

## 1 Introducción a las redes de sensores inalámbricas

Las tecnologías de redes inalámbricas han tenido un rápido desarrollo en los últimos años. Hemos pasado de los veteranos infrarrojo (*Irda*) para comunicaciones punto a punto a las WPAN de corto alcance y multipuntos como "*BlueTooth*" o las redes de rango de alcance medio multi-saltos como "*ZigBee*". Otras tecnologías inalámbricas que podemos nombrar son, la tecnología WI-FI para redes locales (WLAN), la tecnología "WIMAX" para redes WMAN. También la telefonía celular de largo alcance (GPRS) o el desarrollo de las comunicaciones M2M con tecnología inalámbrica. El desarrollo mas interesante es el de las redes de sensores inalámbricos (WSN), debido a sus múltiples aplicaciones, en distintos sectores (seguridad, media ambiente, industria, agricultura etc.). Los principales analistas tecnológicos, dentro de las tecnologías inalámbricas, valoran las redes inalámbricas de sensores (WSN) como una de las opciones de futuro más prometedora. Fabricantes como Microsoft, Intel, IBM, Motorola y Texas Instruments, por citar algunos, han lanzado líneas de investigación en esta tecnología.

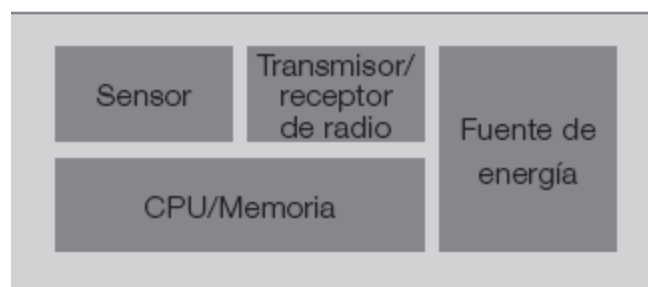
Las redes inalámbricas de sensores (*Wireless Sensor Networks*) también se encuadra dentro de la llamada Inteligencia Ambiental ("*pervasive computing*," "*ambient intelligence*" = *computación ubicua*). El concepto "inteligencia ambiental" es un terreno fronterizo entre los últimos avances en computación ubicua y los nuevos conceptos de interacción inteligente entre usuario y máquina. En el terreno práctico, la inteligencia ambiental consiste en la creación de una serie de objetos de uso cotidiano con cualidades interactivas "suaves" y no invasiva. El objetivo básico de la inteligencia ambiental es el dotar a objetos de capacidades de adquisición de información (tanto del entorno físico como del estado actual del objeto), procesamiento y comunicación, de tal forma que puedan comunicarse entre ellos y ofrecer nuevos servicios a sus usuarios.

## 2 ¿En qué consiste una red de sensores inalámbrica (WSN)?

Las redes inalámbricas de sensores (WSN - *Wireless Sensor Network*), se basan en dispositivos de bajo coste y consumo (nodos) que son capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente, y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación. Los nodos actúan como elementos de la infraestructura de comunicaciones al reenviar los mensajes transmitidos por nodos más lejanos hacia al centro de coordinación.

La red de sensores inalámbricos está formada por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes. Los sensores pueden ser fijos o móviles.

Los dispositivos son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio-transceptor (RF) y un elemento sensor.



Debido a las limitaciones de la vida de la batería, los nodos se construyen teniendo presente la conservación de la energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo ‘durmiente’ (*sleep*) de bajo consumo de potencia.

Las WSN tienen capacidad de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de auto-diagnóstico, auto-configuración, auto-organización, auto-restauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes para solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías.

Las redes de sensores se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), con alta probabilidad de fallo (en los nodos, en la topología), habitualmente construidas *ad-hoc* para resolver un problema muy concreto (es decir, para ejecutar una única aplicación).

### 2.1 Elementos de una red de sensores inalámbrica (WSN)

Dos enfoques se han adoptados. El primero de integrar todos los componentes (sensores, radiotransmisores y micro-controladores) en una sola placa iniciado por *Moteiv Corporation* (ahora *Sentilla*<sup>1</sup>). Tienen un menor costo de producción y resultan más robustos en entornos duros o adversos.

La segunda aproximación comenzada por *Crossbow Technology Inc.*<sup>2</sup> es la de desarrollar una placa con los transceptores que se puede conectar a la placa del micro-controlador. Esta aproximación es más flexible. Los nodos suelen estar formados por una placa de sensores o de adquisición de datos y un “mote o mota” (placa de procesador y transmisión/recepción de radio). Estos sensores se pueden comunicar con un *gateway*, que tiene capacidad de comunicación con otros ordenadores y otras redes (LAN, WLAN, WPAN...) e Internet.

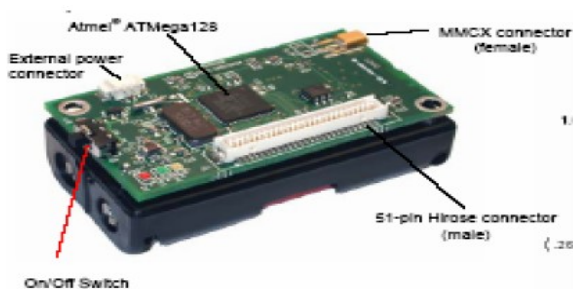
En relación con el *software* que necesitan, existen sistemas operativos específicos, como el TinyOS<sup>3</sup> para sistemas embebidos. Los sistemas de enrutamiento y la seguridad son fundamentales en la estructura de una red inalámbrica de sensores.

#### 2.1.1 Sistema de adquisición de datos

Los sensores son de distinta naturaleza y tecnología. Toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas. En el mercado existen placas con sensores de medida de muy diversos parámetros, como sensores de presión barométrica, GPS, luz, medida de radiación solar, humedad en suelo,

humedad aire, temperatura, sonido, velocidad del viento y un largo etc.

Ejemplos: MTS300/310, sensor capaz de detectar aceleración, luminosidad, micrófono, sonido, magnetómetro, temperatura, y el MTS420 Sensor capaz de detectar temperatura, humedad, luminosidad, es fotosensible a la luz, contiene un barómetro.



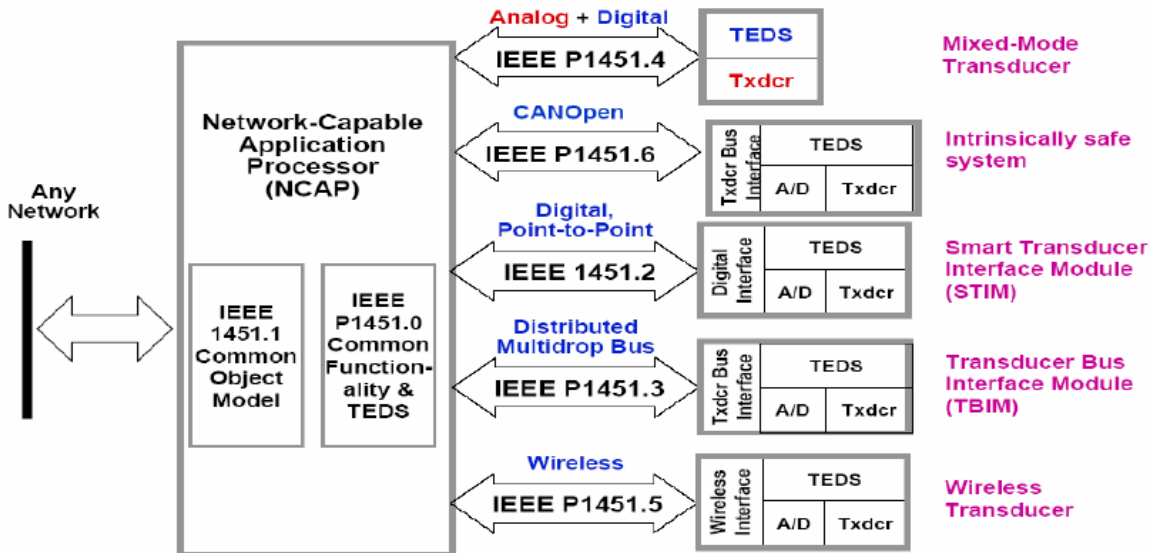
<sup>1</sup> <http://www.sentilla.com/>.

<sup>2</sup> <http://www.xbow.com/>

<sup>3</sup> <http://www.tinyos.net/>

## Wireless Sensor Network

Para entornos de control de sistemas en tiempo real, los transceptores inteligentes cumplen con el estándar IEEE 1451.5 <sup>4</sup>. De normalización de Sensores: Es una familia de estándares propuestos para definir una interfaz para sensores y actuadores, que sea independiente de los protocolos de la red de comunicaciones utilizada. Los transceptores son sensores o actuadores equipados con microcontroladores que les provee de “inteligencia local” y capacidad de comunicación. Diseñado como interfaz entre 802.11 (*WiFi*), 802.15.4 (*Bluetooth*) y 802.15.5 (*ZigBee*).



### 2.1.2 notas

Las notas dotan de procesamiento y de comunicación al nodo sensor. Los procesadores de radio, toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos, y envían la información a la estación base.

Los componentes típicos son:

- Baterías
- Una CPU.
- Memoria Flash
- Memoria separada para datos programas
- Una placa de sensores: luz, humedad, presión, etc.
- Radio para comunicar con otras motas.
- ADC: conversor analógico-digital

Son resistentes a la intemperie y terrenos inhóspitos y capaces de ejecutar una aplicación

Comparación de nodos							
	Btnode3	mica2	mica2dot	micaz	telosA	tmote_sky	EYES
Fabricante	Art of Technology	Crossbow	Crossbow	Crossbow	Imote iv	Imote iv	Univ. of Twente

<sup>4</sup> <http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/>

## Wireless Sensor Network

Comparación de nodos							
Microcontrolador	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 128L	Texas Instruments MSP430	Texas Instruments MSP430	Texas Instruments MSP430
Reloj	7.37 MHz	7.37 MHz	4 MHz	7.37 MHz	8 MHz	7.37 MHz	5MHz
RAM (KB)	64 +180	4	4	4	2	10	2
ROM (KB)	128	128	128	128	60	48	60
Almacenamiento (KB)	4	512	512	512	256	1024	4
Radio	Chipcon CC1000 315/433/868/916 MHz 38.4 Kbauds	Chipcon CC1000 315/433/868/916 MHz 38.4 Kbauds	Chipcon CC1000 315/433/868/916 MHz 38.4 Kbauds	Chipcon CC2420 2.4 GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4 GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4 GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	RFM TR1001 868 MHz 57.6 Kbps
Alcance	150-300 m	150-300 m	150-300 m	75-100 m	75-100 m	75-100 m	75-100 m
Energía	2 AA batteries	2 AA batteries	Coin cell	2 AA batteries	2 AA batteries	2 AA batteries	2 AA batteries
Conector PC	PC-connected programming board	PC-connected programming board	PC-connected programming board	PC-connected programming board	USB	USB	Serial Port
Sistema Operativo	Nut/OS	TinyOS	TinyOS	TinyOS	TinyOS	TinyOS	PEEROS
Transceptores	On acquisition board	On acquisition board	On acquisition board	On acquisition board	On board	On board	On acquisition board
Extras	+ Bluetooth						

### 2.1.3 Gateway

Permiten la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP. Ejemplo: MIB600. Ethernet (TCP/IP) Gateway de la red que sirve a su vez como programador con conexión *ethernet* al que nos podemos conectar desde un PC.

### 2.1.4 Estación base

Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.

## 2.2 Parámetros de una WSN

Los valores principales que caracterizan una red inalámbrica de sensores son los siguientes:

- Tiempo de vida
- Cobertura de la red
- Coste y facilidad de instalación
- Tiempo de respuesta
- Precisión y frecuencia de las mediciones
- Seguridad
- Los valores principales que caracterizan al nodo sensor son los siguientes:
- Flexibilidad
- Robustez
- Seguridad
- Capacidad de comunicación
- Capacidad de computación
- Facilidad de sincronización
- Tamaño y coste
- Gasto de energía

## 2.3 Arquitecturas

El diseño modular es necesario con objeto de poder reutilizar los elementos. Sin embargo, el ser modular conlleva limitaciones de diseño y se ha de tener cuidado para garantizar que las interfaces entre módulos, *hardware* y *software* sean suficientemente general para permitir la portabilidad.

Existen dos arquitecturas:

Arquitectura Centralizada en la que los nodos se comunican únicamente con el *gateway* y a

Arquitectura Distribuida en la que los nodos sensores se comunican sólo con otros sensores dentro de su alcance.

Otro aspecto es la Computación Distribuida, donde los nodos cooperan y ejecutan algoritmos distribuidos para obtener una ÚNICA medida global que el nodo coordinador se encarga de comunicar a la estación base. Los nodos no solo captan la información, sino que además utilizan su capacidad de cómputo para elaborar medidas.

## 2.4 Aplicaciones

Las principales aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas en el campo de la agricultura son las siguientes:

## Wireless Sensor Network

- Monitorización del medio ambiente: Monitorización del tiempo atmosférico y Geo-referenciación, análisis de factores medioambientales en zonas de riesgo (p. ej. cauces fluviales, cultivos...)
- Agricultura de precisión: control de condiciones climáticas, recolección de datos sobre el terreno, control de riegos, suministro de datos para los agricultores, calculo de insumos y de agua
- Agricultura ecológica: medición de niveles de contaminantes, o de sustancias no autorizadas, determinación de ausencia e determinados productos químicos.
- M2M: guía automática de vehículos, gestión de aperos, control robotizado, control de procesos.
- Servicios de Automatización: control de invernaderos, alimentación de animales,
- Sistemas de trazabilidad (RFID): identificación de animales y control sanitarios, alimentación de reses, transporte de animales, inspección de alimentos.

### Otros campos

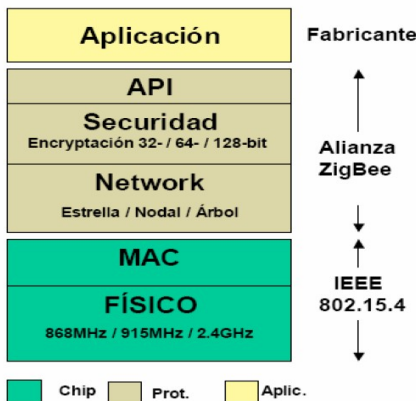
- Medición de características físicas de pacientes (p. ej. temperatura, ritmo cardíaco,...) en entornos hospitalarios o a distancia.
- Control de la seguridad de un perímetro ante posibles intrusos.
- Monitorización continua o esporádica de entornos y situaciones críticas (p.ej. centrales nucleares, bomberos, manejo de sustancias peligrosas,...) o de entornos (p. ej. oficinas, zonas residenciales,...).
- Medición continua de entornos que requieran de unas características ambientales especiales (p. ej. Museos,...).

## 3 Tecnologías inalámbricas estándares y propietarias para sensores inalámbricos

Los estándares inalámbricos más conocidos son para redes LAN el IEEE 802.11b (“WiFi”), para redes PAN, el protocolo IEEE 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002) y IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003). Usan las bandas ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical radio bands*), 902–928 MHz (EEUU), 868 – 870 MHz (Europa), 433.05–434.79 MHz (EEUU y Europa) y 314 – 316 MHz (Japón) y la banda de GHz de 2.400 – 2.4835 GHz (universalmente aceptada).

Comparación entre tecnologías inalámbricas wi-fi, bluetooth, Zigbee			
	WiFi (IEEE 802.11g)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
Radio	DSSS, (direct sequence spread spectrum)	FHSS, (frequency hopping spread spectrum.)	DSSS (direct sequence spread spectrum)
Velocidad	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps
Nº de nodos por master	32	7	64.000
latencia	Up to 3 s	Up to 10 s	30 ms
Tipo de datos	Video, audio, graficos,	Audio, graficos,	Pequeños paquetes de

Comparación entre tecnologías inalámbricas wi-fi, bluetooth, Zigbee			
	WiFi (IEEE 802.11g)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
	película, ficheros	películas, ficheros	datos
Alcance (m)	100	10 (v1.1)	70 - 100
Expansión	Roaming	no	si
Duración batería	12 y 48 horas	1 semana	100 – 1000 días
Costo \$	9	9	9
Complejidad	complejo	Muy complejo	Sencillo
Aplicación Principal	WLAN	WPAN	Control y monitorización
Memoria necesaria	1 MB +	250KB+	4KB – 32 KB
Parámetros mas importantes	Velocidad y flexibilidad	Costes y perfiles de aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste



Las WSN actuales están basadas en el estándar IEEE 802.15.4. *ZigBee* con el protocolo subyacente 802.15.4, que es de tipo más general que WISA, pero con un rendimiento de comunicaciones menor. Incluye multi-salto, lo que implica que un mensaje puede utilizar varios saltos en las ondas de radio para llegar a su destino. Los nodos no tienen asignados intervalos específicos de tiempo, sino que han de competir para acceder al canal. Esto permite el acceso de más usuarios al medio inalámbrico, pero introduce incertidumbre en el sistema, ya que la demora y el consumo de energía aumentan cuando un nodo está esperando su turno. Además, los nodos intermedios desconocen el momento en que pueden ser solicitados para encaminar

paquetes para otros. Por consiguiente, es aconsejable disponer de nodos intermedios.

*ZigBee* resulta ideal para aplicaciones de monitorización de activos.

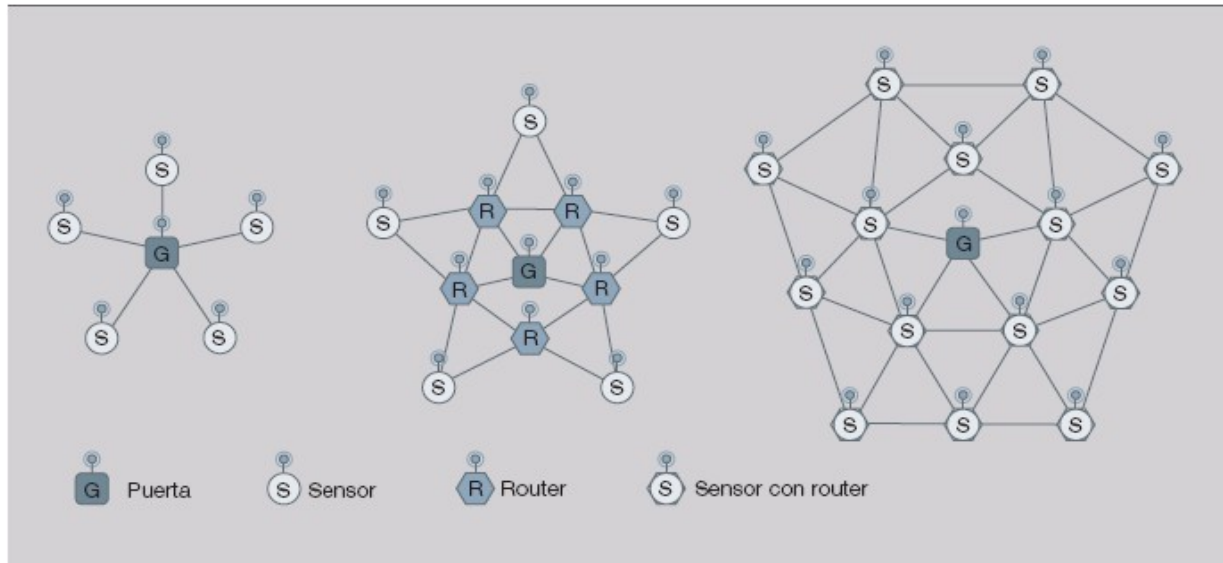
Cuando el número de nodos a interconectar es muy alto, la solución son redes de mas de un nivel con distintas tecnologías (redes híbridas).

También se han desarrollados tecnologías propietarias (*Crossbow Technology* y *Freescale Semiconductor*). Entendemos que los desarrollos futuros deben basarse en estándares.

### 3.1 Topologías

Además de la clásica topología de red mallada de WSN, existen dos topologías. La topología de redes en estrella, los nodos inalámbricos se comunican con un dispositivo de pasarela (*gateway*) que hace de puente de comunicación con una red cableada.

Una solución intermedia emergente y común de WSN es tener dispositivos encaminadores



(*routers*), que comunican con la pasarela. Los sensores sólo necesitan establecer la comunicación punto a punto con los *routers* y por consiguiente, pueden seguir siendo sencillos y de baja potencia, al tiempo que se mejora el rango y la redundancia de la propia red.

## 4 Enrutamiento

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica es que cuando un nuevo nodo, al aparecer en una red, anuncia su presencia y escucha los anuncios *broadcast* de sus vecinos. El nodo se informa acerca de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de encaminarse a través de ellos, a su vez, puede anunciar al resto de nodos que pueden ser accedidos desde él. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y una o más formas de alcanzarlos.

Los algoritmos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricas tienen que cumplir las siguientes normas:

- Mantener una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña
- Elegir la mejor ruta para un destino dado (ya sea el más rápido, confiable, de mejor capacidad o la ruta de menos coste)
- Mantener la tabla regularmente para actualizar la caída de nodos, su cambio de posición o su aparición
- Requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger

### MODELOS DE ENRUTAMIENTO

Existen varios tipos de protocolos de enrutamiento.

#### Protocolo de Difusión directa (modelo de un salto)

Este es el modelo más simple y representa la comunicación directa. Todos los nodos en la red transmiten a la estación base. Es un modelo caro en términos de consumo energético, así como inviable porque los nodos tienen un rango de transmisión limitado. Sus transmisiones no pueden siempre alcanzar la estación base, tienen una distancia máxima de radio, por ello la comunicación directa no es una buena solución para las redes inalámbricas.

#### Modelo Multi-salto (*multi-hops*)

En este modelo, un nodo transmite a la estación base reenviando sus datos a uno de sus vecinos, el



cual está más próximo a la estación base, a la vez que este enviará a otro nodo más próximo hasta que llegue a la estación base. Entonces la información viaja de la fuente al destino salto a salto desde un nodo a otro hasta que llega al destino. En vista de las limitaciones de los sensores, es una aproximación viable. Un gran número de protocolos utilizan este modelo, entre ellos todos los MultiHop de Tmote Sky y Telos: MultiHop LQI, MintRoute.

### **Modelo esquemático basado en clústeres**

Algunos protocolos usan técnicas de optimización para mejorar la eficacia del modelo anterior. Una de ellas es la agregación de datos usada en todos los protocolos de enrutamiento basados en clústeres. Una aproximación esquemática rompe la red en capas de clústeres. Los nodos se agruparán en clústeres con una cabeza, la responsable de enrutar desde ese clúster a las cabezas de otros clústeres o la estación base. Los datos viajan desde un clúster de capa inferior a uno de capa superior. Aunque, salta de uno a otro, lo está haciendo de una capa a otra, por lo que cubre mayores distancias. Esto hace que, además, los datos se transfieran más rápido a la estación base. Teóricamente, la latencia en este modelo es mucho menor que en la de *MultiHop*. El crear clústeres provee una capacidad inherente de optimización en las cabezas de clúster. Por tanto, este modelo será mejor que los anteriores para redes con gran cantidad de nodos en un espacio amplio (del orden de miles de sensores y cientos de metros de distancia).

### **Protocolos centrados en el dato (*Data-centric*)**

Si tenemos un número enorme de sensores, es difícil identificar de que sensor queremos obtener un dato. De una determinada zona. Una aproximación es que todos los sensores envíen los datos que tengan. Esto causa un gran despilfarro de energía. En este tipo de protocolo, se solicita el dato de una zona y espera a que se le remita. Los nodos de la zona negocian entre ellos la información más válida. Solo esta es enviada, con el consiguiente ahorro de energía.

### **Protocolo basado en localización**

Se explota la posición de los sensores para encaminar los datos en la red.

## **5 Sistemas Operativos**

Existe una amplia oferta de sistemas operativos para los microcontroladores. Los principales ejemplos los relacionamos a continuación.

### **Bertha (*pushpin computing platform*)**

Una plataforma de software diseñada e implementada para modelar, testear y desplegar una red de sensores distribuida de muchos nodos idénticos. Sus principales funciones se dividen en los siguientes subsistemas:

- Administración de procesos
- Manejo las estructuras de datos
- Organización de los vecinos
- Interfaz de Red

### **Nut/OS**

Es un pequeño sistema operativo para aplicaciones en tiempo real, que trabaja con CPUs de 8 bits. Tiene las siguientes funciones:

- Multihilo
- Mecanismos de sincronización
- Administración de memoria dinámica
- Temporizadores asíncronos

## Wireless Sensor Network

- Puertos serie de Entrada/Salida

Está diseñado para procesadores con los siguientes recursos:

- 0.5 kBytes RAM
- 8 kBytes ROM
- velocidad de 1 MIPS CPU

### **Contiki**

Es un Sistema Operativo de libre distribución para usar en un limitado tipo de computadoras, desde los 8 bits a sistemas embebidos en microcontroladores, incluidas motas de redes inalámbricas.

### **CORMOS: (*Communication Oriented Runtime System for Sensor Networks*)**

Específico para redes de sensores inalámbricas como su nombre indica.

### **eCos: (*embedded Configurable operating system*)**

Es un sistema operativo gratuito, en tiempo real, diseñado para aplicaciones y sistemas embebidos que sólo necesitan un proceso. Se pueden configurar muchas opciones y puede ser personalizado para cumplir cualquier requisito, ofreciendo la mejor ejecución en tiempo real y minimizando las necesidades de *hardware*.

### **EYESOS**

Se define como un entorno para escritorio basado en Web, permite monitorizar y acceder a un sistema remoto mediante un sencillo buscador.

### **MagnetOS**

Es un sistema operativo distribuido para redes de sensores o adhoc, cuyo objetivo es ejecutar aplicaciones de red que requieran bajo consumo de energía, adaptativas y fáciles de implementar.

### **MANTIS (*Multimodal Networks In-situ Sensors*)**

### **TinyOS**

El sistema operativo TinyOS, es un reducido núcleo multitarea, útil para pequeños dispositivos, tales como los motas. Es un sistema operativo “*event-driven*”, quiere decir que funciona a partir de eventos producidos que llamarán a funciones. Ha sido desarrollado para redes de sensores con recursos limitados. El entorno de desarrollo de TinyOS soporta directamente la programación de diferentes microprocesadores y permite programar cada tipo con un único identificador para diferenciarlo, o lo que es lo mismo se puede compilar en diferentes plataformas cambiando el atributo.

El sistema Tinyos, sus librerías y aplicaciones, está escrito en *nesC*, una versión de C que fue diseñada para programar sistemas embebidos. En *nesC*, los programas están compuestos por componentes que se enlazan para formar un programa completo.

Los componentes se enlazan a través de sus interfaces. Estas interfaces son bidireccionales y especifican un conjunto de funciones que están implementadas bien por los proveedores o bien por los que la utilizan. *NesC* esperará que el código que va a ser generado cree un programa con un ejecutable que contenga todos los elementos del mismo, así como los manejadores de las interrupciones de programas de más alto nivel.

TinyOS tiene las siguientes características:

- Pequeño núcleo de *footprint* (huella del ejecutable del SO) de 400bytes entre código y datos
- Arquitectura basada en componentes
- Capas de abstracción bien establecidas, limitadas claramente a nivel de interfaces, a la vez que se pueden representar los componentes automáticamente a través de diagramas
- Amplios recursos para elaborar aplicaciones
- Adaptado a los recursos limitados de los motas: energía, procesamiento, almacenamiento y

ancho de banda

- Operaciones divididas en fases (*Split-phase*)
- Dirigido por eventos (*Event Driven*): reacciona ante sensores y mensajes
- Concurrencia de tareas y basada en eventos
- Implementación en *nesC*
- Las interfaces realizan servicios,
- Interfaces bidireccionales, con comandos y eventos
- Los comandos los implementa el proveedor
- Los eventos son implementados por el usuario
- Un módulo implementa una interfaz
- Los componentes proveen y usan interfaces (representado en el código por las etiquetas “*provide and use*”)
- Una configuración enlaza las interfaces internas y externas (*wire*)
- Una aplicación consiste en una configuración de alto nivel y todos los módulos asociados

### T-Kernel

Es un sistema operativo que acepta las aplicaciones como imágenes de ejecutables en instrucciones básicas. Por ello, no importará si está escrito en C++ o lenguaje ensamblador.

### LiteOS

Sistema operativo desarrollado en principio para calculadoras, pero que ha sido también utilizado para redes de sensores.

**FreeRTOS**<sup>5</sup> Usado típicamente para aplicaciones integradas, tiene las siguientes características:

- No utiliza mucha memoria
- Cualquier evento en el soporte físico puede hacer que se ejecute una tarea
- Multi-arquitectura (puertos de código para otro tipo de UCP)
- Muchos tienen tiempos de respuesta predecibles para eventos electrónicos

## 6 Lenguajes de programación

La programación de sensores es complicada, entre otras dificultades está la limitada capacidad de cálculo y la cantidad de recursos. Y así como en los sistemas informáticos tradicionales encontramos entornos de programación prácticos y eficientes para depurar código, simular... en estos microcontroladores todavía no hay herramientas comparables.

Podemos encontrar lenguajes como:

- *nesC*: lenguaje que utilizamos para nuestras motas, y que está directamente relacionado con TinyOS.
- *Protothreads*: específicamente diseñado para la programación concurrente, provee hilos de dos bytes como base de funcionamiento.
- *SNACK*: facilita el diseño de componentes para redes de sensores inalámbricas, sobre todo cuando la información o cálculo a manejar es muy voluminoso, complicado con *nesc*, este lenguaje hace su programación más fácil y eficiente. Luego es un buen sustituto de *nesc* para crear librerías de alto nivel a combinar con las aplicaciones más eficientes.
- *c@t*: iniciales que hincan computación en un punto del espacio en el tiempo (*Computation at a point in space (@) Time*)
- *DCL*: Lenguaje de composición distribuido (*Distributed Compositional Language*)
- *galsC*: diseñado para ser usado en TinyGALS, es un lenguaje programado mediante el

---

5 <http://www.freertos.org/>

modelo orientado a tarea, fácil de depurar, permite concurrencia y es compatible con los módulos nesc de TinyOS

- SCTL(*Sensor Query and Tasking Language*): como su nombre indica es una interesante herramienta para realizar consultas sobre redes de motas.

## 7 Seguridad

La seguridad en estas redes no está resuelta. El término inalámbrico está asociado a “poco fiable e inseguro”. Dado que la tecnología es inherentemente insegura debido a su estrecha relación con el entorno físico (un nodo sensor puede ser fácilmente accesible, y los datos son enviados a través de un medio inalámbrico), es necesaria la creación de servicios de seguridad que permitan asegurar la robustez y la fiabilidad de estos sistemas, tales como:

- Primitivas de seguridad e Infraestructuras de claves,
- Sistemas de auto-control (p. ej. Sistemas de auditoria e IDS),
- Protocolos de funcionamiento seguro, etc.

## 8 Eficiencia energética

El objetivo de la eficiencia energética es maximizar el tiempo de vida de la red al mismo tiempo que la aplicación cumple con sus requisitos de QoS. Las mejoras tecnológicas que permiten aumentar la capacidad de las baterías progresan despacio. Esto quiere decir que la eficiencia energética seguirá siendo un reto para este tipo de redes en el futuro próximo.

Diseñar los nodos para un bajo consumo supone elegir componentes de baja potencia. El primer parámetro a considerar es los consumos de energía de la CPU, el sensor, el radio-transceptor y,

posiblemente, de otros elementos, como la memoria externa y los periféricos durante el modo normal de operación.

La elección de elementos de baja potencia implica normalmente aceptar compromisos sobre el rendimiento medio. Por regla general, una CPU de baja potencia opera en un ciclo reducido de reloj, con menos características en el chip que otras unidades homólogas que consumen más energía.

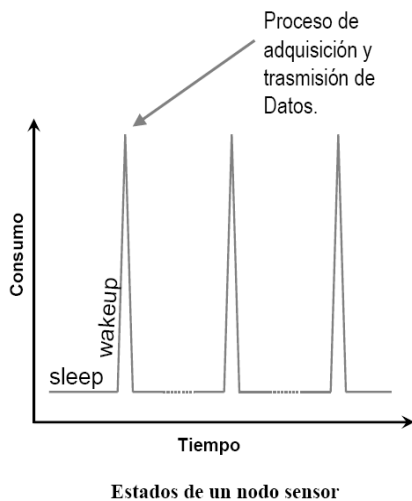
La optimización del consumo de energía en los nodos para lograr el máximo tiempo de vida de la red, es un objetivo básico. Los elementos a considerar son:

La comunicación es el primer consumidor de energía.. Un sistema distribuido significará que algunos sensores necesitarán comunicarse a través de largas distancias, lo que se traducirá en mayor consumo. Por ello, es una buena idea el procesar

localmente la mayor cantidad de energía, para minimizar el número de bits transmitidos.

CPU es capaz de quedar en estado “*sleep*” mientras “no tenga nada que hacer”. El envío de datos desde los nodos puede ser de tres formas: de modo continuo en los intervalos establecidos, dirigido por eventos (envía cuando se cumple cierta condición,) o dirigido por consulta (solo cuando se le solicita). También hay sistemas híbridos que utilizan una combinación de los antes mencionados.

- Economizar la distancia de las comunicaciones.
- Técnicas de *software*: programación eficiente de líneas de código.
- Protocolos de enrutamiento



## Wireless Sensor Network

- Estrategias *hardware* de ahorro de energía.

Para el ahorro de energía los nodos pasan por estos estados:

- *sleep*:
  - El nodo pasa la mayor parte del tiempo en este estado sin actividad
- *Wakeup*:
  - Debemos de minimizar este tiempo para pasar rápidamente al estado de trabajo
- *Active*:
  - Debe estar el mínimo período de tiempo de trabajo y retornar de inmediato al estado *sleep*

## 9 Obstáculos y retos

Los principales obstáculos/retos a los que se enfrenta el desarrollo de esta tecnología son los que comentamos en las siguientes líneas.

No existe una tendencia clara en los Sistemas Operativos ni en plataforma *hardware*.

Las redes de sensores inalámbricas son un campo que cuenta con pocos grupos de investigación en el territorio nacional. Esto contrasta con la actividad existente en otros países, principalmente en Estados Unidos y Asia.

Estamos ante una “tecnología” bastante reciente, no hay empresas con personal cualificado y experto.

### 9.1 Heterogeneidad

Se realizan soluciones *ad-hoc* para redes *ad-hoc*. WSN tienen problemas de heterogeneidad de *hardware*, interoperabilidad, incompatibilidad, y sistemas operativos diferentes. Ej: una mote mica2 es incapaz de comunicarse con una mote micaZ.

Falta de estándares y protocolos comunes que permitan a las aplicaciones interoperar.

Inexistencia de APIs estándar (para la portabilidad de las aplicaciones).

### 9.2 Las redes

Topología muy dinámica de la red:

- Elementos móviles.
- Nodos con alta probabilidad de fallo
- Nodos que entran en el sistema
- Cuantos más nodos en la red mayor será el rendimiento.

Falta de fiabilidad de las redes inalámbricas

Complejidad y alto costo para cubrir áreas muy extensas como es el caso de su aplicación a la agricultura.

Ancho de banda limitado.

### 9.3 Algoritmos

Algoritmos distribuidos donde todos los nodos sean capaces de cooperar para alcanzar un objetivo global mediante la comunicación con nodos próximos y elaborar una respuesta, tomando en cuenta las capacidades de los nodos (p.e. Energía). Los Algoritmos distribuidos mejoran la escalabilidad y la robustez.

- Algoritmos adaptativos que permiten equilibrar la calidad de los resultados con el uso de los recursos para lograr eficiencia y maximizar el tiempo de vida de WSN.
- Mejorar el uso de los recursos: energía, CPU, comunicaciones, etc.
- Realizar caché de datos en nodos intermedios, agregación de datos, etc.
- Generalmente basado en roles.

### 9.4 Características deseables

Es necesaria la adecuación de la tecnología a sus aplicaciones y a los usuarios de esas aplicaciones, debido a su estrecha relación con campos tecnológicos lejanos a las ciencias de la computación. De esta forma, deben existir herramientas que permitan su configuración, utilización y mantenimiento a usuarios (p. ej. biólogos) en vez de expertos.

- Que las redes WSN sean fácilmente reprogramables:
  - Una única aplicación en la red
  - Instalación de nuevos binarios o paso de nuevos parámetros en los “nodos” sin necesidad de acceder físicamente a la red.
- Que las redes WSN sean fácilmente repobladas por:
  - Fallo de nodos (baterías, condiciones extremas, etc.).
  - Fallos en la topología, conectividad, particiones en la WSN, movilidad de los nodos, etc.
- Requisitos de adaptabilidad / flexibilidad
  - Dinamismo de la red.
  - Necesidades de cambiar protocolos.
- Comunicación libre de direcciones, orientada a datos no a direcciones:
  - ¿Cuál es la temperatura del sensor 16?
  - Posiciones donde la temperatura excede de un valor.

## 10 Normas para la Industria agroalimentaria

En entornos industriales se utiliza típicamente el protocolo de Interconexión inalámbrica para sensores y actuadores (WISA, *Wireless Interface to Sensors and Actuators*). El alto rendimiento se puede atribuir a dos factores: salto simple y multiplexación por división en el tiempo (TDM). El primer factor evita demoras en los nodos intermedios, el segundo garantiza que sólo habrá un nodo en el canal, es decir, que no habrá colisiones.

Actualmente hay varias iniciativas en curso que buscan normalizar WSN para el uso industrial.

Una de las más conocidas es la norma *ZigBee*, que es una especificación inalámbrica de baja potencia, bajo coste y baja velocidad de transferencia de datos, destinada a electrodomésticos, juguetes, aplicaciones industriales y otras similares.

Otra importante iniciativa, la especificación inalámbrica HART<sup>6</sup>, tiene como objetivo extender este famoso estándar al dominio inalámbrico y abrir el mercado al gran número de usuarios HART. Esta iniciativa especificará perfiles y casos prácticos en los que se podrá aplicar directamente el control inalámbrico.

La tercera iniciativa en marcha es la norma ISA-SP100<sup>7</sup>. En vez de normalizar todos los elementos del sistema, ISASP100 especifica sólo los niveles superiores de la pila, con varias

6 <http://www.hartcomm.org>

7 <http://www.isa.org>

implementaciones posibles a nivel inferior.

Existe una asociación para impulsar la implantación de soluciones inalámbricas en el entorno industrial WINA (*wireless Industrial networking alliance* <sup>8</sup>).

## 11 Líneas Futuras

Las demanda de seguridad alimentaria (calidad, salubridad y seguridad de los alimentos) en la agricultura y en los alimentos ecológicos, unido a la obligatoriedad de las inspecciones, aseguran una amplia implementación de esta tecnología en el ámbito de la agricultura.

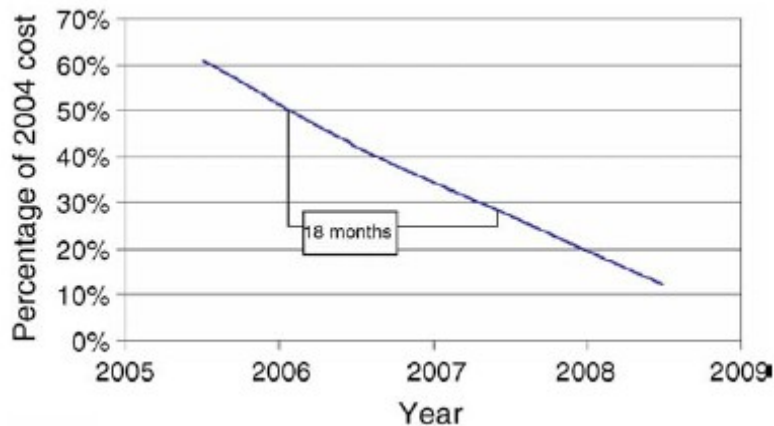
La obligación de la trazabilidad, que requieren inspecciones rigurosas, etiquetado, registro y detección sistemática de los parámetros de calidad y seguridad en toda la cadena alimentaria desde el campo al consumidor.

La tecnología RFID es considerado el sistema mas efectivo para implantar un sistema real de trazabilidad. La combinación de las redes de sensores inalámbricos y de la tecnología RFID, que registren las medidas medioambientales y parámetros de calidad y seguridad alimentaria tendrán un gran desarrollo en un próximo futuro.

Hay mucho por hacer a todos los niveles:

- Físico
- Computación: sistemas operativos, algoritmos distribuidos, *middleware*, etc.
- Comunicación: protocolos de enrutamiento, mantenimiento de topología, descubrimiento de vecinos, etc.
- Existen simuladores que permiten realizar comparaciones de protocolos, algoritmos, pruebas de rendimiento, etc.

Líneas a seguir:



- Arquitectura WSN.
- Middleware WSN.
- Técnicas para minimizar la disipación de energía de un nodo.
- Protocolos de enrutamiento óptimo.
- Seguridad en WSN
- Abstracción de la WSN: WWW, BBDD, Sistema de Ficheros.
- Mecanismos de

asignación de roles dinámicamente a nodos en una WSN para algoritmos distribuidos.

Costo de los sensores inalámbricos bajan un 50% cada 18 meses. En un futuro, la Nanotecnología, MEMS, acabarán con la limitación de recursos como CPU o memoria. Pero persistirá la limitación de energía.

Dada la práctica inexistencia de empresas dedicadas a trabajar con esta tecnología, existe un nicho de mercado donde las compañías españolas podrían conseguir una posición predominante en el mercado mundial.

Desde el punto de vista académico, esta tecnología esta atravesando actualmente una fase de

---

<sup>8</sup><http://wina.org/>

migración de sistemas prototipo a aplicaciones reales. Por lo tanto, todos los descubrimientos que se realicen respecto al uso y aplicabilidad de las redes de sensores resultará en beneficios tanto tangibles (patentes) como intangibles (colaboraciones internacionales) a corto y medio plazo.

### 12 Redes de sensores y la agricultura ecológica

Las redes inalámbricas de sensores permiten dar a conocer de forma inmediata a un sistema informático, las características físicas, tales como temperatura, humedad, luz, nivel de sonido, radiación, movimiento, etc., de un determinado entorno.

En nuestro caso, el interés por estas tecnologías se centra en sus aplicaciones en la agricultura y más exactamente en la agricultura ecológica. Campo en el que hay enormes posibilidades, pero que actualmente hay pocas aplicaciones desarrolladas. Las redes de sensores inalámbricos pueden llegar a ser un subsistema de los experimentos en ecología.

La ecología investiga sobre procesos y patrones que relacionan a los seres vivos con su entorno. Para entender estas relaciones y los cambios que producen la alteración de cualquier parámetro, requiere la observación durante meses. El poder registrar de modo simultáneo, distintos parámetros en distintas ubicaciones, le aporta un enorme potencial a las WSN para realizar modelos y predicciones sobre medio ambiente y agricultura. La capacidad de recolectar gran cantidad de datos exactos de modo espacial y temporalmente distribuido, durante periodos relativamente largos, proporciona unas posibilidades desconocidas hasta ahora. Las variables espacio y tiempo son fundamentales en los modelos ecológicos. Algunos experimentos requieren que los datos se obtengan cada unos pocos segundos y otros necesitan obtenerse cada unos pocos días. La obtención de datos puede ser también disparada por algún estímulo ambiental (alarma).

Los sensores inalámbricos permiten disponer de cientos incluso miles de dispositivos tomando datos de una manera no invasiva y con bajo costo.

Para extender una red de sensores en el ámbito de la agricultura, obviamente la opción inalámbrica es mas adecuada por cuestiones de costos (entre un 40 -80 % de ahorro), y por razones de movilidad de ubicaciones.

Para el control de la trazabilidad, en explotaciones de agricultura ecológica., las redes de sensores tienen un campo de desarrollo muy grande. Las redes de sensores son la única alternativa tecnológica para certificar de manera segura los procedimientos necesarios para las certificaciones de productos ecológicos, al garantizar la exactitud y veracidad de los datos suministrados por los sensores de forma continua y en tiempo real.

### 13 Empresas que comercializan soluciones WSN

Empresas dedicadas a la comercialización de los nodos sensores.

**Csiro**<sup>9</sup>: Empresa Australiana especializada en sensores de exterior. Ejemplo de producto FLECK, con 500 m de alcance y paneles solares para dotarlos de energía.

#### En EE.UU

**Crossbow**<sup>10</sup>: Especializada en el mundo de los sensores, es una empresa que desarrolla plataformas hardware y software que dan soluciones para las redes de sensores inalámbricas. Entre sus

9 <http://www.sensornets.csiro.au/frontpage.htm>

10 <http://www.xbow.com>



## Wireless Sensor Network

productos encontramos las plataformas Mica, Mica2, Micaz, Mica2dot, telos y telosb.

**Moteiv**<sup>11</sup>: Joseph Polastre, antiguo doctorando de un grupo de trabajo de la Universidad de Berkeley formó la compañía Moteiv. Ha desarrollado la plataforma Tmote Sky y Tmote Invent.

**SensorWare Systems, Inc**<sup>12</sup>. Desarrollo de sensores acceso TCP/IP e Internet.

**Millennial Net, Inc.**<sup>13</sup>

**Dust Networks Inc.**<sup>14</sup>

**Melexis Microelectronic Systems**<sup>15</sup>

**Grape Networks, Inc.**<sup>16</sup> Soluciones para viñas de redes de sensores inalámbricos.

## En Europa

**Scatterweb**<sup>17</sup>: Empresa alemana de soluciones de redes de sensores inalámbricas. Colabora con Freie Universität Berlin.

**Particle Computer**<sup>18</sup>: Redes de sensores inalámbricos, aplicaciones industriales. Spin-off de TecO, del departamento de la Universidad de Karlsruhe with con relaciones con SAP Research,

**Shockfish s.a.**<sup>19</sup>:

Empresa suiza que desarrolla TinyNode.( <http://www.tinynode.com/>). A partir de este tipo de mota en Laussane han llevado un proyecto en el que implementan una red de sensores en todo el campus de la “Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne”.

## España

**Dexma Sensors**<sup>20</sup>:

Es una empresa de ingeniería tecnológica especializada en [redes de sensores inalámbricas y conexiones M2M inalámbricas en los sectores de la logística/transportes, hospitales, agricultura y emergencias. Dexma Sensors empezó sus operaciones a mediados del año 2006, con fuertes raíces en la Universidad Politécnica de Cataluña, concretamente con el departamento de Arquitectura de Computadores de la Facultad de Informática de Barcelona. Durante el mismo año Dexma Sensors ganó el segundo premio en el Sexto Concurso de Ideas de Negocio organizado por el CIDEM y el Programa Innova, el jurado resalto el alto potencial del equipo emprendedor, así como la innovación y viabilidad técnica del proyecto.](#)

Entre otros productos tiene **dexAgro** es una solución de monitorización inalámbrica orientada al control medioambiental y sistema de riego inteligente. Características generales:

- Rápido despliegue de decenas de nodos inalámbricos.
- Actuación en zonas de gran extensión de terreno, hasta miles de hectáreas.
- Posibilidad de creación de distintas zonas de monitorización: por cultivo, por riego, por

---

11 <http://www.moteiv.com>

12 <http://www.sensorwaresystems.com/>

13 <http://www.millennial.net>

14 [www.dust-inc.com](http://www.dust-inc.com)

15 <http://www.melexis.com>

16 <http://www.grapenetworks.com/>

17 <http://www.scatterweb.com>

18 <http://www.particle-computer.de>

19 <http://www.shockfish.com/>

20 <http://www.dexmasensors.com/index.php>

## Wireless Sensor Network

localización, etc.

- Cada nodo incorpora sensores de temperatura y humedad, así como inputs para la conexión con otros sistemas de monitorización o sensores.
- Baterías con una vida útil superior a 1 año con una frecuencia de monitorización de pocos minutos.
- Capacidad de comunicación vía GPRS.
- Conexión opcional: placas solares.

**Wireless Sensor Networks Valencia S.L**<sup>21</sup>: nace en el año 2006 como una *spin-off* del instituto ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia. Su propósito principal se centra en proporcionar a desarrolladores y usuarios finales el acceso a las nuevas tecnologías basadas en redes inalámbricas de sensores. Producto **WSN TH Nodo básico** dotado de un sensor de temperatura y humedad. Especialmente diseñado para exteriores, es adecuado para aplicaciones de monitorización medioambiental, agricultura de precisión (en la actualidad se está aplicando a viticultura) control de invernaderos, detección de incendios forestales, etc. Asimismo, también es adecuado para aplicaciones domóticas (gestión de calefacción y Aire acondicionado), tanto en entornos domésticos como en oficinas, fábricas, etc

**MiraQuéBien! sl**<sup>22</sup>: una empresa nacida en 2007 para el desarrollo y la comercialización de tecnología destinada a la apicultura. Principal proyecto es el desarrollo de una herramienta de monitorización remota de colmenas basada en el análisis del sonido. Es un empresa que está siendo apoyada para su nacimiento y consolidación por la Fundación Madri+d, dentro del marco de su programa de apoyo a emprendedores. Su apoyo fue fundamental para el primer impulso a través de la convocatoria del premio de ideas empresariales de base tecnológica, que ganamos y con cuya dotación pudimos hacer el primer prototipo y el estudio de viabilidad técnica. Por otra parte, el proyecto de monitorización está siendo desarrollado en colaboración con la Universidad de Murcia y La Universidad de Córdoba (España) a través de un proyecto conjunto de lucha contra varroa que está siendo financiado por el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación a través del Plan Apícola Nacional

**OpenGate Systems S.L**<sup>23</sup>. Es una empresa de Tecnologías de la Información presente e el mercado con un objetivo: unir el mundo de las comunicaciones inalámbricas (GSM, GPRS, UMTS) con el mundo industrial del telecontrol y de la telemetría: M2M. Constituida en 2007, OpenGate Systems parte con las referencias de clientes que están haciendo uso de su producto Opengate.

## Otras Empresas

**Wiseconn (chile)**<sup>24</sup> Soluciones para la agricultura El área Agrícola de WiseConn ofrece productos para el monitoreo integral de predios frutícolas y control de riego y fertirrigación. Actualmente se esta trabajando en una nueva aplicación de monitoreo, SIMAP: Sistema Inalámbrico de

---

21 . <http://www.wsnval.com/>

22 <http://www.miraquebien.com/mqb/>

23 <http://www.opengate.es/>

24 <http://www.wiseconn.cl/wisefield.html>

## Wireless Sensor Network

mantenciones predictivas.

**Xsilogy Solutions**<sup>25</sup>: Es una compañía que provee WSN para las siguientes aplicaciones comerciales: organización de inventario de tanques, sistemas de distribución de flujos, edificios comerciales, monitorización medioambiental, defensa del hogar, etc.

**ENSCO**<sup>26</sup>: Investiga con WSN para aplicaciones meteorológicas.

**EMBER**<sup>27</sup>: Provee soluciones con WSN para automatización industrial, defensa y edificios inteligentes.

**H900 Wireless SensorNet System(TM)**<sup>28</sup>: El primer sistema de enrutamiento de malla inalámbrico para sensores, desarrollado por la compañía Snsicast Systems. Sus aplicaciones van desde la electricidad a la seguridad del hogar.

**SOFTLINX**<sup>29</sup>: Desarrolla productos de seguridad perimetral basada en sensores.

**XYZ**<sup>30</sup>: Integra redes de sensores inalámbricas para el control de entornos en el interior de edificios.

**J:apan's Omron Corp**<sup>31</sup>: Ha elaborado una red de sensores para naves de carga que provee un sistema de seguridad en los puertos.

## 14 Enlaces

Enlace con resumen de empresas, estándares, fuentes de información e investigación en redes inalámbricas.

- <http://www.ictmarkets.com/>

Proyecto de desarrollo con open source

<http://www.open-zb.net/>

Congreso agricultura y computers normalizacion

- <http://www.wcca2006.org/program.htm>

IEEE802.15.4

<http://www.ieee802.org/15/>

<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>

ZigBee Alliance,

<http://www.zigbee.org>

Wireless HART working Group Communication Foundation,

- <http://www.hartcomm.org>

ISA-SP100,

- <http://www.isa.org>

---

25 <http://www.xsilogy.com/home/main/index.html>

26 <http://www.in-q-tel.com/tech/dd.html>

27 <http://www.ember.com>

28 <http://www.sensicast.com>

29 <http://www.softlinx.com>

30 <http://www.cbe.berkeley.edu/research/briefswirelessxyz.htm>

31 <http://www.omron.com>

## Wireless Sensor Network

### Wireless Industrial networking alliance

- <http://wina.org/>

### Estandar 1451 sistemas de tiempo real

- <http://ieee1451.nist.gov/>
- [http://www.smartsensorsystems.com/What\\_does\\_IEEE\\_1451\\_do.htm](http://www.smartsensorsystems.com/What_does_IEEE_1451_do.htm)
- <http://grouper.ieee.org/groups/1451/5/>

### IETF The Internet Engineering Task Force

- <http://www.ietf.org/>

### Wireless Communications Alliance

- <http://www.wca.org/>

eSEC es la Plataforma Tecnológica Española de Tecnología para la Seguridad y Confianza. [http://www.aetic.es/CLI\\_AETIC/ftpportalweb/documentos/esec\\_aei\\_fin.pdf](http://www.aetic.es/CLI_AETIC/ftpportalweb/documentos/esec_aei_fin.pdf)