



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**

Tesis para optar el Título de INGENIERO ELECTRÓNICO, que presenta el bachiller:

Daniel Villón Valdiviezo

ASESOR: Ing. Luis Angelo Velarde

Lima, Junio de 2009

RESUMEN DE TESIS

La presente investigación realizada durante el periodo de un año en la Universitat Politècnica de Catalunya en Barcelona – España, tiene como objetivo presentar dos conceptos. El primero de ellos, la problemática de la agricultura en el Perú y en general en el mundo. La dificultad y complicación para obtener información al momento y confiable del estado de amplias extensiones de terreno plantea como solución a la Agricultura de Precisión. Este concepto viene marcando la pauta no solo en lo concerniente a la obtención de información sino también en la maximización de recursos como el agua y fertilizantes que den como resultado el mayor tamaño o cantidad de producción posible. El segundo de ellos, las redes de sensores inalámbricas. Esta versátil tecnología es capaz de dar un sinnúmero de soluciones a diversas problemáticas actuales que se derivan de la falta de información. En el presente estudio se presenta a las redes de sensores inalámbricas como una solución a la necesidad de contar con información inmediata y confiable.

El presente estudio consta del diseño y la implementación de una red de sensores inalámbrica, sin embargo, debido a la imposibilidad de contar con la misma tecnología en el Perú, tan solo se presentará el diseño de la red y los resultados obtenidos en la implementación. En el proceso de diseño se tomó en cuenta que para esta aplicación específica, la topología de la red y el protocolo a diseñar debían dar a la misma confiabilidad en la entrega de información y el menor consumo de energía posible. Finalmente se consideró que la red debía ser capaz de ser escalable y presentar su información en un software amigable y dinámico que permita un sencillo análisis.





<u>INDICE DE FIGURAS</u>	<u>6</u>
<u>INDICE DE TABLAS</u>	<u>8</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>9</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>9</u>
<u>1. LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL PERÚ</u>	<u>13</u>
1.1. LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	13
1.2. ANTECEDENTES DE APLICACIONES SIMILARES	15
1.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	18
1.3.1. DISTRIBUCIÓN SE SENSORES POR UMS	20
1.3.2. MICROCLIMAS	22
1.3.3. PREVENCIÓN DE PLAGAS	22
1.3.4. ALMACENAMIENTO DE DATOS	23
1.3.5. AHORRO EN INSUMOS, ADMINISTRACIÓN EFICIENTE DE RECURSOS Y TOMA DE DECISIONES EN TIEMPO REAL	23
<u>2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS</u>	<u>25</u>
2.1. REDES DE SENSORES CABLEADAS	25
2.2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS (SIN HILOS)	26
2.2.1. ELEMENTOS Y TOPOLOGÍAS	28
2.2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES	32
2.2.3. ESTANDARIZACIÓN	44
2.2.4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	46
2.2.5. APLICACIONES Y DESARROLLOS ACTUALES	50
<u>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</u>	<u>53</u>
3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL	53
3.2. HIPÓTESIS SECUNDARIAS	53
3.3. OBJETIVO GENERAL	53
3.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	53
<u>4. DISEÑO DEL SISTEMA</u>	<u>55</u>
4.1. ELEMENTOS CROSSBOW DISPONIBLES	55
4.1.1. GATEWAYS	55
4.1.2. MOTES	56
4.1.3. TARJETAS DE EXPANSIÓN	59
4.2. TINYOS	62
4.2.1. ESTRUCTURA DE TINYOS	63
4.2.2. PROGRAMACIÓN EN NESCS SOBRE TINYOS	64

4.3. HERRAMIENTAS DISPONIBLES	67
4.3.1. TOSSIM	68
4.3.2. SERIAL FORWARDER	69
4.3.3. TOSBASE Y LISTEN	70
4.4. TOPOLOGÍA A USAR	71
4.5. ELEMENTOS A USAR	71
4.5.1. GATEWAY MIB520	71
4.5.2. MICAZ	72
4.5.3. TARJETA DE EXPANSIÓN MTS300	76
4.5.4. TARJETA DE EXPANSIÓN MDA300	78
4.5.5. SENSORES ACOPLADOS	80
4.6. INTERFAZ USUARIO	82
4.7. CARACTERÍSTICAS DE LA RED	85
4.7.1. ESCALABILIDAD Y FLEXIBILIDAD	87
4.7.2. CONSUMO DE ENERGÍA EFICIENTE	88
4.8. EL PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO	88
4.8.1. DESARROLLOS ANTERIORES Y CONSIDERACIONES	89
4.8.2. NST-AODV PARA AHORRO DE ENERGÍA	94
5. PRUEBAS REALIZADAS	102
CONCLUSIONES Y VALORACIÓN	105
LISTADO DE ACRÓNIMOS	109
BIBLIOGRAFÍA	111

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 0-1 Tendencia estimada de los precios por mote [33].....	12
FIGURA 1-1 Variables a considerar para el adecuado riego y fertilización de plantas.....	14
FIGURA 1-2 Reporte de la variación de la humedad [6].....	17
FIGURA 1-3 Progreso del nivel de humedad para un árbol de durazno. [6].....	18
FIGURA 1-4 Capas componentes de una red de sensores sin hilos para agricultura.....	20
FIGURA 1-5 División de una finca por Unidades de Medida o UM [6].....	21
FIGURA 1-6 Leaf Wetness Sensor de la empresa Decagon Devices Inc.....	23
FIGURA 2-1 Ejemplo de Plataforma de Aplicación MOTE-VIEW.....	29
FIGURA 2-2 Topología Estrella con descripción de los elementos [11].....	31
FIGURA 2-3 Topología Malla [11].....	32
FIGURA 2-4 Topología Híbrida Malla – Estrella [11].....	32
FIGURA 2-5 Arquitectura típica del sistema de un nodo [18].....	33
FIGURA 2-6 Evolución del consumo de corriente eléctrica en un nodo Mica2 de Crossbow ..	35
FIGURA 2-7 Red de sensores con una estación base. Los nodos en la región de color amarillo son aquellos por los que pasa toda la información de la red.....	35
FIGURA 2-8 Camino de la señal desde el sensor hasta los sistemas de bajo consumo. Nótese la etapa de filtrado añadida por delante de la etapa de amplificación [21].....	37
FIGURA 2-9 Jerarquía de una red malla para un ejemplo de un sistema de seguridad [22].....	39
FIGURA 2-10 Nodo Spec de la UCB con un área de 2.5mm ² . Integra por primera vez comunicación radio en un chip procesador de sensado.....	39
FIGURA 2-11 Alcances de los estándares 802.15.4 y Zigbee en las capas de una red [17]....	44
FIGURA 2-12 Compañías que componen la Zigbee Alliance [17].....	46
FIGURA 2-13 Relación Potencia vs. Distancia para redes de un solo salto y multi-salto [16]...	47
FIGURA 2-14 Relación Potencia vs. Distancia para 2 frecuencias distintas [31].....	48
FIGURA 4-1 Mote MICAz de la empresa Crossbow Technology INC.....	57
FIGURA 4-2 Mote MICA2DOT en comparación en tamaño con una moneda.....	57
FIGURA 4-3 Mote Cricket v2. Se aprecia el transmisor – receptor de Ultrasonido (US).....	58
FIGURA 4-4 Mote TELOS B (TPR2400).....	59
FIGURA 4-5 Tarjeta de expansión MTS510CA.....	60
FIGURA 4-6 Tarjeta de expansión MTS420CA con GPS.....	61
FIGURA 4-7 Tarjeta de expansión MDA100CA con área para desarrollo de prototipos.....	62
FIGURA 4-8 Tarjeta de expansión MDA300CA con interfaz para sensores externos.....	62
FIGURA 4-9 Aplicación Blink.....	65
FIGURA 4-10 Representación general de una configuración en TinyOS/nesc.....	65
FIGURA 4-11 Configuración Blink.....	66
FIGURA 4-12 Módulo Blink.....	67
FIGURA 4-13 Entorno de simulación TinyViz.....	69
FIGURA 4-14 Ventana GUI correspondiente a SerialForwarder.....	70
FIGURA 4-15 Gateway MIB520 y sus partes señaladas.....	72
FIGURA 4-16 Diagrama esquemático de la conexión del puerto USB del MIB520.....	72
FIGURA 4-17 Hembra y Macho del bus de conexión de 51 pines presente en MICA2 y MICAz	74
FIGURA 4-18 Diagrama de bloques de un mote MICAz [35].....	74
FIGURA 4-19 RSSI vs. Potencia de Tx para los valores típicos en un MICAz [35].....	75
FIGURA 4-20 Tarjeta de expansión MTS300CA.....	77
FIGURA 4-21 Diagrama esquemático de la conexión del sensor de luz y temperatura al canal 1 del ADC.....	78
FIGURA 4-22 Parte trasera de la MDA300 señalando la región de las resistencias de escalamiento.....	79
FIGURA 4-23 Sonda para medición de humedad del suelo ECH ₂ O EC-5 de Decagon Devices Inc.....	80
FIGURA 4-24 Comparación de VWC para distintos tipos de suelo con la misma sonda.....	82
FIGURA 4-25 Cableado de la sonda EC-5.....	82
FIGURA 4-26 Interfaz usuario.....	83
FIGURA 4-27 Opciones de tipos de nodos que se pueden agregar a la red.....	84
FIGURA 4-28 Gráfico de componentes de una aplicación típica.....	90
FIGURA 4-29 Canales disponibles en la banda 2.4 Ghz con sus respectivas frecuencias centrales [29].....	90

FIGURA 4-30 Fases I/Q para modulación O-QPSK [29]..... 91

FIGURA 4-31 Esquema de conexiones del módulo CC2420Radio.nc..... 91

FIGURA 4-32 Esquema de una trama de datos según IEEE 802.15.4 [29]..... 92

FIGURA 4-33 Clustering en una red de sensores [18]..... 95

FIGURA 4-34 Arquitectura de los módulos de NST-AODV..... 96

FIGURA 4-35 Tramas del protocolo NST-AODV..... 97

FIGURA 4-36 Proceso de envío y recepción de mensajes..... 98

FIGURA 4-37 Arquitectura del sub-módulo SingleHopManager..... 99

FIGURA 4-38 Archivo MAKEFILE para la programación de los motes..... 101



INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2-1 Comparativa de las características principales de los diferentes nodos que componen una jerarquía [22]</i>	40
<i>Tabla 2-2 Frecuencias disponibles para aplicaciones ISM según la Tabla Internacional de Asignación de Frecuencias</i>	41
<i>Tabla 4-1 Características principales del Gateway Stargate SPB400</i>	56
<i>Tabla 4-2 Características principales del mote TELOSB</i>	59
<i>Tabla 4-3 Características de los modelos de la familia de tarjetas de expansión MTS</i>	60
<i>Tabla 4-4 Características de los modelos de la familia de tarjetas de expansión MDA</i>	61
<i>Tabla 4-5 Comparativa de las características hardware de los motes MICA [35]</i>	73
<i>Tabla 4-6 Código para la selección de la potencia de transmisión en MICAz</i>	75
<i>Tabla 4-7 Consumos promedios de los bloques funcionales de un MICAz</i>	76
<i>Tabla 4-8 Voltaje, resistencia y temperatura para el Panasonic ERT-J1VR103J</i>	78
<i>Tabla 4-9 Rangos máximos permitidos en la MDA300CA [39]</i>	80
<i>Tabla 4-10 Especificaciones técnicas de la sonda EC-5</i>	81
<i>Tabla 4-11 Resumen de las clases de redes en que se pueden catalogar</i>	86
<i>Tabla 4-12 Codificación Símbolo a Chip según lo especificado en IEEE 802.15.4 [29]</i>	91



INTRODUCCIÓN

Coates, Mahaffie y Hines [1] presentan en su libro “2025 – Scenarios of Us and Global Society Reshaped by Science and Technology” algunas suposiciones básicas que describirían el mundo en el año 2025 de acuerdo a las tendencias actuales en diferentes ámbitos. En una de ellas, ellos plantean: “Todo será mas inteligente (...), esto será logrado ya sea instalando microprocesadores y sensores dentro de todo tipo de dispositivos y sistemas o creando materiales que respondan a variables físicas tales como la luz, el ruido, los olores, los campos electromagnéticos, o con una combinación de estas 2 estrategias.”, ellos plantean también: “La percepción remota de la tierra conducirá al monitoreo, evaluación y análisis de los eventos y los recursos sobre y debajo de la superficie terrestre y marina. En muchos lugares, redes de sensores in situ ayudarán a monitorear el ambiente”. No es necesario esperar hasta el año 2025 para descubrir que las redes de sensores se están volviendo quizás la tendencia mas importante de los últimos años, queda claro que en cualquier proceso la cantidad de información que se puede obtener de él nunca será suficiente; son las redes de sensores las que se plantean como una alternativa viable a la necesidad de información. Hoy en día se empieza a difundir el uso de la redes de sensores sin hilos (Wireless Sensor Networks – WSN) como una nueva forma de entender y administrar nuestro mundo físico en áreas como el cuidado de especies en peligro de extinción, contaminación del aire, tratamiento de pacientes, etc [10].

Los últimos avances en tecnología MEMS (Micro-electro-mechanical Systems) han hecho posible que la transmisión de datos vía RF se haga posible con dispositivos diminutos capaces de lograr autonomías de años inclusive a muy bajo costo. Es ahora posible gracias a esta tecnología incorporar dentro de un solo chip, un transmisor y un receptor de radio con sus respectivos inductores discretos de alto factor de calidad Q, varactores y filtros que habían sido hasta hace algunos años elementos imposibles de integrar en un chip y que terminaban dominando el tamaño del transmisor-receptor. Es esta misma tecnología la que está impulsando la creación de dispositivos de sensado y procesado con un volumen y consumo de energía apropiados para su desempeño en el tipo de aplicaciones que se le desea utilizar. Es justamente la integración de estos dispositivos, sensado, procesado y transmisión-recepción lo que da lugar al concepto de mote o mota impulsando la idea de una red de sensores basada en el concepto de nodos que no compiten sino que colaboran en un objetivo común.

Es de este modo que nos encontramos con una de las necesidades más básicas del ser humano como es la alimentación. La agricultura de precisión es la tendencia que viene marcando la pauta en lo referente a la maximización de los recursos para el cultivo de todo tipo de especies comestibles, permitiéndonos controlar el uso óptimo de recursos como el agua y fertilizantes, implementar los ambientes más propicios, lograr el mayor tamaño o la mayor cantidad de producción, etc.

Lo que se presenta en este estudio, es la fusión de ambas tendencias, el uso de las redes de sensores sin hilos en agricultura de precisión tal y como lo plantea Santiago Rodríguez [2] “Para aumentar la eficiencia de las tareas e insumos, es indispensable el aporte de los nuevos elementos desarrollados por la avanzada tecnología de las Telecomunicaciones, incorporadas a la Agricultura de Precisión. Las Telecomunicaciones, nos brindan todos los medios requeridos por los cuales podemos transferir información muy variada desde y hacia distintos puntos geográficos, relacionándolos entre sí. (...) La transmisión de datos e información por medio de las Redes Integradas de Datos se vuelve crucial e indispensable para aplicaciones de la agricultura de precisión que requieren el análisis de los datos en tiempo real”. Cabe destacar que durante la última década en especial, ha habido un sinnúmero de escándalos e incidentes relacionados con contaminación de la cadena de abastecimiento de alimentos produciendo en los consumidores desconfianza y malestar sin mencionar los costos financieros y políticos de estos hechos. Ante estos lamentables hechos, se ha descubierto, para sorpresa de muchos, que gran parte de los procesos en la industria alimentaria siguen siendo manuales y poco controlados por lo que gobiernos como la Comunidad Europea han establecido fuertes normativas en lo referente al rastreo del origen de las producciones así como en higiene de las mismas. Sin embargo, ninguna de estas supone una prevención de estos incidentes sino más bien es una forma de rápida reacción y fácil descubrimiento de culpables sin considerar que muchas veces hay factores que escapan al conocimiento y control de los productores, creemos que las redes de sensores sin hilos son una respuesta al complejo problema de la maximización de la producción, uso eficiente de recursos y prevención problemas a la salud de los consumidores [3].

Es el interés del presente estudio también colaborar en el diseño y en la investigación de nuevos protocolos que en esta ocasión pueden servir para agricultura, pero en el futuro o en sucesivas aplicaciones fácilmente pueda ser migrado y sirva como referencia y ayuda para continuar con el desarrollo de la tecnología de las redes de sensores sin hilos.

Historia

La tecnología de las redes de sensores sin hilos, también conocida como “Smart Dust” fue concebida en 1998 por el Dr. Kris Pister de la Universidad de California Berkeley. El se propuso diseñar un dispositivo con un sensor, un transmisor-receptor y un pequeño computador todo en un solo empaque. La “Defense Advanced Research Projects Agency” (DARPA), que fue la misma que patrocinó la investigación de las bases de lo que hoy conocemos como Internet, patrocinó también el proyecto proponiendo la meta de demostrar que un sistema completo de sensado-comunicación puede ser integrado en un empaque de un milímetro cúbico.

En los albores de la investigación, el equipo obtuvo experiencia diseñando e implementando motes relativamente grandes usando componentes disponibles en ese momento. Es así como nace el RF-Mote que integraba sensores de temperatura, humedad, presión barométrica, intensidad luminosa, inclinación y vibración y campo magnético así como un módulo de transmisión de radio capaz de transmitir hasta aproximadamente 20 metros de distancia con una autonomía de una semana funcionando continuamente.

Uno de las cuestiones más importantes que tenían que enfrentar era el consumo de energía, se presentaba una limitante de espacio en dispositivos tan pequeños que necesitaban fuentes de energía capaces de proveerles de autonomías suficientemente largas como para justificar su uso en locaciones remotas o lugares de difícil acceso. Es así como el Dr. David Culler diseñó el primer avance de software que le permitía a los motes entrar en estados de *sleep* la mayor cantidad del tiempo que estaban desplegados y solo “despertar” para realizar el sensado y la comunicación.

Posteriormente durante el avance del proyecto, el equipo Smart Dust creó el sistema operativo TinyOS. Una vez instalado en el *mote*, este software es responsable de controlar el dispositivo, administrar la energía y facilitar la comunicación con otros motes.

El proyecto Smart Dust dió como resultado de pruebas tanto en el laboratorio como en el campo una generación de motes entre los que se puede mencionar Clever Dust, Deputy Dust, Daft Dust y Flashy Dust. Estos sirvieron para una prueba realizada para los cuerpos de Marines de los EE.UU. en Palm Spings, California en donde Smart Dust era capaz de rastrear vehículos desplazándose a lo largo de un desierto. Luego de eso, numerosas compañías en el rubro de tecnología vieron el potencial de dichos dispositivos y empezaron el desarrollo de los mismos entre los

que se encuentra la empresa Crossbow que se encarga de comercializar los diseños propuestos por la University of California Berkeley - UCB. El creciente interés en esta tecnología llevó a la necesidad de la estandarización de las comunicaciones utilizadas con el propósito de llevar en una misma dirección las investigaciones realizadas. Es así como nace en octubre de 2003 el estándar 802.15.4 de la IEEE y un año después el estándar de la Zigbee Alliance.

Tendencias Futuras

Los vendedores e investigadores indican que los mote que se venderán en el futuro serán más pequeños y más baratos. Además de eso, los mote tendrán fuentes de energía revolucionarias como la habilidad de convertir el calor y vibración de la maquinaria a la que están adheridas en energía eléctrica. Incluso con el precio de los mote en caída, las ganancias de los vendedores se incrementarán. De acuerdo con un estimado publicado en la revista Business Week Online, el mercado de las redes de sensores sin hilos se espera que crezca de 347 millones de dólares en 2004 a 7 mil millones de dólares en 2010. En la actualidad el precio de cada mote de Crossbow ronda los \$150, sin embargo se espera que caiga a \$40 en el futuro cercano y hasta los \$0.05 para el 2020 tal y como se muestra en la FIGURA 0-1. Basándose en la ley de Moore, los investigadores de Intel calculan que para el 2010 el precio de cada mote será de \$5.00 y se irá recortando a la mitad cada 18 meses [33].

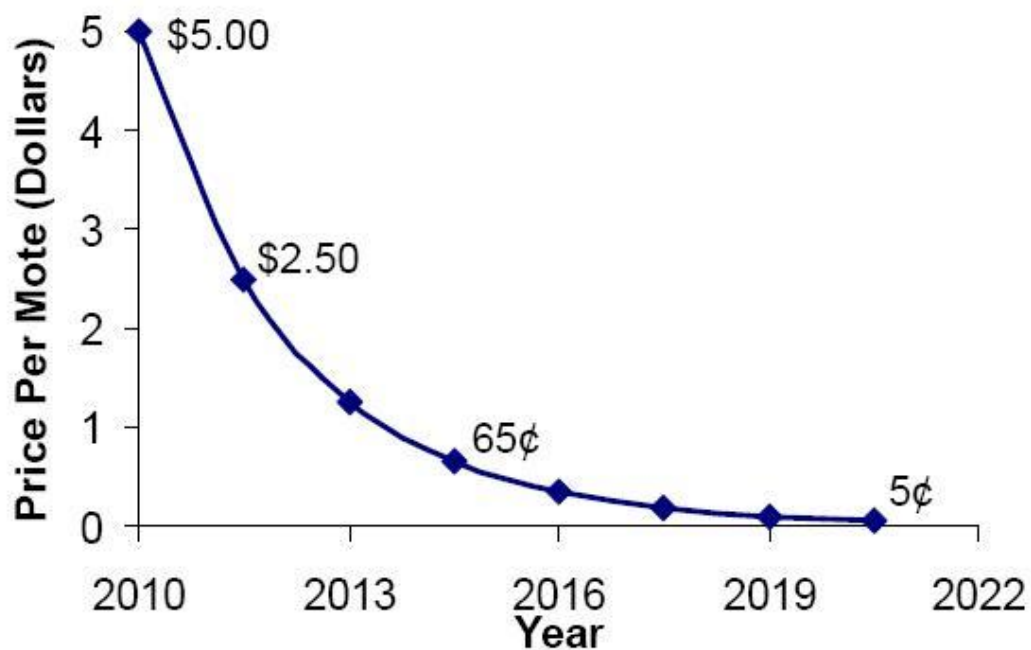


FIGURA 0-1 Tendencia estimada de los precios por mote [33]

1. La Agricultura de Precisión en el Perú

1.1. La Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión plantea como definición: “es la utilización de modernas herramientas capaces de facilitar la obtención y análisis de datos georreferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos. Mayor producción con sostenibilidad del ambiente productivo” [4]. Es de este modo que se plantean innumerables “herramientas” para el alcance de dicho objetivo, tales como pueden ser: sensores, GPS (Global Positioning System), robots autómatas, etc. Hoy en día la tecnología ha alcanzado un nivel que le permite al productor medir, analizar y manejar la variabilidad dentro de los lotes que era conocida de una manera limitada previamente pero que nunca antes se pudo manejar. La habilidad de manejar variaciones en la productividad dentro del lote y maximizar los rendimientos han sido siempre los deseos de los productores, especialmente de aquellos con limitaciones en el recurso suelo. El relativamente reciente desarrollo de microprocesadores y otras tecnologías electrónicas son nuevas herramientas disponibles para ayudar a los productores a alcanzar su meta. El concepto de optimizar la producción basado en la variabilidad dentro de los lotes es tan fundamental que esta tecnología llegó para quedarse. Los productores van a esforzarse continuamente para mejorar los beneficios económicos minimizando el impacto ambiental.

El principal motivo que impulsa la creación de la agricultura de precisión es la variación espacial. La no uniformidad de un terreno es información que ya se conocía pero con la que nunca se había podido hacer algo. Tal y como mencionan Bragachini, von Martini y Mendez [4], la variación espacial es la variación en las características medidas en el cultivo y en el suelo en la distancia y en la profundidad. Generalmente se encuentra variabilidad en todos los lotes. La variabilidad se observa en la fertilidad del suelo, contenido de humedad, textura, topografía, vigor del cultivo, incidencia de insectos y enfermedades y competencia de malezas. Sin embargo, este no es el único problema que afrontan los productores, la amplia gama de variables a considerar por un productor en el momento de tomar una decisión es sumamente extensa. En la FIGURA 1-1 se aprecia que para lograr la maximización de la producción al costo más eficiente en riego y fertilización, las variables que afectan cada decisión van desde el tipo de suelo, pasando por el clima y geografía en que se cultiva, y terminando en el mismo estado actual de la planta que se ha visto afectada hasta ese momento por todos los demás factores. No es de extrañar que muchas veces los productores

tengan que afrontar fuertes pérdidas de dinero debido a que la producción no pasa los estándares de calidad o de salud, todo esto debido a la falta de información que se tiene o del retraso de tiempo con que llega dicha información a sus manos.

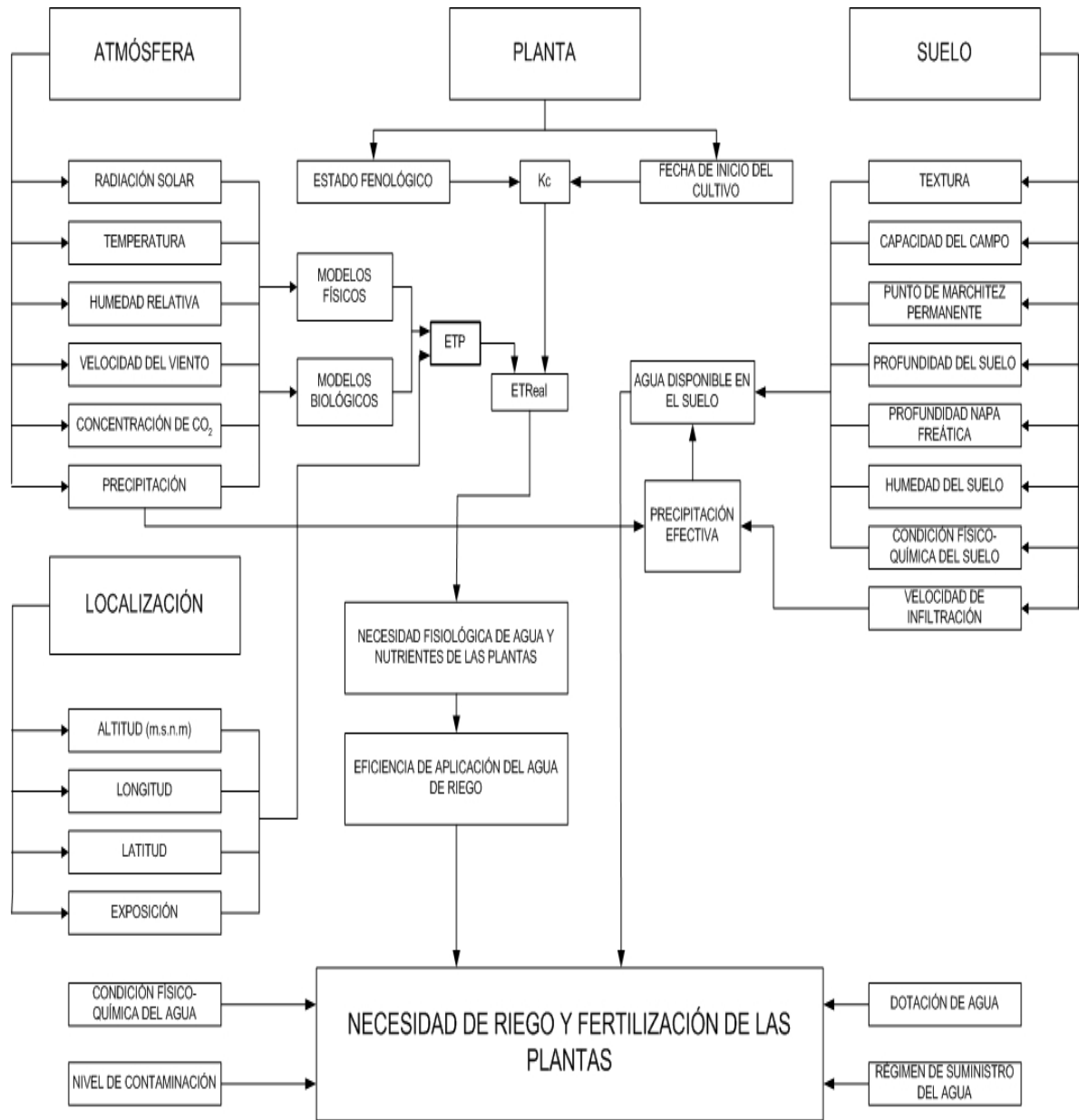


FIGURA 1-1 Variables a considerar para el adecuado riego y fertilización de plantas [5]

1.2. Antecedentes de Aplicaciones Similares

En lo referente a agricultura de precisión, el método mas ampliamente usado hoy en día para el sensado de fenómenos físicos y la obtención de dichos datos del sembrío para su análisis es la telemetría.

Existen una gran variedad de elementos y sistemas que a lo largo de los años se han ido desarrollando con el objetivo de poder suplir la necesidad de cada tipo específico de aplicaciones.

En general y a grandes rasgos, el sistema funciona de la siguiente manera: Para comenzar se deberá hacer un estudio de suelos del sembrío. Según el resultado que arroje este estudio, se hará una división del mismo en Unidades de Medida o UM. Esta división jugará un papel importante en lo sucesivo, posteriormente se hace un estudio del clima, las prácticas de manejo y el sistema de riego presente en todo el sembrío, los cuales en la medida de lo críticos que sean determinaran que se varíe o no la distribución de las UMs, especialmente del sistema de regadío que se tenga que en un caso ideal será independiente para cada UM. A lo largo de todo el sembrío se instalan estaciones de telemetría, una por cada UM, las cuales tienen acopladas sondas y sensores que permiten medir las variables de interés. Dichas estaciones de telemetría tienen una autonomía bastante grande y son programadas de modo que periódicamente hacen una medición de todos los sensores que tienen instalados y envían estos datos instantáneamente a un *data logger* central instalado en algún lugar del sembrío. Esta transmisión de datos se puede dar por medio de un cable o vía wireless, en una sola dirección y por lo general de un solo salto, directamente hacia el *data logger*. Luego, el *data logger* se encarga de recibir la información de todas las estaciones de telemetría y almacenarlas en una memoria. En la actualidad, existen empresas que se dedican a brindar el servicio de extraer la información del *data logger* mediante una PC portátil para llevarla a su centro de análisis, de este modo, se hace un análisis de la información y se elabora un reporte para el productor en el que se detalla por ejemplo, los niveles de humedad de la tierra que ha obtenido en determinado periodo de tiempo cada UM que usualmente es una semana y se le dan una serie de recomendaciones basadas en dichos análisis.

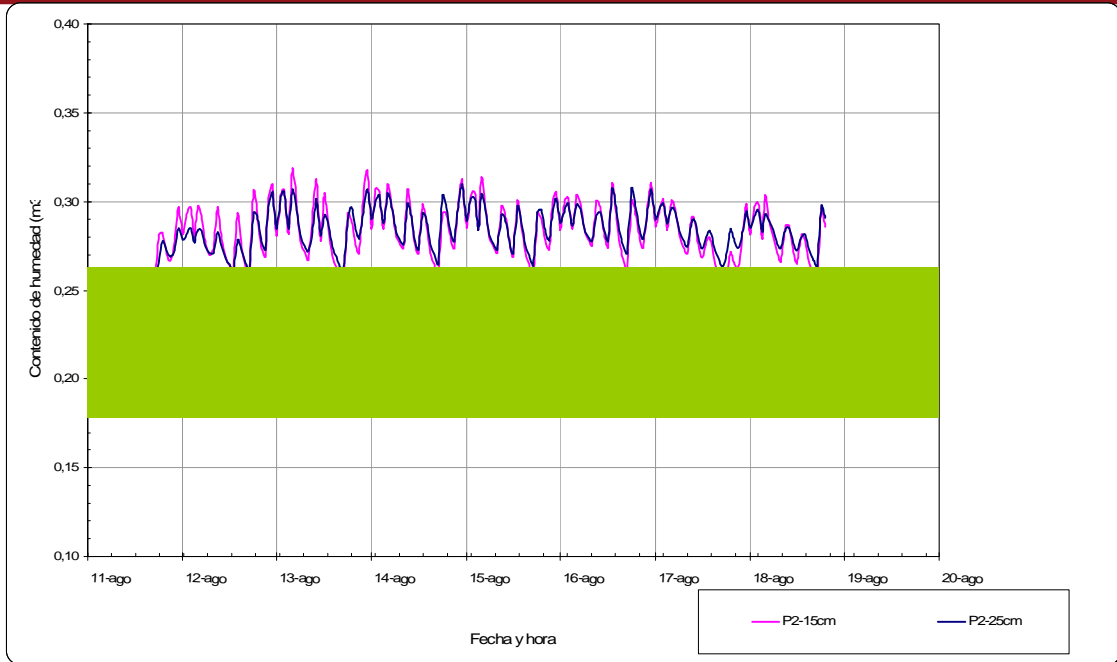
En la FIGURA 1-2 se observan dos ejemplos de dicho reporte. En el caso de este agricultor [6], el se encontraba realizando seis riegos diarios, cuatro durante el día y dos durante la noche. En el reporte se aprecia que para la gráfica (a) se superó casi siempre el límite máximo de humedad o lo que es lo mismo, se desperdició

agua. La banda de cantidad óptima de agua se puede apreciar en el gráfico sombreada de verde y se mide según la velocidad de drenaje que tiene el suelo y la velocidad de absorción que tiene el cultivo. Frente a eso, se le recomendó a este agricultor lo siguiente:

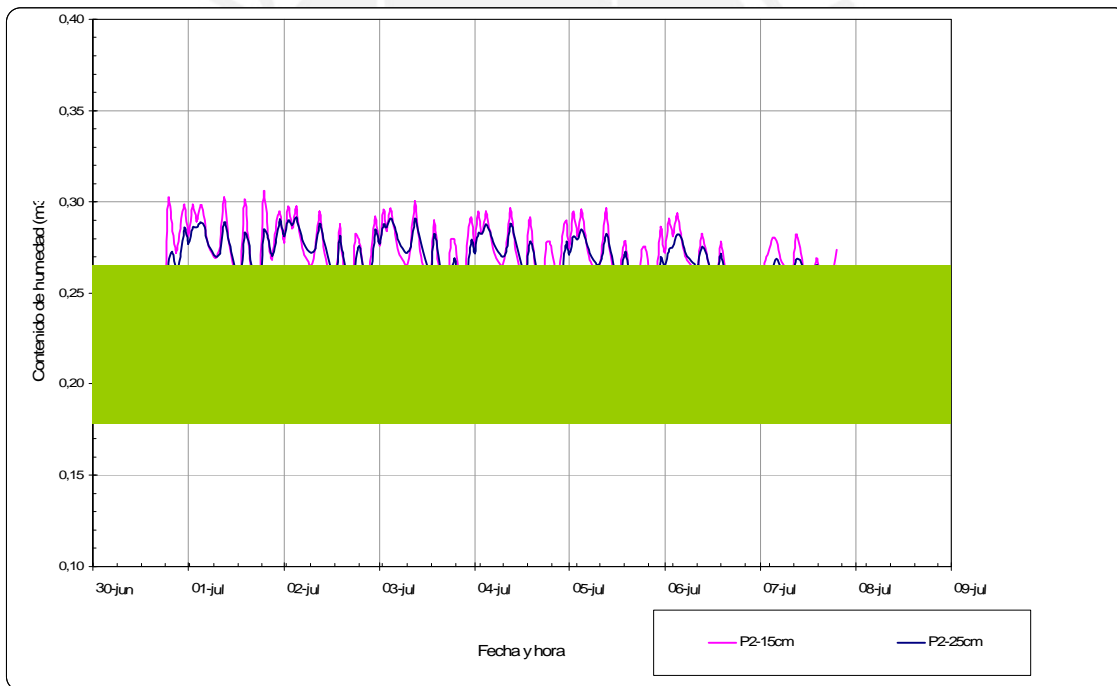
- Suprimir dos de los riegos diarios, de preferencia los nocturnos, y bajar la cantidad de descarga de agua utilizada en el regadío para mantenerse en la banda apropiada.
- De ser necesario y viendo las condiciones que se presenten, se podría suprimir una de las descargas que se hacen al medio día.

Lo que sucede usualmente es que el productor empezará a abrir menos tiempo las válvulas de agua cada día y al cabo de una determinada cantidad de tiempo, esta gráfica se va desplazando hasta caer por debajo de los niveles aceptados o lo que es lo mismo, la planta no estará recibiendo la cantidad óptima de agua. También se puede dar el caso que dependiendo de la temperatura ambiental, lluvias o humedad, a pesar de restringir el paso de agua, no se logre que los niveles de agua entren por completo dentro de la banda como se puede apreciar en la gráfica (b) donde el nivel de humedad bajó, pero no lo suficiente. Ante esto se efectúa la misma recomendación y el ciclo vuelve a empezar.

Otra de las prácticas comúnmente utilizadas es la de colocar dos o tres sensores de humedad a diferentes profundidades en la tierra pero en el mismo lugar, de ese modo se puede medir la velocidad de drenaje que tiene el suelo donde se está haciendo la medición y la variación de la velocidad de absorción de la planta a lo largo de la temporada para de este modo determinar la frecuencia de riego. Es por eso que en la figura del ejemplo, se pueden apreciar dos gráficas, la que se encuentra desfasada hacia arriba es la correspondiente al sensor que está enterrado a menos profundidad.



(a)



(b)

FIGURA 1-2 Reporte de la variación de la humedad [6]

A partir de esto, se pueden efectuar gran cantidad de análisis todo basado en la información que entrega el *data logger*. Por ejemplo, se puede determinar los momentos óptimos del día en los cuales se debe efectuar las descargas de agua y el nivel de saturación de agua mínimo hasta el cual un árbol es capaz de absorber agua. Para determinar estos niveles, se hace una saturación de agua del terreno y luego se procede a cerrar la descarga de agua por varios días. En la FIGURA 1-3

se aprecia la variación de la humedad del suelo muy cercano a un árbol de durazno. En el se puede apreciar que la absorción de agua por parte de la planta es siempre mayor durante el día, por la noche es casi nula. También se puede apreciar el nivel de humedad a partir del cual el árbol ya es casi incapaz de extraer agua del suelo (0.18%) y esta línea es la que determina el nivel mínimo de la banda que apreciábamos en la FIGURA 1-2.

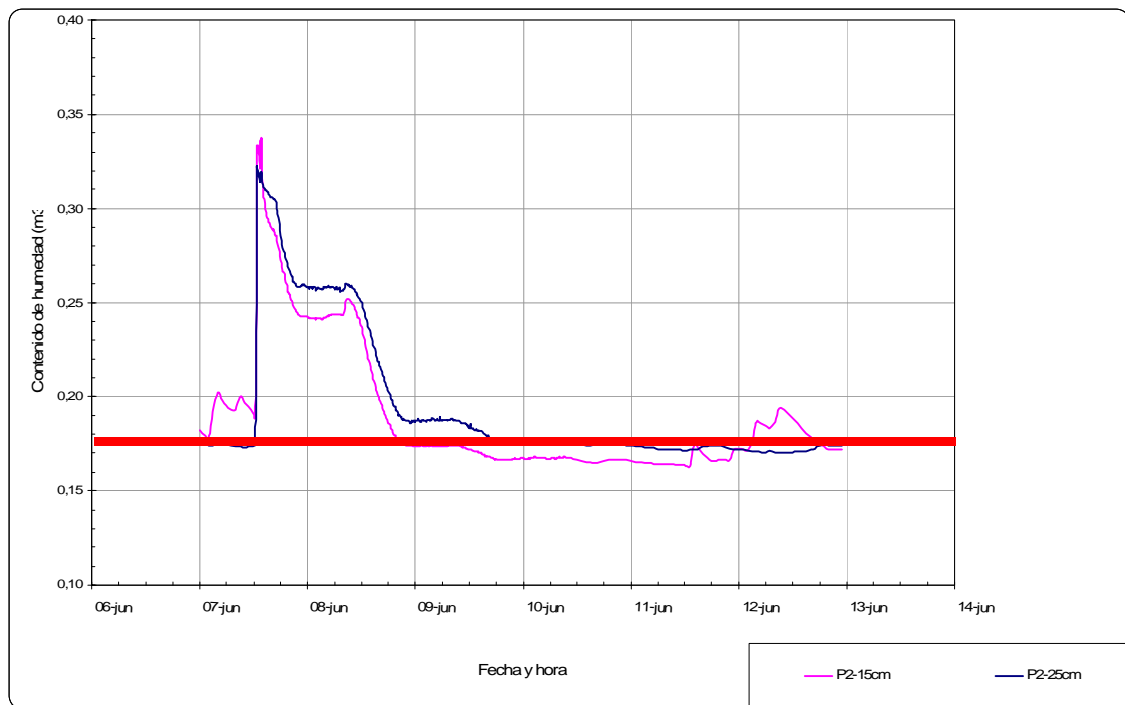


FIGURA 1-3 Progreso del nivel de humedad para un árbol de durazno. [6]

De este modo, se hace imprescindible que se obtengan lecturas de los *data loggers* la mayor cantidad de veces posible pero siempre va a estar supeditado a la cantidad de veces que se pueda pagar a la empresa encargada de la extracción de datos del *data logger* y a su respectivo análisis. Mientras más frecuentemente se puede obtener la información, menos veces se saldrá del rango de humedad necesario y mejor será la calidad de los productos a menor precio. Quizás el mayor inconveniente que tienen este tipo de sistemas es que las decisiones se toman de manera reactiva, es decir, primero sucede el fenómeno, luego se obtiene la información, a partir de esta información se mide las consecuencias causadas y recién a partir de ahí se toman medidas de corrección. (Gráficas e información [6])

1.3. Implementación de la Solución

Del uso de telemetría para agricultura de precisión, se extraerán algunos elementos importantes para la implementación de nuestra solución como son el

uso de UMs y se desecharán algunos otros tal y como detallaremos a continuación.

En general, cuando se trata de el uso de redes de sensores para agricultura se puede decir que la aplicación esta en su más temprana infancia por lo que la red puede tomar muchas formas pero conceptualmente se puede dividir en 6 capas que se interconectan y se comunican tal y como se aprecia en FIGURA 1-4.

Los sensores responden a cambios en el ambiente o entorno produciendo señales eléctricas. Tal y como se ha mencionado anteriormente, los sensores de hoy en día son capaces de obtener información de eventualmente todo y en particular para esta aplicación se cuenta con sensores de humedad, temperatura, humedad de la tierra, radiación solar, etc. sin embargo no se debe descartar iniciar estudios en acoplar sensores que hasta ahora han sido poco usuales pero que podrían ser harto beneficiosos como por ejemplo pH, niveles de oxígeno, concentración de dióxido de carbono, etc.

En la capa de procesado a nivel de campo se encuentra el trabajo de los procesadores que en aplicaciones mas básicas se encargan de convertir tan solo el impulso analógico en digital y transmitirlo vía wireless. En aplicaciones más avanzadas se espera que cada nodo pueda llegar a ser capaz de discriminar la importancia de una lectura y su relevancia para enviar su lectura o que cuenten también con un actuador ante el cual puedan tomar una decisión y por ejemplo empezar un riego. El trabajo a este nivel había sido hecho hasta ahora por *data loggers* como se ha mencionado anteriormente, pero ellos tienen el inconveniente de que vienen preprogramados de fábrica para aplicaciones muy específicas y sencillas y que solo son capaces de funcionar con sensores de su misma marca. Existen sin embargo algunos que son programables pero que elevan considerablemente su precio.

La capa de comunicaciones se encarga de transmitir la información vía wireless a un punto central o laboratorio donde la data será procesada y relacionada para tomar las decisiones mas convenientes frente a los fenómenos que se están presentando. Como se mencionará posteriormente, las transmisiones vía wireless se espera que sean con transmisores de espectro que emiten señales relativamente débiles para poder ahorrar energía pero en un espectro amplio, en contraste con los métodos utilizados anteriormente que utilizaban un sola frecuencia a una potencia muy elevada.

En la capa de computación en laboratorio, la información proporcionada será debidamente tratada y convertida en formas leíbles para el ser humano en forma de tablas y gráficos. En el presente estudio se tendrá en cuenta el idioma nativo de

los agricultores que serán los usuarios finales de la aplicación y en busca de su comodidad y mayor entendimiento del sistema, se prepararán las interfaces en el idioma catalán por haberse desarrollado en la región de Cataluña – España.

Finalmente en la capa de Archivo o Base de Datos, la información puede ser guardada para usos futuros o comparaciones. Claro esta que a la gran velocidad que las redes de sensores son capaces de transmitir información, se plantea un nuevo reto en el almacenamiento de datos para grandes cantidades o en la inteligencia de las redes para el descarte de datos irrelevantes o redundantes.

Como se aprecia en la misma figura, el flujo de datos no es necesariamente unidireccional, información archivada puede ser utilizada para producir datos sintéticos capaces de hacer reaccionar la red y alterar el funcionamiento que la misma esta teniendo hasta ese momento, por ejemplo, pueden solicitar que el intervalo de muestreo sea más elevado para poder tener más precisión en la toma de decisiones [7].

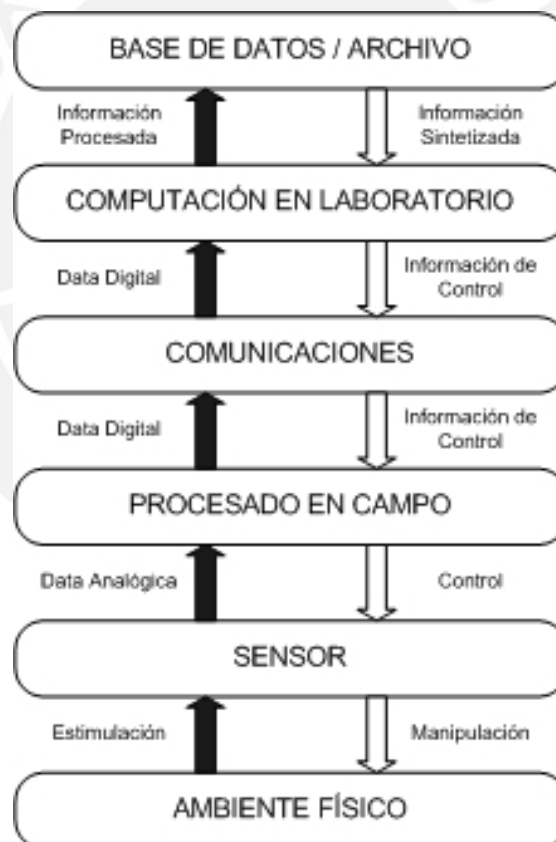


FIGURA 1-4 Capas componentes de una red de sensores sin hilos para agricultura

1.3.1. Distribución de sensores por UMs

Consideramos primordial que para determinar los puntos donde se va a colocar un nodo, se haga un estudio de suelos y se determinen Unidades de Medida. Tal y como en el caso de la telemetría, la homogeneidad del suelo en cada UM es

importante de determinar para no colocar más nodos de los necesarios y para no obtener información redundante que en consecuencia reducirá la autonomía de la red. En la FIGURA 1-5 se puede apreciar una distribución por UMs de una finca después de un estudio de suelos.

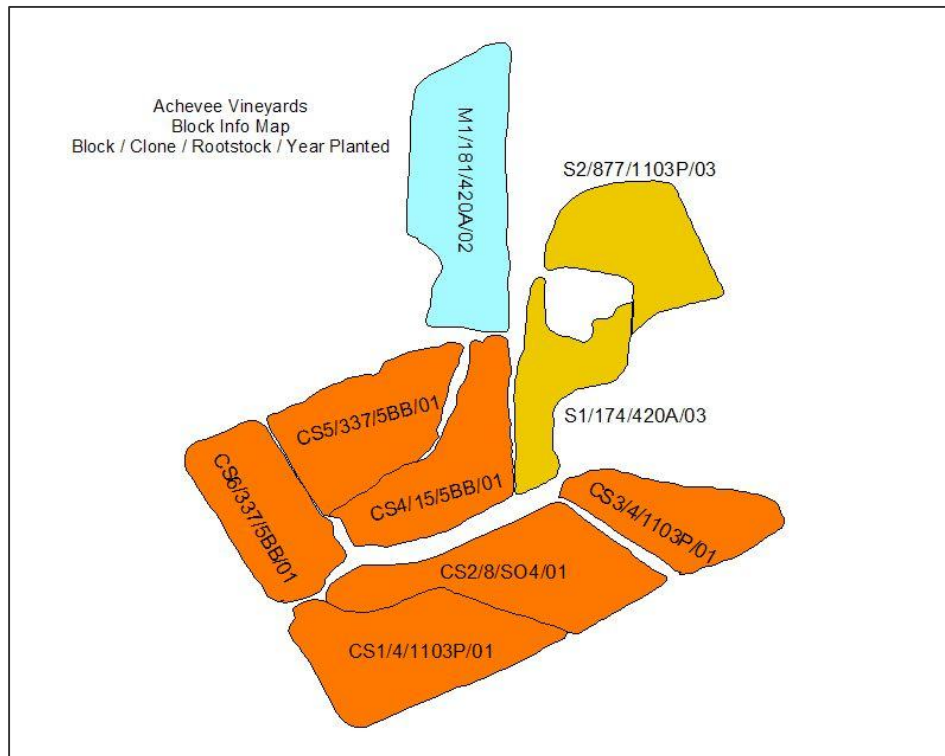


FIGURA 1-5 División de una finca por Unidades de Medida o UM [6]

En la solución implementada hasta el momento, la aplicación soporta tan solo el acoplamiento de una sonda de humedad ECH₂O EC-5 pues se tienen programadas las fórmulas de conversión del dato analógico para ese modelo de sonda. Sin embargo, la aplicación se ha pensado para colocar la cantidad de sensores que se desee acoplar a cada nodo, siempre pensando en las limitaciones hardware de la placa de expansión MDA300 que se detallan en el apartado 4.5.4. Por otro lado en lo referente a la cantidad de nodos, el programa soporta una red de hasta 15 nodos que es expandible pero se pensó así en esta primera versión para poder analizar las tramas provenientes de la red y poder corregir el protocolo de una manera más sencilla. En las pruebas previas se ha podido tan solo evaluar el funcionamiento de la red con hasta 6 nodos pues no se contaba con más.

En lo referente a la distribución de sensores y su jerarquía dentro de la red, se consideró que hay variables que siempre van a ser universales para todo el sembrío. De este modo por ejemplo la temperatura ambiental y la incidencia luminosa sobre el campo será siempre la misma independientemente del lugar donde uno se encuentre, por el contrario, la humedad de la tierra no

necesariamente será así. Tal y como se explicará en el apartado 4.8.2.2, se cuenta con un nodo *sink* que es la cabeza del árbol el cual se encargará de medir estas dos variables, la temperatura y la incidencia de luz. Se le consideró al nodo *sink* el apropiado para esta labor debido a que al ser estas variables las que afectan a la totalidad del cultivo, es importante que la probabilidad de fallo en la transmisión sea lo menor posible de modo que se le colocó tan solo a un salto de distancia del *gateway*.

1.3.2. Microclimas

En el proceso de futuras pruebas en extensiones mas amplias de terreno, dado que la red tiene una capacidad de escalabilidad bastante grande, las redes de sensores sin hilos funcionando sobre el protocolo NST-AODV para ahorro de energía, podrían ser capaces de detectar posibles microclimas que se generen dentro de cultivos de mayores dimensiones, como por ejemplo aquellos que cuentan con un recurso hídrico en zonas bajas y se extienden a lo largo de montañas haciendo de este modo que en las zonas bajas la humedad por evaporación cree un microclima con otra humedad y con otra susceptibilidad a ciertas plagas. Se pueden observar también microclimas en sembríos muy tupidos de árboles muy grandes y altos en los que hay ciertas características al nivel del suelo diferentes que en las copas de los árboles. Este tipo de aplicaciones tienen ya antecedentes en monitoreo ambiental. Quizás el caso más conocido es el de Great Duck Island que se comentará en el apartado 2.2.5.1 pero que centraba sus observaciones en el comportamiento de aves que por supuesto requieren de otro periodo de muestreo, otra disposición de sensores y diferentes características de la red. En lo referente a monitoreo ambiental, el presente proyecto se puede utilizar por ejemplo en la prevención de incendios forestales y otras aplicaciones afines.

1.3.3. Prevención de Plagas

El presente estudio presenta una inmejorable oportunidad para la prevención de plagas y su debido tratamiento en agricultura. Como es conocido, lo peor que puede tener que afrontar un agricultor es una plaga ante lo cual se han desarrollado infinidad de métodos contra su aparición. Sin embargo, gracias a la aparición de nuevas tecnologías y sensores, estas pueden tener sus horas contadas. En el ámbito agrícola es ampliamente conocido que muchas plagas bacterianas y fungoideas atacan a las plantas solamente cuando hay humedad presente en la superficie de la hoja. Como un ejemplo presentamos el Leaf Wetness Sensor LWS [8] (FIGURA 1-6) de la empresa Decagon Devices Inc. que detecta la presencia y duración de humedad en la superficie de la hoja permitiendo a los investigadores y productores predecir una plaga y proteger a la planta en su

debido tiempo. La razón por la que se ha citado este sensor es por que cumple con todos los requerimientos técnicos para conectarlo directamente a una tarjeta de expansión MDA300.



FIGURA 1-6 Leaf Wetness Sensor de la empresa Decagon Devices Inc.

1.3.4. Almacenamiento de Datos

Como parte de la solución implementada se ha considerado importante llevar un registro histórico de las medidas obtenidas por la red. De ese modo, la interfaz gráfica en PC es capaz de guardar las lecturas debidamente acomodadas en un archivo de texto (formato .txt) para ser consultado cuando se requiera. En el se almacena desde el primer dato recibido por el *gateway* procedente de la red. Lo precario de la solución se hizo tan solo para demostrar la posibilidad de hacer un almacenaje automático de datos pues no era objetivo del presente estudio crear una aplicación compleja de almacenamiento en Excel o alguna base de datos disponible, sin embargo destacar que es posible, viable e importante hacerlo.

1.3.5. Ahorro en insumos, administración eficiente de recursos y toma de decisiones en tiempo real

El presente estudio se muestra como una oportunidad inmejorable para lograr algunas metas que le habían sido esquivas a la agricultura. En lo referente al ahorro en insumos y administración eficiente de recursos, se presenta como una herramienta atractiva para el productor, el cual necesitará tan solo la asesoría de un ingeniero agrónomo para realizar la toma de decisiones y la tecnología ya no será una barrera a saldar. De otro lado, la toma de decisiones en tiempo real reduce al mínimo el tiempo de respuesta ante determinados fenómenos que antes eran imposibles de detectar sino hasta ya ocurridas las consecuencias. De este

modo, de fallar la prevención, inmediatamente se tenía que aplicar un plan de retención. Con esta tecnología, de fallar la prevención, la fase de respuesta a la aparición del fenómeno se puede empezar inmediatamente, ya sea plagas, deficiencia de humedad, exceso de radiación solar, etc.

Por otro lado debido a una gran cantidad de escándalos en el sector alimentario que se han venido presentando en los últimos años, estrictas regulaciones a la calidad de la agricultura se han venido aplicando por parte de organismos como la Unión Europea. Entre los escándalos más recientes podemos encontrar el de las “vacas locas” en la década de los noventa y que aún ahora continuamente se presenta como un peligro debido a la imposibilidad de la total erradicación, también tenemos el descubrimiento de la presencia de dioxinas causantes de cáncer en el alimento de animales de granja que llevó a la prohibición de la venta de carne de cerdo, vacunos y pollo, así como de huevos en 1999 en Bélgica que trajo pérdidas cercanas a los € 1,000'000,000.00 [3]. Estos en el sector ganadero pero el segundo precedente del sector agrícola que es de donde se obtiene el alimento para ganado. Ante este panorama, las redes de sensores sin hilos se presentan como una garantía en el monitoreo de los estándares de producción no solo para evitar escándalos como los anteriormente mencionados sino también para la detección de posibles problemas como esos en el momento apropiado y antes de la difusión y extensión de la posible epidemia o lo que fuera que se presente.

2. Redes de Sensores Inalámbricas

La información es poder que nos permite tomar las mejores decisiones para lograr el máximo desempeño o rendimiento de recursos que utilizamos. En este sentido, los sensores son los encargados de suministrar dicha información que el ser humano no puede obtener o que obtiene sin la precisión o volumen adecuados. En particular en el caso de la agricultura los sensores nos brindan información de un sinnúmero de variables como por ejemplo la humedad de la tierra, el pH de la tierra, la humectación de las hojas, la temperatura, la humedad relativa del aire, etc. Sin embargo, hay fenómenos que no pueden ser medidos directamente por sensores pero que pueden ser proveídos mediante una conjugación de la información obtenida por éstos, por ejemplo, una plaga, una baja producción, baja calidad de los productos, etc. Para poder anticiparnos tanto a las variaciones directas como las indirectas necesitamos tener la información apropiada en el momento apropiado. Ante esto planteamos a las redes de sensores como una alternativa frente a la falta de información, con el detalle apropiado y en momento adecuado en la agricultura.

Una red de sensores es un sistema formado por nodos que incorporan a su capacidad de comunicación, la capacidad de sensar alguna variable física. Dicha variable física luego convertirla en un dato digital y enviarla, ya sea a otro nodo o a un nodo central para procesarla y convertirla en información útil.

Frente a este sistema se plantean algunas interrogantes y problemáticas. Por ejemplo, el suministro de energía de los nodos, los cuales necesitarán una fuente de energía tanto para el funcionamiento de los sensores como para la transmisión de datos. Se plantea también el diseño de la red pues estos sensores pueden contar con movilidad. Esta movilidad puede afectar el diseño de la topología de la red en cada movimiento y plantear la interrogante de ¿dónde se encuentra el sensor? Para lo cual actualmente se están diseñando soluciones basadas en GPS. En contraparte pueden ser ubicados en un lugar fijo pero inaccesible, con lo cual el abastecimiento de energía y el papel que dicho nodo tomará en el diseño de la topología de la red son cruciales para el correcto funcionamiento.

Con el presente panorama, se presentan dos alternativas dentro de las redes de sensores, las redes con hilos y sin hilos.

2.1. Redes de Sensores Cableadas

Como menciona Cox [9], las redes de sensores con hilos han estado presentes por décadas en diversos sistemas, principalmente ocupándose del monitoreo de variables como temperatura, humedad, calor, niveles de fluidos en líneas de producción, etc. En muchas ocasiones funcionaban como redes ad-hoc, pero

también en ocasiones conectadas a una PC como parte de una red mayor. El panorama típico era el de un panel central de control en el que se encendían luces o sonaban alertas que avisaban de niveles sobrepasados o de situaciones de emergencia. En el mejor de los casos dichos paneles de control se encontraban conectados a actuadores que abrían válvulas, encendían ventiladores, apagaban motores o corregían su velocidad.

A simple vista saltan algunos problemas respecto a este tipo de sistemas, por ejemplo, la recolección de datos es muy limitada pues uno solo es capaz de saber por ejemplo la temperatura de algún proceso en un determinado momento que será cuando este proceso sobrepase algún límite no deseado, pero no es posible saberlo en cada momento ni determinar como esto influye en la calidad del proceso que se viene desarrollando. Un segundo problema vendría a ser la movilidad, las redes cableadas no nos permiten sensor elementos móviles como tractores o grúas. En particular en la agricultura las redes con hilos presentan la dificultad del momento de la cosecha pues resulta bastante poco práctico el tener que colocar todo el cableado por la temporada y luego retirarlo para la cosecha. Un tercer problema viene a ser el costo de implementación de la red con sus respectivos cables que a posteriori se ve incrementado por el mantenimiento que se le debe dar tanto a la fibra óptica como al par trenzado de cobre.

2.2. Redes de Sensores Inalámbricas (Sin Hilos)

Gracias a avances significativos en transmisión con baja potencia vía radio y diseño de circuitos integrados, las redes de sensores capaces de auto-organizarse y transmitir sin hilos es ahora una realidad. Este nuevo concepto revoluciona todo ámbito en lo referente a la puesta en marcha de una red de sensores, desde el diseño, hasta la implementación y retorno de inversión.

Tal y como lo mencionara Estrin [10] “esta tecnología esta destinada a ser tan desestabilizadora y habilitadora como el Internet (...) El Internet transformó la forma en que individuos y organizaciones interactuaban unas con otras y con el mundo. Las redes inalámbricas de sensores van a transformar la forma en la cual comprendemos y manejamos nuestro mundo físico”.

Tal y como el Internet, las redes de sensores inalámbricas van a cubrir todo el planeta monitoreando y recolectando información de eventualmente todo.

En lugar de ser el panel de control (como en el caso de las redes con hilos) el solicitador de la información. Ahora serán los sensores los iniciadores de la comunicación. De hecho, los sensores serán lo suficientemente inteligentes como para buscar y decidir por un “panel” que quiera o necesite consumir su información [10], formando de esta manera una red ad-hoc. Esto significa que no hay labores

administrativas y presupuestarias asociadas a la puesta en marcha y mantenimiento de una red de sensores sin hilos en contraposición con una red LAN de oficina típica por ejemplo. Se estima que en áreas industriales el costo por metro de cable instalado para una red de sensores es de US\$30.00, si necesito colocar un sensor a 20 metros del *gateway*, eso significa un gasto de US\$600.00, con redes de sensores sin hilos este gasto de instalación no existe [9].

El valor de poseer “ojos y oídos” en eventualmente cualquier etapa de la producción da la infinita posibilidad de maximizar el rendimiento y ganancia de cualquier proceso. En lo referente a la agricultura permitiría determinar cosas como la concentración de nutrientes por lotes de terreno dando la posibilidad de aplicar los fertilizantes solo en las proporciones y lugares adecuados para de este modo minimizar los costos y uniformizar la calidad y cantidad de la producción. Las redes de sensores sin hilos pueden eventualmente crecer indefinidamente eliminando los cables y dando total movilidad y flexibilidad a la adquisición de datos. Pueden estar tanto dentro de un tractor como sobre una planta. Su tamaño y peso les da inmejorables ventajas frente a los sensores tradicionales sin mencionar el costo pues su instalación es menos del 10% del costo de instalación de los sensores tradicionales [11].

Ha existido un problema sustancial que es la implementación de redes de sensores sin hilos hasta el día de hoy y este es el estado de la investigación. Cabría la expresión de que las redes de sensores sin hilos se encuentran actualmente iniciándose. La gran mayoría de investigaciones hasta el día de hoy se han centrado en temas tales como monitoreo ambiental, impacto de sismos o terremotos sobre grandes estructuras y hasta la anticipación de dichos desastres naturales sin mencionar por supuesto las aplicaciones militares que han sido y serán siempre las pioneras.

Se podría por ejemplo mencionar al proyecto Great Duck Island en el caso del monitoreo ambiental o el proyecto del carguero de petróleo Loch Rannoch que significa una real prueba contra la adversidad para las redes de sensores sin hilos [12], pero se hará con mas detalle en el apartado 2.2.5.

El tema central sin embargo es que recién en los últimos meses se abrió el mercado hacia temas mas relacionados con la producción como la agricultura, ganadería y otros de igual manera interesantes como la domótica y el monitoreo de pacientes en hospitales y centros de salud. Dicho interés ha movido recién a grandes empresas a invertir en el desarrollo de estas redes tal y como lo menciona la redacción de la página Web Baquia “El New York Times explica que será la propia IBM la que intente liderar este mercado. Para lograr este objetivo la

empresa dedicará a más de 1000 personas y una inversión de 250 millones de dólares. Que el tema es de actualidad lo confirma el acuerdo firmado entre HP y la consultora Bearing Point con el mismo objetivo” [13].

En lo referente al campo e implementaciones actuales, podemos mencionar el caso de una corporación azucarera en EE.UU. que afrontaba pérdidas anuales de 16 millones de dólares debido a que en el almacenamiento de la cosecha en campos del tamaño de un campo de fútbol y diez metros de alto, el producto empieza a oxidarse y por lo tanto a perder azúcar para luego calentarse y echarse a perder. Ante esto se implementó una red de sensores sin hilos que detectaban las variaciones de temperatura en los campos, una vez que se detectaba un incremento, se cambiaba la prioridad de recojo de dicho campo con lo cual se evitaba que ningún montón de producto se echara a perder [14].

Para finalizar esta introducción cabe mencionar un aspecto muy confuso acerca de las redes de sensores sin hilos es el amplio rango de aplicaciones potenciales que tienen [15]. Las aplicaciones industriales se han centrado en el monitoreo del estado de equipos en plantas y su repercusión en los presupuestos; de este mismo modo, aplicaciones como domótica, monitoreo de pacientes en hospitales, agricultura, respuestas a emergencias y aplicaciones a infraestructuras públicas y militares le han echado el ojo a esta tecnología para obtener el máximo beneficio. Esto crea una suerte de “confusión” a la hora de decidir el rumbo que tomará una determinada investigación.

2.2.1. Elementos y Topologías

Antes de empezar a enumerar los elementos y topologías, es importante dejar en claro el concepto de “mote”. Cada nodo de una red de sensores sin hilos puede estar conformado por un módulo de transmisión-recepción o MPR (Mote Processor Radio) encargado de la comunicación con los demás nodos y eventualmente con un *gateway*. Además de este modulo, típicamente cuentan con un módulo de adquisición de datos que va conectado a los sensores que se requerirán en determinado punto. Debido a motivos que se explicarán a continuación, es posible que un nodo no cuente con el módulo de adquisición de datos y solo cuente con el módulo radio, es así como se ha definido a dichos módulos que funcionan tan solo como nodos de salto como “motes”.

2.2.1.1. Plataforma de aplicación en PC

Es un elemento de la red que puede ser por lo general una PC o eventualmente una computadora portátil usada para monitorear y controlar el funcionamiento de un grupo de sensores y actuadores conectados a una red sin hilos. La plataforma de aplicación podría ser capaz de tomar decisiones basándose en la información

que obtiene de la red. Típicamente cada aplicación que se desarrolla cuenta con un API (Application Programming Interface) y/o un GUI (Graphical User Interface). La API es la encargada de la programación del software en los nodos de la red y es solo utilizada por los desarrolladores y la GUI es la encargada de presentar la información detallada para el usuario final [16]. Esta claro que si se ha logrado prescindir de los cables para el montaje de la red, no podemos en este punto volver hacia atrás y necesitar de ellos para la programación de cada nodo individual; es por eso que en la actualidad existen desarrollos en el área de la aplicación en PC orientados a lograr que la GUI sea capaz de re-programar los nodos enviando una secuencia de datos e información a través de la red, en este sentido cabe destacar el desarrollo de programas como el MOTE-VIEW de la empresa Crossbow que es capaz de presentar la data de cada nodo en una interfaz gráfica bastante amigable y que además es capaz de reprogramar cualquier nodo de la red que se este monitoreando con tan solo un comando.

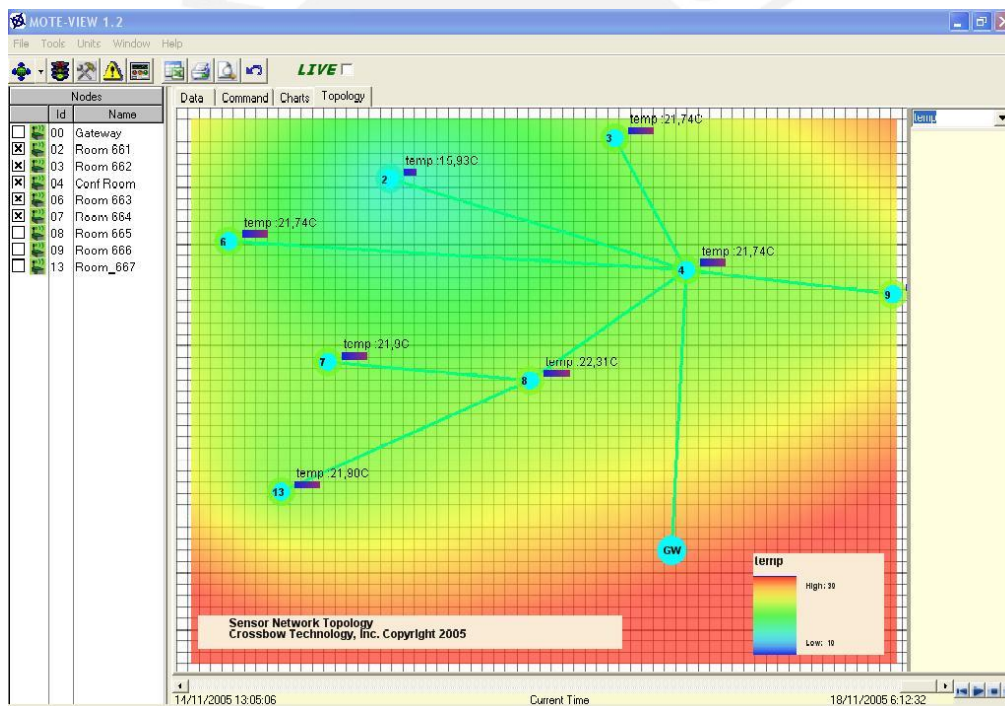


FIGURA 2-1 Ejemplo de Plataforma de Aplicación MOTE-VIEW

2.2.1.2. Gateways

El *gateway* es la interfaz entre la plataforma de aplicación y los nodos que componen la red. Toda la información recibida por el *gateway* es acumulada y re- enviada a la plataforma de aplicación para su debido tratamiento después del cual se mostrará al usuario. En el sentido opuesto, cuando la plataforma de aplicación envía un comando hacia la red, es el *gateway* el encargado de empaquetar el mensaje y re-enviarlo por la red de sensores. Así mismo el *gateway* es el

encargado de hacer la conversión de protocolos para redes de sensores que se comunican con otro tipo de estándares de redes industriales.

2.2.1.3. Nodos Intermedios

También conocidos como “routers” son los encargados de extender el alcance de la red, rodear obstáculos a la transmisión sin hilos y proveer rutas alternativas para el tránsito de mensajes que se envían al *gateway*. En el general de casos, estos nodos estarán conectados vía digital o analógica a un sensor o actuador haciendo el mismo trabajo de entrada-salida que hace un nodo final además del propio. Estos nodos pueden ser alimentados por baterías o por fuentes dependiendo de la estructura que tenga la red y el propósito por el cual fue colocado dicho nodo.

2.2.1.4. Nodos Finales

Son considerados dispositivos de funciones reducidas pues tan solo tienen la labor de sensar la información y transmitirla al siguiente nodo de la red. No tienen que encargarse de recibir información vía radio ni de luego retransmitirla. Son el propósito final por el que se monta toda la estructura de la red pues son la interfaz entre la magnitud física a sensar y la red. Típicamente los nodos finales cuentan con una o más conexiones de entrada-salida para comunicarse con sensores o actuadores y casi siempre son alimentados por baterías.

2.2.1.5. Sensores y actuadores

Estos son los dispositivos encargados de transformar la señal física en una señal eléctrica que es la que queremos medir, almacenar y tratar. Eventualmente pueden ser de cualquier tipo, en la actualidad la variedad de sensores con los que se cuenta es casi infinita por lo que somos capaces de medir casi todo lo que necesitamos

2.2.1.6. Firmware

El software requerido para el funcionamiento en conjunto de la red reside en forma de *firmware* en cada mote y en la plataforma de aplicación como un conjunto de funciones del API.

En lo referente al mote, el *firmware* es el encargado de incorporar a dicho mote en lo que llamaríamos una red ad-hoc, encargándose de manejarlo como parte de ella y no como una entidad independiente. El *firmware* es también responsable de empaquetar las lecturas digitales de los sensores y enviarlas a través de la red.

En contraparte, en el lado de la plataforma de aplicación (en particular el API), se encarga de dinamizar el desarrollo de aplicaciones proveyendo “ganchos” que enlazarán dicha plataforma con los motes. Este *firmware* cuenta con dos tipos de librerías, una de alto nivel encargada de integrar el funcionamiento del API y el

gateway y una de bajo nivel encargada de integrar el funcionamiento de los motes y los módulos de adquisición de datos.

2.2.1.7. Topologías

2.2.1.7.1. Estrella

En este tipo de configuración también llamado “Sistema de un solo salto” cada nodo se encuentra en directa comunicación con su base o *gateway*. Entre las ventajas de este tipo de topología se encuentra su baja latencia y el bajo consumo de energía de cada nodo por lo cual es idónea para aplicaciones en las que el consumo de energía no es esencial y el alcance necesario de la red es corto. En contraparte tiene la desventaja de que el alcance no llega a ser mayor a 100 metros de distancia desde el *gateway* [17][11].

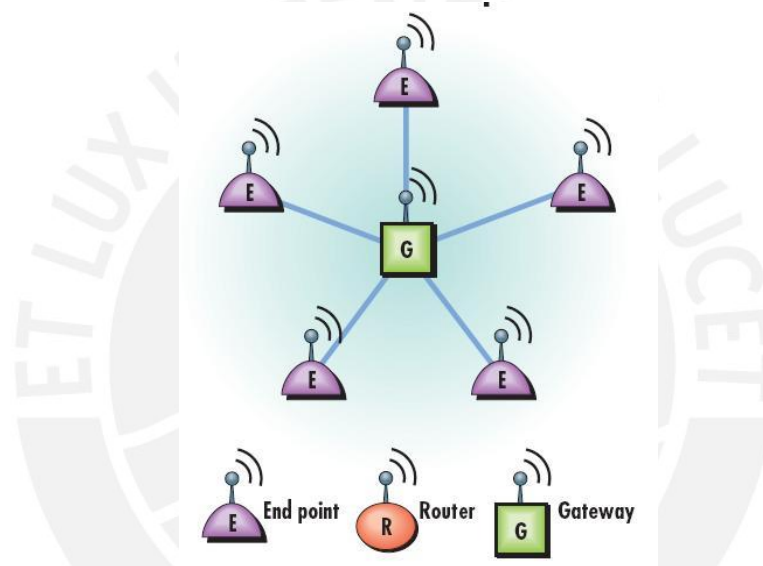
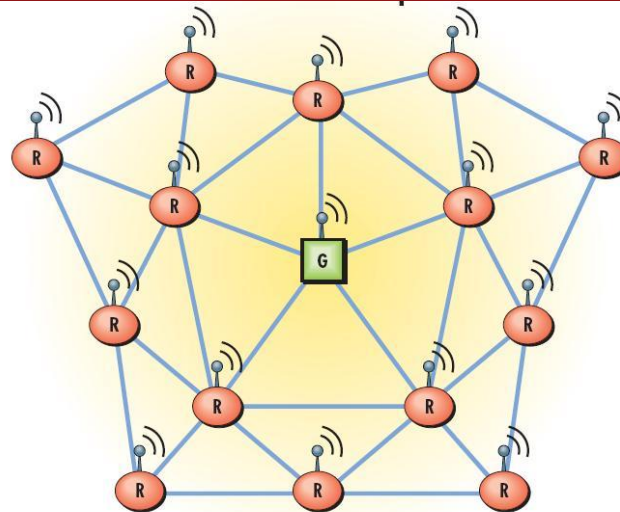


FIGURA 2-2 Topología Estrella con descripción de los elementos [11]

2.2.1.7.2. Malla

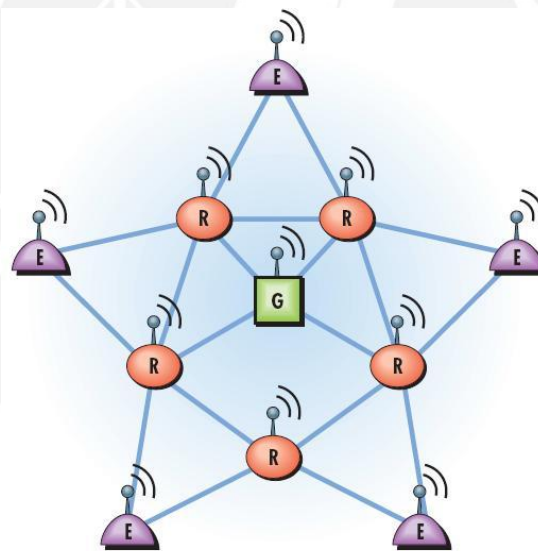
Esta configuración es un sistema multi-saltos (multi-hopping). En esta configuración los nodos intermedios, también llamados Routers y que pueden ser tan solo motes, hacen saltar la información de un sensor a otro en busca del *gateway*. Estos nodos intermedios son capaces de auto-configurarse para encontrar el mejor camino aún en caso de que un nodo se encuentre defectuoso. Dicha cualidad de auto-configurarse dependerá del protocolo sobre el cual estén funcionando.

Entre las ventajas que podemos mencionar se encuentra el hecho de que es altamente inmune a errores pudiendo abarcar mucha mayor distancia, en contraparte tiene una latencia elevada y cada nodo consume más energía debido a que no tienen que ocuparse de transmitir tan solo su propia información sino también las que llega de nodos mas lejanos[17][11].


FIGURA 2-3 Topología Malla [11]

2.2.1.7.3. Híbrido Estrella-Malla

También llamada topología Árbol, es un híbrido de ambos casos anteriores, combina el bajo consumo y simplicidad de la configuración estrella con el amplio rango de cobertura e inmunidad a errores de la configuración malla [17] [11].


FIGURA 2-4 Topología Híbrida Malla – Estrella [11]

2.2.2. Características Generales

2.2.2.1. Arquitectura del sistema

Usualmente un nodo de una red de sensores sin hilos integra el sensado, procesamiento de la señal, el almacenaje de la data, el cálculo y la comunicación sin hilos en un solo chip adherido a la fuente de poder. Para lograr esto esta compuesto de 4 elementos principales, ver FIGURA 2-5:

- Una fuente de energía que viene incorporada al sistema y que es la encargada de proveer la potencia necesaria para hacer funcionar los demás elementos.
- Una unidad de sensado que consiste en un sensor embebido y un actuador así como un ADC que enlaza al mote con el mundo físico.
- Una unidad de cálculo y procesado que es un microcontrolador (MCU – Microcontroller Unit) o un microprocesador con memoria que es quien provee la inteligencia al nodo.
- Una unidad de comunicaciones que consiste en un circuito RF de corto-rango encargado de transmitir y recibir los paquetes de datos

Además de lo anteriormente señalado se tiene un micro-SO (Sistema Operativo) en tiempo real que esta encargado de operar y controlar a la unidad de sensado, cálculo y comunicaciones decidiendo que unidad encender en que momento.

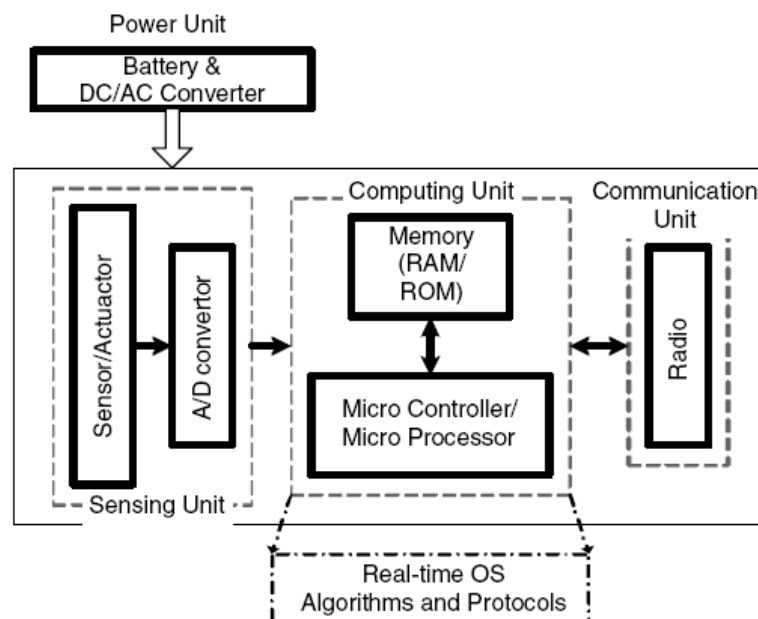


FIGURA 2-5 Arquitectura típica del sistema de un nodo [18]

Se puede observar que la unidad de sensado se encuentra dividida en dos partes principales. El sensor que es el encargado de transformar la medida física en impulsos eléctricos analógicos y el convertor análogo-digital o ADC que es quien convierte en bits dicha medida para entregársela a la unidad de cálculo y procesado.

Por otro lado la unidad de cálculo y procesado es quien almacena el conjunto de procedimientos y tareas que hace que este nodo pueda colaborar con los demás nodos de la red para lograr el transporte de la data.

Finalmente, la unidad de comunicaciones es la encargada de enlazar al nodo individual con el resto de dispositivos de la red.

2.2.2.2. Consumo de Energía

Las restricciones más severas en lo referente al diseño de redes de sensores sin hilos y el diseño de la arquitectura de los motes se refieren al mínimo consumo de energía necesario por parte de circuitos electrónicos y posibles elementos electro-mecánicos o MEMS. El problema se ve agravado cuando actuadores se encuentran presentes en el diseño que por lo general consumen más energía que los sensores. Si los nodos están pensados para tener tiempos de vida relativamente cortos, por ejemplo algunos meses, una batería es una solución lógica. Por el contrario si están pensados para tener tiempos de vida más largos, un método de carga continuada es preferible; sin embargo investigaciones recientes en el tema demuestran la dificultad de asociar paneles solares a motes; esto debido a la baja eficiencia en relación a la cantidad de área que necesitan para alcanzar potencias adecuadas [18] y al elevado costo que todavía tienen [19]. Sin embargo si se profundiza algo más, se observa en la FIGURA 2-6 que el mayor consumo de un nodo o mote se encuentra en el momento de la transmisión inalámbrica. Ante esto, las actuales investigaciones están dirigidas principalmente a dos técnicas en busca de optimizar el consumo de energía por nodo. La transmisión vía radio o RF y la transmisión vía señales ópticas. En el primer caso, la principal desventaja se encuentra en el tamaño mismo de los motes. Al ser tan pequeños, demandan antenas pequeñas (alta frecuencia), el problema es que a comparación de los nodos que funcionan a bajas frecuencias, necesitan más potencia para emitir a la misma distancia; siendo de este modo la comunicación con esta técnica poco compatible con la operación en baja potencia de los nodos. En el segundo caso, la potencia de transmisión es mucho menor pues al transmitir por medios ópticos se trabaja la señal dentro del nodo siempre en banda base sin la necesidad de incorporar moduladores, filtros activos o demoduladores. En adición a esto, al tener el espectro visible de la luz una longitud de onda tan corta, es posible adecuar un concentrador de haz de luz de escala milimétrica en el nodo logrando una amplificación comparable con una antena isotrópica de cinco o seis órdenes de magnitud. Sin embargo, las desventajas son más evidentes pues a priori se necesita línea de vista entre ambos nodos lo cual no siempre es posible y de ser factible la línea de vista, se necesita tener mucha precisión para apuntar el estrecho haz de luz y evitar que se mueva de su lugar.

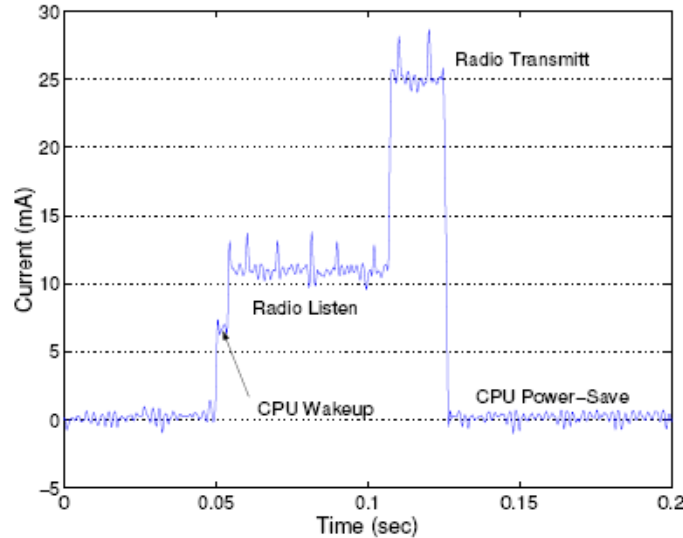


FIGURA 2-6 Evolución del consumo de corriente eléctrica en un nodo Mica2 de Crossbow [20].

Una vez definido que el mayor consumo de energía en un nodo se da en la transmisión, pasamos a analizar la cantidad de transmisiones que debe hacer cada nodo y esto está ligado a la topología de la red y al protocolo que usan. En una red malla o mesh por ejemplo, está claro que los nodos más cercanos al *gateway* serán los más perjudicados en su consumo de energía debido a que tienen que retransmitir más paquetes de información. Esta información proviene principalmente de nodos para los cuales les sirven de ruta hacia el *gateway* (ver FIGURA 2-7).

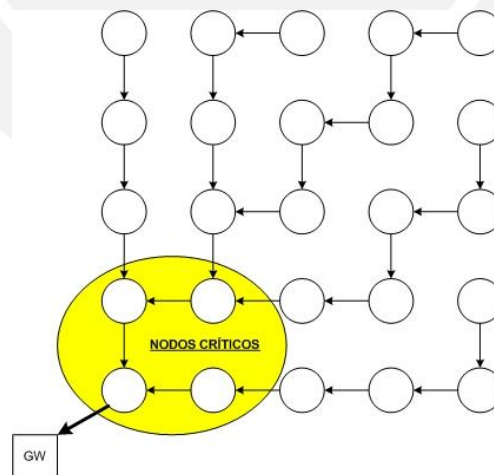


FIGURA 2-7 Red de sensores con una estación base. Los nodos en la región de color amarillo son aquellos por los que pasa toda la información de la red

Es muy importante también considerar en el consumo de energía de los nodos el modo *sleep* (también llamado Power-safe). Para esto definiremos los distintos estados para modelar el consumo de energía [18].

- Adquisición.- incluye el sensado, conversión A/D, procesado y almacenaje.
- Transmisión.- incluye el procesado para la determinación de la dirección de destino, empaquetado del mensaje, codificación y posiblemente colocar en cola el paquete. En el módulo radio, comprende la alimentación a los circuitos en banda base y RF (considerar que usualmente la relación potencia de transmisión vs. Energía consumida no es lineal)
- Recepción.- incluye el uso del amplificador de bajo ruido (Low-noise amplifier), oscilador, filtro, detección, decodificación, detección de errores y verificación de dirección.
- Escucha o “Listening”.- la misma secuencia de la recepción solamente que se detiene en la detección.
- Sleep.- Consumo de energía necesario para “sobrevivir”

Como se puede apreciar en la definición anterior, es sustancial la diferencia de trabajo que se encuentra haciendo el nodo cuando está en *sleep* que cuando está en cualquier otro estado. Cuando los nodos se encuentran “durmiendo” a la espera de alguna instrucción a ejecutar, previenen el desperdicio de energía con la recepción de un mensaje que no está destinado para él (ver FIGURA 2-6), en este momento, el nodo no está ni transmitiendo, ni recibiendo, ni sensando información y tiene un consumo promedio de 110 μ A en contraposición con los 21.48mA empleados en la transmisión de datos o los 7mA empleados en la recepción (Datos promedios de la familia Mica de la empresa Crossbow).

2.2.2.3. Ciclo de Trabajo

Debido a que el ambiente que van a sensar los nodos no se espera que cambie abruptamente o muy frecuentemente, los nodos deben operar en alternados estados de trabajo y no-trabajo. Se estima que el consumo promedio de algunos motes es de 1 μ A (TEXAS INSTRUMENTS TLV2760 por ejemplo). Para poder lograr este consumo se utiliza ciclos de trabajo inferiores al 1%, eso quiere decir que los motes se encuentran en modo *sleep* más del 99% del tiempo que funcionan. Mientras algunas investigaciones para reducir el consumo de energía se orientan en conseguir protocolos más eficientes (los cuales trataremos mas adelante), otras investigaciones se orientan en lograr *duty cycles* más cortos [21]. En términos prácticos lo que se busca es que nodos con una muy baja tasa de transferencia, colocados en lugares remotos y de difícil o imposible acceso tengan autonomías de 10 años o más.

Investigaciones realizadas por la empresa AvalonRF con microcontroladores que no son reconocidos precisamente por su ahorro de energía (Blackfin ADF 7020) muestran que es posible llegar a corrientes de operación promedio de 1 μ A cuando

se trabaja y regula adecuadamente el ciclo de trabajo. Estas investigaciones demuestran que si uno apaga el reloj del microcontrolador este se puede considerar un dispositivo de bajo consumo de energía independientemente del modelo que se utilice. Se ha demostrado que es bastante importante que el microcontrolador sea capaz de apagar su reloj en su estado de *sleep* y posteriormente responder al instante, requisito que no muchos microcontroladores pueden cumplir pues tienen que pasar por un lento proceso de re-inicio que consume grandes cantidades de energía.

Así mismo la circuitería desde el sensor hasta el procesador debe ser bastante eficiente en términos de consumo, para lograr esto, se debe seleccionar un amplificador que sea capaz de cumplir con los requerimientos para el procesamiento de señal del sistema y a la vez requiera la más baja potencia. Los parámetros que influyen en el consumo de energía de amplificadores operacionales son principalmente el desempeño frente al ruido, altas tasas y la corriente de salida del dispositivo. Para evitar el problema del ruido esta empresa ha optado por colocar una etapa de filtro delante de la etapa de amplificación, tal y como se muestra en la FIGURA 2-8. Además para sistemas en los cuales el consumo se mide al microamperio, los amplificadores operacionales que normalmente tienen una corriente de fuga de $1\mu\text{A}$, cuentan con un interruptor de apagado que reduce su corriente de fuga a $0.01\mu\text{A}$. Este aspecto es importante pues la mayor parte del tiempo estos amplificadores operacionales se encuentran sin hacer nada debido al mínimo ciclo de trabajo que emplean y todo ese tiempo significa un ahorro de hasta dos ordenes de magnitud.

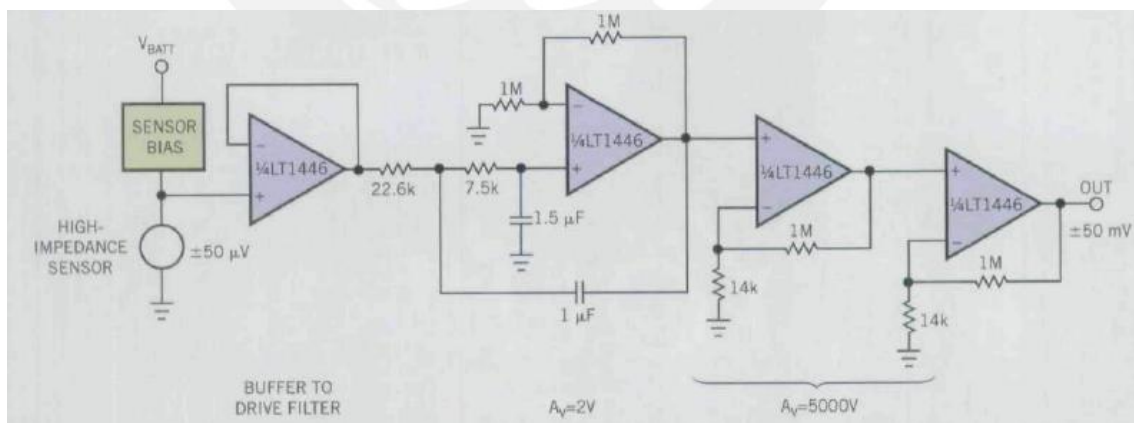


FIGURA 2-8 Camino de la señal desde el sensor hasta los sistemas de bajo consumo. Nótese la etapa de filtrado añadida por delante de la etapa de amplificación [21]

2.2.2.4. Jerarquías de red

En lo referente a aplicaciones más avanzadas en las cuales se diseña la topología de la red de sensores pensando en aplicaciones que integren más funcionalidades de más campos, experiencias en este campo han demostrado que la topología necesita de una jerarquía de red. Dicha jerarquía deberá empezar con los sensores de bajo nivel y continuar hacia arriba en la jerarquía hasta sensores de alto nivel con capacidad de agregación de datos, análisis y almacenamiento [22]. Para ilustrar mejor lo anteriormente dicho, se tomará un ejemplo. Se considerará una red de sensores desplegada para un sistema de seguridad avanzada en el cual la mayoría de sensores cubren irrupciones por ventanas, forcejeo de puertas, etc. La cantidad de sensores necesarios así como su ubicación y distancia unos de otros hacen necesario que se usen baterías para alimentarlos. Estos sensores estarían complementados por una gama de sensores más completos que incluyen cámaras de video, sensores de movimiento, sensores químicos, etc. Para esta aplicación, tanto los sensores simples como los complejos estarían integrados en una red mesh o tipo malla que proveería una vigilancia continuada.

Los sensores colocados en puertas y ventanas tienen una labor específica y necesitan de poder operar con una autonomía larga, además de eso, la tasa de transmisión de datos es muy baja. En contraste, los sensores de movimiento, químicos y cámaras de video son ejemplos de nodos que requieren de amplios anchos de banda así como así como recursos computacionales más complejos y por lo tanto mayores requerimientos de energía.

En adición a las tradicionales aplicaciones de seguridad, las redes de sensores sin hilos están siendo desarrolladas para rastrear elementos móviles dentro de la red. En este sentido es posible por ejemplo adherir mini-motes al personal de seguridad los cuales podrían disparar una alarma cuando una persona entre a una zona restringida, se piensa que en el futuro cercano estos mini-motes serán bastante económicos. En la actualidad en la Universidad de Berkeley se ha logrado desarrollar el nodo *Spec* (ver FIGURA 2-10) diseñado por J. Hill el cual por primera vez integra todas las funcionalidades necesarias (Micro-transmisor radio, conversor análogo-digital, sensor de temperatura y TinyOS) y tiene un coste inferior de producción a los \$0.30 en grandes cantidades [23]. La FIGURA 2-9 muestra en mayor detalle la jerarquía de la red malla para el ejemplo del sistema de seguridad.

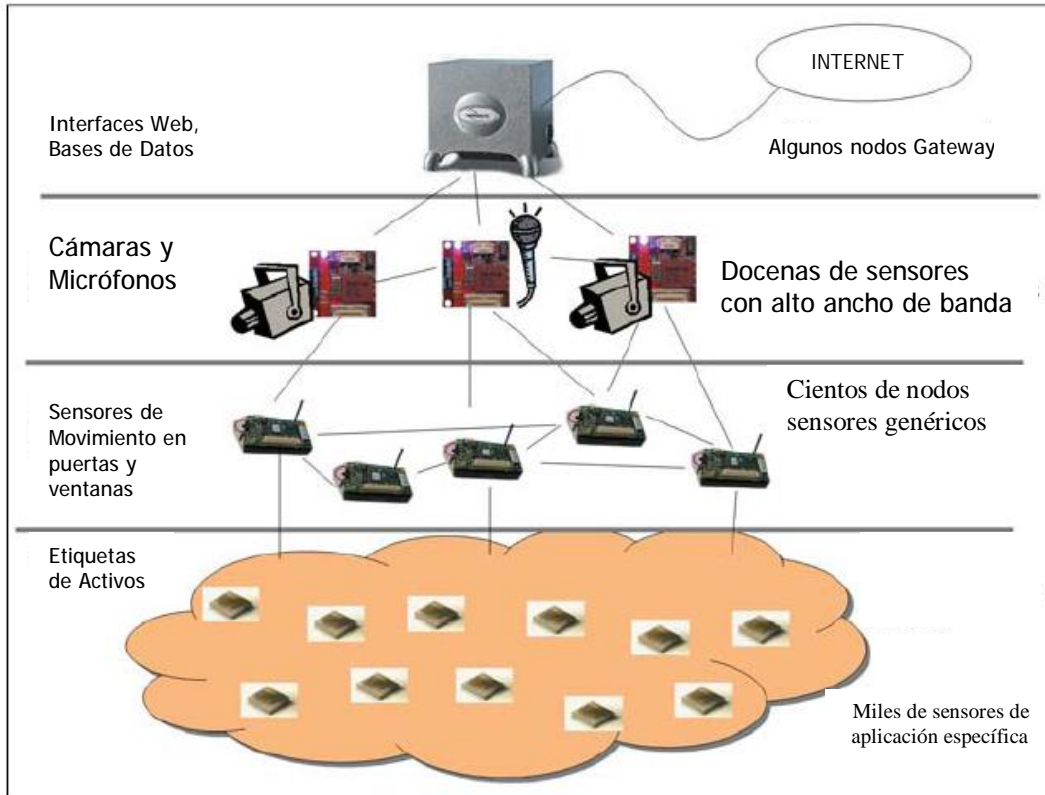


FIGURA 2-9 Jerarquía de una red malla para un ejemplo de un sistema de seguridad [22]

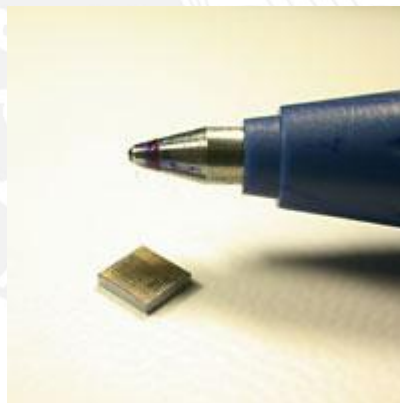


FIGURA 2-10 Nodo Spec de la UCB con un área de 2.5mm². Integra por primera vez comunicación radio en un chip procesador de sensado.

Un elemento final en este ejemplo sería el conocido *gateway* del apartado 2.2.1.2 que en esta ocasión sería algo mas complejo que los tradicionales que se limitan a ser la interfaz entre la plataforma de aplicación y los nodos que componen la red. En este caso incorporaría una base de datos u otro proceso de almacenaje de los datos que recibe de las lecturas individuales de cada nodo.

Para aclarar las diferencias que en características individuales tiene cada tipo de nodo de la jerarquía se adjunta la Tabla 2-1 que toma como ejemplo motes de la

empresa Crossbow principalmente. En ella se puede apreciar como el Mote (Mica2) contiene una memoria y capacidad de procesamiento de energía que fácilmente puede rastrear el movimiento de docenas de nodos *Spec* colgados a él. También se puede apreciar como no es posible que el Mote Mica2 pueda manejar aplicaciones de video o audio por el bajo ancho de banda con que cuenta en su canal de radio. Para eso se cuenta con un Imote por ejemplo, desarrollado por Intel Research que cuenta con una mayor memoria RAM en el chip y un mejor procesamiento de energía. Además es capaz de comunicarse vía Bluetooth con tasas de transmisión superiores a 500Kbps.

Node Type	Sample "Name" and Size	Typical Application Sensors	Radio Bandwidth (Kbps)	MIPS Flash RAM	Typical Active Energy (mW)	Typical Sleep Energy (uW)	Typical Duty Cycle (%)
Specialized sensing platform	Spec mm ³	Specialized low-bandwidth sensor or advanced RF tag	<50Kbps	<5	1.8V*10–15mA	1.8V *1uA	0.1–0.5%
				<0.1Mb			
				<4Kb			
Generic sensing platform	Mote 1-10cm ³	General-purpose sensing and communications relay	<100Kbps	<10	3V*10–15mA	3V *10uA	1–2%
				<0.5Mb			
				<10Kb			
High-bandwidth sensing	Imote 1-10cm ³	High-bandwidth sensing (video, acoustic, and vibration)	~500Kbps	<50	3V*60mA	3V *100uA	5–10%
				<10Mb			
				<128Kb			
Gateway	Stargate >10cm ³	High-bandwidth sensing and communications aggregation Gateway node	>500Kbps–10 Mbps	<100	3V*200mA	3V *10mA	>50%
				<32Mb			
				<512Kb			

Tabla 2-1 Comparativa de las características principales de los diferentes nodos que componen una jerarquía [22]

2.2.2.5. Bandas de Frecuencia

Una red de sensores multi-salto debe tener sus nodos enlazados inalámbricamente. Para lograr esto, tal y como se ha discutido en el apartado 2.2.2.2 se puede utilizar diversos tipos de transmisión dependiendo del consumo de energía que se quiera tener. Sin embargo un aspecto a considerar también es que se espera incrementar la producción industrial de los mismos, consiguiendo con ello que baje el coste de venta y con ello haciéndolos comerciales en todo el mundo, de este modo, se espera que las comunicaciones de los mismos funcionen independientemente del lugar del mundo donde se les coloque, por lo tanto para garantizar la operación mundial de estos dispositivos se debe usar un medio que este disponible en todo el mundo.

Pensando en esto para las comunicaciones radio se han utilizado las bandas ISM (Industrial-Scientific-Medical) que ofrecen su uso sin licencias en la mayoría de países además de no estar restringidas a un estándar en particular lo cual da más flexibilidad de diseño de los elementos. Sin embargo también tienen algunas limitaciones como la potencia máxima de transmisión e interferencia con aplicaciones existentes. La Tabla 2-2 muestra las frecuencias de estas bandas que están disponibles para su uso [24].

Banda de Frecuencia	Frecuencia Central
6765 – 6795 Khz	6780 Khz
13 553 – 13 567 Khz	13 560 Khz
26 957 – 27 283 Khz	27 120 Khz
40.66 – 40.70 Mhz	40.68 Mhz
433.05 – 434.79 Mhz	433.92 Mhz
868 – 870 Mhz	869 Mhz (Europa)
902 – 928 Mhz	915 Mhz (EE.UU.)
2400 – 2500 Mhz	2450 Mhz
5725 – 5875 Mhz	5800 Mhz
24 – 24.25 Ghz	24.125 Ghz
61 – 61.5 Ghz	61.25 Ghz
122 – 123 Ghz	122.5 Ghz
244 – 246 Ghz	245 Ghz

Tabla 2-2 Frecuencias disponibles para aplicaciones ISM según la Tabla Internacional de Asignación de Frecuencias

Algunas de estas frecuencias están en uso para comunicaciones sin hilos en teléfonos caseros, sistemas WLAN, etc. y en lo referente a WSN, casi todos los productos usan la banda de 900 – 928 Mhz y la de 2.4 – 2.483 Ghz sin embargo se presentan complicaciones en ese sentido incluso debido a que por ejemplo en Europa la banda de 900 – 928 Mhz es parte de la banda para comunicaciones móviles celulares GSM [25].

El uso de la banda de 900 Mhz tiene como ventaja que alcanza mayores rangos de cobertura para iguales potencias debido a su relativamente más larga longitud de onda, lo cual acarrea que la autonomía de cada nodo sea mayor. Sin embargo una frecuencia inferior trae consigo el uso de antenas mas grandes en comparación con las requeridas por la frecuencia de 2.4 Ghz.

En algún momento se pensó en utilizar la banda de 900 Mhz para motes en los EE.UU. y utilizar la banda de 433 Mhz para Europa, pero fue desechado pues la

tendencia del mercado fue por el uso de la banda de 2.4 Ghz que esta libre en casi todo el mundo y que permite comunicarse con otros elementos inalámbricos de diferentes estándares que se pudieran acoplar a la red. Hoy en día ciertos fabricantes de redes tienden a tener bandas propietarias en donde colocar la transmisión de sus sensores para dar más seguridad a sus clientes frente a pérdida de datos.

2.2.2.6. Protocolos

Teniendo en cuenta todas las consideraciones de las características señaladas en los apartados anteriores, queda claro que el consumo de energía en una red de sensores sin hilos es el aspecto más limitante. Está claro también que el uso del canal de radio, es la actividad que consume más energía de todas las tareas de un nodo. Pensando en esto, los protocolos diseñados están principalmente pensados para lograr la autonomía mas larga posible en cada nodo reduciendo la cantidad de veces que se usa el canal de radio. De este modo, se hacen más eficientes los procesos de descubrimiento de rutas y las transmisiones de paquetes sin información así como la capacidad de la red para autoconfigurarse frente a cambios en la topología de la red.

Actualmente su puede decir que el encaminamiento en redes tradicionales se puede realizar a nivel de enlace, utilizando las direcciones MAC (Media Access Control) o a nivel de red utilizando las direcciones IP. En redes de sensores sin hilos, si bien se están realizando recién investigaciones en lo referente a dotar a las redes de protocolos basados en IPv6 pues cuentan con un amplio rango de direcciones, también se sigue la misma línea del desarrollo de protocolos a nivel de enlace y a nivel re red.

Protocolos MAC

El propósito de los protocolos MAC es el de organizar el uso del medio compartido, sin embargo, en redes de sensores sin hilos, dicha organización busca además maximizar el ahorro de energía. La colisión de paquetes es uno de los principales causantes de este desperdicio dado que el nodo tiene que re-transmitir los paquetes perdidos. Por el lado del receptor, el idle listening (escucha desocupada), que es la escucha activa de potenciales mensajes destinados al nodo, por prolongados periodos de tiempo y el overhearing (sobre-escucha), que es la recepción de demasiados paquetes que no tienen como destinación dicho nodo, desperdician recursos.

Protocolos TDMA (Time Division Multiple Access) fueron utilizados en los primeros diseños de redes de sensores sin hilos. En estos protocolos, se programaba los accesos al medio compartido y de este modo se evitaban las colisiones, el idle

hearing y la sobre-escucha. Su mayor problema era que asumían como un hecho el *clustering* (almacenaje de datos) haciendo la operación con dispositivos móviles muy difícil y compleja por lo cual fueron descartados también.

Usualmente las redes de sensores sin hilos tienen muy bajas tasas de transferencia de datos, motivo por el cual se descartaron protocolos como el 802.11 (Wi-Fi) pues está optimizado para ofrecer tasas de transferencia altísimas en detrimento de la optimización del consumo. Pensando en esta característica, posteriormente se desarrollaron protocolos como el S-MAC [26] (Sensor networks - Media Access Control) que sincronizaba los nodos organizando sus periodos de *sleep*. Los nodos de este modo se encendían de una manera regular cada cierto tiempo, contendían por el medio si tenían data que enviar y luego pasaban nuevamente al modo *sleep* (ver apartado 2.2.2.2 para una definición de *sleep*). Ajustando los tiempos de *sleep*, *duty cycles* de 1 a 50% eran posibles de lograrse para reducir el gasto de energía producido por el idle listening. Posteriormente se desarrollaron protocolos como el T-MAC [27] (Time-out Media Access Control) que extendían estas ideas para proveer un periodo de *sleep* adaptativo para obtener un mejor throughput cuando se trabaja con multi-saltos.

Finalmente cabe mencionar el protocolo del estándar 802.15.4 (Zigbee). Este protocolo incluye opcionalmente el uso de un *duty cycle* ajustable para evitar el idle listening.

Protocolos en capa de red

Tal y como también lo es en los protocolos MAC, el overhead es un aspecto importante a considerar. Aquí la mayor fuente de overhead son los paquetes de control de tráfico, es decir, los paquetes de *request* (que solicitan una nueva ruta) y los de actualización de las nuevas rutas.

Los protocolos para redes ad-hoc están usualmente agrupados en: Protocolos Proactivos y Protocolos Reactivos.

En el caso de los protocolos proactivos, tenemos como ejemplo mas representativo el OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) que pre-calcula las rutas a algunas o todas las destinaciones de modo que cuando una ruta es solicitada esta ya está disponible y en el caso de los protocolos reactivos, tenemos como ejemplo al AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) y DSR (Dynamic Source Routing protocol) que calcula las rutas a destinaciones específicas solo cuando el tráfico así lo requiere. El overhead del control de tráfico en protocolos proactivos es proporcional a la tasa con la que los nodos cambian y en los reactivos es proporcional a la cantidad de veces que los nodos solicitan nuevas rutas. Los protocolos reactivos son preferibles para redes que contarán con nodos móviles ya

que solo mantienen las rutas hábiles. En contraparte, muchas redes hoy en día tienen solo nodos estacionarios por lo que se recomienda en ese caso usar protocolos proactivos ya que son mucho más sencillos y no tienen retardo por el descubrimiento de una nueva ruta [28].

2.2.3. Estandarización

Dada la particularidad de los requerimientos que las redes de sensores sin hilos necesitan, para mayo de 2003 se impulsó la creación del estándar IEEE 802.15.4 que se concluyó para octubre del mismo año. Seis meses después la Zigbee Alliance publicó las especificaciones indicando las recomendaciones para aplicaciones funcionando sobre dicho estándar con el fin de compatibilizar la producción de dispositivos y uniformizar las investigaciones.

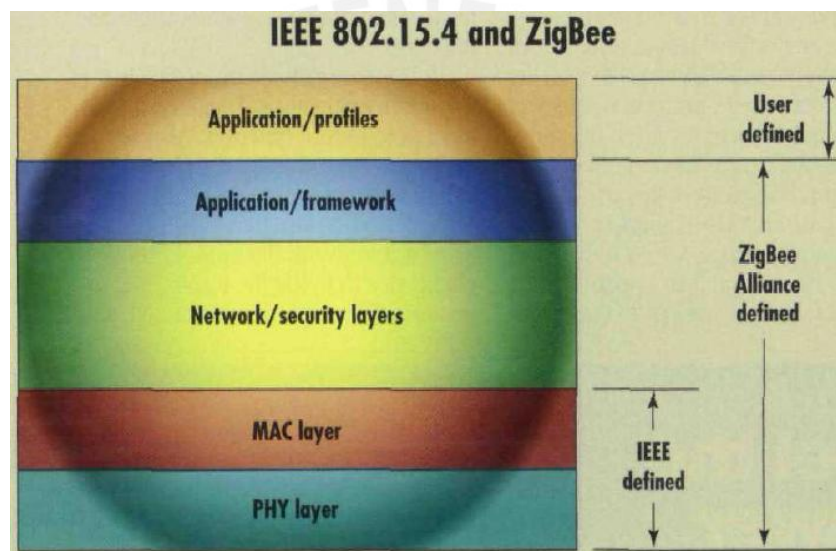


FIGURA 2-11 Alcances de los estándares 802.15.4 y Zigbee en las capas de una red [17]

2.2.3.1. IEEE 802.15.4 [29]

Esta norma define el protocolo y conexiones compatibles para dispositivos de comunicación de datos usando transmisiones de radio frecuencia de baja tasa, baja potencia y baja complejidad en una WPAN (Wide Personal Area Network).

Este estándar uniformiza el uso de redes malla o mesh usando 2 bandas diferentes, 868/915 Mhz y la de 2.4 Ghz así como tasas de datos de 20, 40 y 250 Kbps.

El estándar fue considerado básico en su momento pues esencialmente solo cubre la capa física y la capa MAC. Sin embargo es importante pues estas capas son los bloques elementales para el desarrollo que se pueda lograr más adelante en capas superiores de una forma más abstracta y más eficiente.

Esta norma no estandariza muchos aspectos de la red que son importantes regular como el encaminamiento y la administración de sesión.

En lo referente a la transmisión, delinea un esquema de transmisión basado en DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum):

- Para la banda de 868/915 Mhz, BPSK (Binary Phase Shift Keying)
- Para la banda de 2.4 Ghz, O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying)

En la capa física cubre la detección de la señal RF y la mejora de la calidad de la señal además determina métodos de acceso a los canales de radio a usarse. También está determinado el tamaño del paquete y el direccionamiento de los nodos de la red. En la capa de enlace se define el modo en que los nodos acceden al canal en especial cuando se tienen múltiples nodos intentando transmitir a la vez [17].

2.2.3.2. Zigbee [30]

Como se mencionó anteriormente, el estándar Zigbee se creó con el objetivo de delimitar aquellos vacíos que la norma 802.15.4 dejó con el fin de homologar la producción de dispositivos y las investigaciones que se venían realizando.

En las capas altas de estructura de la red, Zigbee define las capas de red, seguridad y aplicación. En la capa de red, maneja topologías tipo estrella, malla y árbol como se han mencionado en el apartado 2.2.1.7 y delinea lo que será una jerarquía de red.

Quizás la atracción principal en las redes Zigbee es que son auto-configurables y auto-regenerables, esto quiere decir que prevén que los mensajes puedan pasar de un nodo a otro por múltiples caminos pues los nodos son lo suficientemente inteligentes como para re-enrutar el tráfico en caso un nodo se pierda.

En lo referente a seguridad, hay lineamientos para lograr encriptaciones de 128 bits tanto a nivel de capa de red como de nivel de enlace. Para lograr esto se cuenta con varias “link keys” y tan solo una “network key”. De este modo, la comunicación unicast entre dos nodos a nivel de aplicación es encriptada por una llave compartida tan solo por los nodos involucrados a nivel de enlace, mientras que la comunicación broadcast es encriptada por una sola llave común de todos los nodos a nivel de red. Así un nodo que recibe un mensaje es siempre consciente acerca del arreglo exacto de seguridad usado.

Un dato adicional que se puede mencionar acerca de la Zigbee Alliance es que esta compuesta por un grupo de compañías con interés en la estandarización de redes sin hilos. Dentro de esta gama se encuentran tanto compañías de semiconductores como de hardware, software y sensores. La FIGURA 2-12 muestra las compañías que forman parte de la Zigbee Alliance y su distribución según el rubro que abastecen en lo referente a una red.

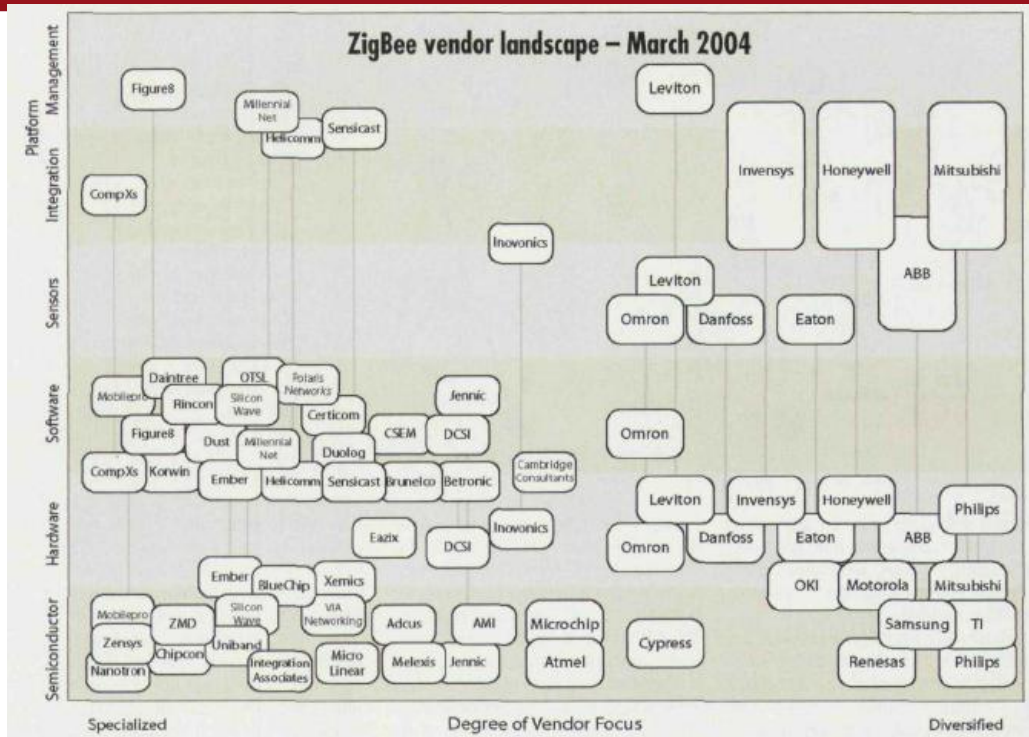


FIGURA 2-12 Compañías que componen la Zigbee Alliance [17]

2.2.4. Consideraciones de Diseño

En el siguiente apartado se delimitan algunas variables que se deben considerar en el diseño de una red de sensores sin hilos y de las cuales dependerá la eficiencia y calidad de la red según la aplicación que diseñemos.

2.2.4.1. Relación Potencia vs. Distancia

Cuando se transmite información de un nodo a otro de una red y la distancia u obstáculos en el camino atenúan demasiado la señal, más potencia en la transmisión no siempre es la respuesta más adecuada. Considerando que el uso de energía suele ser uno de los mayores limitantes, en ocasiones es aconsejable no elevar la potencia de transmisión sino colocar nodos intermedios a modo de repetidores creando un camino multi-salto, ya sea para disminuir la distancia entre nodos o para rodear algún obstáculo que se pudiera presentar. La FIGURA 2-13 muestra la relación potencia utilizada vs. distancia para ambos métodos, el de elevar la potencia y el de colocar nodos intermedios apreciándose una diferencia sustancial.

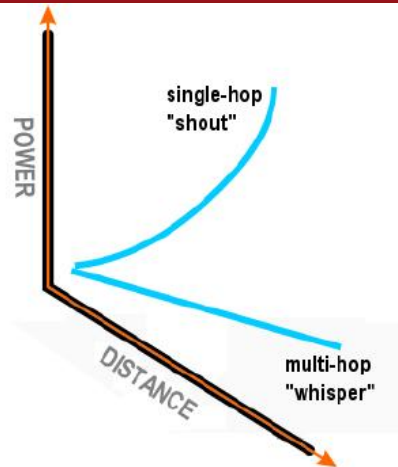


FIGURA 2-13 Relación Potencia vs. Distancia para redes de un solo salto y multi-salto [16]

En contrapartida, se puede considerar en esta relación la frecuencia de trabajo, como se ha comentado anteriormente, una menor frecuencia es capaz de tener mayor cobertura ante una misma potencia de transmisión. Usualmente la relación Potencia Transmitida vs. Distancia entre nodos se calcula con la siguiente función cuyos resultados se presentan en la FIGURA 2-14 para dos frecuencias distintas [31]:

$$P_R(d) = P_t + G_t - \overline{PL}(d) + G_r$$

Donde P_t = la potencia de transmisión

G_r = ganancia de recepción de la antena

G_t = ganancia de transmisión de la antena y

$PL(d)$ = el promedio de pérdida en el camino para una distancia "d"

$PL(d)$ se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\overline{PL}(d) = PL_0(d_0) + 10n \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_s$$

De donde PL_0 se calcula del siguiente modo:

$$PL_0(d_0) = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$$

Siendo, $PL_0(d_0)$ = distancia de espacio libre para una distancia de referencia d_0

λ = longitud de onda para la frecuencia elegida

n = exponente de pérdidas en el camino

X_s = término de shadowing

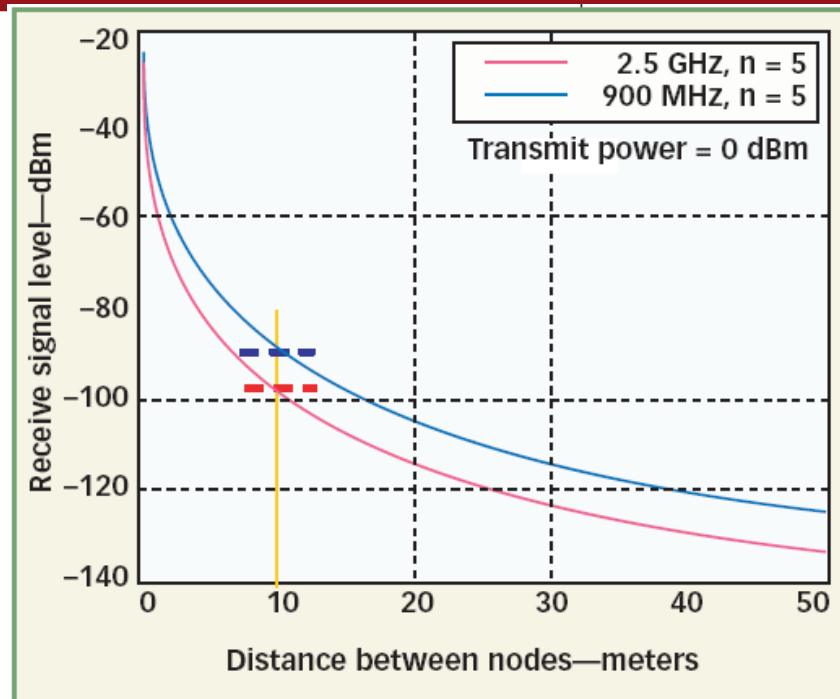


FIGURA 2-14 Relación Potencia vs. Distancia para 2 frecuencias distintas [31]

2.2.4.2. Relación Cantidad de nodos vs. Throughput

Una vez definido que muchas veces es mejor colocar un nodo intermedio en la red antes que tener que elevar la potencia de transmisión, se presenta otra limitación, el throughput. A más nodos que tenga la red, menos será el throughput alcanzable. Investigaciones recientes en el tema demuestran que el throughput de la red decae en función del número de nodos N según la función: $\frac{1}{\sqrt{N}}$ [18]

Sin embargo el throughput también está directamente asociado a la cantidad de transmisiones sin error que la red es capaz de lograr y eso es cuestión muchas veces de los protocolos que se usarán y de la capacidad de canal de que disponen así como la movilidad que tendrán los nodos de la red.

2.2.4.3. Escalabilidad

La escalabilidad define la cantidad de nodos que una red es capaz de soportar así como su flexibilidad al añadir nodos a la red que no se estipularon en la instalación inicial. Se espera que el aumento de nodos en la red o el aumento de la densidad de los mismos, no signifique un detrimento significativo de las cualidades de la red. Estudios recientes hablan de que las redes de sensores sin hilos serán capaces de manejar cientos, miles y hasta millones de sensores. Por supuesto que este nivel de escalabilidad se da debido a la alta densidad que se espera que tengan estas redes. Se espera que los protocolos en redes de sensores sin hilos sean capaces de manejar agregaciones muy grandes de sensores como por ejemplo, una persona que lleva varios sensores con él, en su móvil, en sus gafas, en su reloj, en

sus joyas, etc. de cierta manera constituye lo que podríamos denominar una red de sensores ah-hoc personal, sin embargo, la densidad es diferente si esta persona se encuentra en casa viendo televisión a que si se encuentra en un estadio viendo un partido de fútbol en donde cada persona cuenta con sensores. De este modo, la densidad crece estrepitosamente en el estadio pues se espera que las redes de cada persona interactúen entre si logrando mecanismos de agregación para formar una gran red que por ejemplo informe el estado y locación de cada persona a las autoridades del estadio.

2.2.4.4. Tolerancia a Fallos

Algunos nodos según la aplicación para la que esté diseñada la red, pueden fallar por falta de energía, interferencia, daño físico, etc. sin embargo este daño no tiene porque afectar al buen funcionamiento de la red. A esto se refiere la tolerancia a fallos, a mantener el buen funcionamiento de la red incluso cuando algún elemento de la misma falle. Para lograr esto, los protocolos y algoritmos a utilizar son los encargados de descubrir nuevas rutas y garantizar que la información sea entregada correctamente. Si el ambiente en que se va a desplegar la red de sensores brinda la seguridad de que por ejemplo un nodo no va a ser destruido por un animal, el protocolo puede ser más “relajado”, de lo contrario tendrá que ser más complejo.

2.2.4.5. Movilidad

La movilidad de una red se refiere a la capacidad de la misma de soportar elementos móviles y sus consecuentes cambios en las tablas de encaminamiento. La movilidad de un nodo ocasiona cortes en la comunicación que a su vez ocasionan entre otras cosas, gasto de energía y aumento de la latencia debido a retransmisiones de mensajes de solicitud de rutas de parte de los elementos móviles. El protocolo implementado en una red de elementos móviles debe por lo tanto ser capaz de adaptarse fácilmente a las nuevas rutas minimizando los efectos que los cortes de comunicación puedan ocasionar.

2.2.4.6. Objetivos finales de diseño

Una vez presentadas las características de diseño de una red de sensores sin hilos y sus respectivas limitaciones para lograr ciertas características, presentamos lo que se espera que un buen diseño tenga.

- Arquitecturas y protocolos escalables y flexibles, de este modo lo que se busca es que la red sea capaz de crecer sin mayores dificultades, siendo capaz de re-establecer las rutas multi-salto tanto de los nodos nuevos como las que ya estaban instalados.

- Procesado y fusión localizada de la información, de este modo lo que se deberá lograr es que los nodos no solo entreguen la información en crudo sino que sean capaces de filtrar y eliminar la información redundante en cada nodo.
- Diseño ahorrador de recursos, en las redes de sensores sin hilos, el uso de la energía especialmente es vital en detrimento de la complejidad del sistema. Por encima de todo, protocolos que ahorren energía son necesarios para extender el tiempo de vida del sistema.
- Auto-configuración, las redes de sensores son redes muy dinámicas, como se explicó anteriormente, los nodos pasan por diversos estados como el de transmisión, recepción, *sleep*, etc. por tanto las redes deben ser capaces de conectarse y comunicarse independientemente del estado en que se encuentre el nodo. Además de eso, nuevos enlaces y rutas deben poder ser creadas en caso de fallo o deterioro de algún nodo.
- Fiabilidad y tolerancia a errores, las redes deben poder entregar la información de manera confiable independientemente de las condiciones de ruido, propensión a errores y variaciones del canal. Para lograr lo anteriormente mencionado, verificación de la información en cada capa de la red es necesaria. Además, se espera que los nodos sean capaces de recalibrar y re-configurar los sensores a lo largo de su vida.

2.2.5. Aplicaciones y desarrollos actuales

Debido a la amplia gama de sensores que se pueden integrar a los motes de una red de sensores sin hilos, las aplicaciones en las que este tipo de redes pueden funcionar son prácticamente infinitas. Si uno es capaz de acoplar el sensor adecuado a la red, esta le puede servir a uno eventualmente para monitorear o adquirir información del fenómeno que se desee. Adicionalmente, las redes pueden no solo monitorear, sino también pueden llegar a ser capaces de tomar decisiones y realizar las acciones adecuadas frente a determinado impulso. Esto es posible de lograrse mediante el acople de actuadores a los nodos de la red. En este sentido, presentaremos algunas aplicaciones y desarrollos que se han logrado en este campo hasta el momento.

2.2.5.1. Proyecto Great Duck Island

En la primavera de 2002 el laboratorio de investigaciones de Intel en la UCB (University of California Berkeley) inició un proyecto para desplegar una red de sensores en la isla Great Duck en Maine, EE.UU. Esta red monitorea los microclimas dentro y en alrededores de las madrigueras de anidamiento de los petreles (ave típica del lugar). El objetivo era lograr una red de monitoreo del

hábitat haciendo énfasis en que es posible hacerlo sin entrometerse y alterar el hábitat de los animales.

Para finales de 2002 mas de 1 millón de lecturas de los sensores habían sido ya recolectadas de los 32 motes mica que se desplegaron en la isla. A cada nodo se le acopló sensores de temperatura, humedad, presión barométrica e infrarrojos mediante las tarjetas de expansión Weatherboard. Los motes son capaces de tomar muestras y remitirlas a una estación central en la isla donde se encontraba un enlace satelital, dicho enlace permite a los investigadores en todo el mundo acceder a la información a través del Internet.

Para Junio de 2003 se desplegó una segunda generación de sensores con 56 nodos más, para Julio de 2003 se aumentó en 49 y para agosto del mismo año en 85.

Estos nodos conforman una red multi-saltos que es capaz de transferir información incluso de nodos que se encuentran alejados más de 300 metros dentro del bosque.

Esta aplicación es interesante pues fue una de las primeras que se hizo en el campo y bajo condiciones de trabajo bastante difíciles de afrontar para los motes, sin embargo no funcionó como se esperaba y dicho proyecto sirvió para re-diseñar los motes con aspectos que no fueron tomados en cuenta en el laboratorio [32].

2.2.5.2. Carguero de petróleo Loch Rannoch

La compañía de energía British Petroleum está experimentando con motes en el carguero Loch Rannoch, un carguero de 885 pies de largo para ver si son útiles en la predicción de fallas en la maquinaria de abordó. La firma desplegó una red de 160 nodos para monitorear el equipamiento del carguero midiendo variables como la vibración de las bombas, compresores y motores del barco como indicadores de potenciales fallas generales. La configuración está hecha de modo que la red envía señales de alarma si detecta vibraciones fuera de lo usual. De este modo, los técnicos a bordo pueden arreglar el problema antes de que derive en consecuencias más serias. Debido a que los cargueros cuentan con una variedad muy limitada de herramientas a bordo para solucionar problemas de estos, la predicción de fallas le ha permitido a British Petroleum evitar gastos en retraso de entregas debido a la necesidad de enviar hasta el lugar en que se encuentra el carguero las herramientas que se necesitan para solucionar las fallas. Si los motes funcionan como se espera, pero sobre todo soportan las condiciones marítimas a las que se verán expuestos, es posible que British Petroleum invierta mas dinero en el despliegue de más redes en su flota demostrando que estas redes son capaces de permitir la reducción de costos por la avería de maquinaria cara.

2.2.5.3. Los Viñedos de Pickberry

Con el objetivo de demostrar los beneficios de una red de sensores sin hilos, la compañía Accenture Technology Labs instaló una red a lo largo de treinta acres de viñedos. Dicha red debía obtener de manera continua datos de humedad, viento, agua y temperatura de la tierra y el aire. Los diseñadores del sistema, hicieron que la información recolectada por cada nodo estuviera disponible en la Web para usuarios autorizados haciendo uso de un enlace de telefonía celular. De este modo, la red de sensores ha permitido al personal de los viñedos optimizar la planificación de regadíos basándose en la información proporcionada por los sensores de humedad. Del mismo modo, la aplicación dispara alarmas en determinados eventos como heladas, pestes, etc [33].



3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL

Dado que el consumo y utilización de fertilizantes y agua se realiza prácticamente al tanteo, o en su defecto, con mediciones costosas y lentas que ocasionan pérdidas significativas de dinero y tiempo; entonces, las redes de sensores inalámbricas se proponen como una alternativa de un solo gasto y con una gran escalabilidad y flexibilidad de implementación permitiendo tener grandes volúmenes de información inmediata y por sectores para elevar la calidad de los productos y reducir los costos; la solución propuesta le da a los agricultores capacidad de reacción predictiva frente a problemas que se pudieran presentar en los cultivos mejorando la calidad de los mismos.

3.2. HIPÓTESIS SECUNDARIAS

- Debido a la gran precariedad de la agricultura en el país, la obtención de información por zonas y cultivos se vuelve preponderante para lograr reimpulsar esta actividad.
- La gran variedad de climas y suelos con los que cuenta el país le permiten adecuar casi cualquier cultivo que de grandes márgenes de ganancia pero para alcanzar calidad de exportación se necesita de información que puede ser proporcionada por las redes de sensores sin hilos.
- La poca penetración de las redes de telecomunicaciones no son un impedimento para la implementación de las redes de sensores sin hilos ni para el transporte de la información a lugares para su procesamiento debido a que los enlaces satelitales cierran esa brecha.
- A diferencia de los métodos hasta ahora usados de análisis de variables en los que se extrae una muestra no del todo significativa de los suelos y se envía a analizar, las redes de sensores sin hilos permiten obtener información en todo momento y de muchos más puntos haciendo la información más especializada.

3.3. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una red de sensores inalámbrica con una alta escalabilidad que permita medir aquellas variables que son sensibles en términos de la calidad del cultivo y del ahorro de capital optimizando la utilización y racionalización de fertilizantes. Dicha red deberá presentar la información de una manera amigable.

3.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Lograr implementar la red de sensores inalámbrica de modo que esta no se vea afectada por los efectos extremos tales como viento, frío, lluvia, etc.

- Darle a la red de sensores sin hilos la mayor escalabilidad posible pensando en el futuro crecimiento de las áreas a ser sensadas o de los campos de cultivo.
- Diseñar un sistema de presentación de datos y organización de los mismos para determinar los sectores de los campos de cultivo con más falencias y aquellos con las menores falencias. Lograr que esta presentación de los datos permita tomar decisiones rápidas respecto a la mejora de la calidad del producto o respuesta a problemas en los cultivos para lograr el mayor margen posible en la venta o exportación.



4. Diseño del Sistema

A continuación procederemos a describir varios tipos y familias de elementos que cuentan con distintas características según lo explicado hasta ahora. Nos enfocaremos principalmente en los elementos de la empresa Crossbow pues son con los que se contó en el momento de la investigación.

4.1. Elementos Crossbow Disponibles [34]

En los albores de la investigación en redes de sensores sin hilos, la empresa Crossbow empezó a comercializar como productos estrella los motes MPR400 (MICA2) y MPR500 (MICA2DOT) que son la tercera generación de nodos que se inició con el nodo Rene. Al ser ya una tercera generación, ofrecían una gran garantía a prueba de errores por lo que la mayoría de investigaciones y desarrollos se inclinaron a su uso. Otro aspecto que potenció el uso de dichas plataformas es el sistema operativo que permitía trasladar aplicaciones de una plataforma a otra sin necesidad de mayores cambios.

4.1.1. Gateways

La empresa Crossbow cuenta principalmente con 2 familias de *Gateways* que se procederán a describir.

4.1.1.1. Familia MIB [35]

La familia MIB está orientada principalmente a la programación de los motes y a la labor de interfaz de una red de sensores con un PC. Esta familia de *gateways* es capaz de programar una extensa gama de motes como por ejemplo los MICA, MICA2, MICAz y MICA2DOT. Entre sus principales representantes encontramos al tradicional MIB510 que ofrece conectividad a través de un puerto serial mediante el estándar de intercambio de datos RS-232. Nos encontramos también con el más avanzado MIB520 que ofrece conectividad vía el puerto USB pero tan solo para motes MICA2 y MICAz. Otro elemento representativo de esta familia es el MIB600 con interfaz Ethernet que ofrece una interfaz de comunicación para red LAN de datos así como programación de los motes.

4.1.1.2. Familia Stargate [36]

Esta relativamente nueva familia de *gateways* que fue desarrollada en colaboración con el Ubiquitous Computing Research Program de la empresa Intel, tiene por el momento un solo representante, el SPB400. Esta familia está orientada a ofrecer soluciones para conectar las redes de sensores sin hilos a Internet. El *gateway* SPB400 está basado en el procesador Xscale de Intel (el mismo que se puede hallar hoy en día en handhelds de Compaq y Dell). Este *gateway* viene pre-programado con una distribución básica de Linux así como con algunos drivers y aplicaciones. Posee capacidades de comunicación bastantes amplias así como

una tremenda flexibilidad, está compuesto por una tarjeta madre y una tarjeta hija y es capaz de funcionar tanto con un adaptador de corriente como con baterías. Sus características principales se pueden apreciar en la Tabla 4-1 :

Especificaciones	Observaciones
Tarjeta Madre Stargate	
Intel PXA255, Xscale	400 Mhz, Procesador RISC
Intel SA1111, StrongARM	
<u>Memoria</u>	
64 MB SDRAM	
32 MB FLASH	Espacio de Linux menor a 10 MB
<u>Comunicaciones</u>	
Slot PCMCIA	Tipo II
Slot Compact FLASH	Tipo II
Puerto MICA de 51 pines	UART, SSP vía Conector MICA
Puerto I2C Opcional	Cabezal instalable
Puerto Serial Opcional	Cabezal instalable
Tarjeta Hija Stargate	
<u>Comunicaciones</u>	
Puerto Ethernet 10 Base-T	Conector RJ-45
Puerto Serial RS-232	Conector DB9
Puerto JTAG Debug	
Puerto Host USB	Versión 1.1

Tabla 4-1 Características principales del Gateway Stargate SPB400

4.1.2. Motes

En la gama de modelos que Crossbow tiene para los motes, se distinguen dos tipos, los llamados “Módulos Procesador/Radio” y los llamados “Plataformas de desarrollo”. Los primeros cumplen en su mayoría con toda la normatividad de la IEEE y Zigbee y son adecuados para poner en marcha aplicaciones. Los segundos han sido inspirados por el gran éxito de la familia MICA y funcionan con variantes de los estándares para ser usados especialmente en desarrollo e investigación. Los motes por lo general incorporan un bus de expansión para integrar una tarjeta de expansión. Si no se le coloca la tarjeta, se entiende que este nodo funcionará solo como un receptor-transmisor de la información para salvar la distancia o un eventual obstáculo que se pueda presentar en el camino hacia el *gateway*. Si se le incorpora la tarjeta se entiende que además de receptor-transmisor también

funcionará como un nodo de sensado aunque los últimos modelos ya incorporan algunos sensores en el mote sin necesidad de agregar la tarjeta de expansión.

4.1.2.1. Familia MICA [35]

Desde hace un tiempo atrás se comercializan tres modelos de la familia MICA. El primero, el MICAz (MPR2400) que funciona en la banda ISM de 2.4 Ghz y funciona bajo los estándares IEEE 802.15.4 y Zigbee ver FIGURA 4-1. Los otros dos, tanto el MICA2 (MPR400) y MICA2DOT (MPR500) se diferencian en que están disponibles para su funcionamiento en las bandas de 315, 433, 868/900 Mhz y que fueron diseñados antes del lanzamiento de los mencionados estándares por lo tanto no implementan sus recomendaciones, ver FIGURA 4-2 .

Todos estos modelos cuentan con un procesador sobre el que corre código basado en TinyOS y tienen una memoria flash para almacenamiento de alrededor de 512 Kb, dependiendo del modelo, que según el fabricante es suficiente para almacenar más de 100 000 medidas.



FIGURA 4-1 Mote MICAz de la empresa Crossbow Technology INC.



FIGURA 4-2 Mote MICA2DOT en comparación en tamaño con una moneda

4.1.2.2. Familia MCS [37]

Los motes de esta familia tienen como principal exponente al MCS410CA que fue desarrollado en colaboración con el MIT (Massachusetts Institute of Technology). Dicho modelo más conocido como "Cricket" es una versión de los MICA2 para localización pues usa el mismo procesador y módulo radio. Los Cricket incluyen todo lo que un mote MICA2 estándar incluye en lo referente a hardware y además

agregan un puerto serial RS-232 y un transmisor – receptor de ultrasonido especial para realizar labores de localización respecto a otros nodos. La forma en que funcionan es la siguiente, los nodos pueden ser configurados como Listeners (Escuchas) o como Beacons. Los beacons son colocados en lugares estratégicos a lo largo de alguna instalación en donde se quiera rastrear a los demás nodos y se encargan de transmitir señales RF y pulsos de ultrasonido. Los listeners son fijados a elementos móviles y se mantienen escuchando las señales RF, en el momento que detectan una, pasan a escuchar los pulsos de ultrasonido. Con esto son capaces de determinar la distancia a la que se encuentran del respectivo beacon calculando la diferencia de propagación entre la señal RF y el pulso de ultrasonido.

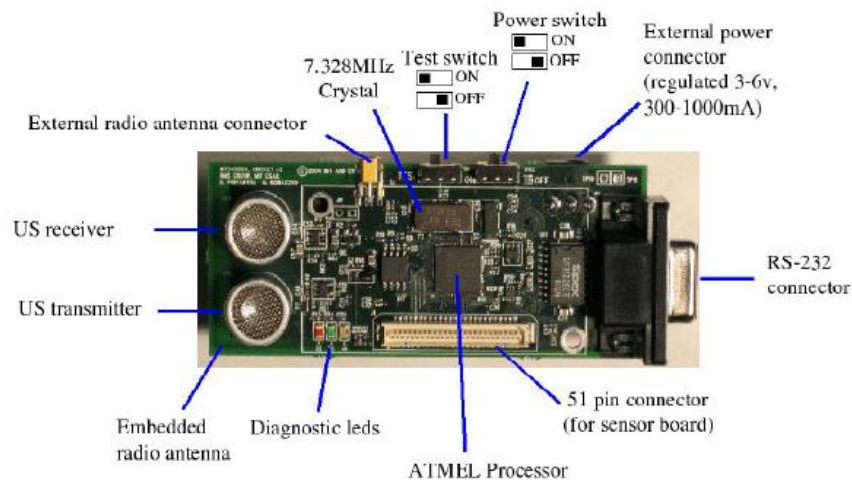


FIGURA 4-3 Mote Cricket v2. Se aprecia el transmisor – receptor de Ultrasonido (US).

4.1.2.3. Familia Telos [38]

El mote insignia de esta familia es el TELOS (TPR2400) diseñado por la UC Berkeley. Es un mote diseñado especialmente para investigación. Por tal motivo, cuenta con capacidad de programación a través de puerto USB, módulo radio IEEE 802.15.4 de baja potencia con antena integrada, memoria extendida y un módulo de sensores incorporados. Además cuenta con la facilidad de que si está conectado al puerto USB, no necesita de alimentación pues esta es proveída por la PC host.

Especificaciones	Observaciones
<u>Módulo</u>	
Desempeño del procesador	RISC de 16 bits
Memoria FLASH	48 KB
FLASH Serial para medidas	1024 KB
RAM	10 KB
Comunicación Serial	UART vía un puerto USB
ADC	12 bits, 8 canales
DAC	12 bits, 2 puertos
Otras interfases	I/O Digital, I2C, SPI
Corriente de fuga	1.8 mA, modo activo
	5.1 μ A, modo sleep
<u>Transmisor RF</u>	
Banda de Frecuencia	2400 a 2483.5 Mhz
Tasa de transmisión de datos	250 Kbps
Potencia	-24 a 0 dBm
Rango Outdoor	75 a 100m
Rango Indoor	20 a 30m
Sensores	Luz, humedad, temperatura.

Tabla 4-2 Características principales del mote TELOSB

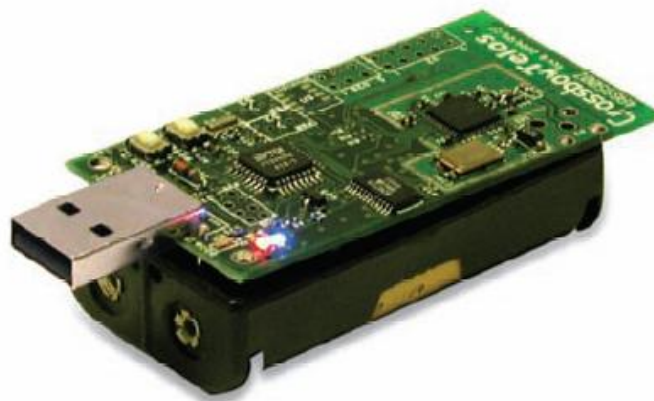


FIGURA 4-4 Mote TELOSB (TPR2400)

4.1.3. Tarjetas de Expansión

Las tarjetas de expansión son las que dan la capacidad de sensado muchas veces a los motes. Estas se incorporan a los MPR de los nodos.

4.1.3.1. Familia MTS [39]

La familia de tarjetas de adquisición de datos MTS o Multi-Sensor Boards están diseñadas para funcionar con los nodos MICA, MICA2, MICAz y MICA2DOT. Estas tarjetas cuentan con un número limitado de sensores que vienen incorporados en ellas y que por lo general son lo típicos para aplicaciones regulares tales como temperatura, humedad, luz, etc. Destacan la tarjeta MTS510 (FIGURA 4-5) que cuenta con tres sensores en un espacio muy reducido especial para acoplar a los MICA2DOT. Asimismo destaca también la tarjeta MTS420 (FIGURA 4-6) que cuenta con un módulo de geo-localización o GPS.

En la Tabla 4-3 se enumeran las características principales de las tarjetas disponibles de la familia MTS.

Modelo	Sensores y características
MTS300CA	Luz, temperatura, micrófono y buzzer
MTS310CA	Luz, temperatura, micrófono, buzzer, acelerómetro de dos ejes y magnetómetro de dos ejes
MTS400CA	Luz, humedad relativa, temperatura, acelerómetro de dos ejes y presión barométrica
MTS420CA	Igual al MTS400CA mas GPS
MTS510CA	Luz, micrófono y acelerómetro de dos ejes (conector para MICA2DOT)

Tabla 4-3 Características de los modelos de la familia de tarjetas de expansión MTS



FIGURA 4-5 Tarjeta de expansión MTS510CA

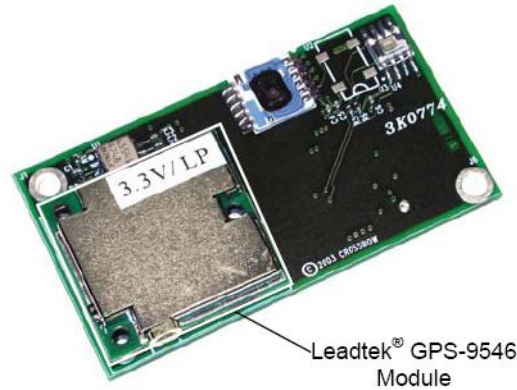


FIGURA 4-6 Tarjeta de expansión MTS420CA con GPS

4.1.3.2. Familia MDA [39]

Esta familia de tarjetas de expansión está pensada principalmente a dar más flexibilidad a las aplicaciones pues cuentan con puertos de entrada a donde se le puede acoplar el sensor que se desee siempre y cuando su señal de salida sea la aceptada por el rango de los puertos de entrada. Estas tarjetas cuentan con la facilidad extra de que muchas de ellas llevan también integrados los sensores típicos de temperatura, humedad y luz. Destacan entre ellas, la MDA100CA (FIGURA 4-7) que cuenta con un área para desarrollo de prototipos para acoplar o tratar señales de eventuales sensores que no puedan funcionar en el rango requerido por la tarjeta de adquisición. Asimismo destaca también la MDA300CA (FIGURA 4-8) que cuenta con 8 entradas analógicas, 8 entradas digitales y dos canales para relay para acoplar actuadores. La Tabla 4-4 resume las características principales de los modelos disponibles de la familia MDA.

Modelo	Sensores y características
MDA100CA	Luz, temperatura y área para prototipos
MDA300CA	Luz, humedad relativa e interfaz para sensores externos
MDA320CA	Interfaz para sensores externos
MDA500CA	Área para prototipos

Tabla 4-4 Características de los modelos de la familia de tarjetas de expansión MDA



FIGURA 4-7 Tarjeta de expansión MDA100CA con área para desarrollo de prototipos



FIGURA 4-8 Tarjeta de expansión MDA300CA con interfaz para sensores externos

4.2. TinyOS

Las abstracciones tradicionales de red, no son aplicables por lo general a redes de sensores sin hilos. Del mismo modo tampoco lo son los sistemas operativos tradicionales, un sistema operativo para redes de sensores sin hilos debe integrar estrechamente la conectividad inalámbrica y la administración eficiente de energía [22].

El TinyOS es un sistema operativo de código abierto desarrollado por la Universidad de California Berkeley para sistemas embebidos que utilizan el medio inalámbrico para sus comunicaciones. Presenta una arquitectura basada en componentes que permite una rápida innovación e implementación mientras minimiza el código para satisfacer las restricciones de memoria que son inherentes en las redes de sensores sin hilos [40]. Además tiene un énfasis en reaccionar a estímulos externos y ahorro de energía. Básicamente es un conjunto de componentes que son incluidos a medida que son necesarios por las aplicaciones.

En palabras del Gerente General de Crossbow, "TinyOS es Linux para dispositivos muy pequeños, es un sistema operativo de código abierto que ahora mismo está siendo usado por mas de 500 diferentes organizaciones. Incluye un organizador,

una base de datos, una pila de transmisión RF, software para ruteo en malla, administrador de energía y tecnología para encriptación de datos para no necesitar preocuparnos por la seguridad” [19].

Las características principales que son a la vez la razón de lo que se buscaba cuando fue creado son las siguientes [41]:

- Robustez, una vez instalada, una red de sensores debe funcionar sin ser atendida por meses o años
- Bajo consumo de recursos, los motes de una red de sensores sin hilos cuentan con una muy pequeña memoria RAM y muy limitada cantidad de energía.
- Diversidad en la implementación de servicios, las aplicaciones deben ser capaces de escoger la forma de sus implementaciones
- Evolución del Hardware, el hardware de los motes está en constante innovación por lo que el SO debe permitir la portabilidad de las aplicaciones a nuevos componentes.
- Adaptabilidad a requerimientos de las aplicaciones, las aplicaciones tienen una gran variedad de requerimientos en términos de tiempo de vida, comunicaciones, sensado, etc.

4.2.1. Estructura de TinyOS

El presente estudio se ha realizado con la versión tinyos-1.15 del sistema operativo. Como experiencia general relativa al sistema, se puede mencionar que se tuvo que migrar desde la versión 1.7 sucesivamente hasta llegar a la última versión para poder hacer funcionar correctamente todos los componentes necesarios, versión en la cual se tuvieron algunos problemas incluso. Esto nos muestra que es un sistema que a pesar de haber tenido grandes avances en los últimos tiempos sobretodo debido a que es un sistema open-source (le permite tener una gran cantidad de desarrolladores contribuyendo en todo el mundo), sigue teniendo algunas deficiencias que deberán ser salvadas en las próximas versiones para alcanzar la versatilidad que se espera que tenga para los desarrollos de aplicaciones en redes de sensores sin hilos.

El foot-print de todo el SO varía según la plataforma que se esté utilizando, pero en ningún caso sobrepasa los 500 Bytes, lo cual lo hace extremadamente pequeño para no ser una carga importante en la reducida cantidad de memoria que el mote puede llegar a tener.

TinyOS tiene una arquitectura basada en componentes, dicha arquitectura permite la creación de aplicaciones ensamblando componentes que pueden ser componentes pre-existentes de librerías o pueden ser componentes creados por el

programador, de este modo, el desarrollo de aplicaciones se hace más sencillo y modular en el cual aplicaciones muy complejas se van formando a partir de pequeños bloques funcionales de sencillo funcionamiento y precisos objetivos. La facilidad más destacable de TinyOS es que contiene las aplicaciones de más bajo nivel de los recursos hardware de modo que un desarrollador no tenga que conocer como implementar dichas operaciones dejándose al sistema operativo, el objetivo es que cuando se corra la aplicación, se puedan realizar las tareas programadas lo más pronto y efectivamente posible para que el sistema operativo pueda llevar al nodo a *sleep*.

4.2.2. Programación en nesC sobre TinyOS

NesC es un lenguaje de programación para sistemas embebidos en red que representa un nuevo espacio de diseño para desarrolladores de aplicaciones. La característica principal de nesC es que es un lenguaje con diseño de aplicaciones orientadas a componentes como se explicará a continuación [42].

En lo referente al modelo de programación, los programas están construidos en base a componentes, cada componente es especificado por interfaces que se encargan de enlazar los componentes en un solo programa. Los componentes son enlazados de manera estática por sus interfaces incrementando de esta manera el rendimiento.

Existen dos tipos de componentes, los módulos y las configuraciones. Los módulos son los encargados de implementar el comportamiento de la aplicación y las configuraciones enlazan los componentes. Se puede destacar como características de este tipo de programación que los componentes no toman en cuenta si el componente al que están enlazados es un módulo o una configuración y que estos componentes pueden estar compuestos por varios componentes.

Los componentes están enlazados de modo que conectan usuarios con proveedores formando una jerarquía de programa. Para enviar tareas hacia abajo en la jerarquía se deberá llamar a un comando y para hacerlo hacia arriba, se deberá señalar a un evento.

Para esclarecer lo anteriormente explicado usaremos como ejemplo una aplicación del tutorial de TinyOS que viene pre-instalado en el paquete. La aplicación se llama BLINK y simplemente hace parpadear uno de los leds del mote a una frecuencia de 1 Hz.

Este paquete de ejemplos se encuentra en la ruta:

```
tinyos\cygwin\opt\tinyos-1.x\apps
```

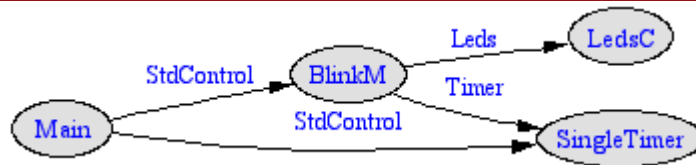


FIGURA 4-9 Aplicación Blink

En la FIGURA 4-9 podemos apreciar la jerarquía del programa que va desde lo más alto en *Main* hasta lo más bajo en *LedsC* y *SingleTimer*, sin embargo en este gráfico no se aprecian todos los componentes que manejan las tareas de más bajo nivel hasta el hardware debido a que ellas hasta cierto punto no son importantes para el programador y son manipuladas por el SO.

En la FIGURA 4-10 podemos apreciar el modelo general en la estructura de una configuración de dos componentes y como se enlazan en una jerarquía de dos niveles que es aplicable para el ejemplo de la FIGURA 4-9 [43].

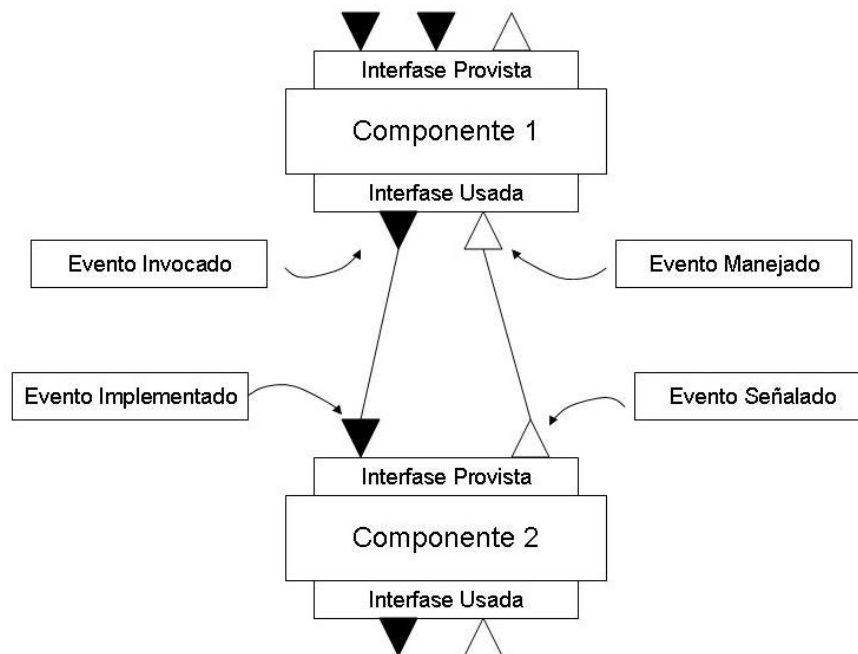


FIGURA 4-10 Representación general de una configuración en TinyOS/nesc

Se procederá a describir un poco el presente ejemplo basándonos en lo anteriormente explicado. Se puede apreciar que este ejemplo está compuesto por cuatro módulos: *Main*, *BlinkM*, *LedsC* y *SingleTimer*. Se debe destacar que el módulo *Main* es un módulo creado por defecto y que siempre se debe enlazar por encima de la aplicación que estamos creando, en este caso *Blink* pues es el encargado de inicializar la aplicación. Ellos están enlazados de esa manera y en esa jerarquía pues así lo estipula la configuración *Blink* que se puede apreciar a continuación:

```

configuration Blink {
}

implementation {
  components Main, BlinkM, SingleTimer, LedsC;

  |
  Main.StdControl -> SingleTimer.StdControl;
  Main.StdControl -> BlinkM.StdControl;
  BlinkM.Timer    -> SingleTimer.Timer;
  BlinkM.Leds     -> LedsC;
}

```

FIGURA 4-11 Configuración Blink

En ella los componentes son declarados primeramente y luego enlazados con sus respectivas interfaces. Se destacan claramente las interfaces que son las encargadas de enlazar los módulos: *StdControl*, *Leds* y *Timer*. Entonces la aplicación *Blink* está compuesta por una configuración que se encarga de especificar como enlazar los módulos, su respectivo módulo asociado *BlinkM*, que es en donde se estipulan las tareas que se lograrán enviando llamadas a los módulos de más bajo nivel y las interfaces que son las encargadas de enlazar los módulos y pasar las llamadas.

Este ejemplo funciona de una manera muy sencilla, se configura el *SingleTimer* que es un contador para que envíe una señal a *BlinkM* cada segundo, cada vez que esto sucede, *BlinkM* envía una llamada a *LedsC* que se encarga de encender y apagar los leds.

En la FIGURA 4-12 se muestra el código del módulo *BlinkM* el cual está escrito en el lenguaje de programación nesC (Network Embedded Systems C). En este ejemplo se puede apreciar claramente el concepto del lenguaje nesC que fue creado por la UCB como un lenguaje de programación basado en componentes y que es una extensión del lenguaje C nativo para sistemas profundamente embebidos funcionando sobre TinyOS. En el ejemplo se puede apreciar como el módulo empieza señalando las interfaces que proveerá y que usará, de este modo, cuando la configuración establezca los enlaces, se podrán detectar errores. A continuación viene la implementación en la cual primero el módulo *Main* inicializa los componentes a los cuales está enlazado a través de la interfaz *StdControl*, cuando *BlinkM* se inicializa, este a su vez hace una llamada en el cuerpo de dicha llamada para inicializar el componente *LedsC* de más bajo nivel. *StdControl* siempre ejecuta en la siguiente secuencia sus respectivas llamadas: *init* – *start* – *stop*. A continuación se pone en marcha el contador con la llamada *start*, el cual

está configurado para señalar un evento cada segundo de manera repetitiva. En seguida por una cuestión de orden y estructura se estipula los componentes que detendrán su ejecución en caso haya una llamada a stop que por lo general no se usa. Finalmente se observa como cada vez que el contador cuenta un segundo este señala un evento, en el cuerpo del evento se debe colocar todas las tareas a realizar cada vez que se realice esa llamada que en este caso se trata de encender el led rojo.

```

/**
 * Implementation for Blink application. Toggle the red LED when a
 * Timer fires.
 **/

module BlinkM {
  provides {
    interface StdControl;
  }
  uses {
    interface Timer;
    interface Leds;
  }
}
implementation {

  command result_t StdControl.init() {
    call Leds.init();
    return SUCCESS;
  }

  command result_t StdControl.start() {
    // Start a repeating timer that fires every 1000ms
    return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 1000);
  }

  command result_t StdControl.stop() {
    return call Timer.stop();
  }

  event result_t Timer.fired()
  {
    call Leds.redToggle();
    return SUCCESS;
  }
}

```

FIGURA 4-12 Módulo Blink

4.3. Herramientas Disponibles

Además de las aplicaciones de ejemplo disponibles con la instalación de TinyOS, también se incluyen algunas herramientas desarrolladas en JAVA que facilitan

algunas operaciones de investigación y desarrollo. Este paquete se puede encontrar en la ruta:

```
tinyos/cygwin/opt/tinyos-1.x/tools/java
```

4.3.1. TOSSIM

TOSSIM es un simulador discreto basado en eventos para redes de sensores sin hilos. En lugar de compilar una aplicación TinyOS para motes, se puede compilar en un framework para TOSSIM que corre en una PC. Esto permite a los desarrolladores no solo probar sus algoritmos sino también sus implementaciones. Entre sus principales ventajas se puede considerar su fidelidad pues se centra en simular el entorno TinyOS al más bajo nivel logrando simular el tráfico de la red a nivel de bit, simulando cada captura de medidas y cada interrupción del sistema. Sin embargo tiene también algunas desventajas considerables a tomar en cuenta como por ejemplo que es incapaz de simular la propagación de la transmisión radio así como el consumo de energía de cada mote, además asume demasiado para poder simplificar la simulación de elementos a bajo nivel por lo que es probable que algunos programas que funcionan en TOSSIM no funcionen en la vida real [44]. Otra desventaja considerable es que solo se puede configurar de modo que todos los nodos a simular tendrán cargado el mismo programa por lo que para redes con elementos que tengan funciones tan solo un poco heterogéneas y por consiguiente programas diferentes, se hace imposible simularlas a menos que se pase por el tedioso trabajo de desarrollar una extensión.

TOSSIM cuenta además con una herramienta GUI (Graphical User Interface) llamada TinyViz. Esta herramienta es capaz de visualizar e interactuar con las aplicaciones que están corriendo sin embargo, mantiene las limitaciones propias de TOSSIM al no poder introducir en la simulación fenómenos externos o de poder hacerlo, solo se puede hacer en transmisiones aisladas.

Últimamente se han desarrollado extensiones entre las que se destaca PowerTOSSIM que permite simular en consumo de energía para los nodos, sin embargo solo es compatible con nodos MICA2 que es para los que fue creado, para nodos MICAz y otros no brinda una adecuada simulación.

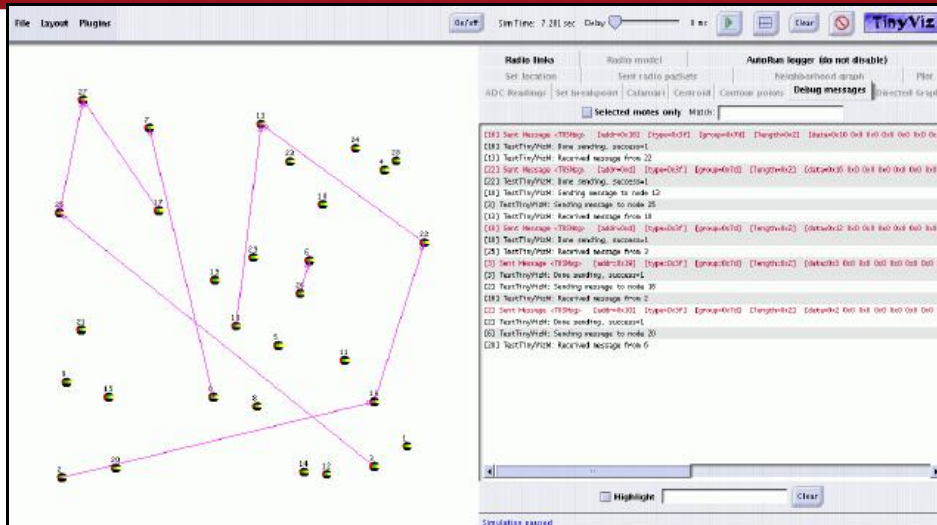


FIGURA 4-13 Entorno de simulación TinyViz

4.3.2. Serial Forwarder

Otra herramienta de mucha utilidad incluida en el paquete de JAVA es el *SerialForwarder*. Esta herramienta abre el puerto serial de la PC permitiendo de este modo comunicarnos con la red de sensores. Para lograr esto necesitamos un *gateway* conectado al puerto serial o USB de la PC.

Es una herramienta bastante utilizada por su flexibilidad ya que permite comunicaciones tanto en un sentido como en el otro de modo que se puede así como recibir datos de la red de sensores, se puede enviar instrucciones a la misma desde la PC. Para invocar a esta herramienta se utiliza el siguiente comando:

```
java net.tinyos.sf.SerialForwarder -com serial@COM1:19200
```

En el cual se especifica el número de puerto de comunicación serial que se utilizará y donde estará conectado el *gateway* (en este caso el COM1) y la velocidad en baudios de la transmisión de datos a través de dicho puerto que varía según el modelo de mote que se esté usando (en este caso, 19200 baudios corresponde a un nodo MICAz)

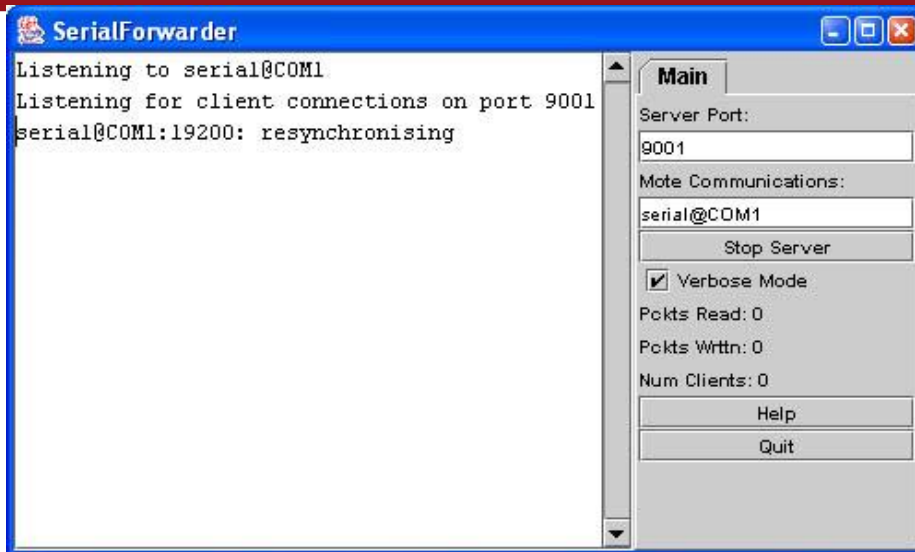


FIGURA 4-14 Ventana GUI correspondiente a SerialForwarder

4.3.3. TOSBase y Listen

La herramienta Listen permite observar tanto los datos que están circulando por la red como los datos que se están enviando al *gateway*. Para poder hacer uso de esta funcionalidad se deberá programar un mote, que estará conectado al *gateway*, con la aplicación TOSBase que se encuentra en el paquete de ejemplos de TinyOS. Esta aplicación abre el canal de recepción radio del mote y recibe todos los paquetes que estén circulando por el canal de radio dentro del rango de alcance del mote. Luego de recibir cada paquete, éste es enviado por la UART hasta la PC donde el *SerialForwarder* se encarga de recibirlo con el respectivo puerto serial abierto y escuchando.

La herramienta Listen, que se encuentra en el paquete de aplicaciones JAVA, muestra en crudo en la pantalla las tramas de datos recibidas por el *SerialForwarder*. El formato usual en que se muestran dichas tramas es en valores hexadecimales little endian.

Si tenemos un nodo programado con la aplicación TOSBase en medio de dos nodos que se están comunicando por el canal de radio. Mediante la herramienta Listen podemos ser capaces de observar en pantalla las tramas de datos que se están enviando. Esta funcionalidad es de muchísimo valor para el desarrollo de aplicaciones pues muestra en tiempo real los verdaderos valores que están circulando y como reacciona la red ante ellos.

Ahora que hemos definido las características principales de las redes de sensores sin hilos así como su funcionamiento, pasaremos a delinear algunas particularidades de nuestra red para el tipo de aplicación que deseamos implementar.

4.4. Topología a usar

Los campos agrícolas se caracterizan principalmente por la gran extensión que tienen. Esta característica hace que sea muy difícil llevar cuenta de lo que sucede en cada lugar en cada momento, mientras por un lado del sembrío puede haber escasez de agua, por el lado opuesto puede haber un exceso de la misma por diversos motivos. Esta característica es la que impulsa al presente proyecto a usar la topología malla pues interesará poder cubrir la mayor cantidad de terreno posible aún a expensas de tener una alta latencia, esto debido a que la velocidad de cambio en las variables que afectan a un sembrío es siempre más baja que cualquier retardo que pudiera tener un mensaje en su tránsito por la red. Las dificultades en ahorro de energía que presenta esta topología si son fundamentales para el presente proyecto, sin embargo, estas serán suplidas por el protocolo que se implementará (ver apartado 4.8), dándole a esta aplicación en particular la capacidad de tener una topología malla con el consumo de energía aproximado al que tendría una topología estrella.

4.5. Elementos a usar [45]

Para el presente proyecto se tuvo disponibilidad de una gama de elementos fabricados por la empresa Crossbow. A continuación procederemos a describir aquellos que se decidió usar.

4.5.1. Gateway MIB520

En realidad, el proyecto comenzó su desarrollo utilizando el *gateway* MIB510 que cuenta con conexión vía puerto serial a la PC y puede programar motes MICA2, MICAz y MICA2DOT. Sin embargo a pocos días antes de empezar a escribir el presente documento pudimos contar con dos *gateways* MIB520 que a diferencia de su predecesor tiene conexión vía puerto USB y solo puede programar motes MICA2 y MICAz. En lo referente al uso del puerto USB, se valoró que esta placa cuenta con dos puertos de comunicación en un solo conector USB, de modo que puede funcionar como programador y como *gateway* a la vez contando además con drivers que permiten manejarlos como los tradicionales puertos seriales. De este modo, cuando está funcionando como *gateway* y se quiere programar un nuevo mote, no es necesario cerrar el puerto para hacerlo, tan solo se coloca el mote a programar en la placa y se programa por un puerto diferente. En la FIGURA 4-16 se muestra el esquemático de cómo está implementado el hardware para el funcionamiento de dos puertos a través de un solo conector. En lo referente a las plataformas que es capaz de programar, no se consideró un problema que no pudiera programar motes MICA2DOT pues no se usan en el presente proyecto.

Además de la evidente facilidad que el tema de los puertos proporciona para el desarrollo de aplicaciones, el MIB520 extrae su energía del propio puerto USB de la PC a la que se conecta de modo que resta posibilidad de fallos al momento de programar motes. Con dicha facilidad no cuenta el MIB510 que necesita una alimentación externa.

El MIB520 cuenta con un procesador Atmega16L que hace las veces de “in-system processor” (ISP), lo cual quiere decir, que el código es bajado al procesador por el puerto USB y es luego el procesador el encargado de programar el mote.

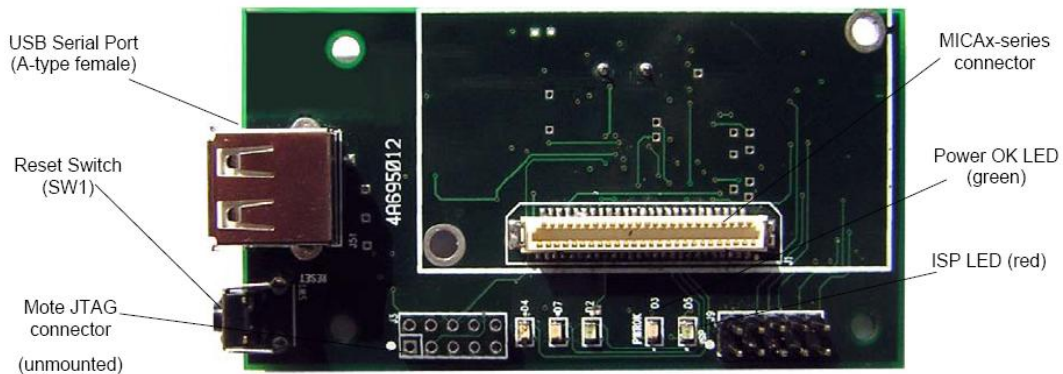


FIGURA 4-15 Gateway MIB520 y sus partes señaladas.

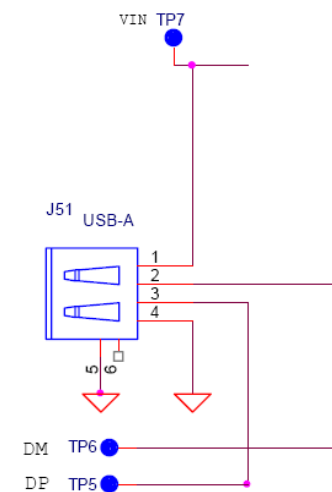


FIGURA 4-16 Diagrama esquemático de la conexión del puerto USB del MIB520

4.5.2. MICAz

Los motes MICAz también de la empresa Crossbow tienen la particularidad de usar el RF Transceiver Chipcon CC2420 que cumple con la normativa de la IEEE 802.15.4 así como las recomendaciones de la Zigbee Alliance. En la Tabla 4-5 se puede apreciar un cuadro comparativo de las diferencias de hardware entre los diferentes modelos MICA. En general, la razón por la que se eligió este modelo por encima del MICA2 es que utiliza una interfaz de radio estándar que cumple con dicha normativa, por lo tanto, coloca la transmisión de radio en la banda ISM de 2.4

Ghz válida para Europa y lejos de la banda de 900 Mhz que es usada por la red de telefonía celular. Adicionalmente comentar que el uso del MICAz supone contar con 16 canales de transmisión para evitar interferencias y velocidades de hasta 250 Kbps según la norma, mientras que los MICA2 cuentan con tan solo 10 canales en la banda de 900 Mhz y que su velocidad de transmisión máxima es de 38.4 Kbps.

Mote Hardware Platform		MICAz	MICA2	MICA2DOT	MICA
Models (as of April 2005)		MPR2400	MPR400/410/420	MPR500/510/520	MPR300/310
MCU	Chip	ATMega128L			ATMega103L
	Type	7.37 MHz, 8 bit		4 MHz, 8 bit	4 MHz, 8 bit
	Program Memory (kB)	128			
	SRAM (kB)	4			
Sensor Board Interface	Type	51 pin		18 pin	51 pin
	10-Bit ADC	7, 0 V to 3 V input		6, 0 V to 3 V input	7, 0 V to 3 V input
	UART	2		1	2
	Other interfaces	DIO, I2C		DIO	DIO, I2C
RF Transceiver (Radio)	Chip	CC2420	CC1000		TR1000
	Radio Frequency (MHz)	2400	315/433/915		433/915
	Max. Data Rate (kbits/sec)	250	38.4		40
	Antenna Connector	MMCX		PCB solder hole	
Flash Data Logger Memory	Chip	AT45DB014B			
	Connection Type	SPI			
	Size (kB)	512			
Default power source	Type	AA, 2x		Coin (CR2354)	AA, 2x
	Typical capacity (mA-hr)	2000		560	2000
	3.3 V booster	N/A			✓

Tabla 4-5 Comparativa de las características hardware de los motes MICA [35]

Se puede destacar que su microcontrolador es el Atmega128L operando a una frecuencia de 7.37 Mhz y que cuenta con una memoria FLASH serial de 4 M-bit (Atmel AT45DB041) para almacenar medidas de sensores e información. El sistema operativo TinyOS accede a esta memoria como un sistema de micro-file y necesita utilizar esta memoria para reprogramaciones “over the air” que son aquellas que se realizan con instrucciones desde el gateway sin necesidad de retirar el mote de la red y colocarlo en un programador. Cuenta además con un bus de expansión de 51 pines que se puede apreciar en la FIGURA 4-17, tres leds y antena. El detalle del diagrama de bloques de un MICAz se aprecia en la FIGURA 4-18, a continuación, procederemos a desarrollar las principales características de los bloques funcionales.



FIGURA 4-17 Hembra y Macho del bus de conexión de 51 pines presente en MICA2 y MICAz

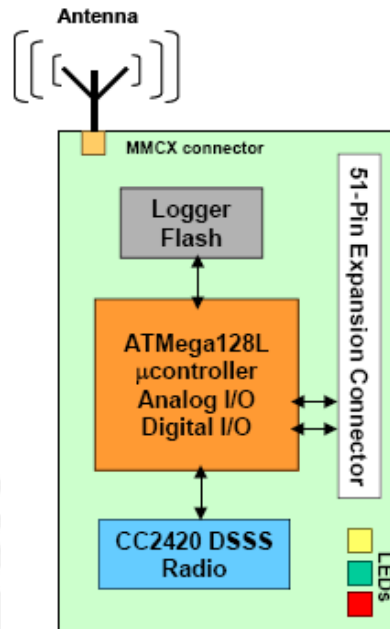


FIGURA 4-18 Diagrama de bloques de un mote MICAz [35]

4.5.2.1. Módulo radio

Para este modelo de motes, la empresa Crossbow cambió los tradicionales CC1000 de los MICA2 y MICA2DOT por el chip CC2420 para poder cumplir con los requerimientos del estándar 802.15.4. Los canales están numerados del 11 (2.405 Ghz) al 26 (2.480 Ghz), separados 5 Mhz el uno del otro y pueden ser cambiados durante la ejecución del programa con la siguiente llamada a la librería TOS CC2420Radio:

```
CC2420Control.TunePreset(uint8_t chnl)
```

Donde *chnl* es el número de canal que se desea seleccionar. La potencia de transmisión es programable desde 0 dBm (1 mW) hasta -25 dBm también durante la ejecución mediante la siguiente llamada:

```
CC2420Control.SetRFPower(uint8_t power)
```

Donde *power* es el valor de la potencia que se desea seleccionar según la Tabla 4-6:

Registro de potencia (Código)	Potencia de Tx RF (dBm)
31	0
27	-1
23	-3
19	-5
15	-7
11	-10
7	-15
3	-25

Tabla 4-6 Código para la selección de la potencia de transmisión en MICAz

Un dato importante es que para este chip, el consumo de corriente a máxima potencia es de 17.5 mA y a mínima potencia cae hasta 8.5 mA, una diferencia sustancial para un aspecto tan importante como el del consumo de energía por lo que nos interesará no solo mantener la potencia lo más bajo posible para evitar interferencias sino también para ahorrar en el consumo.

Este chip proporciona también la funcionalidad de poder leer directamente el valor del RSSI (Received Signal Strength Indication). Para esta funcionalidad, TinyOS usualmente coloca automáticamente el valor en el campo *strength* de la trama TOSMsg. Los valores típicos de RSSI para cada valor de la potencia de transmisión se muestran en la FIGURA 4-19:

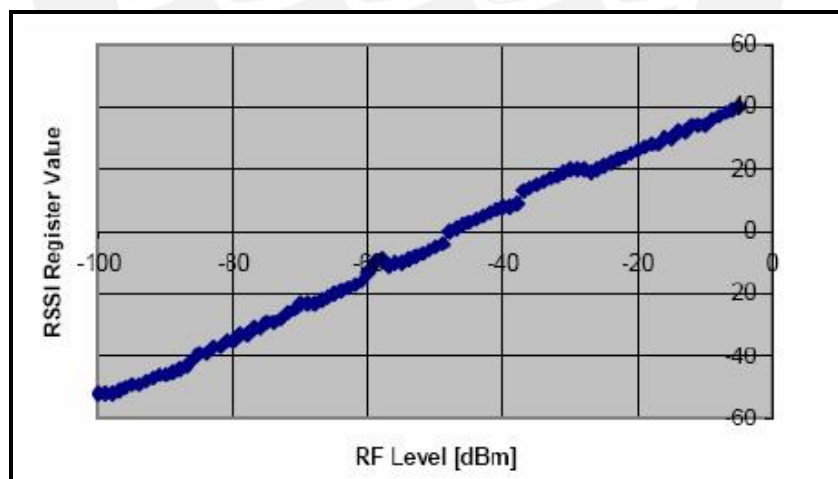


FIGURA 4-19 RSSI vs. Potencia de Tx para los valores típicos en un MICAz [35]

Este modelo proporciona una tasa de transmisión de hasta 250 Kbps tal y como lo estipula el estándar IEEE 802.15.4 sin embargo la tasa real es bastante inferior considerando los efectos del protocolo usado. Un aspecto importante que afecta la calidad de la transmisión del módulo radio es la antena. Debido a que el tamaño del mote es importante en su diseño, usualmente se elige antenas de un solo cable aislado de longitud $\frac{1}{4}$ de longitud de onda de la frecuencia de trabajo. En el caso

de la antena para un MICAz, la longitud es de 1.2 pulgadas o lo que es lo mismo, 3.048 centímetros.

4.5.2.2. Alimentación

Los motes MICAz están diseñados para ser alimentados por baterías AA, sin embargo cualquier tipo de alimentación puede ser utilizada siempre y cuando brinde un voltaje entre 2.7 y 3.6 V.

Especial cuidado se debe tener al seleccionar las baterías a colocar para que el sistema pueda cumplir con la autonomía esperada y los requerimientos de consumo. Para una referencia se adjunta la Tabla 4-7 que resume los consumos promedios de cada bloque funcional del MICAz.

Bloque funcional y estado	Corriente de operación en mA
ATMega128L, full operation	12
ATMega128L, sleep	0.010
Radio, Rx	19.7
Radio, Tx (0 dBm de potencia)	17.4
Radio, sleep	0.001
Memoria serial FLASH, escritura	15
Memoria serial FLASH, lectura	4
Memoria serial FLASH, sleep	0.002

Tabla 4-7 Consumos promedios de los bloques funcionales de un MICAz

Cabe destacar que el modelo MICAz no cuenta con regulador de voltaje como si lo contaba sus predecesores de modo que en situaciones de agotamiento de batería en donde el voltaje de la misma baja, no se detiene por completo el funcionamiento del nodo y se mantienen funcionando los componentes que no requieran un voltaje superior. De este modo, los componentes van dejando de funcionar en el siguiente orden: Transmisión de datos, acceso a la memoria FLASH externa y la recepción de datos.

4.5.3. Tarjeta de expansión MTS300

La tarjeta de expansión MTS300 es una tarjeta que contiene incorporados una variedad de sensores pero que no cuenta con puertos para el acondicionamiento de sensores externos. Entre las aplicaciones en las que se puede utilizar se encuentran: detección de vehículos, sensado de actividad sísmica, movimiento, acústica, robótica, domótica entre otros. La razón por las que se utiliza esta tarjeta en el desarrollo del presente proyecto se explicará con mayor detalle en la sección 1 pero se puede resumir de la siguiente manera. Para una aplicación en agricultura

de precisión es necesario contar con un punto dentro del sembrío que mida variables que siempre serán comunes a todo el lugar como por ejemplo la temperatura ambiental o la incidencia de luz. Estas variables nunca serán diferentes independientemente del lugar del sembrío que se quiera monitorear, por lo tanto, se pensó en acoplar esta tarjeta a un nodo para el sensado de las mismas. Para dar más facilidad y fidelidad a la información proveída por la misma, se pensó que lo mas adecuado sea que se coloque en el nodo más cercano al *gateway* para que cumpla las funciones de nodo “*sink*” o sumidero.

La presente tarjeta de expansión (FIGURA 4-20) cuenta dentro de sus características hardware con un micrófono, un *buzzer* y un sensor de luz y temperatura de los cuales tan solo usaremos los sensores de luz y temperatura.



FIGURA 4-20 Tarjeta de expansión MTS300CA

El sensor de luz es una simple foto-resistencia de CdSe cuya máxima sensibilidad es a 690 nm de longitud de onda de la luz. La resistencia típica cuando es expuesta a la luz es de 2 K Ω y cuando está en oscuridad total es de 520 K Ω . Este sensor se encuentra conectado al canal 1 del ADC de la tarjeta.

El sensor de temperatura (Panasonic ERT-J1VR103J) es un simple componente de montaje soldado a la placa. Esta configurado como un simple circuito divisor de voltaje cuya escala-media nominal es de 25 °C. La salida de dicho sensor se puede encontrar también en el canal 1 del ADC (ver diagrama esquemático en la FIGURA 4-21), lo cual ha suscitado problemas al desarrollar aplicaciones que comparten el uso de dicho sensor con el de luz. En el desarrollo del presente proyecto se tuvo el mismo problema para lo cual se tuvo que emplear un parche de los componentes que manejan los elementos de bajo nivel en TinyOS. El rango de operación del sensor de temperatura es de -40 a 70 °C y los valores tanto de la resistencia variable del divisor como de la lectura que recibe el ADC se pueden apreciar en la Tabla 4-8 .

Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)	Lectura ADC (% de Vcc)
-40	427 910	2.3
-20	114 200	8.1
0	35 670	22
25	10 000	50
40	4 090	71
60	2 224	82
70	1 520	87

Tabla 4-8 Voltaje, resistencia y temperatura para el Panasonic ERT-J1VR103J

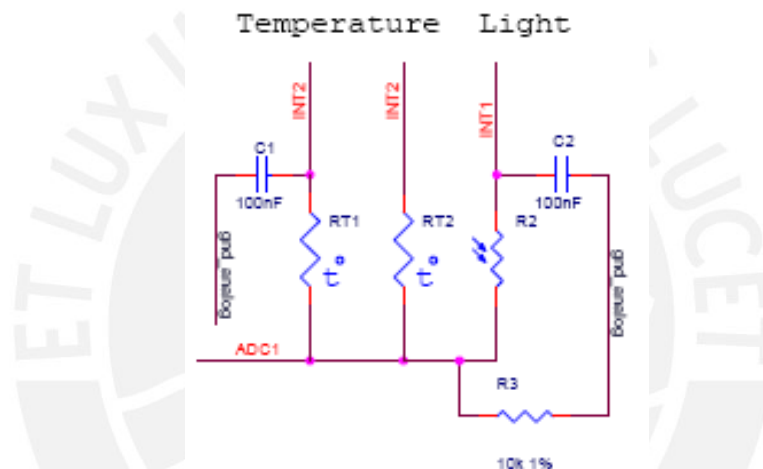


FIGURA 4-21 Diagrama esquemático de la conexión del sensor de luz y temperatura al canal 1 del ADC

La fórmula para la conversión de las lecturas del ADC a unidades de grados Kelvin se encuentra en el manual de usuario de la placa [39] y es la siguiente:

$$\frac{1}{T(K)} = 0.00130705 + 0.000214381 * Ln\left(\frac{10000 * (1023 - ADC)}{ADC}\right) + 0.000000093 * \left[Ln\left(\frac{10000 * (1023 - ADC)}{ADC}\right)\right]^3$$

Donde ADC es el valor entregado por el ADC.

4.5.4. Tarjeta de expansión MDA300

La tarjeta de expansión MDA300 fue diseñada pensando especialmente en dar versatilidad a las redes de sensores sin hilos mediante la adquisición de datos de sensores analógicos y digitales externos a los motes así como el posible manejo de actuadores a través de ella. Gracias a su interfaz de conexión directa, esta tarjeta fue diseñada pensando especialmente en aplicaciones ligadas a campos como el monitoreo ambiental y la agricultura de precisión. Entre sus características podemos señalar:

- 8 entradas analógicas
- 8 entradas/salidas digitales
- 2 canales de relay
- Tensiones de excitación de 2.5, 3 y 5 V

Los sensores analógicos pueden ser acoplados a diferentes canales según la precisión deseada y el rango dinámico del mismo. Así mismo, sensores digitales pueden ser acoplados a los canales digitales que en conjunto con los canales relay, pueden hacer de este nodo una máquina de control y toma de decisiones automática sin necesidad de esperar instrucciones del nodo central o *gateway*. En la FIGURA 4-8 se puede apreciar la facilidad para la conexión de elementos a través de la bornera con que cuenta.

En la Tabla 4-9 se presentan los rangos eléctricos máximos para el apropiado funcionamiento de los canales de la MDA300. Para señalar algunas características especiales de esta tarjeta, podemos señalar para los canales analógicos simples (que son los que nos interesan) que el rango de operación es de 0 a 2.5V y que el ADC es de 12 bits cuya fórmula de conversión del valor en bits a voltaje por consiguiente es:

$$V = 2.5x \frac{ADC}{4096}$$

Donde *ADC* es el valor entregado por el ADC. Sin embargo, de necesitar trabajar fuera de este rango, se ha implementado a nivel hardware divisores de voltaje que pueden escalar las lecturas de modo que entren en este rango. Para lograr esto, solo se deben soldar las resistencias necesarias y que correspondan al canal a usar según lo que se muestra en la FIGURA 4-22 .

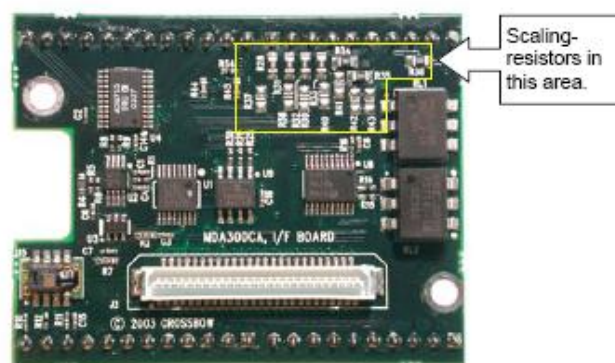


FIGURA 4-22 Parte trasera de la MDA300 señalando la región de las resistencias de escalamiento

+VDD to GND*-0.3V to +5.5V
Digital Lines:	
Input voltage range**-0.5 V to $V_{DD} + 0.5$ V
Continuous output low current50 mA
Continuous output high current-4 mA
Analog Lines:	
Input voltage range-0.2 V to $V_{CC} + 0.5$ V
Counter Line:	
Input voltage range0 V to 5.5V
Relays:	
Maximum Contact Voltage100V
Maximum Contact Current150mA

*Users are strongly encouraged to stay within the MICAz or MICA2 nominal input voltage of 2.7 to 3.3 VDC
 **The input negative-voltage ratings may be exceeded if the input and output current ratings are observed.

Tabla 4-9 Rangos máximos permitidos en la MDA300CA [39]

Como dato de interés para trabajos futuros se puede señalar que los canales relay pueden ser utilizados para integrar actuadores a estas placas y dar más auto-dependencia a los nodos. Esta placa cuenta con dos canales relay, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado.

4.5.5. Sensores acoplados

Para el desarrollo del presente proyecto, la empresa LAB FERRER proporcionó una sonda para medir la humedad el suelo ECH₂O EC-5 fabricada por la empresa DECAGON DEVICES Inc. (FIGURA 4-23).

Esta sonda cuenta con los últimos avances en el empleo de materiales resistentes para poder monitorear a largo plazo y con precisión el contenido de humedad.



FIGURA 4-23 Sonda para medición de humedad del suelo ECH₂O EC-5 de Decagon Devices Inc.

Principio de Funcionamiento

La sonda es un sensor de tipo capacitivo que mide la constante dieléctrica del suelo para poder así hallar el contenido volumétrico de agua (VWC - Volumetric Water Content) que se mide en metros cúbicos de agua por metros cúbicos de suelo m^3/m^3 (%). Se les denomina sensores tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) ya que determinan la permisividad del medio midiendo el tiempo de carga de un condensador que emplea el suelo como dieléctrico. Cuando se aplica

un voltaje, se puede medir una frecuencia que variará con el dieléctrico que se encuentre entre ambas placas del condensador [46]. Para medir esta frecuencia, la sonda cuenta con un oscilador de 70 Mhz, frecuencia superior a los osciladores presentes en sus predecesoras las EC-10 y EC-20 (5 Mhz) con el propósito de minimizar los efectos de la salinidad y textura del suelo. A dicho oscilador se le deberá enviar un pulso de voltaje de entre 2.5 y 5V durante por lo menos 10 ms para excitarlo y de ese modo empezar la medición.

El agua tiene una permisividad de 80 dS/m aproximadamente mientras que la de los suelos minerales suele ser de 4 y la del aire 1. Por lo tanto, una mayor concentración de agua da lugar a cambios en la permisividad del suelo. Lo que esta sonda hace es obtener un promedio del valor de VWC a lo largo de toda la longitud de la sonda con aproximadamente 2 cm de zona de influencia por encima y debajo de la zona plana de la sonda [47].

Algunas características técnicas de la sonda que se consideran de importancia se muestran en la Tabla 4-10:

Característica	Valor
Error	$\pm 0.003 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en suelos con hasta 8dS/m
Resolución	$0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en suelos minerales
Requerimientos de Alimentación	2.5 – 5V @ 10mA
Valores de salida	Entre el 10 y 40% de Vcc
Temperatura de funcionamiento	-40 a 60 °C
Rango de medida	0 a 100% VWC
Dimensiones	8.9 x 1.8 x 0.7 cm

Tabla 4-10 Especificaciones técnicas de la sonda EC-5

Estudios recientes [48] acerca de la precisión de esta sonda ante diferentes concentraciones tanto de agua como de salinidad y textura del suelo, muestran que se ha alcanzado una exactitud bastante buena permitiendo que la calibración de la sonda sea mínima pues siempre se comporta de manera lineal y dentro de un rango de error bastante aceptable incluso para suelos con altas concentraciones de arena, componente que suele introducir el mayor error en las mediciones. Este resultado se puede apreciar en la FIGURA 4-24.

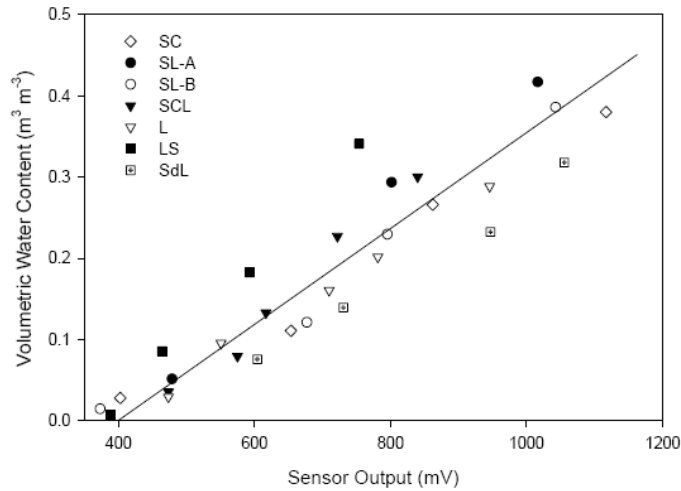


FIGURA 4-24 Comparación de VWC para distintos tipos de suelo con la misma sonda.

En lo referente al acoplamiento de la sonda a la MDA300, dicha sonda cuenta con un conector estándar estéreo para los tres cables que necesita conectar (FIGURA 4-25). El primero de ellos es GND, el segundo de ellos es por donde se enviará el pulso de voltaje o excitación para activar la medición y el tercero de ellos por donde regresará el voltaje medido como relación del VWC.

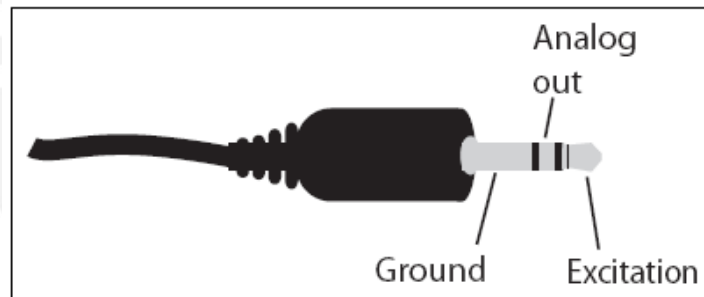


FIGURA 4-25 Cableado de la sonda EC-5

Una vez obtenido el valor de voltaje medido, se deberá aplicar una fórmula de conversión a dicho valor para convertirlo a VWC, dicha fórmula es la siguiente pues en nuestro proyecto se utilizó excitación de 2.5 V [49]. θ se mide en m^3/m^3 .

$$q = 0.00119 \times ADC - 0.4$$

Siendo ADC el valor enviado por el ADC.

4.6. Interfaz Usuario

La interfaz usuario desarrollada para el presente proyecto fue hecha en base a una interfaz previamente realizada en el “Grup de Xarxes Sense Fils” de la Universitat Polotècnica de Catalunya para una aplicación de domótica y está hecha en lenguaje de programación JAVA. El concepto principal detrás de la interfaz es que sea amigable para el usuario, considerando que las personas que la operarán no tendrán mayores conocimientos de redes o telemática y no les es de interés el

funcionamiento de la red. Sin embargo, debido a que es un software pensado para desarrollo se ha considerado incluir un panel en el que se muestren las tramas recibidas por parte del *gateway*, de modo que pueda ser fácilmente analizadas por personas a cargo tanto del mantenimiento de la red como de su posterior desarrollo. Todas estas facilidades estaban contempladas previamente en el software en su versión anterior que fue desarrollada en catalán y que se ha querido mantener en ese idioma por ser el más familiar para agricultores y productores de la zona en donde se espera en un futuro probar el sistema.

La interfaz está dividida en tres partes tal y como se muestra en la FIGURA 4-26, el panel principal, en donde se espera poder colocar una foto aérea del sembrío a monitorear. Un Panel lateral en donde se mostrará la información global o lo que es lo mismo, aquellas variables que afectan a todo el sembrío tales y como son la temperatura de ambiente y la incidencia luminosa. Además en dicho panel, se puede apreciar la cantidad de motes que componen la red y de los que se espera que venga información.

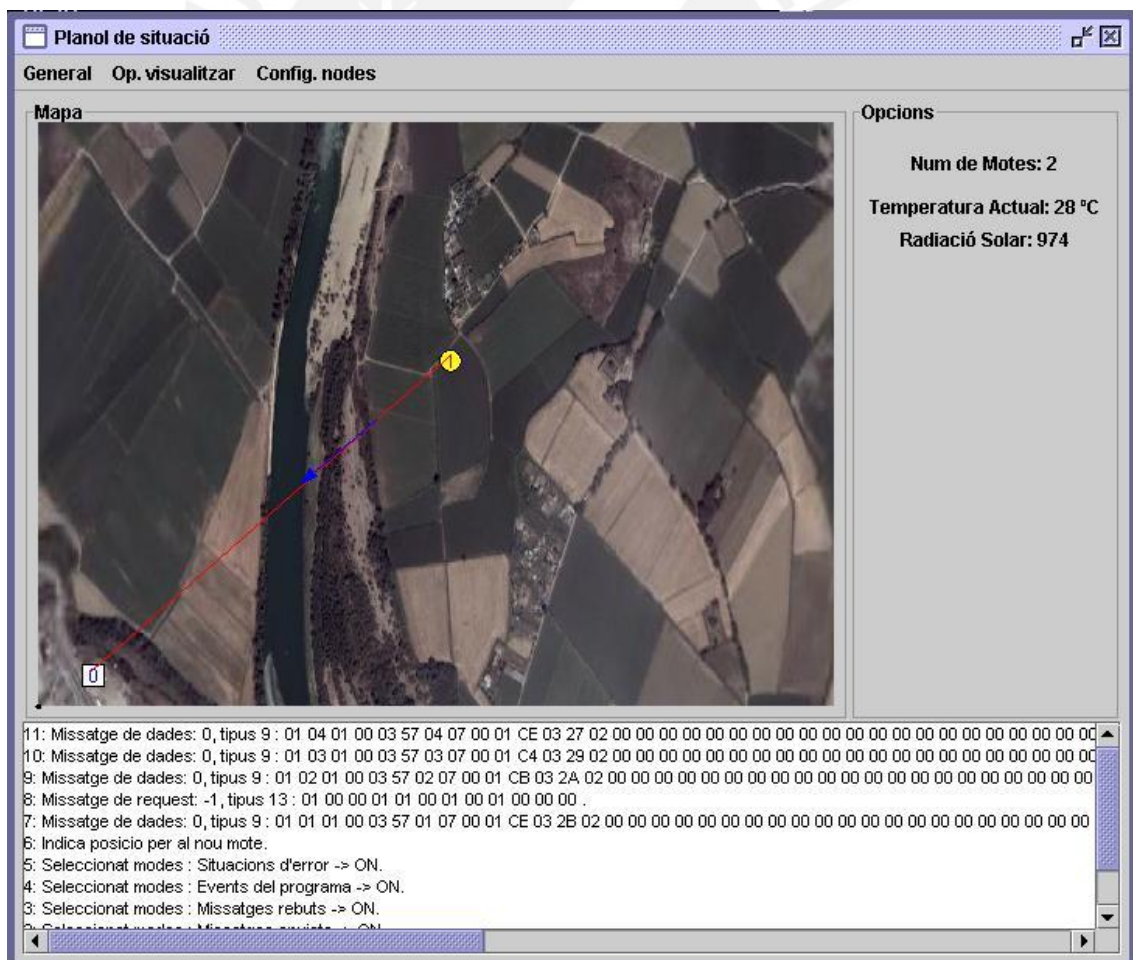


FIGURA 4-26 Interfaz usuario

Finalmente en el panel inferior se muestra información no importante para el usuario final pero si para el programador o encargado de dar mantenimiento a la red. En el se indica el tipo de mensaje que ha arribado al *gateway*, que puede ser de descubrimiento de ruta, de datos o de error, tal y como se verá posteriormente en el apartado 4.8.2.1. En el ejemplo de la FIGURA 4-26 se puede apreciar como el mensaje número 8 es una trama de *request* o de solicitud de nueva ruta, mientras que el mensaje número 9 en adelante son mensajes de datos y contienen la data proveniente de la red que se irá mostrando en pantalla.

El funcionamiento es sumamente sencillo, al iniciar el programa, aparece por defecto en la parte inferior izquierda el nodo cero o *gateway* que es en donde teóricamente se ubica el usuario, lo que se debe hacer a continuación es ir agregando los nodos para lo cual el usuario deberá elegir en el menú principal de “Config. Nodos” la opción “Afeqir Node” tras lo cual se desplegará la ventana de la FIGURA 4-27 en la cual se podrá elegir el tipo de nodo a agregar. Se deberá tomar en consideración que la red cuenta con un solo nodo *sink* que es el que está encargado del sensado de la temperatura y la intensidad luminosa. Dicho nodo es el que se deberá colocar más próximamente al *gateway* y que se coloreará de color celeste. Luego los nodos externos serán coloreados de color amarillo y serán los encargados de monitorear las variables que se requiera que para el caso de esta aplicación es la humedad del suelo. Finalmente se ha considerado también en la lista de opciones el “MicaZ + Controlador”, pensando en futuras mejoras de la red que permita enviar mensajes desde el *gateway* hasta un determinado nodo para ordenar el comienzo de una descarga de riego, fertilizante o insecticida según lo que decida el usuario o en un mejor caso, si la red desarrolla mayores capacidades, según lo que el mismo nodo decida que sea lo mejor.

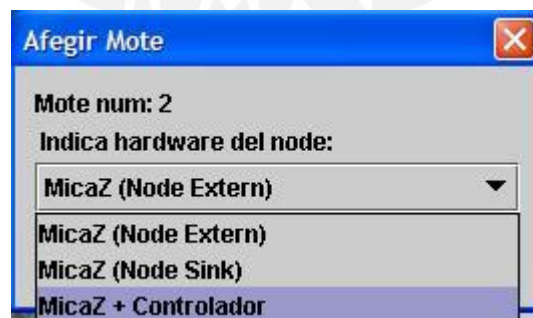


FIGURA 4-27 Opciones de tipos de nodos que se pueden agregar a la red

El programa cuenta además con la posibilidad de eliminar nodos introducidos incorrectamente o nodos que se decida retirar de la red. En el menú de “General” se cuenta con la opción de “Reset” con la que se puede eliminar todos los nodos introducidos y empezar el programa como si se hubiera vuelto a abrir, esto

pensado en reorganizaciones generales de la red. Finalmente destacar que el programa guarda todos los datos recibidos en un archivo de formato .txt de modo que puedan ser revisados y utilizados para ser analizados con programas de estadística más potentes, tales como Excel, para realizar estudios y proyecciones. De este modo, se espera que en una eventual instalación de la red en campo real, el productor sea capaz de, según los sensores que se pueda permitir colocar, tener en tiempo real información de lo que está pasando en su cultivo y ser capaz de tomar decisiones de prevención.

4.7. Características de la red

Las redes de sensores sin hilos brindan una herramienta muy útil para la obtención de información acerca del estado de diversas variables que puedan afectar directamente la producción (humedad, pH de la tierra, etc.) como también indirectamente (clima). Las redes de sensores sin hilos también presentan una versatilidad única como herramienta para la obtención de información distribuida permitiendo tener la información en todo momento incluso de elementos móviles esto debido a que a diferencia de otras redes tradicionales donde cada elemento compite por acceder o usar el medio, en las redes de sensores sin hilos, los elementos trabajan de manera cooperativa para lograr un objetivo. En redes tradicionales, los elementos son configurados y luego instalados en la red por técnicos calificados de los cuales siempre se requerirá su servicio para labores de mantenimiento, por lo cual, siempre se destina un presupuesto para esta labor. En redes de sensores sin hilos sin embargo, los nodos de la red se espera que funcionen desatendidos por largos periodos o incluso por todo su tiempo de vida, por lo tanto, la red que diseñemos para esta aplicación, si bien no se espera que cuente con elementos desatendidos para siempre, se espera que no lo necesiten por largos periodos.

Para determinar las características de la red que deseamos implementar, primero debemos tomar en cuenta las clases de redes que existen, ver resumen en Tabla 4-11.

De acuerdo con la distancia de los nodos al *gateway*, las redes pueden ser multi-hop o single-hop. Característica ligada con el tipo de topología de la red que se desea implementar (ver apartado 2.2.1.7). En las redes multi-hop (de propagación), la mayoría de los nodos solo pueden entregar su información a través de un nodo intermedio, mientras que en las redes single-hop (no-propagación) la información es entregada por el nodo directamente al *gateway*.

En lo referente a la densidad de nodos en una región y dependencia de la data, las redes pueden ser de agregación y no-agregación. En redes de no-agregación, la

data que un nodo recibe, es enviada “tal cual” al siguiente nodo, lo cual da una baja latencia, sin embargo consume mas energía pues es más propensa a pérdidas de paquetes y por consiguiente a necesitar retransmisiones para redes con más densidad de nodos. En redes de agregación, la data recibida por el contrario puede ser almacenada por un periodo de tiempo para agregarla a otra data que llegue y enviar todo en un solo paquete, incluso un paquete podría ser descartado según la lectura de data que llegara a un nodo. Por supuesto que este tipo de red requiere que los nodos sean más inteligentes y puedan tomar decisiones pero eleva la latencia de la red, es más adecuada para redes con poca densidad de nodos.

Por otro lado, las redes de sensores sin hilos pueden ser determinísticas o dinámicas de acuerdo a la distribución de los nodos. En redes determinísticas, los nodos no se espera que se muevan de su lugar físico en el que se le instalará y además se puede conocer dicha ubicación a priori para hacer el diseño de la red en base a eso. Por el contrario en redes dinámicas, no se conoce *a priori* la ubicación de los nodos, los cuales muchas veces serán colocados de forma aleatoria en el campo o incluso contarán con elementos móviles.

Una última categoría hace que las redes de sensores puedan ser auto-configurables y no-auto-configurables. De este modo, las redes no-auto-configurables, son aquellas en las que cada nodo siempre espera instrucciones de un nodo central para realizar cualquier acción. Este tipo de redes solo pueden ser implementadas cuando se contará con un muy reducido número de nodos. En contraparte, las redes auto-configurables hacen que cada nodo pueda encargarse de mantener su medio de comunicación hacia el *gateway* y de manera colaborativa encargarse de lograr las funciones de sensado para las que se le ha desplegado. A continuación procederemos a delinear algunas características que tendrá la red de modo que se pueda acondicionar a la aplicación que deseamos implementar.

Factor	Clase
Distancia al gateway	Single-hop vs. Multi-hop
Dependencia de la data	Agregación vs No-agregación
Distribución de los sensores	Determinística vs. Dinámica
Esquema de Control	Auto-configurable vs. No-auto-configurable

Tabla 4-11 Resumen de las clases de redes en que se pueden catalogar

4.7.1. Escalabilidad y flexibilidad

La agricultura de precisión es una forma de utilización de herramientas para optimizar el uso de los recursos buscando obtener mejores productos a un menor precio. Ante este panorama, una red de sensores sin hilos que busque colaborar con dicho objetivo debe tener Administración de Configuración. Las redes de sensores sin hilos tienden a cambiar constantemente desde su instalación y configuración, por tal motivo cualquier situación no prevista en la configuración inicial puede afectar la calidad del servicio que se brinda. Por lo tanto la administración de configuración debe tomar en cuenta acciones como auto-configuración, auto-organización, auto-descubrimiento y auto-optimización. Cumpliendo con algunas de estas acciones, se espera que nuevos nodos puedan ser colocados en la red a diseñar con facilidad. Esto debido a que muchas veces las plantaciones agrícolas pueden ser variables en su desarrollo en el sentido de que sectores que el día de hoy no necesitan ser seguidos con precisión, el día de mañana si pueden necesitarlo debido a plagas o daños ocurridos en el proceso. Es posible también que se necesite expandir el tamaño de la red, necesitando que ella monitoree una mayor cantidad de terreno agregando más nodos a la periferia de la misma.

A la vez se espera que sea dinámica de modo que, los nodos puedan ser movidos de su ubicación original sin que ello represente una detención del funcionamiento de la red y menos aún una re-configuración manual de cada nodo. Incluso para algún desarrollo futuro se espera que se pueda usar la red de monitoreo de los nodos para monitorear elementos móviles tales como tractores en los sembríos.

Capacidad de saltos

En el desarrollo del presente proyecto, se espera que esta red sea capaz de tener un gran alcance en grandes extensiones de terreno, por lo que en muchas ocasiones, los datos tendrán que pasar a través de muchos nodos para que la información sea entregada al *gateway*, haciendo de la misma una red multi-hop. Por lo tanto, se considera que el diseño tanto del protocolo como de la red, deben ser capaces de permitir que los mensajes atraviesen una cantidad considerable de nodos sin verse afectados, retrasados en extremo o incluso perdidos. Sin embargo, para la aplicación que estamos desarrollando, la latencia con que cuente la red no es necesariamente una limitante pues en aplicaciones agrícolas, es valioso contar con la información in situ pero no es necesario conocerla en tiempo real, un retardo relativamente corto se considera razonable.

Adición de nuevos sensores

Se desea también en el desarrollo del presente proyecto que se pueda tener la facilidad de agregar nuevos nodos a la red (una vez más, una red auto-configurable) de modo que con solo instalarlo con sus respectivos sensores en el lugar necesario, sea capaz de configurar su propia ruta de llegada al *gateway*. De este modo, si es instalado en su agregación como un sensor externo en la periferia de la red, sea capaz de encontrar la ruta óptima para enviar sus mensajes hacia el *gateway* y si es instalado como un sensor router en el medio de la red, sea capaz a la vez de configurarse como un transmisor-receptor para servir como eventual ruta de mensajes. Se espera que en ningún caso, la instalación de un nuevo nodo signifique una sobre-saturación de mensajes para solicitar nuevas rutas y reconfigurar la red con el nuevo nodo añadido pues se considera muy valiosa la energía que se desperdicia en la transmisión de paquetes de ese tipo.

4.7.2. Consumo de energía eficiente

Se espera que una red que se despliegue en tan grandes áreas geográficas tenga una autonomía con dos características, primero que sea larga y segundo que la autonomía de toda la red sea uniforme. El lo referente a la primera característica, se espera que los nodos cuenten con un protocolo que les permita ahorrar energía al máximo. En una red de esa envergadura sería poco práctico que se necesite que los nodos necesiten cambio de baterías en periodos cortos de tiempo. Haría que los recursos que se ahorran gracias a la red tengan que ser invertidos en el cambio de baterías de los mismos. En lo referente a la segunda característica, se pretende que los nodos tengan un consumo uniforme de energía, es decir, que cuando un nodo necesite cambiar de batería, se necesite con proximidad el cambio de todos los nodos, haciendo de esta manera el despliegue de recursos para esta actividad, una sola vez y para toda la red. Para lograr esto, el protocolo a usar debe tener en cuenta lo explicado en el apartado 2.2.2.2 referente a consumo de energía desigual por parte de los nodos más próximos al *gateway*, los encargados de una mayor cantidad de retransmisiones (FIGURA 2-7). Por tanto se deberá pensar en una red de agregación de modo que un nodo pueda enviar al siguiente nodo en la ruta su data y que dicho nodo receptor, sea capaz de recolectar por un periodo de tiempo las transmisiones de todos los nodos a los que le sirve de ruta para ir las agregando en un solo mensaje, así se logra evitar re-transmisiones innecesarias o demasiado continuas.

4.8. El Protocolo de Encaminamiento

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las redes de sensores sin hilos pueden llegar a contener cientos o hasta miles de nodos interactuando unos con otros en colaboración para lograr un objetivo común. Se espera que las redes de

sensores sin hilos puedan funcionar libres de necesitar mantenimiento por largos periodos así como que tengan un largo tiempo de vida o autonomía. Ante estas expectativas, el protocolo de encaminamiento juega un papel fundamental y crucial para poder lograr dichos objetivos. En la presente sección haremos una revisión un poco más en detalle acerca de las capas bajas del mote MICAz así como del desarrollo de protocolos previos. Finalmente haremos una revisión en detalle del protocolo “NST-AODV para recogida de datos eficiente”.

4.8.1. Desarrollos Anteriores y Consideraciones

4.8.1.1. La capa física y la capa MAC en el MICAz

Debido al peculiar funcionamiento por módulos en la programación sobre TinyOS de redes de sensores sin hilos, se consideró la creación de una capa entre la capa MAC y las superiores. Esta capa lleva como nombre capa AM (Active Message) y su función es la de abstraer el funcionamiento de las capas MAC y PHY de las superiores haciendo que sea el protocolo el que interactúe con esta capa intermedia. Será esta última capa quien se encargará de seleccionar los módulos necesarios para el correcto funcionamiento del protocolo independientemente del modelo de mote usado. En la FIGURA 4-28 se puede apreciar la abstracción desde la capa de aplicación que hace la capa AM para el manejo de los módulos de transmisión tanto vía radio como UART.

En lo referente al nivel físico, los motes MICAz siguen el estándar IEEE 802.15.4 por lo cual la banda seleccionada para comunicaciones es la de 2.4 Ghz con velocidades de 250 Kbps mediante la utilización del chip ChipCon CC2420 [50]. Para las transmisiones de radio se emplea una transmisión DSSS a 2Mchips modulada mediante O-QPSK por alguno de los 16 canales disponibles numerados desde el 11 al 26 tal y como muestra la FIGURA 4-29 (del 1 al 10 son empleados por los motes MICA2 en la banda de 900 Mhz).

En el estándar IEEE 802.15.4 [29] se detalla como cada dato decimal o símbolo debe ser primero codificado por una secuencia PN (Pseudo-Noise) de 32 chips [29] según la Tabla 4-12. A continuación de ello, para la transmisión vía radio, se debe modular mediante O-QPSK según como se muestra en la FIGURA 4-30 el ejemplo para la transmisión del símbolo cero.

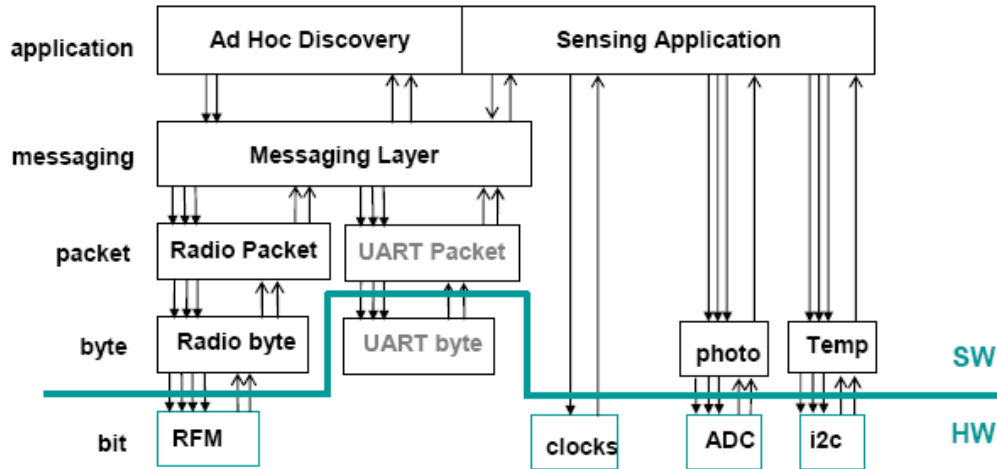


FIGURA 4-28 Gráfico de componentes de una aplicación típica

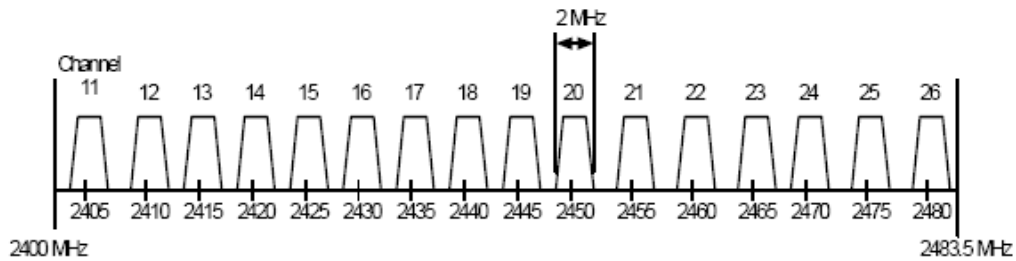


FIGURA 4-29 Canales disponibles en la banda 2.4 Ghz con sus respectivas frecuencias centrales [29]

Symbol	Chip sequence ($C_0, C_1, C_2, \dots, C_{31}$)
0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

Tabla 4-12 Codificación Símbolo a Chip según lo especificado en IEEE 802.15.4 [29]

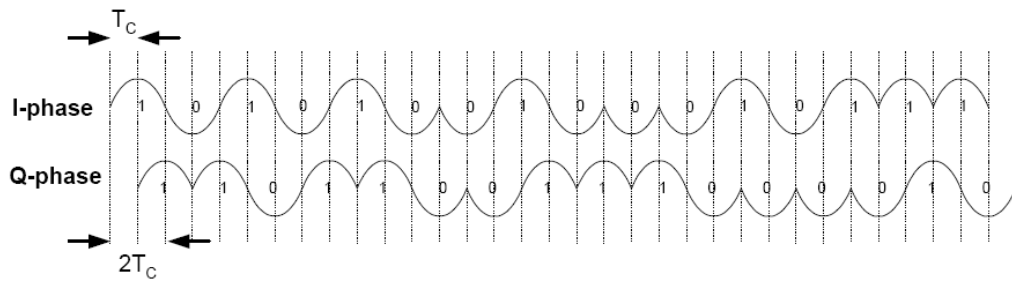


FIGURA 4-30 Fases I/Q para modulación O-QPSK [29]

Para el presente proyecto, la programación de la capa PHY y MAC está implementada en el módulo *CC2420RadioC.nc*, el cual se puede apreciar en la FIGURA 4-31 que cuenta con una variedad de “sub-módulos” con los que interactúa. Estos se encargan tanto del control de hardware de este mote en particular, como de otras características hardware comunes a los demás modelos de mote.

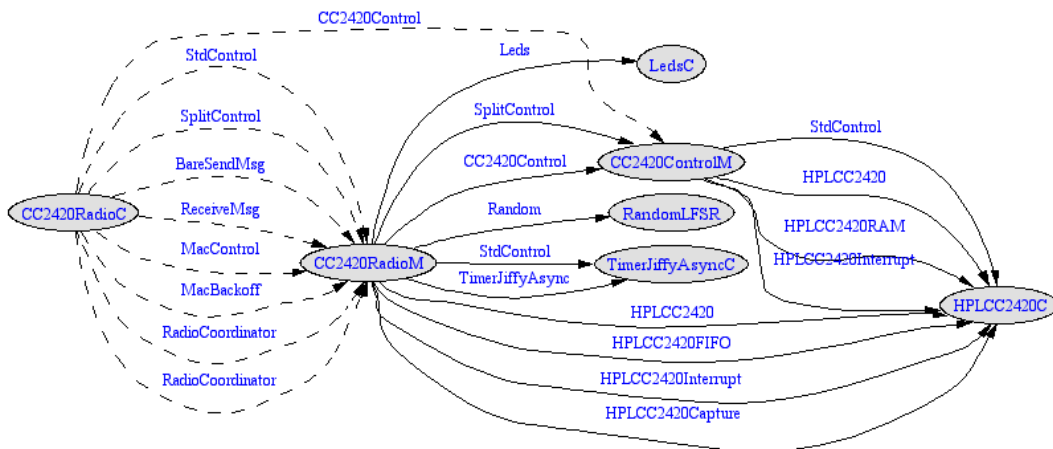


FIGURA 4-31 Esquema de conexiones del módulo *CC2420Radio.nc*

Quizás la interfaz mas importante que vale la pena señalar es la *CC2420Control* que permite ajustar el conjunto de parámetros empleados por la radio a nivel físico entre los cuales se encuentran: *TunePreset* que ajusta el canal empleado por la radio, *TuneManual* que ajusta la frecuencia de emisión, *TxMode / TxModeOnCCA / RxMode* que cambia el modo de trabajo del transceptor de recepción a transmisión y viceversa y *SetRFPower / GetRFPower* que ajusta el nivel de potencia de emisión de mensajes. Por otro lado, el módulo que vale la pena señalar es el *HPLCC2420FIFO* que controla los buffers de datos de 128 bytes que incluye el chip CC2420 para transmisión y recepción.

En lo referente a la capa MAC, el estándar IEEE 802.15.4 indica dos tipos de acceso al medio, mediante la utilización de *beacons* o en el modo *beaconless*. En

el caso CC2420 se implementa la solución *beaconless* que da mayor simplicidad en la configuración. En este modo, todos los nodos funcionan como FFD (Full Function Device) y los mensajes se envían mediante tramas asíncronas por mecanismos de acceso al medio CSMA. El detalle de las tramas de mensajes de datos se puede apreciar en la FIGURA 4-32. En ella se observa la cabecera PHY que se agrega a los mensajes así como la cabecera MAC. Dentro de la cabecera MAC se puede apreciar un campo llamado Addressing Fields que puede contener entre 4 y 20 bytes, ese campo que es importante para el funcionamiento del protocolo y no es visible para el desarrollador mediante la aplicación TOSBase y Listen, se puede apreciar con mayor detalle en la FIGURA 4-35. Para la aplicación que se está desarrollando cuenta con 6 bytes.

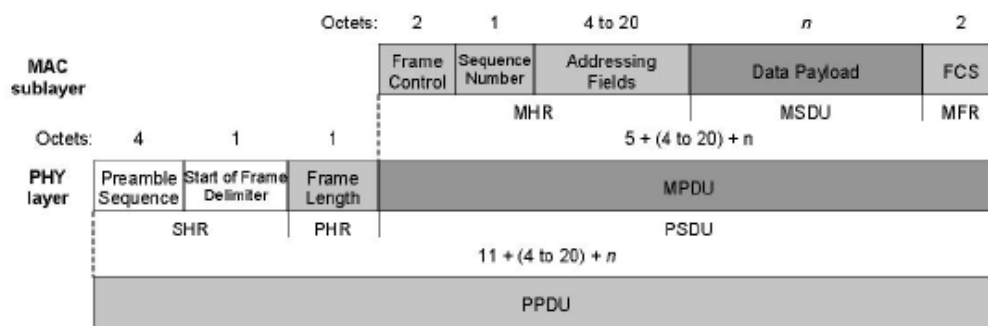


FIGURA 4-32 Esquema de una trama de datos según IEEE 802.15.4 [29]

4.8.1.2. Desarrollos previos: TinyAODV y NST-AODV

Los protocolos usados en redes típicas usualmente no son aplicables a redes de sensores sin hilos por una variedad de factores entre los que podemos mencionar por ejemplo:

- Las redes de sensores sin hilos deben ser capaces de auto-organizarse y configurarse sin la necesidad de requerir mantenimiento continuo de la red.
- En muchas aplicaciones, los nodos de la red son estáticos, pero en muchas otras, los nodos pueden tener movilidad.
- Muchas veces cada red de sensores tiene una aplicación específica haciendo que se requiera, por ejemplo, una latencia distinta o un consumo de energía diferente en cada caso.
- Usualmente las redes de sensores sin hilos son data-céntricos, es decir, la data concurre a un solo nodo mientras que en las redes tradicionales, la información puede concurrir a diferentes nodos en momentos diferentes según la petición.

- La percepción de la localización física de cada nodo es importante pues siempre irá asociada a la data que se recolecta.

Estos motivos fueron los que influenciaron la creación, por parte del HSN (Heterogeneous Sensor Networking) del Intel Research Group, de protocolos como DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) con inundación controlada o la versión reducida de AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) llamada TinyAODV. Todos estos protocolos ahora en funcionamiento y cuyas últimas investigaciones [51] muestran que es posible dar completa movilidad a los elementos de la red de una manera eficiente. Ambos protocolos pueden ser hallados como parte del código de TinyOS. Más específicamente dentro de la carpeta */contrib* el mismo en donde se hallan un conjunto de componentes desarrollados por investigadores fuera de la Universidad de California Berkeley y que se consideran como código no totalmente testeado pero que es de gran interés para la comunidad de desarrolladores, de este modo se incluye en las versiones de TinyOS y se espera que pueda ser más ampliamente probado y corregido por ser código abierto.

El TinyAODV que se encuentra ya en su revisión número 3, como su nombre lo indica es una versión reducida del protocolo AODV justamente con el objetivo de salvar las diferencias que se mencionaban en el párrafo anterior. Este protocolo es un protocolo on-demand que quiere decir que intentará ir construyendo las rutas a medida que sean solicitadas por los emisores. La ruta a un nodo en la red está determinada por una lista dentro del nodo, en ella se asocia un nodo destino con el siguiente nodo al que hay que realizar el salto para alcanzar dicho destino final. De este modo, cuando un nodo necesite enviar información a un nodo que no tenga en su lista de rutas, enviará un mensaje broadcast de RREQ (Route REQuest) el cual será retransmitido hasta llegar al nodo destino. Este nodo destino es el encargado de responder la solicitud con un mensaje de RREP (Route REPLY). Así, cuando el RREP va retornando al nodo emisor, en cada nodo que realiza un salto va actualizando la lista de rutas que puede contener destinos de hasta 7 nodos en la red [52]. Las rutas nunca expiran, pero cuando la lista de rutas se llena, la ruta más antigua se borrará. Podríamos decir que la mayor limitación del TinyAODV es que no cuenta con la funcionalidad de un nodo *sink* o sumidero a donde concurra toda la información.

En base a TinyAODV, en la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) se desarrolló el NST-AODV (Not So Tiny AODV) que ha sido concebido para ser una solución intermedia entre una implementación minimalista como TinyAODV y la implementación full, AODV. Los beneficios que este protocolo brinda se dan a

costa de un 58% más de memoria de almacenamiento. Entre las principales características que se pueden mencionar del citado protocolo en comparación con TinyAODV están:

- Opera por defecto con notificación a nivel de la capa de enlace asumiendo redes no-estáticas.
- El paquete de datos que provoca el proceso de búsqueda de nueva ruta, es almacenado y transmitido una vez que la ruta ha sido establecida.
- Después de una transmisión a nivel de capa de enlace sin éxito, hasta dos intentos adicionales provocados por la capa de red pueden ser realizados. De este modo se evita intentos falsos de transmisión de mensajes de petición de ruta RREQ.
- Cuando un paquete de datos encuentra una ruta no válida o desaparecida, es almacenado y transmitido cuando la ruta ha podido ser reparada o sustituida por otra. De este modo se espera que la fiabilidad de la red se incremente así como que decrezca la latencia de la red.
- Dos colas FIFO (First In First Out) han sido añadidas, una intentando guardar los paquetes de entrada durante un proceso de descubrimiento de ruta en desarrollo y la otra usada como una cola de salida.
- Un nodo intermedio puede generar un mensaje de RREP si conoce la ruta a una destinación solicitada. Esta característica se espera que reduzca el número de RREQ y RREP que se transmiten.

4.8.2. NST-AODV para ahorro de energía

En el desarrollo de aplicaciones específicas para redes de sensores sin hilos, en particular, para esta en agricultura de precisión, el ahorro de energía en cada nodo se vuelve un requisito indispensable. Para poder lograr esto, los protocolos a implementar deben tener la cualidad de hacer *Clustering* o aglomeración de datos. Para realizar los clusters, el protocolo debe ser capaz de organizar cada nodo en una jerarquía según la cercanía al nodo *sink* y además debe ser capaz de reorganizarla según se pueda dar el caso de que algún nodo de la red se pierda o falle.

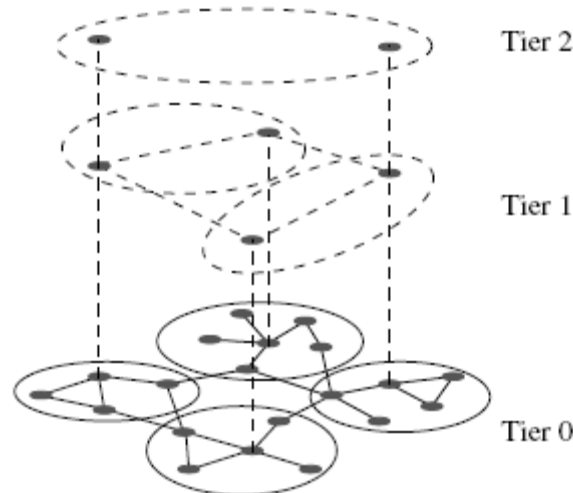


FIGURA 4-33 Clustering en una red de sensores [18]

De este modo, los datos recopilados por la capas superiores del cluster, se irán agregando consecutivamente a los datos recolectados por las capas inferiores y serán enviados tan solo cuando algún evento sea señalado que puede ser una cola llena o similares. Así, no se hace una transmisión cada vez que un nodo obtiene una nueva lectura sino que se hace las transmisiones van supeditadas a los eventos que señalen que se debe enviar toda la data recolectada por esa capa. Frente a este panorama es que se modificó el protocolo NST-AODV para darle la capacidad de *Clustering* brindándole un plus de ahorro de energía. El protocolo sigue la siguiente lógica, cuando un nodo toma una muestra, dado que el sistema en sí ya está trabajando en conjunto, debe enviarla hacia el siguiente nodo en la ruta. Sin embargo, el siguiente nodo al recibir esta información, no enviará la data sino tan solo la almacenará, tanto esa, como todas las que puedan provenir de nodos en una capa superior del cluster, será recién cuando este nodo tenga que sensar su entorno cuando agregará este dato a los anteriormente recolectados y hará un solo envío.

4.8.2.1. Funcionamiento y Tipos de Mensajes

Para entender mejor el funcionamiento de las mensajes se explicará en principio el proceso de envío de mensajes a través de la red para lo cual se cuenta con tres mensajes de control (*RREQ Route request*, *RREP Route reply* y *RERR Route error*) y uno de datos.

Para enviar en principio un mensaje, se llama a la función *SendMHopMsg* indicando el nodo destino. Esta función pertenece al módulo *AODV_PacketForwarder* que se encarga de poner el mensaje en la cola *BufferQueue*, de no tener ningún mensaje por delante en la cola, este mensaje se servirá, de lo contrario se mantendrá en espera.

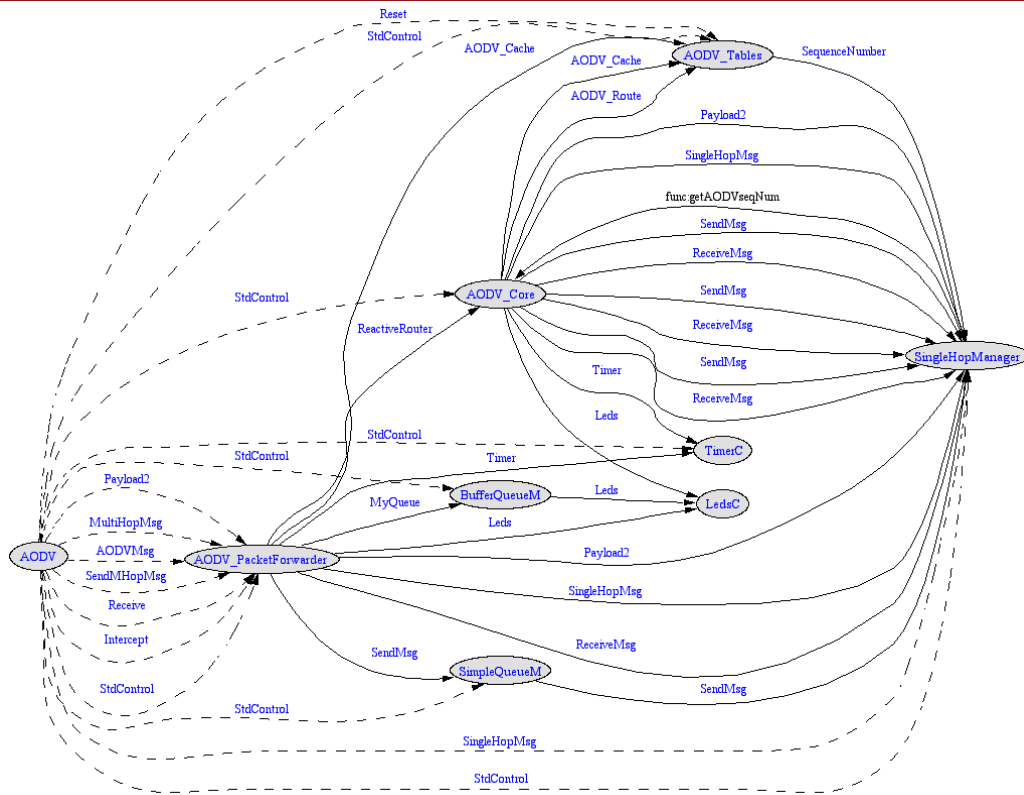


FIGURA 4-34 Arquitectura de los módulos de NST-AODV

El siguiente paso a realizar es el de consultar la existencia de una ruta hacia el nodo destino, para esto se consulta al módulo *AODV_Core* que a su vez consulta al módulo *AODV_Tables* que de no encontrar ruta, comunica el evento al *AODV_PacketForwarder* e inicia el proceso de descubrimiento de nueva ruta.

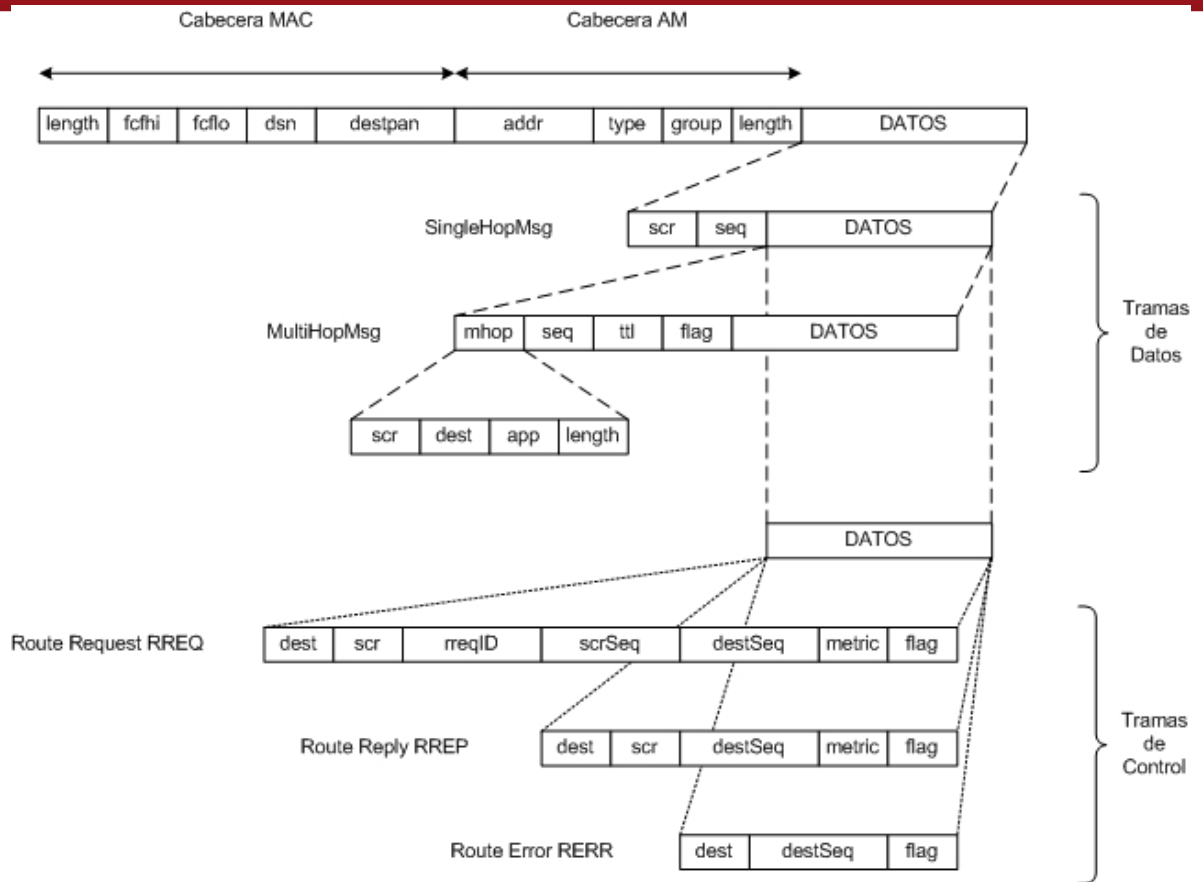


FIGURA 4-35 Tramas del protocolo NST-AODV

Para llevar a cabo dicho proceso, se envía un mensaje de RREQ, cuya trama podemos apreciar en la FIGURA 4-35, en inundación controlada por número de saltos. De este modo, el nodo destino responde con un mensaje de RREP o en su defecto, un nodo de la ruta que tenga en su lista de ruta al mencionado nodo destino (FIGURA 4-36). Cuando se recibe la primera respuesta, se le indica al módulo *AODV_PacketForwarder* que ya se puede enviar el mensaje, si cuando ya se ha enviado el mensaje llega otra respuesta con una ruta más favorable, la ruta se actualiza y los sucesivos mensajes se enviarán por esta nueva ruta.

El proceso de envío en sí consiste en pasar el mensaje al módulo *SimpleQueue* que intentará un número máximo de reintentos para enviar el mensaje de forma correcta, cuando se envía de forma satisfactoria, se señala el evento *SendDone()* mediante la interfaz de envío *SendMHopMsg*.

Si el envío no se logra después del número de intentos máximos, se inicializa una vez más un proceso de búsqueda de ruta mediante el envío de un RREQ, de ser un nodo intermedio de la ruta el que no logra enviar el mensaje este avisará de que está iniciando un nuevo proceso de búsqueda de ruta, llamado Local Repair, enviando un mensaje broadcast de RERR (*Route error*) de modo que los nodos borren de su lista aquella ruta.

Cabe destacar que para esta versión de ahorro de energía de este protocolo, el tráfico en paquetes de control que se pueda desarrollar entre nodos para descubrimiento de rutas o para reconfigurarlas, no se ve afectado por el llamado *Clustering*, es decir, de enviarse un mensaje de RREQ, el nodo que lo recepcione no lo pondrá en una cola junto con los demás mensajes de datos para enviar después. Todos los mensajes de control tienen prioridad y se transmiten siempre una vez recibidos.

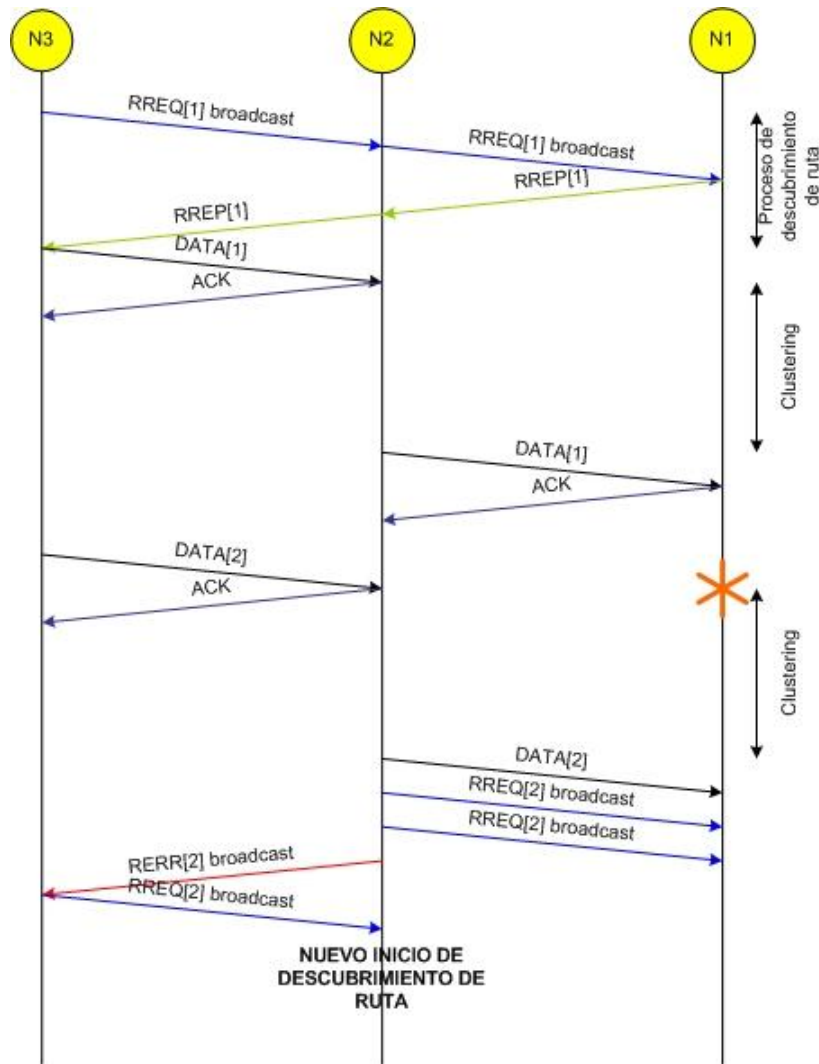


FIGURA 4-36 Proceso de envío y recepción de mensajes

Vale la pena enfatizar el funcionamiento de algunos módulos importantes en el NST-AODV, como por ejemplo el *SingleHopManager* que se puede apreciar en la figura a continuación:

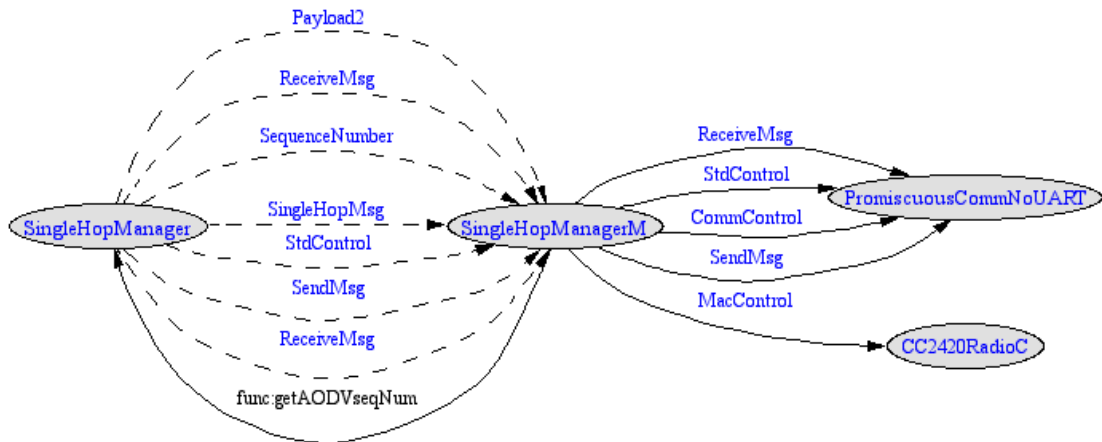


FIGURA 4-37 Arquitectura del sub-módulo SingleHopManager

La función principal que tiene es la de enlazar al protocolo con las capas inferiores y ofrecer comunicaciones en salto simple directo entre nodos. Agrega dos bytes a la cabecera AM como se puede apreciar en la FIGURA 4-35 identificando al nodo emisor del mensaje y un número de secuencia que identifica al mensaje emitido. Por otro lado también se tiene el módulo *AODV_Core* que proporciona un conjunto de acciones de control del protocolo y es el responsable de la creación de rutas así como de la reparación de las mismas. El módulo *AODV_PacketForwarder* es el encargado de enviar los mensajes, consultando la existencia de rutas.

4.8.2.2. Tipos de Aplicaciones en los Motes

Debido a razones que se han explicado anteriormente, se ha considerado la creación de aplicaciones diferentes para los motes que componen la red. En lo referente al protocolo, se diferencian tres tipos de nodos.

Nodos Externos

Los nodos externos son todos aquellos nodos que se encargarán de la recolección de datos en el campo, con la capacidad de reorganizarse y hacer *Clustering* de los datos, estos nodos se programan haciendo la variable $Nxv1=1$ en el momento del volcado de datos y además se debe especificar el tiempo de retardo que deberá tener cada nodo al hacer el *Clustering* especificándolo en la variable *DINTERVAL*, dicho valor deberá estar en milisegundos y considerar que internamente se multiplica por 60. Se les asigna el ID desde el número 2 en adelante (FIGURA 4-38).

Nodo Sink

También llamado nodo 1, es el nodo sumidero, el cual recibirá la información de toda la red, cada paquete de datos que se envíe desde la red, tendrá como destino este nodo, es la cabeza del árbol y además es el encargado de sensar variables que son comunes a todo el campo como la intensidad de luz y la temperatura

atmosférica. Se le programa haciendo la variable $Rx=1$ en el momento del volcado de datos.

Nodo Estación Base

Este nodo, identificado con el ID = 0, es el responsable de comunicarse directamente con el nodo 1 y se espera que esté conectado a un *gateway* y una PC. Este nodo es el encargado de recibir la información enviada por la red vía el canal radio y de re-transmitirla vía UART a la aplicación en PC que se encargará de tratar y mostrar la información de manera amigable para el usuario. Para programar este nodo se deben colocar a 1 las variables *Versio0Rx* y *BS* de modo que se pueda activar el modo de recepción vía radio y transmisión vía UART.

En lo referente al nodo estación base, el módulo *PromiscuousCommNoUART* (ver FIGURA 4-37) es reemplazado por el módulo *PromiscuousCommUART* que brinda la transmisión de mensajes por el puerto UART hacia la PC.

Resaltar como final de este capítulo que la escalabilidad del protocolo ha sido probada con éxito. En pruebas realizadas en el laboratorio con nodos colocados en red, el protocolo respondió satisfactoriamente a nodos agregados en la periferia de la misma; de modo que el nodo agregado solo tenía que solicitar una ruta y escoger entre las opciones que los nodos aledaños le brinden. Del mismo modo, nodos agregados en el medio de alguna ruta, encontraron su ruta de destino óptima y luego pasaron los nodos aledaños a reconfigurar sus rutas de acuerdo a si este nodo mejoraba la ruta o la degradaba. Esta cualidad es particularmente importante pues, si bien, en una aplicación de agricultura los nodos pueden permanecer estáticos la mayor parte del tiempo; según como se vaya desarrollando la temporada puede ser necesario que algún nodo sea movido a otra localización del sembrío para monitorear con más precisión esa zona. Otra posibilidad también es que sea necesario colocar nuevos nodos según se vaya expandiendo el tamaño del sembrío y ante estas variaciones del entorno, la red debe permanecer inmutable y seguir enviando la información de manera fiable sin necesidad de la intervención de nadie para brindar mantenimiento.

```

PLATFORMS=micaz

# SOFTWARE PARA EL NODO ESTACION BASE (NODO 0)
ifndef NO
COMPONENT=Versio0Rx
endif

ifndef BS
LOCAL_DEFINES += -DBS=$(BS)
endif

# SOFTWARE PARA NODOS EMISORES EXTERNOS
ifndef INT
LOCAL_DEFINES += -DINTERVAL=$(INT)
else
LOCAL_DEFINES += -DINTERVAL=250
endif

ifndef Nxv1
COMPONENT=TX
endif

# SOFTWARE PARA EL NODO SINK (NODO 1)
ifndef N1
COMPONENT=RX
endif

# PARAMETROS PARA PROGRAMAR POR DEFECTO
DEFAULT_PROGRAM=mib510
MIB510=/dev/ttyS4

# TAMAÑO DEL MENSAJE
ifndef SMALL_MSG
CFLAGS += -DTOSH_DATA_LENGTH=29
else
CFLAGS += -DTOSH_DATA_LENGTH=112
endif

# TX POWER LEVELS
#
# 0x03          -25 dBm
# 0x07          -15 dBm
# 0x0B          -10 dBm
# 0x0F          -07 dBm
# 0x13          -05 dBm
# 0x17          -03 dBm
# 0x1B          -01 dBm
# 0x1F          -00 dBm
CFLAGS += -DCC2420_DEF_RFPOWER=1

# ZIBGEE 2.4 GHZ CHANNEL
CFLAGS += -DCC2420_DEF_CHANNEL=26
LOCAL_PATH += -I. -I$(WSNDIR)/interfaces -I$(WSNDIR) -I$(WSNDIR)/system -I$(WSNDIR)/lib/aodv -I$(WSNDIR)/msp430
include ../MakeWSN

```

FIGURA 4-38 Archivo MAKEFILE para la programación de los motes

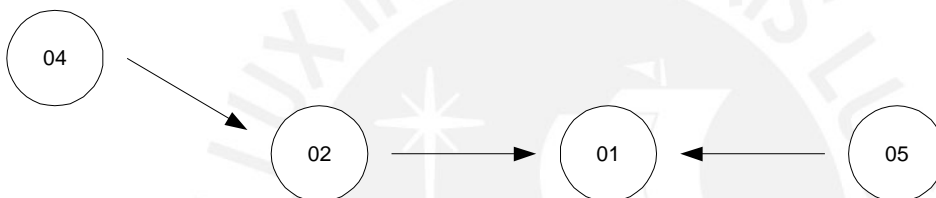
5. Pruebas Realizadas

Debido a la imposibilidad de presentar el sistema en funcionamiento, a continuación presentamos una serie de pruebas realizadas en el laboratorio.

Como premisa podemos acotar que los nodos fueron identificados de la siguiente manera:

- Nodos 04 y 05: Nodos Periféricos de sensado
- Nodo 02: Nodo Router / sensado
- Nodo 01: Nodo Gateway

Los nodos 02, 04 y 05 contaban con la posibilidad de incorporar 02 sensores cada uno, sin embargo, tan solo tenían conectado uno de ellos. La intención del presente experimento fue la de comprobar el desempeño del protocolo



En la primera etapa se observa que al ser encendidos los nodos 01 y 02, es el nodo 02 quien realiza la primera solicitud de descubrimiento de ruta (RREQ), siendo el nodo 01 quien le responde (RREP). Posteriormente el nodo 02 inicia el proceso de envío de información enviando una trama de datos. Se puede apreciar que la misma tiene como destino al nodo 01 y que en el campo de datos se puede identificar que el sensor1 correspondiente al nodo 02 está enviando el dato 03B5.

ADDRESS	TYPE	GROUP	LENGTH	SRC(L)	SEQ	DEST	SRC(O)	REQ. ID	SRC SEQ	DEST SEQ	METRIC	FLAG
FF FF	00	7D	0C	02	00	01	02	01 00	01 00	01 00	00	00
02 00	0E	7D	08	01	00	01	02	01 00	01 00	01 00	01	00
												RREQ
												RREP
ADDRESS	TYPE	GROUP	LENGTH	SRC(L)	SEQ	SRC(O)	DEST	APP	LENGTH	SEQ	TTL	FLAG
01 00	09	7D	70	02	01	02	01	03	67	01	07	00
												DATA

Como segunda etapa se puede apreciar que se inicia un segundo proceso de descubrimiento de ruta. En este caso es el nodo 04 quien al ser encendido, envía un mensaje “broadcast” (ADDRESS FFFF) con el fin de encontrar al nodo 01 o a algún nodo que tenga en su lista de rutas al nodo 01. El que responde evidentemente es el nodo 02 que ya tiene en su lista de rutas al nodo 1, sin embargo, la respuesta se da a través de un RREQ en pos de ver la posibilidad de que exista otro nodo con una menor distancia al nodo 01 y mejorar el mismo su propia tabla de rutas.

Conclusiones y Valoración

El presente estudio ha mostrado algunas de las tecnologías presentes y en desarrollo de las redes de sensores sin hilos. Se ha mostrado, principalmente en el capítulo 02, la viabilidad y flexibilidad que tienen dichas redes para adaptarse a casi cualquier tipo de aplicación que lo requiera. Precisamente ha sido la intención del presente estudio demostrar la capacidad que tienen y las virtudes que pueden proporcionar estas redes en el monitoreo de plantaciones agrícolas haciendo un énfasis especial en la agricultura de precisión.

Los primeros pasos del presente proyecto consistieron en la investigación de elementos y plataformas de la empresa Crossbow, que tal como se ha mencionado anteriormente, es una empresa pionera en el rubro encargada de la comercialización de dispositivos y aplicaciones desarrollados por la Universidad de California Berkeley, por lo que son sus dispositivos con los que se cuenta actualmente en el Grupo de Redes sin Hilos de la Universitat Politècnica de Catalunya.

El primer objetivo cumplido fue el de entender un nuevo sistema operativo, el TinyOS, y su desarrollo de aplicaciones en programación basada en módulos en un lenguaje de programación totalmente nuevo como es el nesC. Este tipo de programación permite programar sin considerar los elementos de bajo nivel como son el control de comunicaciones, administración de energía o acceso a dispositivos conectados. A pesar de la aparente sencillez que puede tener la programación en nesC y TinyOS, la mayor limitación y problemática se presentó en el hecho de que al ser un sistema en desarrollo presenta numerosas deficiencias y aspectos inconclusos a la espera de aportaciones de la comunidad de desarrolladores que al proponer nuevas aplicaciones van encontrando errores y van a su vez proporcionando soluciones que se deben ir probando y corrigiendo.

Una vez conocido el funcionamiento del sistema operativo y su programación, se debió empezar el desarrollo de un protocolo que se acondicionara a las necesidades de la aplicación, es así como se concluyó que dicho protocolo debía poseer capacidades de administración eficiente de energía complementarias a las proporcionadas por el propio sistema operativo, es así como nace la idea del NST-AODV para ahorro de energía. Se trabajó a partir del NST-AODV, protocolo previamente diseñado en el Grupo de Redes sin Hilos de la Universitat Politècnica

de Catalunya. El nuevo protocolo integra la capacidad de *Clustering* a un protocolo de inundación controlada para el descubrimiento de rutas bajo demanda. El protocolo ha demostrado en pruebas de laboratorio ser bastante eficaz tanto en la fiabilidad de la información entregada como en la administración de energía de la red. El diseño fue capaz de transmitir información en redes de hasta 05 motes ubicados de manera jerárquica en 05 niveles, la razón por la que las pruebas se hicieron con 05 motes fue por que no se contaba con más motes en ese momento, pero en teoría, la red es capaz de manejar infinitos motes debido a que actualmente IPv6 permite gestionar prácticamente infinitas direcciones. Sin embargo, sería recomendable realizar pruebas con una mayor cantidad de motes para determinar hasta cuantos motes permite manejar la capacidad de almacenamiento de datos limitada que tienen los motes pero que, nuevamente, virtualmente puede ser infinita. Complementariamente a esto se debió trabajar en el acondicionamiento de sensores externos como el del caso de la sonda EC-5 para el monitoreo de la humedad del suelo. Esto presentó una dificultad especial debido a la escasa documentación disponible referente al funcionamiento de redes de sensores sin hilos con sensores externos pues la mayoría de aplicaciones existentes se han realizado haciendo uso de los sensores incorporados en los motes pues cuentan con una mayor facilidad de manejo y los hay de gran variedad. Es de especial interés para el presente proyecto que la sonda con la que se contó es el último modelo de la empresa Decagon Devices por lo que se ha usado un elemento de vanguardia pero a la vez ha habido una deficiencia en la documentación disponible respecto a dicha sonda y su uso en redes de sensores sin hilos.

Posteriormente se debió trabajar en el desarrollo de una interfaz usuario que fuera amigable y de sencillo uso para usuarios finales considerando que serán los mismos agricultores y productores quienes harán uso de la misma. Es en este punto en el que el proyecto puede en el futuro alcanzar mayores avances y mejores prestaciones de cara a la familiarización con los requerimientos de los productores. Se espera que personas mas familiarizadas con la programación en Java puedan integrar, entre otras cosas, una prestación que no fue posible realizar en el presente proyecto y que es el mapa de gradiente de la variable que se está monitoreando para visualizar por lotes y de manera amigable el estado actual del sembrío.

Finalmente y en paralelo a lo anteriormente mencionado se debió hacer una investigación en el campo de la agricultura y sus tecnologías, así como en sus deficiencias y carencias para desarrollar una aplicación que se amolde a sus requerimientos. Se descubrió en el proceso que es un campo de muchísimo potencial para las redes de sensores sin hilos, en el que las mismas pueden brindar inmensas prestaciones para la mejora integral de la agricultura en general. Esta etapa fue de particular dificultad y aprendizaje para el desarrollo del presente proyecto pues es un campo totalmente diferente y alejado de la ingeniería electrónica pero se aprendió también que en el desarrollo de aplicaciones se debe ser sensible y capaz de investigar en otras áreas ajenas al propio campo para lograr un desarrollo eficiente, productivo y útil.

Recomendaciones

En lo referente a trabajos futuros a realizar a partir del proyecto presentado, se espera que se pueda agregar prestaciones a la interfaz usuario de modo que permita que desde la PC se puedan enviar mensajes hacia los nodos para realizar alguna tarea ya sea de red o con un elemento físico, llámese actuador, acoplado al mismo. Se espera que investigaciones futuras permitan incluso a la red ser más inteligente y capaz de realizar tareas sin necesidad de esperar las acciones del usuario como por ejemplo, si un nodo detecta que la humedad baja del nivel permitido, sea capaz de accionar un actuador que inicie la descarga de agua para compensar dicha deficiencia. De este modo se hace el consumo de recursos más eficiente aún y se logra automatizar totalmente el uso de recursos. Dicha prestación, basándose en el protocolo ya desarrollado, es de muy fácil implementación pues los motes cuentan con los recursos computacionales necesarios para lograrlo. Se podría también implementar alarmas, mensajes de problemas y dar prioridad a mensajes de urgencia en la red para que puedan evitar el *Clustering* y llegar inmediatamente al usuario, todo esto dependerá del valor que se le brinde a esta aplicación y la inversión que se desee y pueda hacer en ella.

Finalmente mencionar que en el campo de los sensores, recientemente se han desarrollado gran cantidad de bio-sensores para el análisis de niveles de contaminación tanto químicos como biológicos que, independientemente de las limitaciones que ahora tienen para su aplicación en redes de sensores sin hilos, se encuentra que ahora son viables y están disponibles para el control de alimentos y agua y que se encuentran ganando fuertemente terreno en áreas como la agricultura y control ambiental. Dichos sensores son los que brindarán, en el futuro,

a aplicaciones como la que ahora se presenta una capacidad de monitoreo sin precedentes.

Se puede concluir entonces que en el sector alimentario y de agricultura, las redes de sensores sin hilos presentan un enorme potencial, especialmente en la agricultura de precisión. El incremento de la eficiencia de la información obtenida es, y será, un aspecto importante a seguir desarrollando en los próximos años debido a que la tecnología cuenta con la capacidad para su desarrollo. Sin embargo el acceso a estas tecnologías de la información (IT – Information Technologies) sigue siendo altamente desigual incluso en países altamente industrializados. Es el interés del presente estudio presentar una motivación para que dichas desigualdades o diferencias se acerquen, motivando tanto a los productores de tecnología a reducir sus precios, así como a los consumidores de la misma a utilizar dicha tecnología con el objetivo de mejorar el nivel de calidad de sus productos.



Listado de Acrónimos

ACK: Acknowledgement
ADC: Analog to Digital Converter
AODV: Ad-hoc On-demand Distance Vector protocol
API: Application Programming Interface
CRC: Cyclic Redundancy Check
DSDV: Destination-Sequenced Distance-Vector
DSR: Dynamic Source Routing protocol
DSSS: Direct-Sequence Spread Spectrum
FDR: Frequency Domain Reflectometry
FFD: Full Function Device
FIFO: First-In First-Out
FSK: Frequency Shift Keying modulation
GPS: Global Positioning System
GUI: Graphical User Interface
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP: Internet Protocol
ISM: Industrial, Scientific and Medical radio band
LAN: Local Area Network
MAC: Media Access Control
MDA: Mote Data Acquisition board
MIB: Mote Interface/programming Board
MIT: Massachusetts Institut of Technology
MPR: Mote Processor Radio
MTS: Mote Sensing board
NesC: Network Embedded Systems C
NST-AODV: Not So Tiny AODV
OLSR: Optimized Link State Routing Protocol
O-QPDK: Offset Quadrature Phase Shift Keying
PAN: Personal Area Network
PN: Pseudo Noise
RAM: Random Access Memory
RERR: Route Error
RF: Radio Frequency
ROM: Read-Only Memory
RREP: Route Reply
RREQ: Route Request

RSSI: Received Signal Strength Indication

S-MAC: Sensor network-Media Access Control

SO: Sistema Operativo

TDMA : Time Division Multiple Access

TinyOS: Tiny micro threading Operative System

T-MAC: Time-out Media Access Control

UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

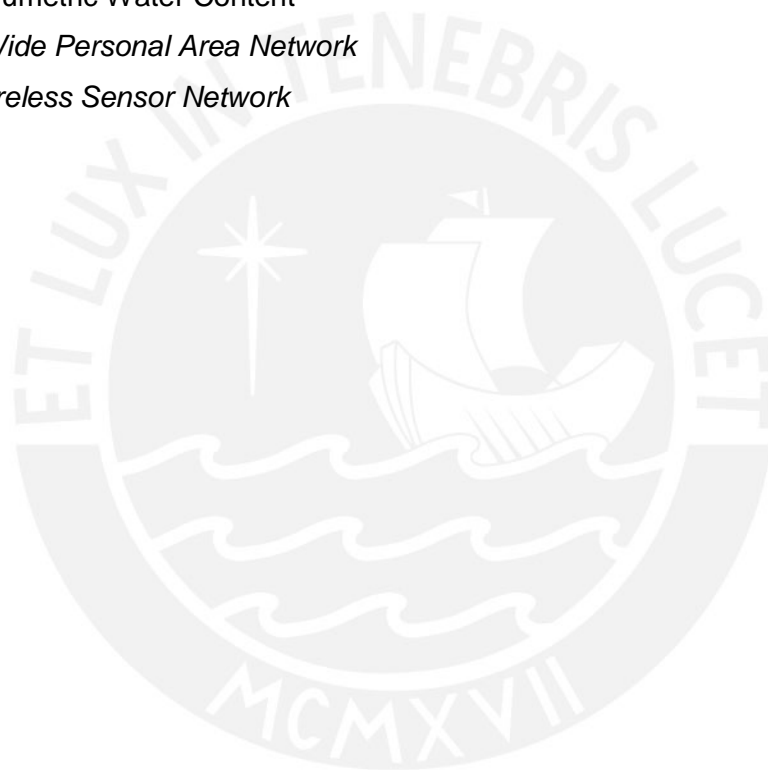
UCB: Universidad de California Berkeley

UM: Unidades de Medida

VWC: Volumetric Water Content

WPAN: Wide Personal Area Network

WSN: Wireless Sensor Network



BIBLIOGRAFÍA

- 1 Joseph F. Coates, John B Mahaffie y Andy Hines
2025 – Scenarios of Us and Global Society Reshaped by Science and Technology
- 2 Santiago H. Rodríguez Isleño
Las Redes Integradas de Datos en la Agricultura de Precisión
www.agriculturadeprecision.org
- 3 Conolly, M; O'Reilly, F.
Sensor Networks and the Food Industry
- 4 Mario Bragachini, Axel von Martini, Andrés Méndez
Agricultura de Precisión en Argentina
<http://www.agriculturadeprecision.org/presfut/AgPrecArgentina.htm>
- 5 INIA
Información proporcionada por el Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) – Perú
- 6 Francesc Ferrer
Programació de Regs a Temps Real – Mètode de camp basat en registers en continu de la humitat del sòl i una adaptació de la metodologia FAO.
- 7 Porter, J; Arzeberger, P; Werner, H; Bryant, P; Gage, S; Hansen, T; Hanson, P; Lin, C; Lin, F; Kratz, T; Michener, W; Shapiro, S; Williams, T.
Wireless Sensor Networks for Ecology
BioScience, July 2005, Vol 55, Nro 7
- 8 Decagon Devices Inc.
Dielectric Leaf Wetness Sensor – Operator's Manual
Version 1.0, 2006
- 9 Cox, John
Next frontier for wireless: Sensor networks.
Network World, 6/7/2004, Vol. 21 Issue 23, p10, 2p, 1 diagram; (AN 13311073)
- 10 Estrin, Deborah
How smart sensors might save Planet
EarthGlobal Agenda, Jan2005 Issue 3, p206, 2p, 2 diagrams; (AN 16578908)
- 11 Pacelle, Mark; Repas, Robert
Industrial sensing the wireless way
Machine Design, 1/6/2005, Vol. 77 Issue 1, p104, 4p, 3 diagrams; (AN 15667771)
- 12 Pister, Kris
In dust we trust
Economist, 6/12/2004, Vol. 371 Issue 8379, special section p10, 2p, 1c; (AN 13425027)

- 13 Redacción de Baquía
Las redes de sensores se vuelven importantes
<http://www.baquia.com/noticias.php?id=670&PHPSESSID=c8063e5fdf271c8635265826f7be0964>
- 14 Cox, John
Wireless sensor networks grabbing greater attention
 Network World, 9/27/2004, Vol. 21 Issue 39, p9, 2p; (AN 14546743)
- 15 Ricadela, Aaron
Sensitive Sensors
 InformationWeek, 11/22/2004 Issue 1015, p61, 2/3p; (AN 15175958)
- 16 Rhee, Sokwoo; Liu, Sheng
Wireless Sensor Networking – Source Book
 Editado por Millennial Net - Enero 2005
- 17 Malan, Remy; Teschler, Leland
Here come WIRELESS SENSORS
 Machine Design, 5/6/2004, Vol. 76 Issue 9, p68, 4p, 4 diagrams; (AN 15232351)
- 18 Ilias, Mohammad; Mahgoub, Imad
Handbook of Sensors Networks: Compacts Wireless and Wired Sensing Systems.
 CRC Press LLC
- 19 Metz, Cade
Get Out the Mote
 PC Magazine, 7/6/2004, Vol. 23 Issue 12, p108, 2/3p, 1c; (AN 13439303)
- 20 Shnayder, V; Hempstead, M; Cheng, B; Werner, G; Welsh, M
Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications
 Harvard University, Sensys 2004
- 21 Conner, Margery
RUN FOR YOUR LIFE
 Design News, 7/18/2005, Vol. 60 Issue 10, p87-90, 3p; (AN 17614360)
- 22 Hill, Jason; Horton, Mike; Kling, Ralph; Krishnamurthy, Lakshman
THE PLATFORMS ENABLING WIRELESS SENSOR NETWORKS
 Communications of the ACM, Jun2004, Vol. 47 Issue 6, p41, 6p; (AN 13565604)
- 23 Yang, Sarah
Researchers create wireless sensor chip the size of glitter
http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/06/04_sensor.shtml
- 24 I.F.Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci
WIRELESS SENSOR NETWORKS: A SURVEY
 Computer Networks, Dec2001, Vol. 38 , p393 – 422

- 25 Conner, Margery
WIRELESS-SENSOR NETWORKS FIND A FIT IN THE UNLICENSED BAND
EDN, 3/16/2006, Vol. 51 Issue 6, p46-52, 6p; (AN 20235012)
- 26 Ye, W; Heidemann, J; Estrin, D.
An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks
http://www.isi.edu/~weiye/pub/smac_infocom.pdf
- 27 van Dam, T; Langendoen, K.
An Adaptative Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks
Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems - 2003
- 28 Heidemann, John; Govidan, Ramesh
An Overview of Embedded Sensor Networks
Handbook of Networked and Embedded Control Systems, Springer-Verlag. 2004
- 29 IEEE Wireless Standards Zone
Standard 802.15.4
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>
- 30 Pagina Web de la Zigbee Alliance
<http://www.zigbee.org>
- 31 Haroun, I; Lambadaris, I; Hafez, R
Building Wireless Sensor Networks
Microwaves and RF, September 2005
- 32 Pagina Web del proyecto Great Duck Island
<http://www.greatduckisland.net>
- 33 Steel, Doug
Smart Dust
UH ISRC Technology Briefing, March 2005
- 34 Página Web de Crossbow Technology INC.
<http://www.xbow.com>
- 35 Crossbow Technology INC
MPR/MIB User's Manual
Rev. A September 2005, Document 7430-0021-07
- 36 Crossbow Technology INC
Stargate Developer's Guide
Rev. B January 2006, Document 7430-0317-13
- 37 Crossbow Technology INC
Cricket v2 User Manual
MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab, July 2004

- 38 Crossbow Technology INC
TPR2400 Datasheet
Rev. B, Document 6020-0094-01
- 39 Crossbow Technology INC
MTS/MDA Sensor and Data Acquisition Board User's Manual
Rev. A, January 2006, Document 7030-0020-04
- 40 Página Web de TinyOS
Mission Statement
<http://www.tinyos.net>
- 41 Gay, D; Levis,P; Culler, D
Software Design Patterns for TinyOS
Proceedings of the ACM SIGPLAN/SIGBED 2005 Conference on Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems (LCTES'05), Chicago, June 2005.
- 42 Gay, D; Levis, P; Culler, D; von Behren, R; Welsh, M; Brewer, E;
The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems.
Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI), San Diego, June 2003.
- 43 Lee, E. A.; Neuendorffer, S.
IEE Proceedings -- Computers & Digital Techniques
Mar2005, Vol. 152 Issue 2, p239-250, 12p; DOI: 10.1049/ip-cdt:20045065; (AN 17035362)
- 44 Levis, P; Lee, N.
TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks
<http://www.cs.berkeley.edu/~pal/pubs/nido.pdf>
- 45 Crossbow Technology INC
MPR/MIB User's Manual
Rev. A September 2005, Document 7430-0021-07
- 46 Página Web de Decagon Devices Inc.
<http://www.decagon.com>
- 47 Decagon Devices Inc.
Frequently Asked Questions about the ECH2O Soil moisture Probes and Accessories
<http://www.decagon.com/appnotes/echofaq.pdf>
- 48 Campbell, C.
Response of the ECH2O Soil Moisture Probe to Variation in Water Content, Soil, Type, and Solution Electrical Conductivity
http://www.decagon.com/appnotes/echo_analysis.pdf
- 49 Decagon Devices Inc.
ECH₂O Soil Moisture Sensor – Operator's Manual
Version 2.0, 2006

- 50 ChipCon Products From Texas Instruments
2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2420.html>
- 51 Traynor, P; Shin, J; Madan, B; Phoha, S; La Porta, T.
Efficient Group Mobility for Heterogeneous Sensor Networks
www.cse.psu.edu/~traynor/papers/vtc06.pdf
- 52 Datema, S.
A Case Study of Wireless Sensor Network Attacks
<http://pds.twi.tudelft.nl/education/masters/theses/MSc-thesis-Datema.pdf>

