1 Caracterización del área de cultivo a supervisar	27
2.2 Medición de la humedad del suelo en viñedos	29

2.3 Medición de la humedad y temperatura del ambiente	32
2.4 Principales proveedores de equipamiento para WSN	32
2.5 Cálculo de la altura de ubicación de las antenas de los nodos.....	33
2.6 Propuesta de diseño de la WSN con nodos eKo	35
2.6.1 Balance de potencia de los enlaces	37
2.7 Propuesta de diseño de WSN con equipamiento de Libelium	39
2.7.1 Balance de potencia de los enlaces en la red ZigBee.....	41
2.8 Valoración económica.....	42
2.9 Conclusiones del capítulo	44
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE SENSORES	
INALÁMBRICOS	45
3.1 Parámetros a considerar en la evaluación de la red de sensores	45
3.2. Configuración de la simulación	46
3.3 Resultados de las simulaciones.....	49
3.4 Conclusiones del capítulo	54
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	I
ANEXO I. Equipamiento del fabricante MEMSIC.....	VI
ANEXO II. Equipamiento del fabricante Libelium.....	XII
ANEXO III. Equipamiento del fabricante National Instruments	XV
ANEXO V. Solapamiento entre canales Zigbee y WiFi.....	XVII

INTRODUCCIÓN

No hay duda de que los principales factores que garantizan el mantenimiento de la existencia humana y sostienen la vida en la tierra son el agua y la comida. La agricultura provee la gran mayoría de los alimentos, pero consume una gran proporción del agua dulce disponible en el planeta. En las regiones con escasas precipitaciones la creciente competitividad por los recursos hídricos está causando importantes problemas de desabastecimiento que afectan principalmente a la agricultura. Además, los efectos del cambio climático auguran un progresivo empeoramiento de la situación actual.

Maximizar la eficiencia de uso del agua en los cultivos y, para este fin, aplicar estrategias y métodos de programación de riego más eficientes que los que se aplican actualmente, basándose para ello en la información climática, el estado del suelo y el de las propias plantas; así como en una interpretación adecuada de esta información para la toma de decisión, lleva a hablar de agricultura de precisión [1], entendiéndolo como un método de estimar, evaluar y entender las variaciones existentes en los cultivos, con el propósito de estimar con mayor exactitud las necesidades de fertilizantes, pesticidas y riego, las fases de desarrollo y maduración de los productos, los puntos óptimos de siembra y recolección.

La monitorización de explotaciones agrícolas representa una aplicación para las redes de sensores inalámbricos WSN (por sus siglas en inglés, Wireless Sensor Network) [2]. Mediante estas redes es posible recoger datos de amplios espacios naturales a través de numerosos sensores, transmitiendo las mediciones obtenidas en las diferentes localizaciones a través de los dispositivos de la red a lo largo de grandes distancias, hasta una localización central donde son almacenados. Debido al uso de este tipo de tecnologías es posible optimizar la producción en el entorno agrícola sin alterar sus condiciones.

Los dispositivos que componen las WSN son estables ante posibles condiciones ambientales adversas y disponen también de una autonomía elevada, lo que les

permite realizar las mediciones de forma continuada en tiempo real. Hoy en día casi cualquier magnitud puede ser medida por un sensor, ya que cada vez son más los tipos de sensores existentes y los que pueden ser utilizados en estos dispositivos, disponiendo de reducidas dimensiones y rangos de medida muy elevados con gran precisión.

En países como España y Estados Unidos un ejemplo de la utilización de esta tecnología lo constituye la monitorización de humedad y temperatura en viñedos. La mayoría de las plagas y enfermedades que aparecen en este cultivo están ampliamente relacionadas con estas variables y con los niveles que se presentan en la planta.

En el caso de Cuba el fomento del cultivo de la uva en los últimos años con el objetivo de sustituir importaciones hacen ver que la utilización de esta tecnología podría contribuir a incrementar las producciones a un menor costo, alcanzar mayores rendimientos y permitirían su estudio para posterior introducción en otros cultivos.

En la Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) Oscar Montano de la provincia de Granma el uso de este tipo de tecnologías en las áreas que se encuentran en explotación con este cultivo es nulo. Como causa fundamental se encuentra el desconocimiento que existe en este campo en las entidades correspondientes, pues a pesar de contar con fuentes de financiamiento, no se realiza la implementación de la misma. De aquí, que el problema de investigación de este trabajo sea:

Deficiente infraestructura tecnológica en la recolección de información procedente de las áreas destinadas al cultivo de la uva en la CCS Oscar Montano que no permiten la utilización más eficiente del agua e insumos.

Objeto de la investigación: Redes de sensores inalámbricos (WSN).

Campo de acción: Redes de sensores inalámbricos en agricultura de precisión.

El objetivo general de esta investigación es: Desarrollar una red de sensores inalámbricos para la recolección de información en los viñedos de la CCS Oscar

Montano.

Para dar cumplimiento al objetivo general se precisan como objetivos específicos:

1. Caracterizar las redes de sensores inalámbricos utilizadas en la agricultura de precisión.
2. Diseñar una red WSN para la supervisión de los parámetros agrometeorológicos en los viñedos de la CCS Oscar Montano.
3. Evaluar el funcionamiento de la red propuesta.

El desarrollo de la investigación proporciona respuestas a las siguientes interrogantes científicas:

1. ¿Cuáles son las características de las redes de sensores inalámbricos que permiten su utilización en la supervisión de parámetros agrometeorológicos en viñedos?
2. ¿Qué criterios deben ser considerados en el diseño de una red de sensores inalámbricos para su implementación en los viñedos de la CCS Oscar Montano?
3. ¿Cómo evaluar el diseño de red de sensores inalámbricos propuesto para el viñedo de la CCS Oscar Montano?

Los métodos científicos sobre los cuales se desarrolla la investigación son:

- El histórico lógico el cual permite contextualizar el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo
- El analítico-sintético ya que es necesario trabajar cada componente del diseño y sus relaciones y luego lograr la integración de las partes constitutivas del objeto de investigación para llegar al diseño de la red
- El inductivo-deductivo a través del cual se logra establecer generalidades en cuanto al diseño de la red a partir de las experiencias particulares de especialistas.
- La modelación mediante la cual se crean abstracciones con vistas a explicar la realidad.

- En la evaluación de la propuesta se emplearán criterios de especialistas con el propósito de valorar la validez de la misma.

Como resultados de la presente tesis se espera obtener:

1. La caracterización la tecnología WSN utilizada en la agricultura de precisión.
2. Una propuesta de red viable para garantizar la supervisión de los parámetros agrometeorológicos en los viñedos de la CCS Oscar Montano que permitirán la utilización de manera más eficiente de los recursos hídricos e insumos.
3. Un material de estudio para la futura implementación de esta tecnología.

El impacto social que se lograría al implementar esta red en el cultivo de la uva es que se podrían incrementar las producciones con menos costos, lo que contribuiría a la reducción de precios y a un mejor abastecimiento para la población y sectores priorizados. El impacto económico, de implementarse esta tecnología, es que se lograría mayor productividad con menos costos, la sustitución de importaciones, el uso eficiente de recursos y la protección del medio ambiente. El impacto científico que se deriva de esta investigación es la sistematización de la teoría sobre la tecnología escogida, recopilando datos técnicos y el análisis de los diferentes equipamientos y proveedores.

El trabajo está estructurado en tres capítulos. En el primero se realiza una caracterización de las redes de sensores inalámbricos y un estudio de las tecnologías más usadas en el mundo en la agricultura de precisión para el cultivo de la uva. En el segundo capítulo se diseña la red para supervisar los parámetros agrometeorológicos en los viñedos de la CCS Oscar Montano, la propuesta de equipamiento, así como las diferentes alternativas en cuanto a modelos y fabricantes. En el tercer y último capítulo se analiza el funcionamiento de la propuesta de solución mediante simulación de la red. Las conclusiones del trabajo abordan los resultados obtenidos de la investigación. En los anexos se podrá consultar información adicional sobre la tecnología estudiada, el equipamiento alternativo propuesto en caso de fallo de algún proveedor, esquemas de los enlaces, configuración de la simulación y cálculos económicos.

CAPÍTULO 1: REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS UTILIZADAS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En este capítulo se realiza una revisión general de las características de las redes de sensores inalámbricos para la aplicación en la agricultura de precisión, se exponen los factores a tener en cuenta en el diseño de estas redes, los principales parámetros que pueden ser monitoreados, así como ejemplos de implementación de esta tecnología en viñedos.

1.1 Caracterización de las WSN

Las redes de sensores inalámbricos por sus siglas en inglés WSN (*Wireless Sensor Network*) [2], son un conjunto de dispositivos con capacidad de tratar información procedente de sensores, que establecen una comunicación sin cables interconectados entre sí a través de una red inalámbrica y a su vez conectados a un sistema central en el que se recopilará la información recogida por cada uno de los sensores, con el fin de llevar a cabo un objetivo común [3], [4].

Están constituidas por un número determinado de nodos sensores de bajo costo y consumo de energía, estos dispositivos realizan funciones muy específicas de monitorización, procesamiento de datos y comunicación. El funcionamiento básico de estas redes consiste en realizar una serie de mediciones sobre el medio, transformar dicha información en el propio nodo y transmitirla fuera de la red de sensores inalámbricos a una estación base, donde la información será almacenada y tratada para finalmente pasar a un servidor con mayor capacidad que permita conformar un histórico o realizar un análisis de datos. El tiempo de vida de la red de sensores inalámbricos depende del tiempo de vida de la batería de sus nodos al ser dispositivos se encuentran dispersos de manera ad-hoc [5] en una determinada área a monitorizar.

Las WSN tienen características [6] que las hacen cada vez más atractivas para su implementación:

- Gestión de recursos y energía: los elementos que componen estas redes al ser dispositivos de pequeño tamaño con limitaciones de procesamiento y de energía deben ser capaces de realizar las operaciones básicas con la mayor eficiencia posible [7].
- Escalabilidad, movilidad y topología de red dinámica: el entorno altamente dinámico donde operan las redes de sensores necesita de mecanismos robustos de funcionamiento tolerantes a fallos. A su vez, los propios sensores necesitarán autoconfigurarse para adaptarse a los cambios en la red.
- Organización dinámica de la red: muchos de los recursos con los que se cuenta en las redes de sensores son dinámicos (la energía, el ancho de banda, capacidad de procesamiento, número de nodos). La organización de dichos elementos es una parte esencial de la propia red. Con este objetivo tiene que existir un mecanismo de descubrimiento que permita saber en todo momento cómo está la red y quiénes están accesibles.
- Integración en el mundo físico: los servicios que proporcionen las plataformas tienen que soportar las características de tiempo real que demandan las aplicaciones.
- Calidad de servicio: es un término muy amplio que puede tener diferentes interpretaciones. En lo referente a las redes de sensores inalámbricas, son importantes dos ámbitos, el de aplicación y el de red. El primero tendrá en cuenta las necesidades de la aplicación en cuanto a medidas de los nodos, el despliegue o los nodos activos, entre otros. El ámbito de red se centrará en cómo cumplir las necesidades de las aplicaciones, gestionando el ancho de banda y la energía.
- Seguridad: en muchas ocasiones la información con la que tratan los sensores puede ser sensible para el usuario. Así mismo, las condiciones de despliegue y el uso de tecnologías inalámbricas para las comunicaciones los hacen más vulnerables a los ataques malintencionados.

1.1.1 Elementos que componen las WSN

Están compuestas por nodos inalámbricos, puertas de enlace y estación base. Los nodos inalámbricos o nodos sensores son llamados también motas, del inglés “mote”[8], por su reducido tamaño. Son dispositivos electrónicos capaces de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destinatario. Estos nodos son diseñados y programados para formar parte de una red con un objetivo particular, lo que quiere decir que de manera aislada tiene muy poca utilidad. Los nodos inalámbricos se clasifican en dos tipos:

- Nodos intermedios: también conocidos como enrutadores son los encargados de extender el alcance de la red y proveer rutas alternativas para el tránsito de mensajes que se envían a la puerta de enlace.
- Nodos finales: son considerados dispositivos de funciones reducidas pues solo tienen la labor de sensor la información y transmitirla al siguiente nodo de la red.

El hardware de los nodos finales tiene varias partes bien diferenciadas, que se detallan en la figura 1.1

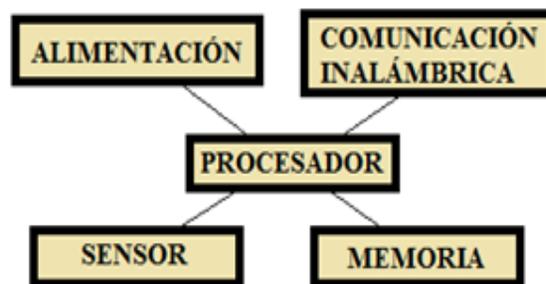


Figura 1.1: Arquitectura de un nodo inalámbrico

Procesador: es el núcleo de un nodo sensor inalámbrico. Recoge datos de los sensores, procesa estos datos, decide cuándo y dónde enviarlo, recibe datos de otros nodos de sensores, y decide sobre el comportamiento del actuador; es la unidad central de procesamiento (CPU) del nodo.

Memoria: es utilizada para almacenar programas y datos intermedios, las clases más relevantes de memoria en estos dispositivos son las integradas en el chip de un microcontrolador y las memorias flash, la memoria RAM fuera del chip es raramente usada. Las memorias flash son usadas gracias a su bajo coste y su gran capacidad de almacenamiento.

Sensores y actuadores: son la interfaz real con el mundo físico, son dispositivos que producen una respuesta medible ante un cambio en un estado físico, como puede ser temperatura o humedad. Los sensores detectan o miden cambios físicos en el área que están monitorizando.

Comunicación inalámbrica: consiste en un dispositivo que permite enviar y recibir datos para comunicarse con otros dispositivos dentro de su rango de transmisión. Los nodos usan la banda ISM que son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial en áreas industrial, científica y médica. Las funcionalidades de emisión y recepción se combinan en un solo aparato que es llamado transceptor. Los estados de operación son emitir, recibir, dormir e inactividad.

Alimentación: normalmente la fuente de alimentación son baterías. Para las situaciones en donde no se dispone de red eléctrica y la posibilidad de sustituir las baterías es muy complicada, se utilizan diferentes técnicas para alimentar el nodo, como puede ser mediante paneles solares. Ante la limitación de la vida útil del dispositivo hay que realizar una gestión eficiente del consumo energético. La mayor cantidad de energía es consumida en la transmisión de información, siendo menor en el procesador y uso de los sensores.

Las puertas de enlace son elementos para la interconexión entre la WSN y una red de datos (TCP/IP). Es un nodo especial sin elemento sensor, cuyo objetivo es actuar como puente entre dos redes diferentes. En aplicaciones donde se usan WSN, éstas no pueden operar completamente aisladas y deben contar con alguna forma de monitorización y acceso a la información adquirida por los nodos de la red de sensores.

La estación base es un ordenador común. Los datos van a parar a este equipo y son almacenados dentro de una base de datos, los usuarios acceden remotamente para poder observar y estudiar los datos almacenados.

1.2 Eficiencia energética

El objetivo de la eficiencia energética [9] es maximizar el tiempo de vida de los dispositivos. Diseñar los nodos para un bajo consumo supone elegir componentes de baja potencia. El primer parámetro a considerar es el consumo de energía de la unidad central de procesamiento (CPU), el sensor, el radiotransceptor y, posiblemente, de otros elementos, como la memoria externa y los periféricos durante el modo normal de operación.

Para el ahorro de energía los nodos pasan por los estados que se muestran en la figura 1.2:

- Inactivo (*Sleep*): el nodo pasa la mayor parte del tiempo en este estado sin actividad.
- Levantarse (*Wakeup*): es el tiempo de transición del estado de inactividad al estado activo y el mismo debe ser minimizado.
- Activo (*Active*): debe estar el mínimo período de tiempo de trabajo y retornar de inmediato al estado inactivo.

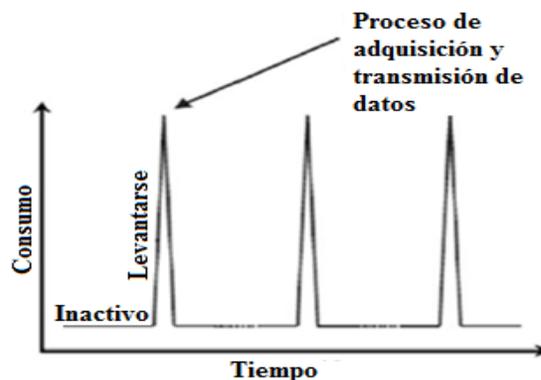


Figura 1.2: Estados de un nodo sensor

La CPU es capaz de quedar en estado inactivo (*sleep*) mientras no tenga nada que hacer. El envío de datos desde los nodos puede ser de tres formas: de modo

continuo en los intervalos establecidos, dirigido por eventos, envía cuando se cumple cierta condición o dirigido por consulta, solo cuando se le solicita. También hay sistemas híbridos que utilizan una combinación de los antes mencionados.

1.3 Estándar ZigBee

El desarrollo de este estándar lo realizó la Alianza ZigBee [10]; consorcio de empresas fabricantes de semiconductores, proveedores de tecnología, fabricantes de equipos originales (OEM) y usuarios finales, que han desarrollado una norma común para la gestión de redes inalámbricas de sensores y automatización. Tiene alrededor de 150 miembros, incluyendo ocho fabricantes (Ember, Freescale, Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, y Samsung).

El estándar ZigBee define un conjunto de protocolos para redes inalámbricas de corta distancia de muy bajo consumo energético y bajo costo, que permita usar equipos alimentados con batería y con tasas de transferencia de datos reducidas. Opera en las bandas libres ISM (*Industrial, Scientific & Medical*) de 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos). Puede transferir datos hasta 250 Kbps. Este protocolo adopta al estándar IEEE 802.15.4 [11], [12], [13] para sus dos primeras capas, es decir la capa física (PHY) y la subcapa de acceso al medio (MAC) y agrega la capa de red y de aplicación. Tiene la capacidad de operar en redes de gran densidad, esta característica ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que entre más nodos existan dentro de una red, entonces, mayor número de rutas alternativas existirán para garantizar que un paquete llegue a su destino.

Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Teóricamente pueden existir hasta 16 000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65 000 nodos, obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas (memoria disponible y ancho de banda).

Es un protocolo de comunicación multisalto, es decir, que se puede establecer comunicación entre dos nodos aunque estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten, de esta manera, se incrementa el área de cobertura de la red.

1.3.1 Arquitectura

En la Figura 1.3 se muestran las capas del protocolo ZigBee. Las 2 capas inferiores, o sea la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) son las definidas por el standard IEEE 802.15.4.

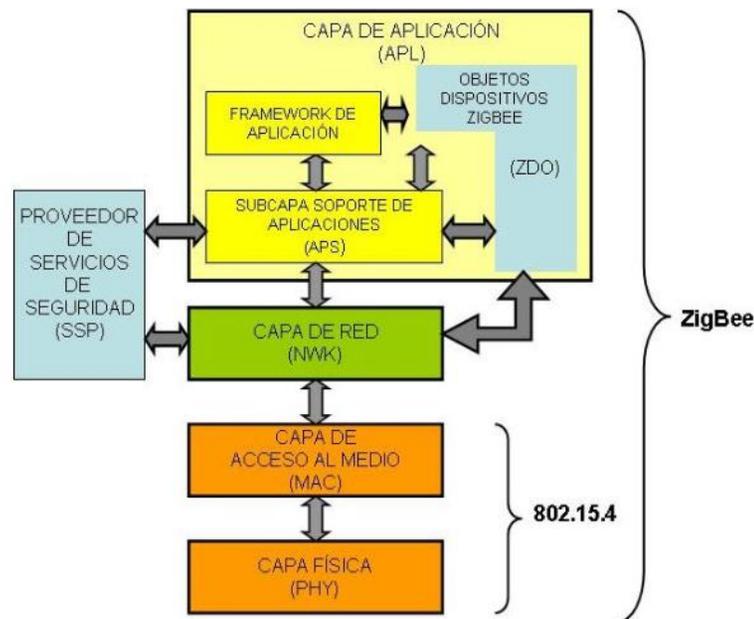


Figura 1.3: Arquitectura de ZigBee

Las capas de red (NWK) y de aplicación (APL) se definen en ZigBee:

- **ZigBee Device Objects (ZDO):** es un protocolo de la pila del protocolo ZigBee, es responsable de la gestión de dispositivos en general, seguridad, claves y políticas.
- **ZDO Management Plane:** este plano se extiende por la *Application Support Sub-Layer (APS)* y las capas NWK, permitiendo la comunicación entre estas capas al realizar sus tareas internas. Además permite que el ZDO haga frente

a las peticiones de las solicitudes de acceso y funciones de seguridad de la red por medio de mensajes ZDP.

- *Application Support Sub-Layer (APS)*: es responsable de la comunicación con la aplicación correspondiente y de mantener tablas de unión entre las aplicaciones.
- *Network Layer (NWK)*: maneja el direccionamiento de red y el encaminamiento o routing produciendo acciones en la MAC.
- *Security Plane*: es un tramo de la arquitectura que se extiende e interactúa con el APS y las capas NWK, proporcionando servicios de seguridad. Como por ejemplo: la gestión de la seguridad de claves, cifrado y descifrado de datos.
- *Application Framework (AF)*: contiene los objetos de aplicación y facilita la interacción entre las aplicaciones y la capa APS. Los objetos de la aplicación interactúan con la capa APS a través de una interfaz conocida como *Service Access Point (SAP)*.
- *Service Access Point (SAP)*: implementa un conjunto de operaciones para pasar información y los comandos entre las capas.
- *Application Endpoints*: un nodo puede tener varias aplicaciones que se ejecutan en él (varios sensores) cada uno de ellos es una aplicación. Estas instancias de aplicación sobre un nodo se dice que son puntos finales (*endpoints*), donde los mensajes pueden originarse y/o terminarse.
- *Atributos*: cada elemento de datos que pasa entre los dispositivos de una red ZigBee se llama un atributo. Cada atributo tiene su propio y único identificador.
- *Cluster*: es la agrupación de atributos, donde cada grupo tiene su propio identificador único.

1.3.2 Dispositivos ZigBee

Se definen tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee según su papel en la red

- *Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC)*: es indispensable que exista un dispositivo coordinador para que pueda existir una red ZigBee. Es el

encargado de proporcionar las direcciones dinámicas de red a sus dispositivos hijos. No puede existir más de un coordinador en una red ZigBee, en el caso de existir más de una red ZigBee en el mismo medio físico, cada una de ellas se distingue por un identificador diferente, y existe una red por cada grupo de coordinador y sus hijos. Como el coordinador tiene que estar continuamente escuchando el medio físico, el mismo no puede entrar en modo de bajo consumo y suele estar alimentado mediante fuente de tensión. Normalmente, el coordinador hace de pasarela entre la WSN y el software que la gestiona y monitoriza sus datos.

- *Router ZigBee (ZR)*: actúa como dispositivo hijo, en cuanto necesita que un padre (un coordinador u otro router) le proporcione su dirección dinámica de red y le asocie a una red; pero también actúa como dispositivo padre, en cuanto puede proporcionar direcciones de red a otros dispositivos hijos (otros routers o end devices). Por el mismo motivo que el coordinador, no puede entrar en modo de bajo consumo.
- *Dispositivo final (ZigBee end device, ZED)*: Sólo puede actuar como dispositivo hijo, necesita comunicarse con un dispositivo padre para poder estar asociado a una red y que le proporcionen una dirección de red. Si el dispositivo padre cae y no encuentra otro padre, perderá su configuración de red, hasta que encuentre de nuevo un padre (el mismo o uno diferente) que le asigne una nueva configuración de red.

En base a la funcionalidad del *hardware* puede plantearse una segunda clasificación:

- *Dispositivo de funcionalidad completa (FFD)*: es capaz de recibir mensajes en formato del estándar IEEE 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaz con los usuarios.
- *Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD)*: tiene capacidad y funcionalidad limitadas con el objetivo de conseguir un bajo costo y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

Usualmente, el coordinador suele ser un FFD, y los ZED suelen ser RFD. En el caso de los enrutadores pueden tener hardware específico que esté a mitad de camino o ser RFD como los ZED, pero con fuente de suministro eléctrico constante. Normalmente no suelen ser de tipo FFD por motivos de precio, aunque no hay nada que lo impida.

1.3.3 Direcciones físicas y direccionamiento dinámico

Cada dispositivo debe tener una dirección física única que se comunica al coordinador en el proceso de asociación. Así el coordinador distingue si el dispositivo estaba ya asociado o no. Posteriormente, el coordinador le asigna al dispositivo final una dirección dinámica de 2 bytes única en esa red ZigBee, mediante la cual se enviarán y se recibirán mensajes, de modo que la dirección IEEE 802.15.4 ya no se utiliza más, salvo que quiera comunicarse dentro de la trama de datos, aunque no siempre es viable, dada la reducida MTU (*Maximum Transmission Unit*) de ZigBee.

1.3.4 Proceso de asociación

Para que exista comunicación entre un nodo y la red a la que pertenece, debe de haber algún mecanismo por el cual alguien, al que llamamos padre, configura a dicho dispositivo, llamado hijo, con los parámetros necesarios para estar en dicha red. A este proceso, se le llama asociación.

Básicamente, en el proceso, el dispositivo padre recibe la dirección física del hijo, su identificador de red único y su perfil de red. Si le permite la conexión a su red, le envía cuál es su dirección dinámica para la conexión. Puede que el padre ya tuviese configurado al hijo y que éste simplemente se hubiese desconectado temporalmente, por ejemplo por un fallo de batería, en dicho caso, se le comunicarán los mismos valores.

De acuerdo a la topología de red, puede haber dispositivos padres e hijos, siendo los padres los responsables de la configuración de red de sus hijos. Puede haber dispositivos que sean padres e hijos a la vez (típicamente los enrutadores) y el coordinador es el único dispositivo que no puede ser hijo de nadie.

1.3.5 Comunicación entre dispositivos

Para que los dispositivos que forman una aplicación puedan comunicarse, deben utilizar un protocolo de aplicación compartido. Estas convenciones se agrupan en perfiles. Las decisiones de asociación se deciden en base a la coincidencia entre identificadores de grupo, de entrada y salida, que son únicos en el contexto de un perfil dado y se asocian a un flujo de datos de entrada o salida en un dispositivo, las tablas de asociación mantienen los pares de identificadores fuente y destino.

En base a la información disponible, el descubrimiento de dispositivos puede adecuarse utilizando varios métodos distintos. Si se conoce la dirección de red, se pide la dirección IEEE 802.15.4 utilizando difusión única. Si no es así, se pide por difusión a todos y la dirección IEEE 802.15.4 forma parte de la respuesta. Los dispositivos finales responden con la dirección propia solicitada, mientras que los nodos intermedios o enrutadores y coordinadores envían también las direcciones de todos los dispositivos asociados a ellos.

Este protocolo extendido permite indagar acerca de dispositivos dentro de una red y sus servicios ofrecidos a nodos externos a la misma. Los identificadores de grupo favorecen la asociación entre entidades complementarias por medio de tablas de asociación, mantenidas en los coordinadores ZigBee ya que estas tablas siempre han de estar disponibles en una red (los coordinadores son, de entre todos los nodos, los que con mayor seguridad dispondrán de una alimentación continua). Las salvas a esas tablas, de ser necesarios para la aplicación, han de realizarse en niveles superiores. Por otra parte, el establecimiento de asociaciones necesita que se haya formado un enlace de comunicación; tras ello, se decide si adjuntar un nuevo nodo a la red en base a la aplicación y las políticas de seguridad.

Luego de establecerse la asociación, pueden iniciarse las comunicaciones. El direccionamiento directo utiliza la dirección de radio y el número del dispositivo final; por su parte, el indirecto necesita toda la información relevante (dirección, dispositivo final, grupo y atributo) y la envía al coordinador de la red, que mantiene esta información por él y traduce sus peticiones de comunicación. Este direccionamiento

indirecto es especialmente útil para favorecer el uso de dispositivos muy sencillos y minimizar el almacenamiento interno necesario. Además de estos dos métodos, se puede hacer difusión a todos los dispositivos finales y direccionamiento de grupos para comunicarse con grupos de dispositivos finales de uno o varios dispositivos distintos.

1.3.6 Seguridad

La seguridad de las transmisiones y de los datos son puntos clave en la tecnología ZigBee. Ésta utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, la cual especifica 4 servicios de seguridad:

- Control de accesos: el dispositivo mantiene una lista de los dispositivos comprobados en la red.
- Datos encriptados: usan una encriptación con un código de 128 bits.
- Integración de tramas: protegen los datos de ser modificados por otros.
- Secuencias de refresco: comprueban que las tramas no han sido reemplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas.

Por motivos de seguridad puede interesar que ningún dispositivo se asocie a la red. Esto se consigue definiendo un perfil de red específico. De este modo, cuando un dispositivo intenta asociarse, el coordinador le solicita su perfil de red, y si no coincide con el suyo, se deniega la asociación.

1.3.7 Topologías

La topología se refiere a la configuración de los componentes de *hardware* y como los datos son transmitidos a través de esa configuración. Cada topología es apropiada bajo ciertas circunstancias y puede ser inapropiada en otras. La figura 1.4 muestra las tres topologías recogidas por ZigBee.

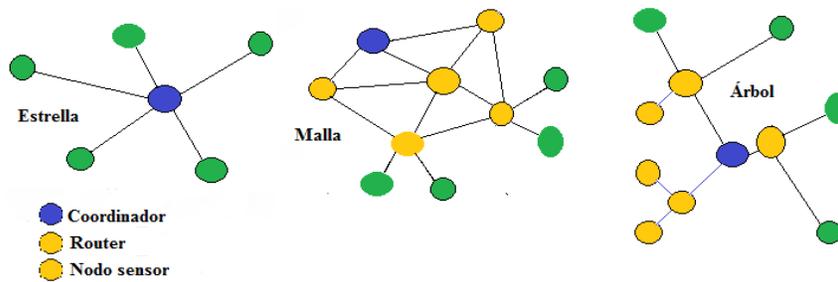


Figura 1.4: Topologías en las que puede configurarse una red ZigBee, basado en [14]

En la topología en estrella la información enviada solo da un salto y todos los nodos sensores están en comunicación directa con el coordinador. Los nodos finales no intercambian información entre ellos. Esta topología es la que menor gasto de energía desarrolla, pero por el contrario está limitada por la distancia de transmisión vía radio.

En el caso de la topología en malla forma un sistema donde todos los nodos intermedios son idénticos. A diferencia de la topología en estrella, los nodos pueden enviarse mensajes entre ellos. Esta topología es altamente tolerante a fallos ya que cada nodo tiene diferentes caminos para comunicarse con la puerta de enlace. Si un nodo falla, la red se reconfigurará alrededor del nodo fallido automáticamente.

Por su parte la topología en árbol combina las ventajas de los otros dos tipos, la simplicidad y el bajo consumo de una topología en estrella, así como la posibilidad de cubrir una gran extensión y de reorganizarse ante fallos de la topología en malla. Este tipo crea una red en estrella alrededor de nodos intermedios pertenecientes a una red en malla. Los nodos intermedios dan la posibilidad de ampliar la red y de corregir fallos y los nodos finales se conectan con los nodos intermedios cercanos ahorrando energía.

1.4 Solución de ZigBee al problema de las colisiones

Uno de los problemas que se presenta en una WSN son las colisiones. Una colisión se produce cuando dos o más dispositivos transmiten datos en el mismo canal al mismo tiempo. Si el protocolo de comunicaciones que se está utilizando tiene un mecanismo de detección de integridad en los paquetes, como es el caso de ZigBee,

el mensaje será detectado como erróneo y no se transmitirá a las capas altas del firmware la recepción de un mensaje de radio, con lo que la información se perderá. Según la forma en que esté configurado el nodo emisor, si está esperando un ACK o una respuesta que no recibe, éste puede desconectarse de la red. Si todo está bien configurado, el nodo volverá a conectarse a la red y volverá a tratar de enviar el mensaje, proceso en el que podrán producirse nuevamente colisiones.

En el proceso de asociación también podrían producirse colisiones, por lo que si en un entorno hay una gran cantidad de dispositivos transmitiendo información, los problemas pueden ser enormes. Este es el motivo por el que se aconseja testear las redes ZigBee con al menos el doble o el triple de los dispositivos que vayan a desplegarse finalmente, de modo que podamos garantizar la robustez de la solución.

Para hacer frente al problema de las colisiones, ZigBee utiliza un mecanismo CSMA/CA (siglas en inglés de Acceso Múltiple por Detección de Portadora / Evitando Colisiones) [15]. Éste es un protocolo muy básico y sencillo de comunicación entre dispositivos inalámbricos. En él, el nodo emisor comprueba que el medio no esté siendo ocupado por otro nodo y, si esto es así, emite el mensaje. En caso contrario, si el canal está siendo ocupado, se espera una cantidad de tiempo que se calcula aleatoriamente y se vuelve a intentar el proceso de comunicación.

1.5 Los problemas del nodo oculto y del nodo expuesto

El algoritmo de CSMA-CA tiene problemas cuando aparece un nodo oculto (figura 1.5). Si los nodos A y C están fuera de alcance entre ellos pero existe un nodo B que puede comunicarse tanto con A como con C, entonces cuando A transmita algo a B, el nodo C no se enterará, análogamente cuando C transmita a B, A no lo recibirá.

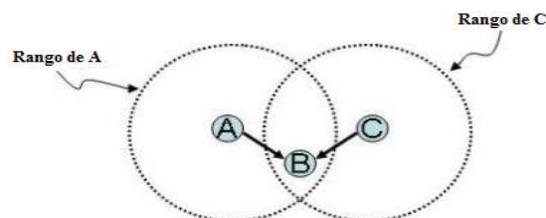


Figura 1.5: Problema del nodo oculto.

Si por alguna razón transmiten A y C en el mismo canal y en el mismo momento, esto creará una colisión de paquetes en B. Una forma de resolver este problema es aumentando la potencia en los nodos A y C de modo que A reciba a C y viceversa.

En la capa MAC de IEEE 802.15.4 a diferencia de IEEE 802.11, no hay un mecanismo de diálogo (*handshake*) que soporte RTS/CTS (*Request To Send/Clear To Send*) así que no hay solución a nivel *software* de MAC.

El otro problema es el del nodo expuesto. En la figura 1.6, el nodo E le transmite un mensaje a D mientras que en el mismo momento F le transmite a G. El nodo D está fuera de alcance del nodo F por lo tanto E y F podrían transmitir en simultáneo sin colisiones. Pero el nodo E cuando aplique el algoritmo de CSMA-CA percibirá la transmisión del nodo F, considerará que el canal está ocupado y no transmitirá. A esto se lo denomina el problema del nodo expuesto. En este caso el problema se podría solucionar disminuyendo la potencia a la mínima necesaria para que el receptor reciba correctamente la información, cambiando la ubicación de los nodos, o usando RTS/CTS que como se dijo no está soportado en IEEE 802.15.4

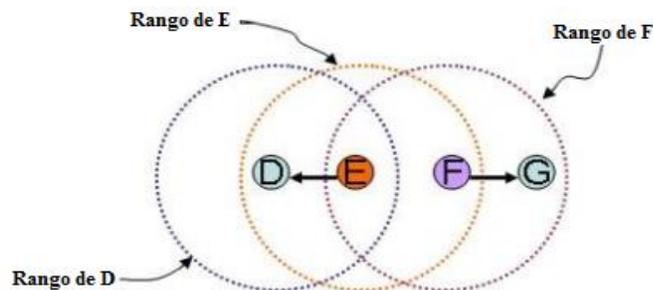


Figura 1.6: Problema del nodo expuesto.

Si bien ZigBee utiliza el mecanismo CSMA/CA, cuando la ocasión lo ha requerido, las empresas han desarrollado sus propios mecanismos de comunicaciones, modificando lo que han creído conveniente. De aquí ha salido la solución al problema del nodo oculto, mediante la utilización de un mecanismo llamado DFW-MAC (*Distributed Foundation Wireless – Medium Access Control*) [16], [17]. Con este protocolo, la comunicación se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- El equipo origen envía una trama corta de solicitud de transmisión. Esta trama recibe el nombre de RTS (*Ready To Send*).
- Si el equipo destino está preparado para recibir recibirá dicha trama y devolverá por respuesta una trama que se ha dado en llamar CTS (*Clear To Send*).
- Si el nodo que envió la trama RTS recibe una trama CTS, emitirá la trama de datos propiamente dicha (DATA). En caso contrario se produce una señal RxBUSY y el emisor espera un tiempo aleatorio, tras el cual intenta volver a realizar la transmisión. Tras un número determinado de intentos fallidos, se produce un error de transmisión.
- El equipo de destino contestará con la confirmación positiva (ACK) indicando que la trama se ha recibido correctamente, o con la contestación negativa (NAK) indicando error de recepción.
- Si el emisor recibe una respuesta NAK tratará de repetir la transmisión.

Este método asegura que el mensaje se reciba correctamente. Sin embargo, debido a las dos transmisiones pierde un poco de eficiencia, retrasando en aproximadamente un segundo la entrega de cada mensaje, incrementa el volumen de tráfico en la red, reduce sus prestaciones e incrementa el gasto energético. Por otra parte, si bien este protocolo resuelve el problema planteado de nodo oculto, no es capaz de resolver el problema de nodo expuesto.

1.6 Protocolo basado en tramas piloto

Este protocolo está contemplado en ZigBee y está basado en el envío de tramas piloto [18]–[20]. El principio fundamental de este protocolo es que el coordinador de la red puede emitir periódicamente unas tramas piloto a intervalos que pueden ser desde 15 a 245 milisegundos. El tiempo entre dichas tramas se divide en 16 ranuras de tiempo independientemente de la duración del intervalo. Un dispositivo puede transmitir cuando sea durante una ranura de tiempo, pero debe terminar la transmisión antes de la siguiente trama piloto.

Por otro lado, el coordinador puede asignar ranuras de tiempo determinadas a un solo equipo que requiera un ancho de banda permanente o transmisiones con una latencia muy reducida. Estas ranuras de tiempo asignadas se llaman GTS (*Guaranted Time Slots*) y juntas forman un periodo de tiempo que se conoce como periodo de contención libre, el cual se localiza antes del envío de la próxima señal piloto. Este periodo varía en función de la demanda de los demás dispositivos. Al usar GTS, todos los dispositivos deben completar todas sus transacciones antes de que el periodo de contención libre comience. En una red que utilice comunicación por pilotos y ranuras de tiempo, una forma de proceder de un dispositivo que desea comunicar es el comprobar en primer lugar si algún otro dispositivo está utilizando esa ranura de tiempo. Si algún otro dispositivo está transmitiendo en dicha ranura de tiempo, el dispositivo salta un número aleatorio de ranuras de tiempo o indica fallo de conexión tras varios intentos.

Si bien, el principal inconveniente de esta solución es que los hijos han de estar permanentemente escuchando el canal para recibir las tramas piloto, lo que implica que han de estar siempre en modo activo sin poder entrar en modo de bajo consumo, siendo esto poco recomendable utilizarlo en dispositivos alimentados con baterías. En estos casos hay otros protocolos de comunicación más fiables y robustos.

1.7 Factores que afectan al diseño de una WSN

Al diseñar una WSN hay que tener en cuenta diferentes factores que pueden ser determinantes para el adecuado funcionamiento de la aplicación. En las redes de sensores el consumo de energía es de suma importancia, puesto que los nodos al alimentarse con baterías, se requiere que los periodos de vida de estos dispositivos sean los mayores posibles, se debe intentar reducir y optimizar el consumo de energía, es importante conocer cuánto tiempo estará el nodo alimentado y cuándo dejará de funcionar.

El entorno es otro de los factores a tener en cuenta. Muchos de los nodos deben sobrevivir en ambientes difíciles, soportando golpes, polvo, agua, altas temperaturas

y para que soporten estos ambientes es importante que dispongan de dispositivos de protección.

Debido a que la comunicación se realiza de manera inalámbrica, es importante considerar el medio de transmisión pues se utiliza la banda ISM que es usada en numerosas aplicaciones al no requerir licencia en la mayoría de los países. No obstante por lo general en entornos agrarios al ser zonas distantes el nivel de utilización del espectro en estas bandas es prácticamente nulo.

La escalabilidad es otro elemento de suma importancia pues, dependiendo de la aplicación en la que será usada la red, el número de nodos puede crecer hasta llegar a varios miles. Cuanto mayor es el número de nodos, mayor es la información que los demás nodos deben retransmitir y puede llegar un momento en que los nodos más cercanos a las puertas de enlace puedan fallar debido a la gran cantidad de información que deben transmitir.

Los nodos deben ser capaces de tolerar los fallos en la red. Cuando un nodo falla, solo debe verse perjudicada la información que ese nodo recoge a través de los sensores y no la información que éste debe retransmitir. Para evitar esto, los nodos deben ser lo suficientemente inteligentes como para saber que el nodo al que se manda la información está fallando y que debe buscar otro camino para enviar la información. Dependiendo de la topología de la red, los nodos pueden funcionar de varias maneras. Hay nodos que interesa más que transmitan información, otros que capturen datos de los sensores, otros que solo procesen información. La red puede estar compuesta por un gran número de nodos por lo que es importante saber qué topología es la más adecuada.

1.8 Parámetros agrometeorológicos fundamentales

Dentro de los parámetros agrometeorológicos que pueden ser supervisados se encuentran:

- ✓ Humedad y cantidad de agua en el suelo: la agricultura en muchas zonas tiene como característica limitante la lluvia caída, relacionándose con la

cantidad de agua almacenada en el suelo a disposición de las plantas. Esta característica puede medirse como humedad del suelo o como cantidad de agua en el suelo y es un parámetro importante que puede llegar a indicar el éxito o fracaso del cultivo. Es útil conocer estos valores, hay cultivos que pueden ser irrigados y estos niveles indican dónde y cuándo hacerlo. Otros cultivos cumplen mejores condiciones de siembra cuando estos niveles están entre determinados valores. En otros casos el crecimiento del cultivo se relaciona con estos niveles.

- ✓ Temperatura del suelo: la temperatura del suelo se mide ya que afecta a multitud de cultivos en diferentes etapas de su desarrollo. En la fecha de siembra, en el crecimiento de la planta, en la rapidez de desarrollo, en los microorganismos del suelo
- ✓ Humedad ambiente: conocer la humedad ambiente ayuda a conocer cómo los cultivos están realizando la transpiración; pues la realización de esta transpiración influye en la manera en que la planta absorbe agua y nutrientes desde el suelo. Además en la transpiración la planta se refresca consiguiendo que su temperatura se reduzca. También es interesante conocer la humedad ambiente en casos de aparición y transmisión de enfermedades.
- ✓ Temperatura ambiente: hay una gran variación en el resultado final del cultivo según si la climatología durante su ciclo ha sido calurosa o fría debido a que los procesos fisiológicos que se efectúan en una planta, como pueden ser la fotosíntesis, la respiración y el crecimiento responden de forma distinta a diferentes temperaturas. Para un correcto crecimiento del cultivo, todas las plantas para completar su ciclo vegetativo deben acumular cierto número de grados de temperatura durante este periodo.
- ✓ Presión atmosférica: se mide para relacionarla con la cantidad de agua disponible en el suelo, toda vez que el potencial hídrico varía dependiendo de la presión atmosférica existente. Además es un factor que puede determinar

otras variables como la altitud del cultivo, la cantidad y velocidad del aire y la temperatura del aire en capas altas de la atmósfera sobre el cultivo.

- ✓ Radiación solar: la cantidad de radiación solar es uno de los factores más significativos a la hora de realizar la fotosíntesis. Está comprobado que la cantidad de radiación acumulada por el cultivo durante su ciclo vegetativo es influyente en el crecimiento de la planta y en la maduración del fruto.
- ✓ El CO₂ (Dióxido de carbono): la realización de la fotosíntesis es la transformación de energía radiante en energía química mediante la asimilación del carbono del CO₂ del aire y su fijación en compuestos orgánicos carbonados. Además, la emisión de CO₂ que se relaciona con la respiración del suelo, puede determinar qué tipo de fertilizantes se aplicarán en el cultivo ya que la aplicación de éstos sobre el suelo es uno de los principales factores que influyen en la emisión. Elegir los fertilizantes adecuados ayuda a reducir el fenómeno conocido como efecto invernadero, que reduce la emisión de calor al espacio y provoca un mayor calentamiento del planeta.
- ✓ El CH₄ (Metano): se produce en procesos de descomposición anaerobia en multitud de cultivos. Como es uno de los elementos que influye ampliamente en el calentamiento global de la atmósfera es interesante su medición en los cultivos para luchar contra estos efectos.

1.9 Casos prácticos de utilización de WSN en viñedos

Una de las enfermedades más famosas y conocidas que puede afectar a la vid es el mildiu [21]. Si las condiciones son favorables para el desarrollo de la enfermedad, ésta puede atacar a todos los órganos verdes de la vid, provocando pérdidas elevadas de la cosecha. Esta enfermedad está provocada por el hongo plasmopara vitícola [22], que aparece en regiones con clima cálido y húmedo. Para los racimos es especialmente peligroso entre la floración y el cuajado, si durante este periodo el

tiempo es húmedo y las temperaturas benignas, pudiera perderse gran cantidad de la cosecha.

Siempre, para que surja la enfermedad, tiene que darse el hecho de que en invierno el hongo se conserve en forma de esporas [22]. Para luego en primavera, si se cumplen ciertas condiciones ambientales, como precipitaciones de más de 10 milímetros, temperaturas superiores a 12 °C y humedades elevadas, la actividad germinadora de la contaminación primaria del virus empezará a infectar la planta en sus diferentes fases. De la misma manera, durante los periodos de incubación tienen que cumplirse ciertas condiciones ambientales para que el virus sobreviva. Tras este periodo de incubación, que oscila entre una y dos semanas, en función de la humedad ambiente y sobre todo de la temperatura, se pueden observar los primeros síntomas.

Mediante el sistema de captación de información, se supervisan todas estas variables y se tiene conocimiento de cuando éstas se cumplen, lo que indica que existe la posibilidad que la enfermedad se haya desarrollado en una zona localizada. De esta manera se puede determinar si es posible que ataque la enfermedad y proceder a utilizar un tratamiento para solucionarlo. En caso que las condiciones hayan hecho imposible el desarrollo de la enfermedad, se pueden ahorrar recursos tales como el gasto en insecticidas y plaguicidas e incluso eliminar el riesgo de multiplicación de ácaros o cicadélidos que se ven favorecidos por el uso de insecticidas.

Los viñedos Camalie, en Estados Unidos, tienen uno de los sistemas más avanzados de medida de la humedad del suelo. Usan la tecnología inalámbrica desarrollada por la Universidad de Berkeley en colaboración con Intel y comercializada por Crossbow (actualmente MEMSIC). La aplicación consiste en optimizar la irrigación, reduciendo el consumo de agua, la energía utilizada en el bombeado y mejorando la calidad de la uva. Se proporciona una monitorización del sistema de irrigación, mostrando fallos que pueden tener un impacto sustancial a largo plazo [9].

Viña Costeira, es una bodega de España que participa en un proyecto piloto de investigación junto a otra de Italia, en el viñedo, mediante una WSN, obtienen información casi instantánea del estado de las vides y de las condiciones ambientales, y en la bodega con tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*). El sistema, envía sus datos vía radio hasta una aplicación web a la que acceden los técnicos de viña. Utilizan los datos recogidos para hacer las predicciones que permitan conocer la evolución y el riesgo de plagas. Este conocimiento en tiempo real hace que reduzcan el número de tratamientos con beneficio para el medio ambiente y para la economía de los viticultores al disminuir costos.

Las bodegas Martín Códax, Condes de Albarei y Rosalía de Castro cuentan con una infraestructura tecnológica que tiene en funcionamiento una red de 72 sensores instalados en los viñedos, que transmiten a un equipo central la información relativa a la humedad, temperatura y actividad foliar de la viña en el momento de su medición, contribuyendo a reducir las pérdidas productivas, mejorando la sostenibilidad y el costo económico.

1.10 Conclusiones del capítulo

Las características de las redes de sensores inalámbricos hacen de ellas un elemento indispensable para el desarrollo de la agricultura de precisión por su fácil implementación, funcionamiento autónomo por largos espacios de tiempo sin requerir mantenimiento y su elevada resistencia a los impactos agresivos del medio donde se instalan. Contribuyen significativamente al incremento de los rendimientos, la reducción de los costos y la protección del medio ambiente. Su implementación en el cultivo de la uva posibilita un seguimiento en tiempo real de los factores que lo afectan para disminuir los efectos que le provocan.

CAPÍTULO 2: DISEÑO DE LA WSN PARA LA SUPERVISIÓN DE PARÁMETROS AGROMETEOROLÓGICOS

En este capítulo se realiza la propuesta de red de sensores inalámbricos utilizando dos variantes de equipamiento. Teniendo en cuenta las particularidades del cultivo de la uva y del área seleccionada, se determinan los puntos donde serán ubicados los sensores de humedad del suelo y se realizan los cálculos de las alturas a ubicar las antenas de los nodos así como el balance de potencia en el enlace.

2.1 Caracterización del área de cultivo a supervisar

El terreno donde se encuentran las áreas de cultivo a supervisar tal como se muestra en la figura 2.1 y 2.2, es totalmente llano, con vegetación escasa y de poca altura. Uno de los viñedos es aproximadamente de 0,5 hectáreas (5000 metros cuadrados) con una distancia máxima de 120 metros desde la vivienda del productor hasta el punto más alejado, dividido en siete parcelas. El otro viñedo es de 0,45 hectáreas (4540 metros cuadrados) y se encuentra a alrededor de 670 metros por carretera de la vivienda del productor (500 metros con línea de visibilidad directa), esta área se dividió en tres parcelas. Se ubicarán diez nodos sensores, uno por cada una de las parcelas trazadas. La vivienda del productor cuenta con conexión a la red eléctrica por lo que podrá ser utilizada para la ubicación de los elementos de red que requieran protección y no funciones con baterías.



Figura 2.1: Imagen del satélite de las áreas de cultivo a supervisar. Imagen de Google Earth.



Figura 2.2: Áreas de cultivo a supervisar. Imagen de Google Earth.

Particularidades del cultivo de la uva

El 90 por ciento de las raíces de la planta se desarrolla por encima del primer metro de suelo, estando la gran mayoría entre los 40 y 60 cm de profundidad [23]. El tronco puede estar más o menos definido según el sistema de formación. La altura depende de la poda de formación, estando normalmente comprendida en alrededor de 200 centímetros. El diámetro puede variar entre 10 y 30 centímetros. La separación entre los troncos de las plantas es de aproximadamente 300x150 centímetros.

Métodos o sistema de sostenimiento

El emparrado consiste en formar una malla horizontal de alambre a 2 metros de altura, formando un rectángulo de 90 cm de largo por 40 cm de ancho. Estos alambres se amarran de estacones de concreto o madera dura, situados en la periferia del viñedo. La distancia entre estacones a lo largo del viñedo es cada 6 m y a lo ancho de cada 3 metros. Este es el método más utilizado pues se obtienen los mayores rendimientos. En las imágenes mostradas en la figura 2.3 que fueron tomadas del área de estudio se puede comprobar lo explicado.

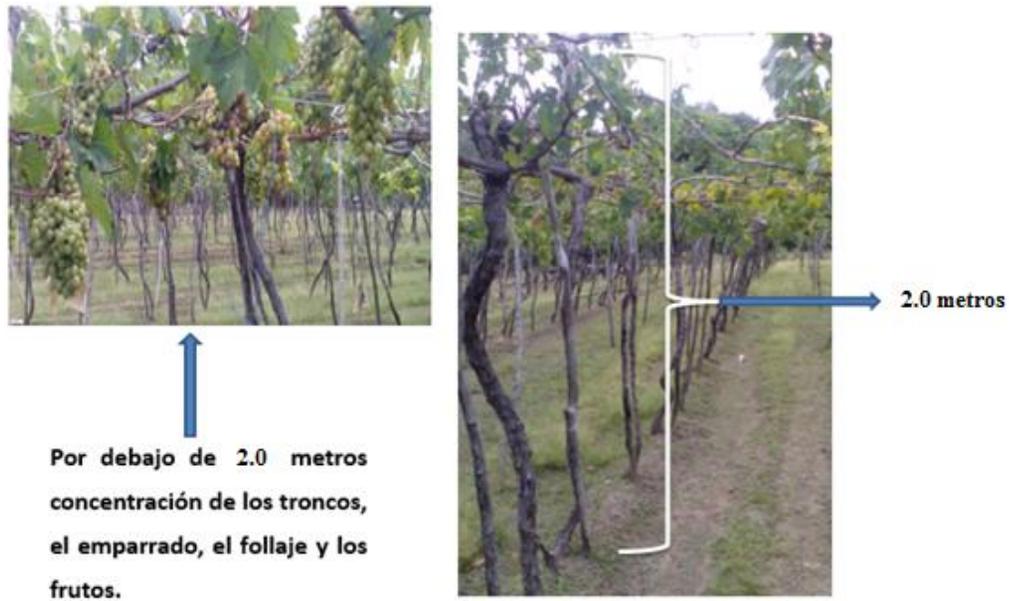


Figura 2.3: Área de cultivo en estudio

2.2 Medición de la humedad del suelo en viñedos

La figura 2.4 muestra la ubicación de dos sensores de humedad del suelo teniendo en cuenta las particularidades de este tipo de cultivo. Un sensor se ubica a 40 centímetros de profundidad y el otro a 60 centímetros.

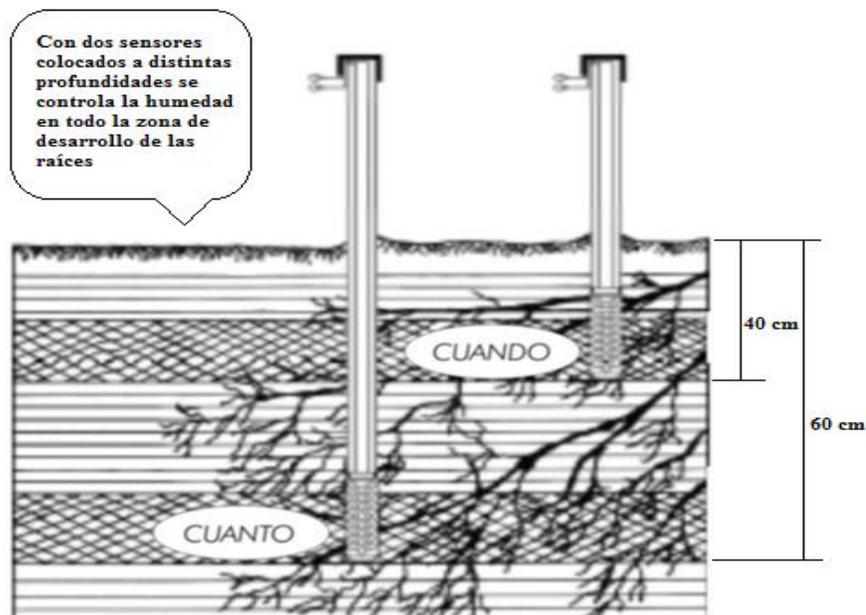


Figura 2.4: Particularidades del cultivo de la uva, basada en [23]

La humedad del suelo es constantemente absorbida o liberada por el sensor. A medida que el suelo se seca, se reduce la humedad del sensor proporcionando lecturas precisas de 0 a 200 centibares (cb) [24]. La figura 2.5 muestra cómo las variaciones en el suelo afectan su capacidad para almacenar agua (capacidad de retención de agua).

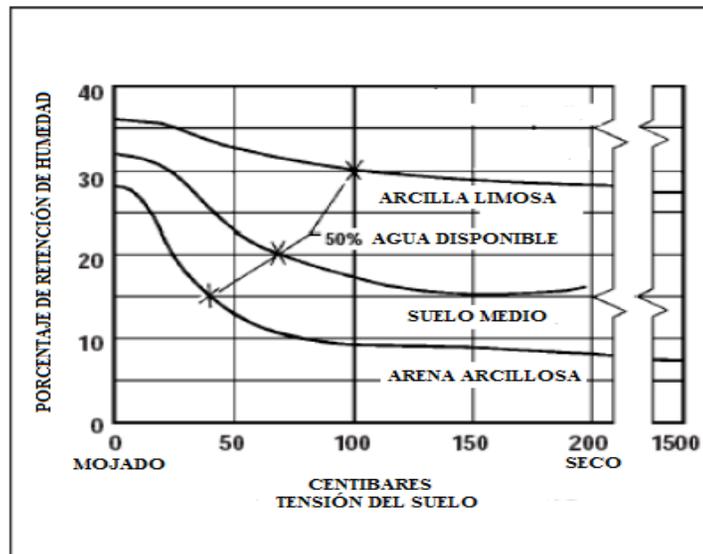


Figura 2.5: Capacidad de retención de agua de diferentes tipos de suelo, basada en [25].

Con esta medición se cubre todo el rango de humedad del suelo requerido para la utilización de riego, incluso en los suelos de arcilla más pesada. De esta manera se sabe la tensión del agua del suelo o la succión, que es un indicador directo de lo difícil que el sistema de raíces de la planta tiene que trabajar para extraer el agua del suelo. Cuanto más seco sea el suelo, mayor será la lectura. Mediante el control de los sensores entre los riegos, es posible medir la velocidad a la que el suelo se está secando. La tasa de cambio es tan importante como la lectura real para determinar cuándo regar para evitar el estrés por humedad o cuánto regar para no provocar un exceso de humedad en el suelo con la consiguiente afectación a la planta y el gasto innecesario de recursos hídricos y energéticos.

Los suelos arcillosos más pesados almacenan mucho más agua que los suelos arenosos. Pero aún más importante, la planta no puede extraer fácilmente toda esta humedad almacenada, sólo la porción disponible. La regla general es que el riego

debe comenzar antes de llegar al 50% de la porción disponible que se está agotando.

Suponiendo un suelo de tipo medio, este nivel del 50% ocurriría en aproximadamente 60-70 centibares. Si bien la determinación del punto de riego adecuado depende en gran medida del tipo de suelo, también es necesario considerar el método de cultivo y riego. En las diferentes etapas del cultivo se requieren diferentes frecuencias de riego; en etapas menos sensibles no necesitará agua hasta otro momento. El riego superficial puede permitirle aplicar agua mucho más rápidamente que un sistema de goteo, por lo que debe considerar la rapidez con la que su sistema puede reaccionar para evitar el estrés por humedad (Ver figura 2.6).

El mantenimiento de registros, la experiencia con el cultivo, los suelos y el método de riego son esenciales con cualquier buen sistema de manejo. Con utilización de estos sensores correctamente colocados tanto en la parte superior (40 cm) como en la parte inferior (60 cm) del sistema de raíces del cultivo, las lecturas indicarán si la humedad que se agota es superficial o profunda. Si la lectura superficial es 60 cb y la lectura profunda es 25 cb, es necesario aplicar suficiente agua para volver a humedecer la parte superior. Si las lecturas son invertidas, con 40 cb para la superficial y 60 cb para la profunda, se puede necesitar el doble de agua.

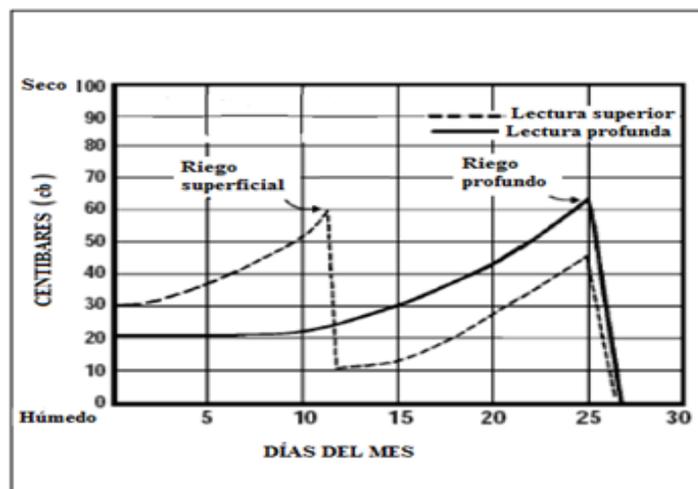


Figura 2.6: Frecuencias de riego, basado en [25]

2.3 Medición de la humedad y temperatura del ambiente

El aire, en ambiente normal, siempre mantiene la humedad. El número de moléculas de agua en el aire puede variar sustancialmente. Puede ser tan seco como en un desierto o tan húmedo como en los trópicos. Hay un límite superior para la cantidad de humedad que el aire puede retener a una temperatura dada. Más allá de este límite se produce la saturación. Si por alguna razón el nivel de humedad se empuja hasta este límite, se produce condensación y se forman nieblas o gotas de agua. La humedad relativa indica el porcentaje de humedad presente en el aire. En contraste con la humedad relativa, la humedad absoluta indica la cantidad absoluta de humedad en el aire independientemente del nivel de saturación expresado como la masa total de moléculas de agua por volumen de aire.

Contar con el registro de la humedad y temperatura en el ambiente permite predecir la aparición de enfermedades, pues al cumplirse determinados valores durante un período de tiempo pudieran favorecer la formación de brotes en áreas específicas. La utilización de plaguicidas e insecticidas se realiza entonces de manera controlada y en las áreas que lo requieran, teniendo esto, un impacto positivo en el medio ambiente y en la disminución de los costos de producción.

2.4 Principales proveedores de equipamiento para WSN

El imparable crecimiento de las redes de sensores desde su nacimiento, se ha visto reflejado a nivel de mercado puesto que el número de empresas ha crecido significativamente [6] y la gama de equipos que estas ofrecen se adaptan cada vez más a los requerimientos de las distintos entornos y aplicaciones con elevadas prestaciones en cuanto comunicación (frecuencias de transmisión y alcance), capacidad computacional (procesador, memoria), autonomía (gestión de batería, modos de bajo consumo) o medida (diferentes tipos de parámetros medibles). A continuación, se indican algunas de las compañías más representativas con equipamiento relacionadas con el estudio de variables en entornos agrícolas:

- ✓ MEMSIC, empresa con sede en EUA, descendiente de Crossbow Technology, tiene como distribuidor a la empresa Álava Ingenieros de España. Para el desarrollo de aplicaciones individuales, presenta un amplio portfolio de productos entre las que se destaca la línea eKo [25], [28]–[30], comercializando para todas ellas kits de desarrollo. Cada uno de estos productos (Anexo I) presenta características de transmisión, memoria, procesamiento y capacidad de medida de parámetros diferentes, con la finalidad de adaptarse a los diferentes requerimientos.
- ✓ Libelium, empresa española que se dedica al diseño y la fabricación de tecnología para la implementación de WSN. Las principales líneas de investigación y desarrollo de Libelium son Waspote [31]–[35] y Meshlium [31], [36] (Anexo II), como dispositivos de comunicación y procesado [37]. Las comunicaciones entre los diferentes dispositivos se realizan a través de los módulos Xbee desarrollados por la empresa Digi, sobre el protocolo IEEE 802.15.4 a las frecuencias de 868 MHz, 915 MHz y 2.4GHz, utilizando el protocolo de enrutamiento propietario Digimesh.
- ✓ National Instruments empresa con sede en EUA provee una plataforma de red inalámbrica de sensores [26], [27] que posibilitan monitorizar el entorno con nodos de medidas (Anexo III), suministra el software para el análisis y procesamiento de los datos de manera local remota. Cada red inalámbrica puede escalar decenas y hasta cientos de nodos.

La selección de los equipos a implementar en una WSN, varían de acuerdo a sus características, pero principalmente de la aplicación en particular, pues esta define los parámetros que se deben tener en cuenta y facilita la selección de los dispositivos.

2.5 Cálculo de la altura de ubicación de las antenas de los nodos

Para garantizar el enlace entre los nodos y el coordinador de la red es necesario ubicar las antenas a una altura en la cual el follaje de las plantas y el emparrado no

atenúen la señal de manera que provoquen la pérdida del enlace. Numerosos estudios se han realizado para modelar y calcular los efectos que provoca la vegetación en el establecimiento de enlaces por radio [38]–[40]. No basta que las antenas se ubiquen solo a la altura del cultivo si no que tiene que existir un despeje adicional cuya altura está determinado por las zonas de Fresnel. La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre [41]–[43].

Se puede calcular la altura de ubicación de las antenas partiendo de la siguiente ecuación:

$$h = h_c + 0.6 * r_1 \quad (2.1)$$

Donde h_c es la altura del cultivo, para el caso de las áreas de cultivo seleccionadas, esta altura es dos metros pues corresponde con las características de esta planta y el resto de la vegetación en el trayecto de los enlaces más distantes es bien escasa y de baja altura.

r_1 representa el radio de la primera zona de Fresnel y se calcula como sigue:

$$r_1 = 8.657 * \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (2.2)$$

Donde f es la frecuencia en MHz [44] y D es la distancia en metros entre la antena transmisora y receptora, sustituyendo la ecuación 2.2 en la 2.1 queda:

$$h = h_c + 5.1942 * \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (2.3)$$

Sustituyendo la frecuencia, la altura del cultivo y la distancia a la que se ubicará cada nodo, se obtiene los resultados mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Altura de ubicación de las antenas para cada enlace.

Enlace	Frecuencia (MHz)	Altura del cultivo (metros)	Distancia entre el nodo y la estación base (metros)	Altura de las antenas (metros)
1	2480 ¹	2	20	2,47
2			47	2,72
3			40	2,66
4			55	2,77
5			56	2,78
6			70	2,87
7			90	2,99
8			470	4,26
9			480	4,29
10			520	4,38

Para que ningún enlace sufra atenuación por la presencia de la vegetación. La antena del coordinador de la red se ubicará a una altura de 4,5 metros al igual que los tres nodos más distantes y en el caso de los siete nodos restantes se ubicarán a tres metros de altura.

2.6 Propuesta de diseño de la WSN con nodos eKo

La extensión del área de cultivo en estudio permite implementar una topología de red en estrella, debido a que todos los nodos eN2120 pueden alcanzar sin dificultad la radio base eB2120 considerando la información del alcance suministrada por el fabricante. Todos los nodos serán dispositivos de funcionalidad reducida (RFD) lo que simplificará el funcionamiento de red. Serán ubicados 10 nodos sensores, uno por cada parcela definida dentro de las áreas de cultivo (ver figura 2.1). A cada nodo se le conectará el sensor eS1101, el cual permitirá la supervisión de la temperatura y humedad del suelo, al nodo uno se le conectará además la estación meteorológica eS2000 la cual garantiza la recolección de información de los parámetros fundamentales del ambiente. La figura 2.7 representa de manera general la propuesta de diseño de la red.

¹ En esta frecuencia no existe ningún equipo transmitiendo en la zona. Fuente OTC-MINCOM

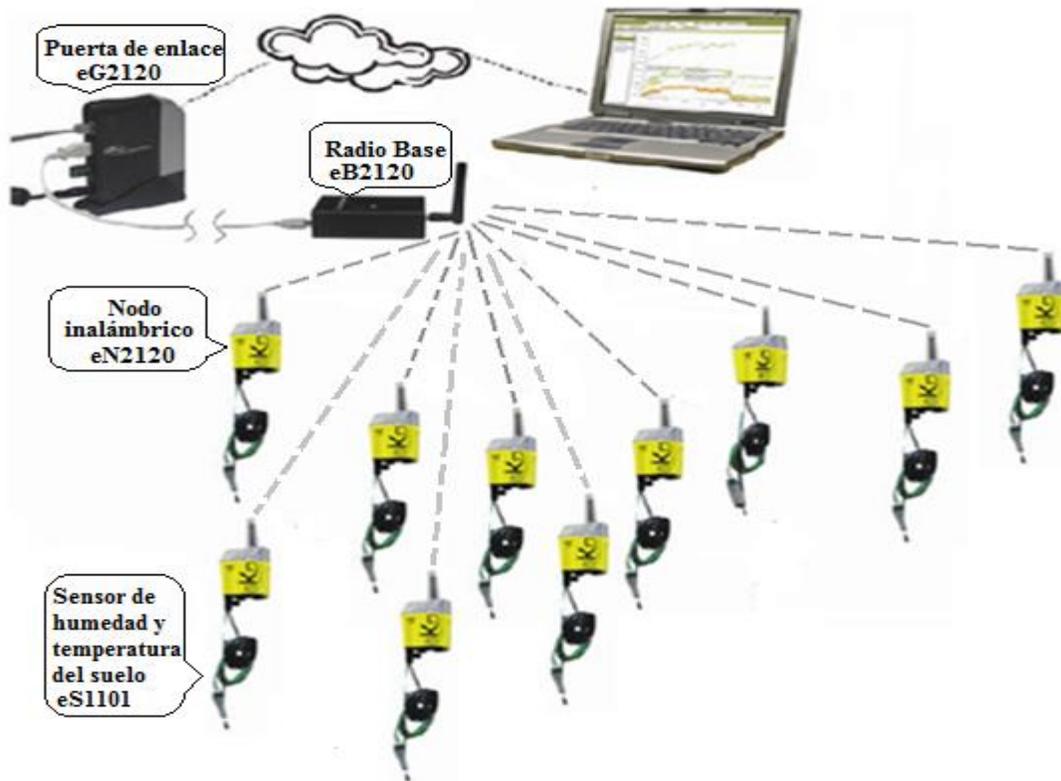


Figura 2.7: Propuesta general de diseño, basado en [25].

Conexión con la puerta de enlace

Si se desea una conexión directa de una PC con la puerta de enlace sin la utilización de un enrutador (ver figura 2.8), se debe utilizar un cable cruzado. La puerta de enlace eG2120 está configurada de manera predeterminada con una dirección IP estática (192.168.1.77).

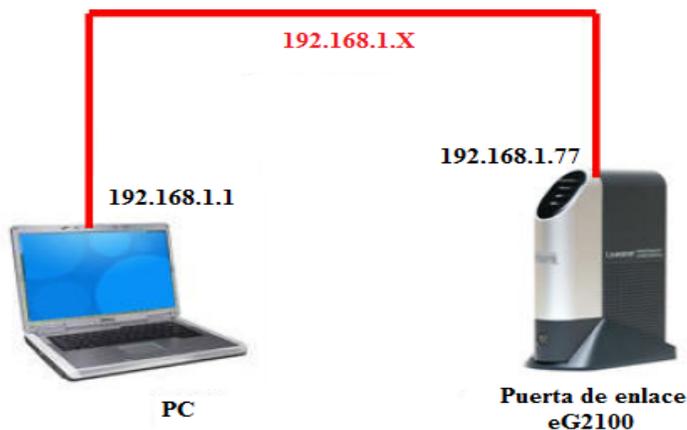


Figura 2.8: Conexión a través de cable cruzado, basado en [25].

Para el caso que se desee enlazar la puerta de enlace de la red WSN con un centro de investigación a través de una red privada virtual la configuración sería como se muestra en la figura 2.9.

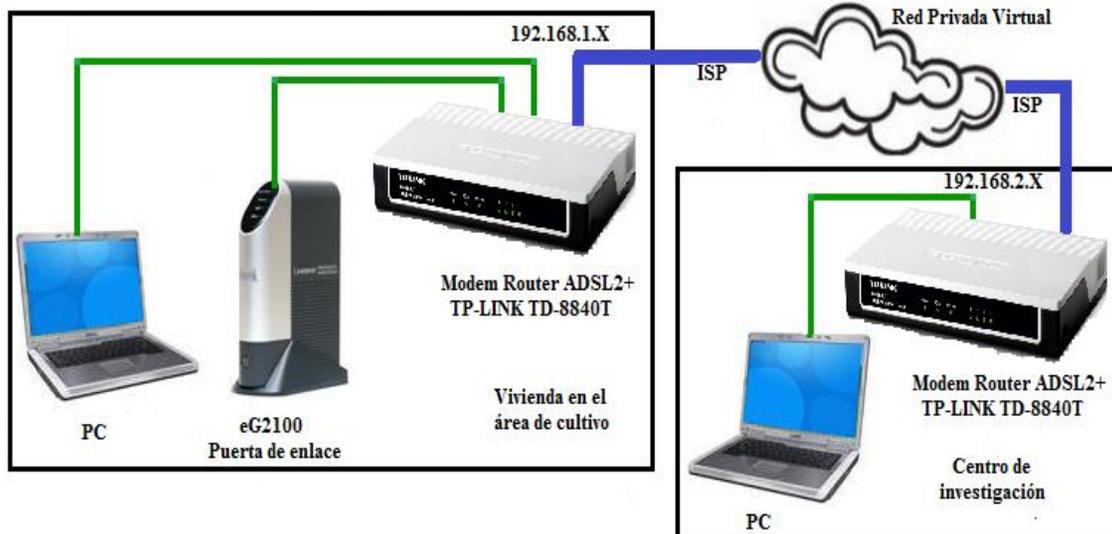


Figura 2.9: Conexión a través de una red privada, basado en [25].

En ambos casos, los datos provenientes de los nodos sensores son almacenados en una base de datos local y el acceso a toda la información se logra a través de la aplicación web eKoVIEW escribiendo en el navegador el URL <http://<eko-XXXXX>> donde XXXXX representa el número de serie de la puerta de enlace eG2120.

2.6.1 Balance de potencia de los enlaces

La potencia en el receptor estimada se calcula por la ecuación de balance de potencia del enlace de radio [41]–[43].

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_{TT} + G_{Tx} - L_b + G_{Rx} - L_{TR} \quad (2.4)$$

Donde:

P_{Rx} : Potencia de recepción estimada.

P_{Tx} : Potencia del transmisor

L_{TT} y L_{TR} : Pérdidas (dB) en los terminales en el transmisor y el receptor .

G_{Tx} y G_{Rx} : Ganancia (dB) de las antenas del transmisor y el receptor respectivamente.

L_b : Pérdida en el trayecto de propagación.

De las características del equipamiento seleccionado tenemos:

$$P_{Tx} = +3 \text{ dBm}$$

$$G_{Tx} = 9 \text{ dBi y } G_{Rx} = 5 \text{ dBi}.$$

Como las antenas de los nodos están ubicadas a una altura del cultivo suficiente para garantizar que no se produzca atenuación por la presencia de la vegetación, las pérdidas en el trayecto se calculan por el modelo de propagación para el espacio libre [41]–[43].

$$PL_{\text{espacio-libre}}(\text{dB}) = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} d \quad (2.5)$$

Sustituyendo el valor de la frecuencia y la distancia en la ecuación 2.5 se obtiene el valor de las pérdidas de trayecto (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Pérdidas en el trayecto

Enlace	Frecuencia (MHz)	Distancia entre el nodo y la estación base (Km)	Pérdidas en el espacio libre (dB)
1	2480	0,02	66,35
2		0,047	73,77
3		0,04	72,37
4		0,055	75,14
5		0,056	75,29
6		0,07	77,23
7		0,09	79,41
8		0,47	93,77
9		0,48	93,95
10		0,52	94,65

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.4 se obtiene la potencia estimada en el receptor para cada enlace (se despreciaron las pérdidas en los terminales (L_{TT} y L_{TR})). Luego se calcula el margen con que está protegido el sistema frente a los desvanecimientos restándole a la potencia estimada recibida el umbral del receptor que es dado por el fabricante. Ambos resultados son mostrados en la tabla 2.3.

$$M(dB) = P_{Rx}(dBm) - P_{Rx}(dBm) \quad (2.6)$$

Tabla 2.3 Potencia estimada en el receptor y margen de protección contra desvanecimiento.

Enlace	Potencia del Tx (dB)	Ganancia antena Tx (dBi)	Ganancia antena Rx (dBi)	Potencia de Rx estimada (dBm)	Umbral del Rx (dBm)	Margen de protección contra desvanecimiento (dB)
1	3	5	5	-53,35	-101,00	47,65
2	3	5	5	-60,77	-101,00	40,23
3	3	5	5	-59,37	-101,00	41,63
4	3	5	5	-62,14	-101,00	38,86
5	3	5	5	-62,29	-101,00	38,71
6	3	5	5	-64,23	-101,00	36,77
7	3	5	5	-66,41	-101,00	34,59
8	3	5	5	-80,77	-101,00	20,23
9	3	5	5	-80,95	-101,00	20,05
10	3	5	5	-81,65	-101,00	19,35

Con los valores del margen de protección de la señal obtenidos, se garantiza el funcionamiento estable de los enlaces, por lo que desde el punto de vista del balance de potencia del enlace de radio, es posible implementar en el diseño la topología en estrella para el equipamiento seleccionado.

2.7 Propuesta de diseño de WSN con equipamiento de Libelium

Se implementa una red en estrella considerando información de alcance de los nodos suministrada por el fabricante y la extensión del área de cultivo lo que simplifica el diseño. La figura 2.10 representa la propuesta de diseño de la red utilizando el equipamiento de Libelium que se detalla en el Anexo II.

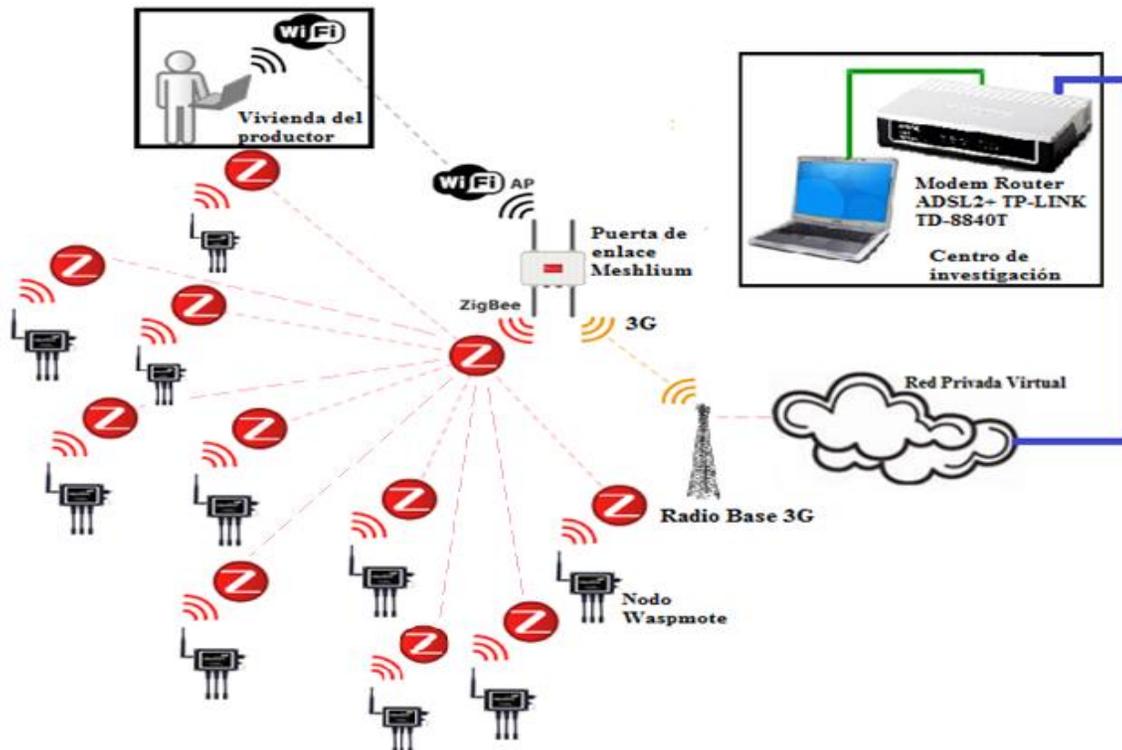


Figura 2.10: Propuesta general de diseño, basado en [45].

Se utilizan 10 nodos sensores Wasmote Plug & Sense! SA 802.15.4 los cuales se enlazan a la puerta de enlace Meshlium a través del módulo de radio ZigBee. La ubicación de los sensores en el área en estudio es similar a lo explicado en el epígrafe 2.6. Los datos provenientes de la red de sensores son almacenados en una base de datos local en Meshlium. La conexión con la puerta de enlace se propone realizarla por dos variantes aprovechando las potencialidades de este dispositivo, en la cual funcionan simultáneamente varias interfaces de radio. Se accede desde la vivienda del productor a través del módulo WiFi y se conecta además al centro de investigación contratando con ETECSA² un acceso a redes corporativas a través de 3G³. El acceso a toda la información de la WSN a través de la conexión WiFi se logra mediante el sistema de gestión de Meshlium escribiendo en el navegador el URL <http://10.10.10.1/ManagerSystem>. En el caso del acceso desde el centro de investigación se escribe el URL <http://192.168.1.100/ManagerSystem>.

² Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A.

³ Tercera generación de telefonía móvil.

ZigBee y Wifi utilizan la misma banda de frecuencia por lo que pudiera producirse interferencia. En el Anexo V se muestra el solapamiento de canales entre estas dos tecnologías. Para ZigBee fue escogida en el epígrafe 2.5, la frecuencia 2480 MHz que corresponde al canal 26 por lo que para WiFi se podrá utilizar el canal uno y el 6. Con esto se garantiza la coexistencia de ambos enlaces.

2.7.1 Balance de potencia de los enlaces en la red ZigBee

Utilizando las expresiones planteadas en el subepígrafe 2.6.1 y sustituyendo los parámetros correspondientes al equipamiento seleccionado se obtiene el valor de la potencia de recepción estimada y el margen de protección contra desvanecimiento para cada enlace mostrado en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Potencia estimada en el receptor y margen de protección contra desvanecimiento.

Enlace	Potencia del Tx (dB)	Ganancia antena Tx (dBi)	Ganancia antena Rx (dBi)	Potencia de Rx estimada (dBm)	Umbral del Rx (dBm)	Margen de protección contra desvanecimiento (dB)
1	20	5	5	-36,35	-100	63,65
2	20	5	5	-43,77	-100	56,23
3	20	5	5	-42,37	-100	57,63
4	20	5	5	-45,14	-100	54,86
5	20	5	5	-45,29	-100	54,71
6	20	5	5	-47,23	-100	52,77
7	20	5	5	-49,41	-100	50,59
8	20	5	5	-63,77	-100	36,23
9	20	5	5	-63,95	-100	36,05
10	20	5	5	-64,65	-100	35,35

Los resultados de los cálculos realizados para el margen de protección de la señal muestran el funcionamiento de todos enlaces, por lo que desde el punto de vista del balance de potencia del enlace de radio, es posible implementar en el diseño la topología en estrella con este equipamiento.

2.8 Valoración económica

Al analizar los precios de los dispositivos que ofrecen los fabricantes para la supervisión de parámetros agrometeorológicos y las posibilidades de adquisición de la tecnología conllevan en primera instancia a desechar el empleo de las mismas. Sin embargo al realizar un estudio minucioso se pueden comprobar los beneficios económicos que reporta su implementación al contribuir a la reducción de los costos de producción por el empleo de los insumos y recursos hídricos necesarios y la protección del medio ambiente.

Las tablas 2.4 y 2.5 muestran los costos de los equipamientos de MEMSIC y Libelium respectivamente. Se puede apreciar que la propuesta realizada con el primer proveedor reduce los costos en más de 700 euros⁴ y simplifica la instalación de los nodos pues con dos dispositivos sensores se supervisan los parámetros requeridos, a diferencia del equipamiento del segundo que requiere de la conexión de 5 dispositivos sensores.

Tabla 2.4 Costo del equipamiento de MEMSIC seleccionado.

Equipamiento de MEMSIC	Precio unitario (euros)	Cantidad	Importe (euros)
Puerta de enlace eKo eG2120	871,51 €	1	871,51 €
Radio base eKo eB2120	326,06 €	1	326,06 €
Nodo Sensor eKo eN2120	490,90 €	10	4.909,00 €
Sensor de temperatura y humedad del suelo eS1101	96,80 €	10	968,00 €
Kit estación meteorológica eS200 (Colector de lluvia, temperatura y humedad, anemómetro, velocidad y dirección del viento, presión barométrica y radiación solar)	813,33 €	1	813,33 €
Total⁵			7.887,90 €

⁴ Tasa actual de conversión: 1 euro equivale a 1,0728 dólar USA

⁵ Solo se considera el valor del equipamiento que requiere de importación, no se incluye los costos de instalación ni de infraestructura en caso que se requiera

Tabla 2.5 Costo del equipamiento de Libelium seleccionado.

Equipamiento de Libelium	Precio unitario (euros)	Cantidad	Importe (euros)
Meshlium 4G 802.15.4 AP	1.500 €	1	1.500 €
Waspote Plug & Sense! SA 802.15.4	534 €	10	5.340 €
Batería recargable (6600 mAh) + panel solar interno de 6.5V – 205 mA	44 €	10	440 €
Sensor de humedad del suelo con cable de 8 metros de longitud	90 €	3	270 €
Sensor de humedad del suelo con cable de 4,5 metros de longitud	78 €	7	546 €
Sensor de temperatura del suelo (DS18B20)	30 €	10	300 €
Sensor de Temperatura humedad y presión	48 €	1	48 €
WS-3000 (anemómetro, veleta y pluviómetro)	150 €	1	150 €
Total⁶			8.594 €

Costos de operación

Los costos de operación están asociados al pago del enlace para conectar la red de sensores a la red privada a la cual está conectada el centro de investigación que analizará las mediciones realizadas. La tabla 2.6 muestra las tarifas de los enlaces que provee ETECSA, la primera variante corresponde al enlace que requiere la propuesta con el equipamiento de MEMSIC y la segunda variante es la seleccionada en el caso del equipamiento de Libelium. Estos valores pueden variar teniendo en cuenta la modalidad contratada. Para la conexión desde la vivienda del productor no es necesario incurrir en gastos adicionales debido en ambas propuesta las puertas de enlace garantizan esta funcionalidad.

⁶ Solo se considera el valor del equipamiento que requiere de importación, no se incluye los costos de instalación ni de infraestructura en caso que se requiera.

Tabla 2.6 costos de operación

Enlaces	Cuota mensual (CUC)	Costo de instalación (CUC)
Conectividad IP (1 Mbps)	470,00	800
Acceso a redes corporativas a través de la red celular, paquete de 1 gigabyte (GB) ⁷	80,00	30

Otro factor importante en la valoración económica es el incremento del rendimiento de la cosecha [47] por el empleo de esta tecnología. La introducción de la agricultura de precisión en los viñedos conlleva a un incremento de hasta un 50 % del rendimiento por hectárea de ahí que el área en estudio que produce en la actualidad 5400 kilogramos podría elevar su producción hasta 10 800 kilogramos. Los ingresos adicionales teniendo en cuenta los precios en el mercado internacional de una libra de uva (0,80 centavos de dólar por libra) serían de 4320 dólares. De estos cálculos se deduce que solo con el incremento de la producción que se produciría se recupera el monto invertido en dos cosechas.

Otros elementos a considerar es el empleo de manera eficiente de fertilizantes, plaguicidas y sistemas de riego. Estos también influyen en la recuperación del monto invertido pero su principal contribución está asociada a la obtención de producciones más limpias con el empleo de menor cantidad de contaminantes y el uso racional del agua.

2.9 Conclusiones del capítulo

En el diseño de una WSN para la supervisión de parámetros agrometeorológicos se deben tener en cuenta los siguientes criterios: banda de frecuencia, topología, las particularidades de los cultivos, y las posibilidades de conexión con otras redes.

Los elementos de hardware de los fabricantes MEMSIC y Libelium son factibles para su implementación en el área de cultivo en estudio tanto desde el punto de vista económico como tecnológicamente.

⁷ Cada megabyte (MB) adicional tiene un valor de 0.50 CUC.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

En este capítulo se realiza la evaluación del funcionamiento de la WSN propuesta utilizando la herramienta de modelación y simulación OPNET Modeler 14.5, analizando el comportamiento de diferentes parámetros que miden el desempeño de la red. Se realiza además una valoración económica general de las propuestas presentadas teniendo en cuenta el equipamiento y fabricantes seleccionados.

3.1 Parámetros a considerar en la evaluación de la red de sensores

Las propias características y parámetros de las WSN permiten realizar su evaluación, existiendo una estrecha relación entre sí. En ocasiones es necesario disminuir el desempeño de uno para lograr mejor resultado en otro. En el caso específico del monitoreo de entornos agrícolas, se requiere que la WSN, se encuentren activa durante años, debido a que las propias condiciones del área de implementación, no permiten contar con energía de la red eléctrica para alimentar los nodos sensores. El sistema de radio es el elemento de mayor consumo de energía en un nodo inalámbrico. Este consumo puede ser reducido disminuyendo la potencia de salida de la señal de radio o disminuyendo también el ciclo de trabajo del radiotransmisor. Ambas alternativas, provocan sacrificar otras propiedades de estas redes como es el caso de la cobertura.

Los nodos eKo minimizan la limitante que impone la alimentación con baterías pues tienen incluido internamente celdas solares que permiten alimentar los nodos y recargar las baterías, de ahí que su tiempo de vida sea elevado. Por su parte para los nodos Waspote Plug & Sense es necesario adquirir adicionalmente la celda solar para su alimentación lo que encarece el valor del equipamiento. En el caso de las puertas de enlace al ubicarlas en la vivienda del productor se utiliza la red eléctrica para su alimentación por lo que se elimina esta limitante. Cabe destacar además, que para la aplicación que se propone la WSN en esta investigación, la toma de datos puede realizarse de manera espaciada en el tiempo debido a que los parámetros agrometeorológicos no varían drásticamente en la zona en estudio. Este

elemento posibilita que el período de tiempo en estado inactivo de los nodos sea elevado contribuyendo considerablemente al ahorro de energía y por consiguiente al aumento del tiempo de vida de las baterías de estos dispositivos.

La escalabilidad es un elemento fundamental a la hora de valorar una WSN. Inicialmente se ha propuesto esta red con 10 nodos sensores pero pudiera posteriormente extenderse a otras áreas de cultivo agregando nuevos nodos. En ambas propuestas realizadas las puertas de enlace de eG2120 de MEMSIC y Meshlium de Libelium soportan más de 30 nodos conectados de acuerdo con las especificaciones de ambos fabricantes, esto garantiza una posible expansión de la red hacia otras áreas.

A lo largo de toda la vida de la red, los nodos pueden ser reubicados, o grandes objetos pueden ser colocados de forma tal que interfiera la comunicación entre ellos. La red debe estar diseñada para reconfigurarse automáticamente con el objetivo de tolerar estos posibles hechos. Los nodos $\bar{e}Ko$ vienen configurados con el protocolo de red de baja potencia XMesh [46] lo que proporciona estas funcionalidades. Al igual que estos nodos, los Wasmote Plug & Sense tienen la posibilidad de funcionar como enrutadores por lo que es posible garantizar este requerimiento.

Además de los parámetros antes mencionados existen métricas a través de las cuales se puede evaluar el desempeño de una WSN, el retardo de extremo a extremo, la razón de entrega de paquetes y el *throughput* [14]–[16]. El primer caso consiste en una estadística global que describe el tiempo que le toman a los datos viajar desde el origen al destino. El segundo es el total de paquetes recibidos en el nodo destino entre el total de paquetes enviados por el nodo origen. El tercer caso está definido como el número total de paquetes recibidos exitosamente en el destino dividido por el tiempo de duración de la simulación.

3.2. Configuración de la simulación

Para la simulación se utilizó la herramienta OPNET Modeler 14.5, la misma contiene los modelos de dispositivos ZigBee para los coordinadores, enrutadores y

dispositivos finales. Esta herramienta posibilita definir el escenario con las dimensiones del área para la cual se propone la WSN diseñada. En la figura 3.1 se muestra la ubicación de los dispositivos ZigBee utilizados de acuerdo a la topología empleada, vinculando el escenario definido en OPNET Modeler 14.5 con las imágenes de Google Earth. El empleo combinado de estas aplicaciones garantiza la ubicación de los nodos con gran exactitud, de esta forma se evalúan además la veracidad de los cálculos realizados para el establecimiento de los enlaces.



Figura 3.1: Ubicación de los dispositivos ZigBee. Imagen de OPNET Modeler 14.5 y Google Earth.

Comparar el desempeño de la topología propuesta con otras topologías de red es un elemento esencial para demostrar las ventajas que posee la misma en este tipo de aplicaciones. Es preciso además comprobar la escalabilidad de la red propuesta incrementando el número de nodos hasta llegar a la cantidad límite que especifican los fabricantes.

Para lograr lo antes planteado se configuran tres escenarios en OPNET Modeler 14.5, el primero constituye la propuesta de diseño realizada y está formado por el coordinador de la red y 10 nodos asociados a este en una topología en estrella. El

segundo corresponde a la formación de una topología en malla con la misma cantidad de nodos y el tercero incrementa a 30, la cantidad de los nodos en la red manteniendo la topología en estrella. La comparación del desempeño de las redes de estos tres escenarios permite evaluar la propuesta realizada.

Para la realización de la simulación solo se tiene en cuenta la propuesta realizada con nodos ēKo debido a que la potencia de transmisión de la interfaz de radio es menor que en los nodos Waspote Plug & Sense. El resto de los parámetros que se utilizan para la configuración de la simulación son similares en ambas propuestas. Al evaluar esta variante se está considerando el peor de los casos para el establecimiento de los enlaces. La tabla 3.1 muestra los parámetros que son necesario modificar, para ajustar los atributos de los dispositivos ZigBee en la herramienta OPNET Modeler 14.5 a las especificaciones del equipamiento propuesto en el epígrafe 2.6.

Tabla 3.1 Parámetros de configuración para la propuesta con nodos ēKo.

Parámetros para la simulación	Valor
Velocidad de datos (bits/s)	250000
Umbral de recepción (dBm)	-101
Potencia de transmisión (W)	0,0019952
Intervalo de tiempo entre paquetes (s)	900
Tiempo de la simulación (horas)	2
Banda de frecuencia (GHz)	2,4

En el primer escenario definido en OPNET Modeler 14.5, la configuración de los dispositivos corresponde con la topología en estrella. Solo es necesario utilizar el coordinador de la red (node_0) y diez nodos asociados a este.

La figura 3.2 ilustra la configuración de los dispositivos ZigBee presentes en la red para este escenario.

Attribute	Value	Attribute	Value
name	node_0	name	node_10
ZigBee Parameters		ZigBee Parameters	
MAC Parameters		MAC Parameters	
Physical Layer Parameters		Physical Layer Parameters	
Data Rate	250000	Data Rate	250000
Packet Reception-Power Threshold	-101	Packet Reception-Power Threshold	-101
Transmission Bands	Worldwide	Transmission Bands	Worldwide
Transmit Power	0.0019952	Transmit Power	0.0019952
Network Parameters	(...)	Device Type	End Device
PAN ID	Auto Assigned	PAN ID	Auto Assigned
Application Traffic		Application Traffic	
Destination	All Nodes	Destination	node_0
Packet Interarrival Time	constant (900)	Packet Interarrival Time	constant (900)
Packet Size	constant (1024)	Packet Size	constant (1024)
Start Time	constant (0)	Start Time	constant (0)
Stop Time	Infinity	Stop Time	Infinity

Figura 3.2: Configuración del coordinador de la red y los nodos, tomado de OPNET Modeler 14.5.

La potencia de transmisión se situó en 0.0019952 W para reflejar la potencia de transmisión de los nodos $\bar{e}Ko$. El umbral de potencia de recepción para estos dispositivos es -101 dB. La velocidad de datos se fijó en 250000 bits/s y el tamaño de los paquetes en 1024 bits, lo cual no es común en las WSN, sin embargo se seleccionan estos valores para explorar el caso más crítico. Por último, se selecciona la banda de frecuencia de 2,4 GHz y se define el intervalo de tiempo entre paquetes el cual es 900 segundos, datos suministrados en las especificaciones de los nodos.

3.3 Resultados de las simulaciones

La figura 3.3 muestra el tráfico total recibido en la capa de aplicación para los tres escenarios simulados, se puede observar que en red formada por 10 nodos sensores con una topología en malla se recibe una cantidad de paquetes mucho mayor que en la topología en estrella, a pesar de que se incrementa el número de nodos presentes en la red.

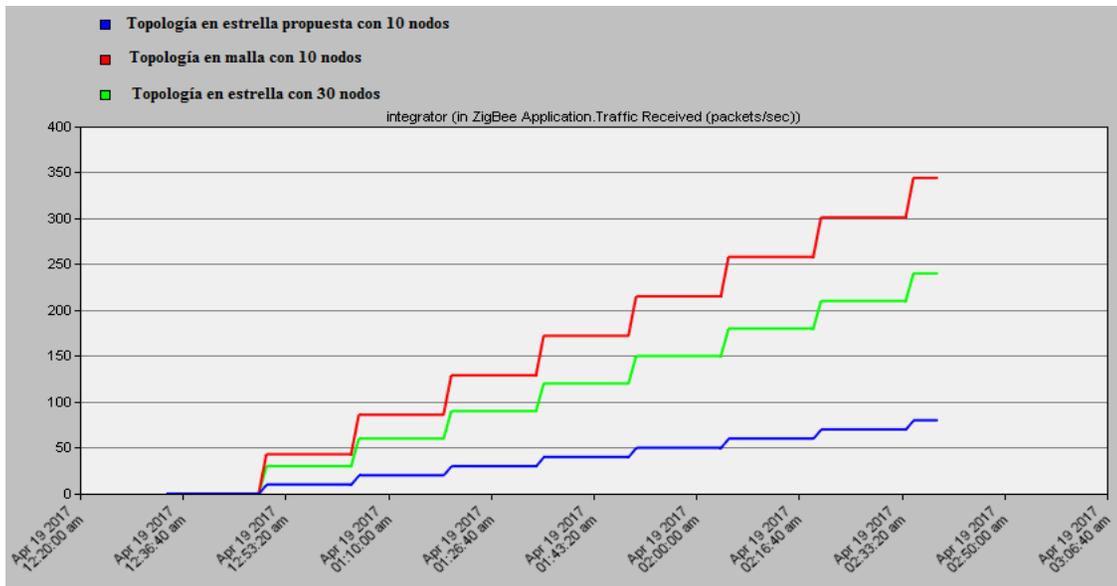


Figura 3.3: Tráfico total recibido en la capa de aplicación, tomado de OPNET Modeler 14.5.

Comparando el valor del retardo extremo a extremo en la capa de aplicación para los tres escenarios simulados tal como se muestra en la figura 3.3. Para la topología en estrella tanto en la red con 10 nodos como con 30, el valor se mantiene en 6,2 milisegundos durante las dos horas de la simulación, menor que el resultado obtenido para la topología en malla con 10 nodos sensores, cuyo valor oscila entre 9 y 10 milisegundos.

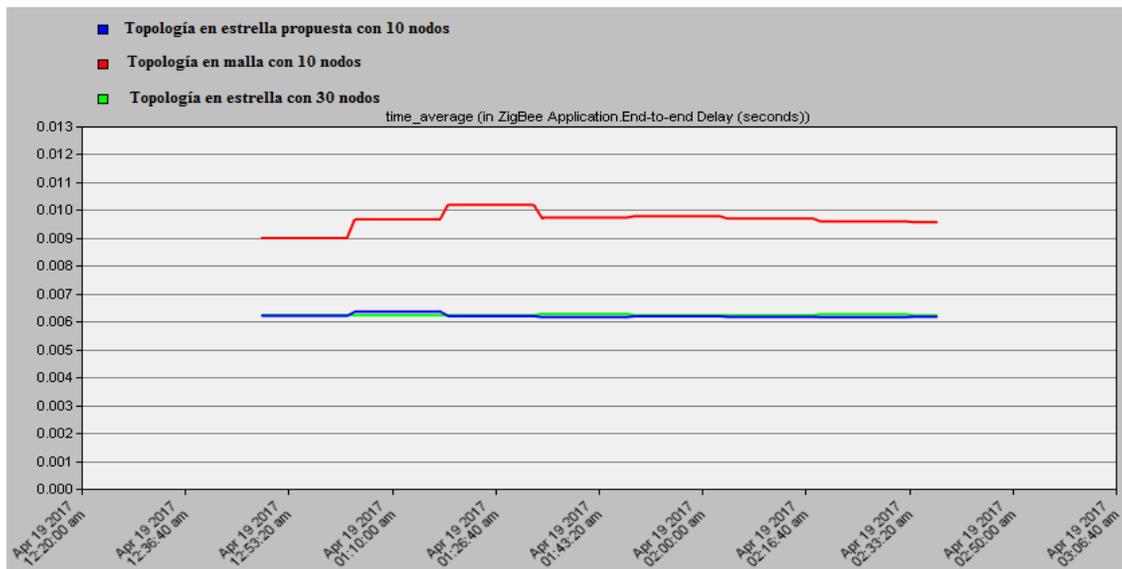


Figura 3.4: Retardo extremo a extremo en la capa de aplicación, tomado de OPNET Modeler 14.5.

La demora promedio en la capa MAC del Coordinador es variable, transcurrido las dos horas de simulación para la topología en malla alcanza 17,5 milisegundos, en los dos escenarios restantes este valor alcanza un valor cercano a 6 milisegundos a pesar de variar considerablemente la cantidad de nodos presentes en la red (ver figura 3.5).

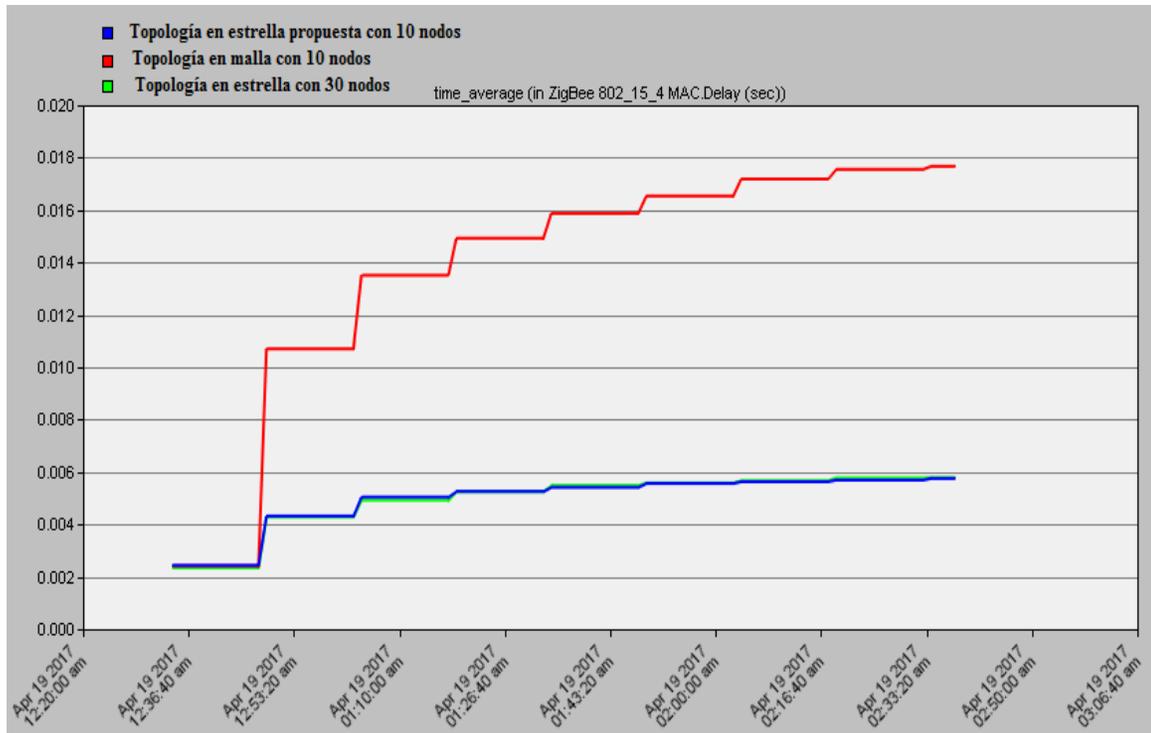


Figura 3.5: Demora promedio en la capa MAC del coordinador, tomado de OPNET Modeler 14.5.

En la Figura 3.6, se muestra el *Throughput* del coordinador de la red en la capa MAC para los tres escenarios. Se puede observar que para el caso de la red en estrella formada por 10 nodos alcanza el valor de 0,15 Kbps, al triplicar el número de nodos en la red con la misma topología, alcanza 0,45 Kbps, mientras que para la red conformada por 10 nodos con una topología en malla es de 7,5 Kbps.

La carga en la capa MAC (ver figura 3.7) es de 10 Kbps y 30 Kbps para las redes con topología en estrella formadas por 10 y 30 nodos respectivamente. Para el caso de la red con una topología en malla con 10 nodos sensores alcanza 75 Kbps.

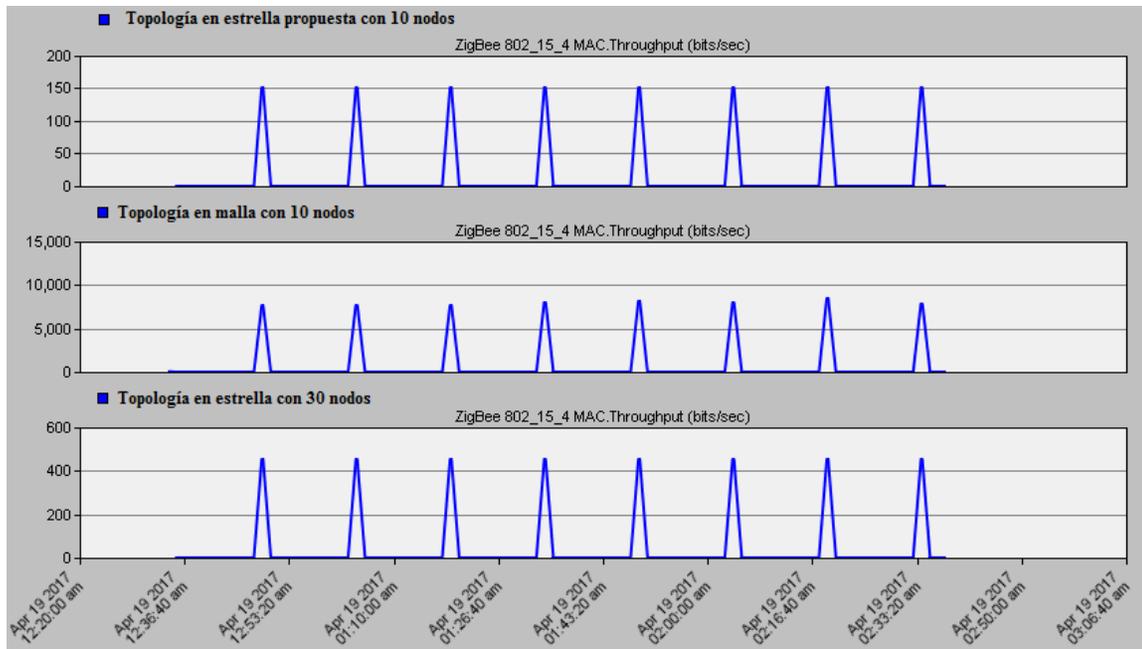


Figura 3.6: *Throughput* del coordinador de la red en la capa MAC, tomado de OPNET Modeler 14.5.

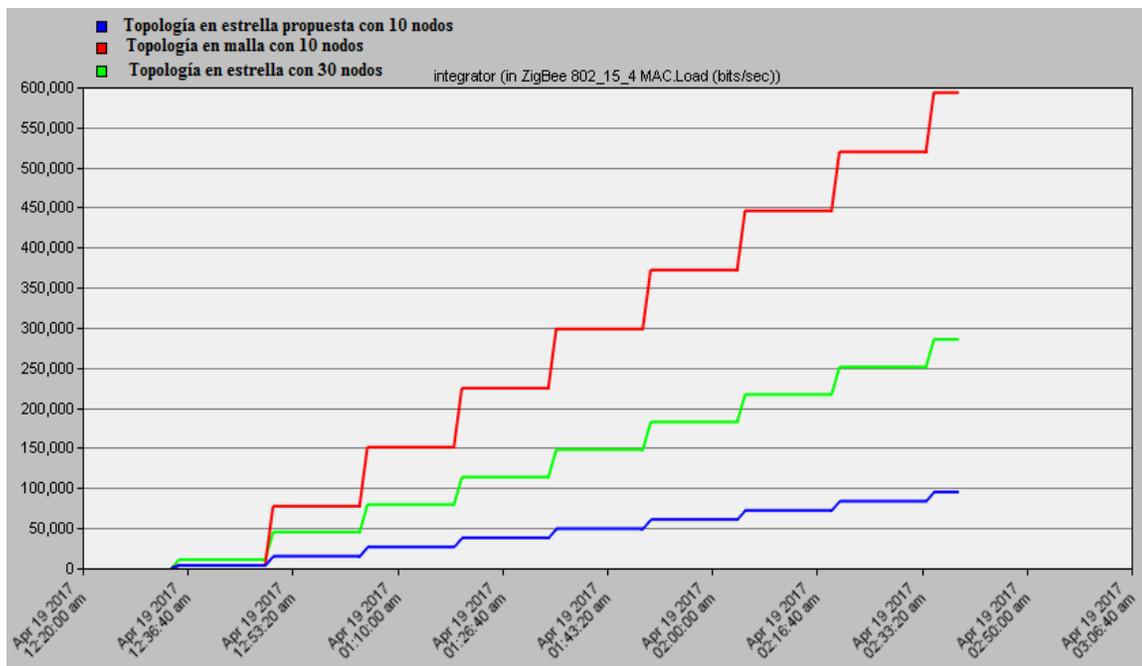


Figura 3.7: Carga del coordinador de la red en la capa MAC, tomado de OPNET Modeler 14.5.

La tabla 3.2 muestra un resumen de los resultados correspondientes a la propuesta presentada. Al ejecutar la simulación por un espacio de tiempo de dos horas, cada nodo ZigBee envía ocho paquetes de datos durante este período al coordinador de la

red, este dispositivo recibe un total de 80 paquetes de datos, la razón de entrega de paquetes es del 100 %.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos en la simulación del primer escenario.

Métricas evaluadas topología en estrella propuesta con 10 nodos.	Resultados
Paquetes de datos enviados por los nodos (paquetes)	80
Paquetes de datos recibidos en la red (paquetes)	80
Razón de entrega de paquetes (%)	100
Retardo en la capa MAC 802.15.4 (ms)	5,55
Retardo extremo a extremo en la capa de aplicación (ms)	6,2
<i>Throughput</i> (Kbps)	0,15

Al comparar estos resultados con los obtenidos para la topología en malla simulada (ver tabla 3.3), se observa que para la misma cantidad de paquetes transmitidos por los nodos, se incrementa considerablemente el tráfico recibido en la red debido a que los paquetes de datos son enviados a varios nodos para garantizar la redundancia de los enlaces. Esto provoca que el retardo extremo a extremo y demora promedio en la capa MAC se eleven a 9,5 y 17,5 milisegundos respectivamente. Algo similar ocurre con el *throughput* cuyo valor oscila entre 7,7 y 8,6 Kbps.

Los elementos antes analizados evidencian el funcionamiento de manera estable de la propuesta realizada y la topología empleada en el diseño propuesto simplifica el funcionamiento de la red.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos en la simulación del segundo escenario.

Métricas evaluadas topología en malla con 10 nodos	Resultados
Retardo en la capa MAC 802.15.4 (ms)	17,5
Retardo extremo a extremo en la capa de aplicación (ms)	9,5
<i>Throughput</i> (Kbps)	7,7 a 8,6

En el escenario tres, una vez incrementado hasta 30 el número de nodos asociados al coordinador de la red, continúa funcionando de manera estable, manteniéndose prácticamente sin variación el retardo extremo a extremo y demora en la capa MAC a pesar de incrementarse significativamente el tráfico en la red. En el caso del *throughput* alcanza el valor de 0,45 Kbps.

3.4 Conclusiones del capítulo

Luego de la evaluación del desempeño de la red propuesta se concluye que:

En el primer escenario correspondiente a la red en topología en estrella con 10 nodos sensores el número de paquetes recibidos es 10 cada 15 minutos durante las 2 horas de simulación. El retardo extremo a extremo 6,2 milisegundos y la demora promedio en la capa MAC del coordinador es 6 milisegundos, el *throughput* 0,15 Kbps mientras que la carga es 10 Kbps.

En el segundo escenario formado por 10 nodos sensores con una topología en malla el número de paquetes recibidos es 48 cada 15 minutos durante las 2 horas de simulación. El retardo extremo a extremo 9,5 milisegundos y la demora promedio en la capa MAC del coordinador es 17.5 milisegundos, el *throughput* varía entre 7,7 Kbps y 8,6 Kbps mientras que la carga es 75 Kbps.

En el tercer escenario correspondiente a la red en topología en estrella con 30 nodos sensores el número de paquetes recibidos es 30 cada 15 minutos durante las 2 horas de simulación. El retardo extremo a extremo 6,2 milisegundos y la demora promedio en la capa MAC del coordinador es 6 milisegundos, el *throughput* 0,45 Kbps mientras que la carga es 30 Kbps.

Los resultados obtenidos en las simulaciones corroboraron el funcionamiento estable de la topología de red en estrella propuesta y sus ventajas en esta aplicación.

CONCLUSIONES

A partir del cumplimiento de los objetivos planteados se arriba a las siguientes conclusiones:

- ✓ Las propias características de las WSN, su facilidad de implementación, el funcionamiento autónomo por largos espacios de tiempo y su elevada resistencia a los impactos agresivos del medio permiten su utilización en entornos agrícolas.
- ✓ Las particularidades del cultivo de la uva determinaron el cálculo de la altura de ubicación de las antenas y la profundidad de colocación de los sensores de humedad y temperatura del suelo.
- ✓ La propuesta de red diseñada garantiza el seguimiento en tiempo real de los parámetros agrometeorológicos que afectan el cultivo de la uva con el propósito de ejecutar acciones que minimicen su impacto.
- ✓ Los dispositivos de los fabricantes MEMSIC y Libelium utilizados en los diseños de red propuestos cumplen con los requerimientos para el establecimiento de los enlaces posibilitando la formación de una topología en estrella que simplifica el funcionamiento de la red.
- ✓ Con la valoración económica realizada se demuestra que la inversión para la introducción de esta tecnología en el área de cultivo en estudio puede ser asumida y recuperada en un período de dos años.
- ✓ Los resultados obtenidos en las simulaciones corroboraron el funcionamiento estable de la topología de red en estrella propuesta y sus ventajas en esta aplicación.

RECOMENDACIONES

Se considera que las siguientes recomendaciones pueden ser de utilidad para enriquecer el estudio realizado y los resultados obtenidos:

- ✓ Implementar la variante de almacenamiento en una base de datos remota de los datos provenientes de la WSN
- ✓ Evaluar dispositivos de otros fabricantes en busca de otras variantes de equipamiento que permitan disminuir los costos.
- ✓ Estudiar la posibilidad de introducción de esta tecnología en otros tipos de cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Marote, "Agricultura de precisión," *Ciencia y tecnología*, pp. 143–166, 2010.
- [2] IEEE 802.15.4, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal," no. October. USA, 2003.
- [3] N. Aakvaag and J. Frey, "Redes de sensores inalámbricos," *Revista ABB*, pp. 39–42, 2006.
- [4] National Instruments, "¿Qué es una red de sensores inalámbricos?," 2009. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>.
- [5] E. O. Sosa, "Contribuciones al establecimiento de una red global de sensores inalámbricos interconectados," Universidad Nacional de la Plata, 2011.
- [6] J. A. Galache, "Contribución al diseño, definición e implementación de una plataforma de investigación para la internet del futuro, basada en un despliegue masivo de redes de sensores inalámbricos heterogéneos, en el marco de la ciudad inteligente," Universidad d Cantabria, 2013.
- [7] J. J. Escudero, "Optimización de energía y eficiencia de transmisión con análisis de imparcialidad en comunicaciones inalámbricas adaptativas," Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [8] D. Gascón, "Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible," *Tecnología y Sociedad*, pp. 53–55, 2010.
- [9] R. Fernández and J. Ordieres, *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. Logroño, España: Universidad La Rioja, 2010, pp. 17–90.
- [10] S. Escolar, "Wireless sensor networks: fundamentos estado del arte y desafíos," in *Arquitectura y Tecnología de Computadores (ARCOS)*, 2011.

- [11] IEEE 802.15.4, *Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, vol. 2011, no. September. USA, 2011.
- [12] IEEE 802.15.4f, “Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)—Amendment 2: Active Radio Frequency Identification (RFID) System Physical Layer (PHY),” vol. 2012, no. April. 2012.
- [13] IEEE 802.15.4e, “Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)—Amendment 1: MAC sublayer,” vol. 2012, no. April. 2012.
- [14] W. Dargie and C. Poellabauer, *FUNDAMENTALS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS THEORY AND PRACTICE*, First Edit. United Kingdom: JohnWiley & Sons Ltd., 2010, pp. 27–34.
- [15] K. Ashrafuzzaman, “Energy and Throughput Optimal Operating Region in Slotted CSMA/CA Based WSN,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 1524–1527, 2012.
- [16] T. Ohsawa and G. Q. M. Jr, “Bridging Functionality for Medium Access Control Sublayer-Applied to Distributed Foundation Wireless Medium Access Control -,” *5th IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. Wirel. Networks - Catch. Mob. Futur.*, vol. 3, pp. 880–884, 2004.
- [17] Y. Wang, “Achieving Fairness in IEEE 802 . 11 DFWMAC with Variable Packet Lengths,” *IEEE Conf. Publ. Glob. Telecommun. Conf. 2001. GLOBECOM '01*, vol. 3, pp. 3588–3593, 2001.
- [18] N. S. Bhat, “Design and Implementation of IEEE 802 . 15 . 4 Mac Protocol on FPGA,” *IEEE Conf. Publ. Int. J. Comput. Appl.*, pp. 1–5, 2011.
- [19] D. Jung and J. Joung, “structure for Energy and Transmission efficiency,” *IEEE Conf. Publ. Int. SoC Des. Conf.*, pp. 257–258, 2015.

- [20] M. U. Harun, A. Rasyid, F. A. Saputra, and M. H. R. Ismar, "Performance of Multi-hop Networks Using Beacon and Non-beacon Scheduling in Wireless Sensor Network (WSN)," *IEEE Conf. Publ. Int. Electron. Symp. Perform.*, pp. 195–199, 2015.
- [21] Viveros Barber, "Mildiu de la vid. Plagas y Enfermedades Viña.," *VitiViniCultura*, 2014. .
- [22] J. Pérez, "EL MILDIU DE LA VID : Síntomas y estrategias de lucha," *Investig. y Desarro. Tecnológico Agroaliment.*, pp. 1–65, 2015.
- [23] UPM, "Morfología de la vid," *Investig. en Vitic.*, vol. 1, pp. 1–13, 2011.
- [24] M. Fueyo, "Manejo de riego con tensiómetros," *CIATA Tecnología Agroalimentaria*, España, p. 4, 2012.
- [25] MEMSIC, "ēKo PRO Series Users Manual," *ALAVA Ing.*, vol. 1, pp. 1–116, 2017.
- [26] National Instruments, "NI 9792 Programmable WSN Gateway," *Tech. Sales*, no. 866, pp. 1–11, 2016.
- [27] National Instruments, "Wireless Sensor Network Programmable Analog Input Measurement Nodes NI WSN-3202, NI WSN-3212, NI WSN-3226," no. 866, pp. 1–14, 2016.
- [28] MEMSIC, "ēKo Node For Environmental Monitoring," *ALAVA Ing.*, vol. 1, pp. 1–2, 2016.
- [29] MEMSIC, "ēKo Pro Series System For Enviromental Monitoring," *ALAVA Ing.*, vol. 1, pp. 1–6, 2016.
- [30] MEMSIC, "ēKo Sensors For Enviromental Monitoring," *ALAVA Ing.*, vol. 1, pp. 1–2, 2016.

- [31] Libelium, “Wireless Sensor Networks with Waspote and Meshlium,” *Libelium Comun. Distrib. S.L.*, vol. 1, pp. 1–22, 2016.
- [32] Libelium, “Waspote Plug & Sense! Sensor Guide,” *Libelium Comun. Distrib. S.L.*, vol. 1, pp. 1–105, 2016.
- [33] Libelium, “Waspote Plug & Sense! Technical Guide,” *Libelium Comun. Distrib. S.L.*, vol. 1, pp. 1–162, 2016.
- [34] Libelium, “Waspote Plug & Sense! Quickstart Guide,” *Libelium Comun. Distrib. S.L.*, vol. 1, pp. 1–27, 2016.
- [35] Libelium, “Waspote Plug & Sense! Quick Overview,” *Libelium Comun. Distrib. S.L.*, vol. 1, pp. 1–29, 2016.
- [36] Libelium, “Meshlium Xtreme Technical Guide.” España, 2017.
- [37] Libelium, “Product catalogue,” 2017.
- [38] ITU-R, “Attenuation in vegetation P Series Radiowave propagation,” *Int. Telecommunication Union*, vol. 9, pp. 1–29, 2016.
- [39] UIT-R, “RECOMENDACIÓN UIT-R P . 833-3 Atenuación debida a la vegetación,” *Union Int. Telecomunicaciones*, vol. 1, pp. 1–7, 2001.
- [40] L. Figueredo, “Propuesta de diseño de red de sensores inalámbricos para la programación del riego en la caña de azúcar,” Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2016.
- [41] J. J. Murillo, *Problemas de radiocomunicación*. Sevilla, España: Sevilla, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de, 2013, pp. 3–9.
- [42] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems P Series Radiowave propagation,” *Int. Telecommunication Union*, vol. 16, pp. 1–58, 2015.

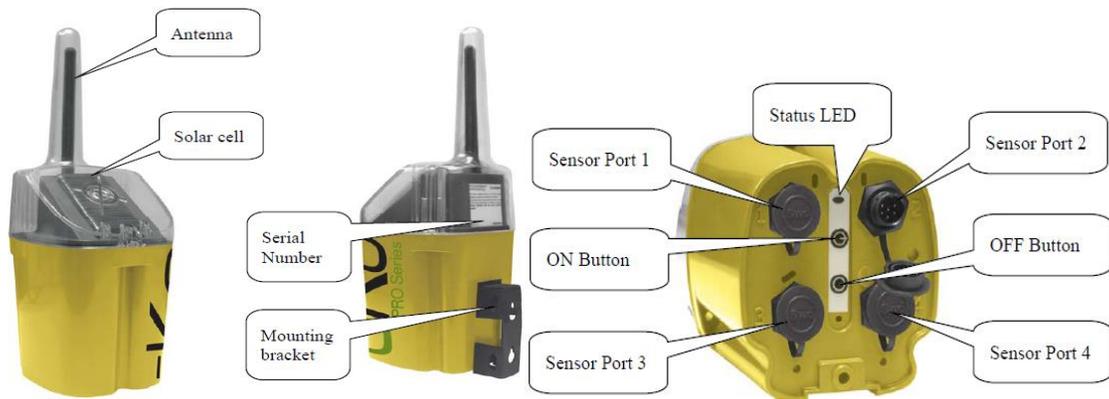
- [43] UIT-R, "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa Serie P," *Unión Int. Telecomunicaciones*, vol. 13, pp. 1–53, 2009.
- [44] G. Echeverry, Y. Cabezas, and N. Olarte, "ISM Frequency Regulations for Xbee-802.15.4-Pro Device Applications Artículo," *INGE CUC*, vol. 10, no. 2, pp. 81–90, 2014.
- [45] Libelium, "Meshlium X treme Guía Técnica." Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., España, pp. 1–98, 2017.
- [46] Thinkbox Software Inc, "XMesh for Maya - Introduction," *Thinkbox Software*, 2017. .
- [47] F. V. Mendoza, "Cálculo del costo de producción de uva para vinificar," *Inst. Nac. Viticultura*, vol. 1, pp. 2–20, 2015.

ANEXOS

ANEXO I. Equipamiento del fabricante MEMSIC

Nodo eKo – eN2120

eKo Node	eN2120
Sensor Ports	
Number of Ports	4: Each port can support one e ⁻ Ko compatible sensor.
Sensor Types	Each port supports either an e ⁻ Ko compatible simple or smart sensor (MEMSIC ESB protocol).
Sensor Measurement Interval	One measurement every 15 minutes (default).
Connectors	Compatible with 6 pin, Switchcraft
Radio	
Frequency	2.405 to 2.480 GHz
Channels	16 channels available selectable via rotary switch
Type	DSSS, IEEE 802.15.4
Transmitter Power Output	+3dBm (typical)
Receive Sensitivity	-101dBm (typical)
Outdoor Range Per Single Radio Hop	Typical 500ft to 1500ft line-of-sight per hop.
Outdoor Coverage (typical)	• Flat with no overhead canopy: 1 eN2120 per 15-25 acres
	• Hilly but no overhead canopy: 1 eN2120 per 5-7 acres
	• Overhead canopy such as forest, orchards: 1 eN2120 per 1-2 acres
Antenna	Dipole, internal
Certification	
Visual Indicators	
LED	One tricolor LED to indicate sensor and network connectivity
Power	
Operating Current	0.4 mA average (no sensors) at 15 minute data sampling rate
Solar Panel	Self-contained 1.3"x 2.5" solar panel to recharge batteries
Batteries	Standard: 3 AA low-leakage NiMH rechargeable (via internal solar panel). Life Expectancy: 3 months with no solar recharging; > 5 years field life
Mechanical	
Water / Dust Resistance	IP66 (Protected from dust and high pressure water jets)
Operating Temperature	-40C to +60C (battery life degraded above 50C)
Operating Humidity	0 to 100 %RHI, Condensing
Storage Temperature	-45C to +70C (excluding battery)
Mounting Bracket	Wall/pole attachable bracket for quick disconnect of eN2120.
Size	3.75" x 3.5" x 10.5" / 95 x 89 x 267mm
Weight	1.2 lbs/544g



LED Sequence	1 st Flash	2 nd Flash	3 rd Flash	4 th Flash	Repeated Flashes	Solid On
LED On Period	2 sec	2 sec	2 sec	2 sec	1 sec	20 sec
LED Color					2+ connections 1 connection No connections
Operation	Scan Port 1	Scan Port 2	Scan Port 3	Scan Port 4	Scanning the network	Results of network Scan

Port Scan Mode	Description
Red flashing	No sensor was detected at that port
Green flashing	Sensor was detected at that port
Network Search Mode	Description
Rapid blue flashing	This pattern starts each time the ON button is pressed and after the sensor port scan is complete. The node is searching for nearby nodes to determine the quality of the available radio paths. After one minute, the blue flashing will stop and a color (see below) will be displayed for 20 seconds.

Connection Status	Description
Solid red	No radio paths have been found. Move the location of the node or place a repeater node.
Solid yellow	One good radio path found. If there is only one node in the network then this is OK however there will be no alternate radio paths to the base radio.
Solid green	Two or more solid paths found. The node is in a good position.

Puerta de enlace eKo – eG2120

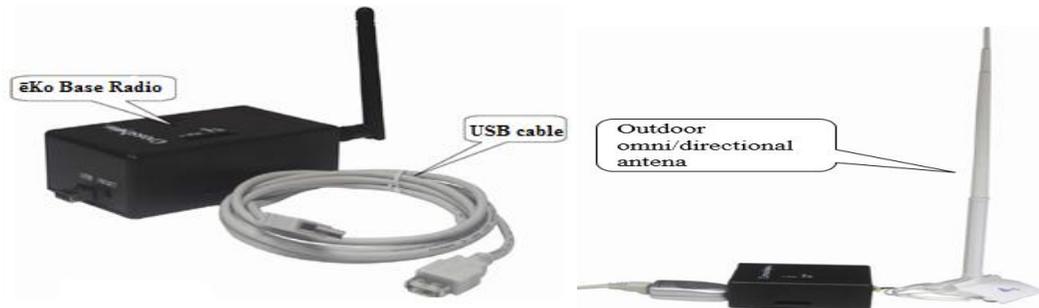
Gateway	eG2120
Operating System	Debian Linux OS
Maximum network size	35 eKo Nodes per gateway
Flash Memory	
Type	USB plug – in
Memory Size	4 GB (gigabytes)
Connectors	
Ethernet	1 RJ45
USB	2 USB 2.0 host (USB 1.0/1.1 compatible)
Visual Indicators	
5 LEDs	Status indicators
Power	
Supply Voltage	5V
Power	4W
Mechanical	
Enclosure	Indoor rated
Operating Temperature	6C to 40C ambient
Operating Humidity	10% to 80% non-condensing
Size / Weight	5.2" x 0.83" x 3.6" / 0.35 lbs



Indicator	Color	Status
Power Button	Green	System on
Ready/Status	Green/flashing Yellow	System running
	Yellow then flashing Green	System boot
Ethernet	Flashing Green	Network activity
Disk2	Solid Green	XServe Running
Disk1	Green	USB disk running

Radio base eKo – eB2120

eKo Base Station	EB2120
Radio	
Frequency	2.405 to 2.480 GHz
Channels	16 channels available
Type	DSSS, IEEE 802.15.4
Transmitter Power Output	+3dBm (typical)
Receive Sensitivity	-101dBm (typical)
Outdoor Range Per Hop	Typical 500ft to 1500ft line of sight per hop. Range extends through mesh networking hops.
Antenna	Removable dipole antenna.
Antenna Connector	Reverse SMA compatible with most wifi indoor and outdoor antennas
Certifications	
Visual Indicator	
5 LED	Indicate power and radio communication
Cables	
USB	6ft USB cable between eKo base radio and eG2120 gateway.
Power	
Voltage	Supplied via USB cable from gateway.
Operating Current	30 mA average
Mechanical	
Enclosure	Indoor rated
Operating Temperature	6C to 40C ambient
Operating Humidity	10% to 80% non-condensing
Size / Weight	2.25" x 1.25" x 4" / 0.25 lbs



	Standard	Remote Indoor	Remote Outdoor
Cable connection lengths			
Antenna distance to the base radio	0 ft	3 ft	3-50 ft
Base radio distance to the gateway	8 ft	100 ft	100 ft

Sensor de humedad y temperatura del suelo eKo – eS1101

eS1101 – Soil Moisture and Soil Temperature	
Type	Simple eKo sensor
Sensor Manufacturer / Model	<ul style="list-style-type: none"> • Soil Moisture: Irrrometer/Watermark • Soil Temperature: Davis
Range	<ul style="list-style-type: none"> • Water Potential: 0 to 200 cbar • Temperature: -40C to +70C
Accuracy	+/- 5%
Cable Length	16ft / 4.8m - 20ft / 6m
Connector	6 pin, Switchcraft
Size	<ul style="list-style-type: none"> • Soil Moisture: 3.25" x 3/4" (diameter) • Soil Temperature: 1" x 1/4" (diameter)
Weight	0.6 lbs including cable



Sensor de humedad y temperatura del ambiente eKo – eS1201

eS1201 – Ambient Temperature and Humidity	
Type	Simple eKo sensor
Sensor Manufacturer / Model	MEMSIC – Using Sensirion SHT75
Range	<ul style="list-style-type: none"> • Humidity: 0 to 100%RH • Temperature: -40 deg to 70 degC
Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> • Humidity: +/-3% [10 to 90%RH] • Temperature: +/-2C full range, +/-1C above -20C
Cable Length	20ft / 6m
Connector	6 pin, Switchcraft
Size	3 ⁵ / ₈ " x 1.4" (diameter)
Weight	0.5 lbs including cable
Weather Rating	IP65 Indoor / Outdoor



Estación meteorológica eKo – eS2000

Sensors	Resolution	Range	Accuracy
Barometric Pressure (Elevation Range - 1000' to +12,500')	0.1 mbar	880 to 1080 mbar	1.0 mbar
Rainfall	0.02 mm (Rounded to 1mm at 2000 mm and above)	Day: 0 to 9999 mm Storm: 0 to 9999 mm Month: 0 to 19,999 mm Year: 0 to 19,999 mm	4%
Solar Radiation	1 W/m2	0 to 1800 W/m2	5%
Temperature	0.1°C	-40° to +65°C	0.5°C
Humidity	1%	0% to 100%	3%
Wind Direction	1°	0° to 360°	7°
Wind Speed	0.1 m/s - 1 km/hr	1 to 67 m/s 3 to 241 km/hr	5%



ANEXO II. Equipamiento del fabricante Libelium



Nodo Waspnote
Plug & Sense! SA
802.15.4



Meshlium
Puerta de enlace



Sensor de humedad del suelo



Sensor de temperatura
del suelo



Estación meteorológica

Puerta de enlace Meshlium



Processor	1 GHz Quad Core (x86)	
RAM memory	2 GB (DDR3)	
Disk memory	16 GB	
Power	6 to 12 W (12 V)	
Power source	PoE (Power Over Ethernet)	
Max current supply	2 A	
Enclosure	Material	Aluminum
	Dimensions	300 x 220 x 87 mm
	Weight	2.2 kg
	External protection	IP65
Temperature range	-20 °C / 50 °C	
Response time to Ethernet ping	60 s	
Time to have all the services running	60 s	
Types of power supply*	AC-220 V (DC-12 V)	
	Linux, Debian based	
	Meshlium Manager System	
Management software	(open source)	
Security	Authentication WEP, WPA, WPA2, HTTPS	

(*) Only with the accessories supplied by Libelium

4G/LTE module



Protocols	4G, LTE, 3G, WCDMA, HSPA, UMTS, GPRS, GSM
Frequency bands, EU/BR version	LTE - 800 (B20) / 1800 (B3) / 2600 (B7) UMTS - 850 (B5) / 900 (B8) / 2100 (B1) GSM/GPRS - 900 /1800
Frequency bands, US version	LTE - 700 (B17) / 850 (B5) / AWS1700 (B4) / 1900 (B2) UMTS - 850 (B5) / 1900 (B2) GSM/GPRS - 850 / 1900
Frequency bands, AU version	LTE - 700 (B17) / 1800 (B3) / 2600 (B7) (AU models do not support 3G, GPRS or GSM)
Output power	Class 4 (2 W, 33 dBm) @ GSM 850/900 Class 1 (1 W, 30 dBm) @ GSM 1800/1900 Class E2 (0.5 W, 27 dBm)@ EDGE 850/900 Class E2 (0.4 W, 26 dBm)@ EDGE 1800/1900 Class 3 (0.25 W, 24 dBm) @ UMTS Class 3 (0.2 W, 23 dBm) @ LTE
RX rate	Up to 100 Mb/s
TX rate	Up to 50 Mb/s
Antenna	4 dBi
SIM card	Access via the External micro-SIM socket

Radio Zigbee



Modelo	XBee - PRO - 802.15.4
Frecuencia	2.4GHz
Potencia-Tx	100mW
Sensibilidad Rx	-100dBm
Antena	5dBi Dipolo
Distance	7km*

Modelo	XBee - PRO - ZigBee
Frecuencia	2,4GHz
Potencia-Tx	50mW
Sensibilidad Rx	-102dBm
Antena	5dBi Dipolo
Distancia	7km*

Radio Wifi AP - 2.4GHz



RADIO WIFI	
Chipset	Atheros AR5213A - IEEE 802.11b/g
Potencia-TX	100mW - 20 dBm
Distancia	500m*
(*) Dependiendo de la antena y línea de vista	
ANTENA	
Tipo	Omnidireccional
Ganancia	5dBi
Dimensiones	224 x 22 mm

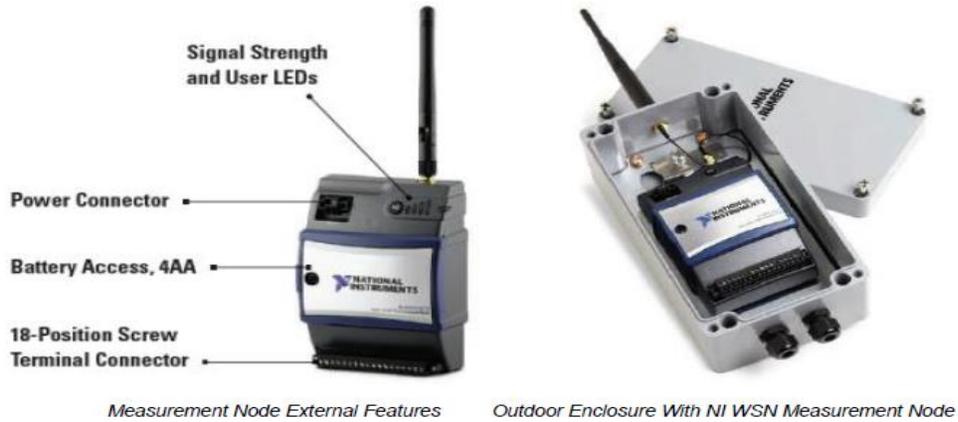
Nodo Wasmote Plug & Sense SA 802.15.4

General data and Specifications					
Microcontroller		ATmega1281			
SRAM		8 KB			
EEPROM		4 KB			
FLASH		128 KB			
SD Card		2 GB			
Battery voltage		3.3 V - 4.2V			
Solar panel charging:		6 - 12 V - 280mA			
Temperature Range		-10/50°C			
Enclosure		Material		polycarbonate	
Sealing		polyurethane			
Cover screws		stainless Steel			
Ingress protection		IP 65			
Approximated weight		800 g			
Radio					
Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.405 - 2.465 GHz	100 mW	-100 dBm	7000 m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.40 - 2.47 GHz	50 mW	-102 dBm	7000 m



ANEXO III. Equipamiento del fabricante National Instruments

Nodo NI WSN-3202



Wireless Characteristics	
Radio mode	IEEE 802.15.4
RF data rate	250 kbit/s
Frequency band ¹	ISM 2.4 GHz (2400 MHz to 2483.5 MHz)
Channels ²	11–24
TX power	
Americas	+17 db (50 mW)
International	+10 db (10 mW)
Range	
Americas	Up to 300 m
International	Up to 150 m
Modulation type	DSSS (O-QPSK)
Receiver sensitivity	-102 dBm
Antenna	
Connector	Female RP-SMA connector
VSWR	MAX 2.0
Impedance	50 Ω
Directivity	Omni
Nominal gain	1.5 dBi

Puerta de enlace WSN programable NI 9792



Wireless Characteristics

Radio mode	IEEE 802.15.4
RF data rate	250 kbits/s
Frequency band ¹	ISM 2.4 GHz (2400 MHz to 2483.5 MHz)
Channels ²	11–24
TX power	

Version	Maximum Radio Output	Outdoor Range
Americas	+17 dBm max (50 mW)	Up to 300 m
Europe/Asia	+10 dBm max (10 mW)	Up to 150 m

Modulation type	DSSS (O-QPSK)
Receiver sensitivity	-102 dBm
Antenna	
Connector	Female RP-SMA connector
VSWR	MAX 2.0
Impedance	50 Ω
Directivity	Omni
Nominal gain	1.5 dBi

Memory

Non-volatile	2 GB
Use the following formula to determine the minimum life span in years of the nonvolatile memory:	
Memory life span in years = $\frac{\text{Amount of memory in NI 9792 (MB)} \times 100,000/365 \text{ days}}{\text{file size (MB)} \times \text{write rate (per day)}}$	
DRAM	256 MB

ANEXO V. Solapamiento entre canales Zigbee y WiFi

