

Protección activa contra la siniestralidad laboral

Soluciones para la monitorización de trabajadores en obra mediante

TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

Por **RAMÓN GONZÁLEZ CARVAJAL**. Dr. Ingeniero Industrial y Catedrático de Tecnología Electrónica (carvajal@us.es). Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
Co-autores: **V. PÉREZ MIRA**. Ingeniero Técnico Industrial, Técnico Superior PRL y Máster en Microelectrónica. **D. DAZA REBOLLO**. Ingeniero de Telecomunicación y Máster en Ingeniería Electrónica. **J. CARRILLO CASTRILLO**. Ingeniero Industrial, Máster en *Manufacturing Engineering* y Técnico Superior PRL.

La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, y sus posteriores modificaciones, establece en su artículo 14 que «los trabajadores tienen derecho a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo. El citado derecho supone la existencia de un correlativo deber del empresario de protección de los trabajadores frente a los riesgos laborales». Asimismo, en dicho artículo se establece que «el empresario desarrollará una acción permanente de seguimiento de la actividad preventiva con el fin de perfeccionar de manera continua las actividades de identificación, evaluación y control de los riesgos que no se hayan podido evitar y los niveles de protección existentes y

La prevención activa puede implementar diferentes barreras de seguridad. El estado de la técnica de los sistemas de inteligencia ambiental permite construir sistemas inteligentes que, mediante la utilización de redes de sensores inalámbricos, son capaces de identificar peligros y evaluar riesgos, ayudando en la adopción de medidas preventivas de forma activa y en tiempo real. El trabajo de investigación consiste en el diseño de una solución de toma de decisiones en tiempo real, capaz de identificar una situación de riesgo y decidir la medida preventiva apropiada, así como de detectar si el trabajador ha sufrido un accidente y facilitar la evacuación. Se ha realizado un análisis de las tecnologías disponibles y se ha configurado una solución que se ha implementado en un sistema prototipo. El prototipo se ha validado y sus funcionalidades se han verificado en un escenario real.

dispondrá lo necesario para la adaptación de las medidas de prevención señaladas en el párrafo anterior a las modificaciones que puedan experimentar las circunstancias que incidan en la realización del trabajo».

Esta adaptación a las situaciones de riesgo, en un entorno cambiante como es una obra de construcción, constitu-

ye una importante dificultad. También en el artículo 15 se recoge entre los principios de la acción preventiva «tener en cuenta la evolución de la técnica», lo que supone de facto una necesidad de innovación continua que permita al empresaria adoptar las tecnologías que puedan mejorar la prevención de los riesgos laborales.



LatinStock

El presente trabajo incorpora las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) a la mejora de los sistemas de prevención, definiendo nuevas herramientas tecnológicas que aporten mejores soluciones al control de la siniestralidad.

El índice de incidencia del sector de la construcción es el mayor en España: 8.232 accidentes por cada 100.000 trabajadores afiliados. Del análisis de las causas de accidente mortal, realizado en el estudio *Análisis de la mortalidad por accidente de trabajo en España 2005-2007*, elaborado por el INSHT⁽¹⁾ en colaboración con comunidades autónomas, se observan, entre otras, como principales las siguientes:

- Ausencia/deficiencia de protecciones colectivas frente a caída de personas.
- Formación/información inadecuada, inexistente sobre riesgos o medidas preventivas.
- No utilización de prendas de protección individual puestas a disposición por la empresa y de uso obligatorio.
- Instrucciones inexistentes, confusas, contradictorias o insuficientes.
- Incumplimiento de procedimientos e instrucciones de trabajo.

Un sistema capaz de mejorar la identificación del uso de EPIS y de la presencia del trabajador en zonas restringidas, que permita controlar su situación y estado y que le proporcione información en tiempo real de los riesgos, supone un avance técnico que implementaría barreras de seguridad en los escenarios de los accidentes más relevantes del sector. Dicho sistema debe activarse junto a un adecuado sistema de gestión de la prevención, una formación y entrenamientos adecuados y una concienciación y motivación de los trabajadores.

Una de las principales dificultades en obra es el control de acceso y la concurrencia de trabajadores en diferentes ta-

reas que deben ser coordinadas. Un sistema como el planteado en este proyecto supone la creación de un segundo bucle de supervisión. Dicho bucle estaría basado en la monitorización activa de los trabajadores.

En la actualidad ya han aparecido productos que proporcionan soluciones parciales, pero que no resuelven de una forma integrada y eficaz la problemática expuesta. Además de ese carácter incompleto, desde el punto de vista tecnológico, las soluciones en general están basadas en tecnología GSM-GPRS combinada con la tecnología GPS, lo cual limita su uso en obras de edificación.

Tecnologías inalámbricas

Una de los objetivos del proyecto es la selección de las tecnologías más adecuadas para alcanzar la solución planteada. El concepto de redes de sensores inalámbricas (WSN) abarca la creación de una plataforma de sensores y comunicaciones que permita tanto la monitorización de magnitudes físicas o circunstanciales (eventos) dentro de un escenario (en nuestro caso, el espacio físico

que ocupa una obra de construcción), como la toma de decisiones⁽²⁾.

La solución más adecuada en el campo de las comunicaciones en el ámbito de la construcción (tanto la edificación como la obra civil) es el uso de las tecnologías inalámbricas. La motivación clave para el uso de estas tecnologías es la reducción de costos por instalación y la posibilidad de reutilización en obras sucesivas, ya que en ellos no existe necesidad de tender cableado.

Los módulos inalámbricos más extendidos hoy en día son los que utilizan la banda de 868 MHz. Sin embargo, debido al reducido ancho de banda de los mismos, se tiende a sistemas inalámbricos que se desarrollen en la banda sin licencia de 2.4 GHz. Las tecnologías pertenecientes a esta banda que se han seleccionado son consideradas las más adecuadas para cubrir las necesidades del presente proyecto. Entre estas tecnologías se encuentran dos de corto alcance, como son Bluetooth y Zigbee. Esta última, por su parte, logra alcanzar distancias de hasta 500 metros aproximadamente, aunque se pueden encontrar módulos que incrementan esta distancia de forma considerable. Como contrapartida, esta tec-

Tabla 1. Comparativa de tecnologías.

Tecnología	Wi-Fi	WiMAX	Bluetooth	ZigBee
Capacidad	54-11 Mbps	70 Mbps	1-10 Mbps	250 kbps
Nº nodos	+100	+1000	8	65000
Autonomía	.5-5 días	Alimentación	1-7 días	3-30 meses
Alcance	10-300 m	50 km	1-100 m	100-300 m
Latencia	1ms	1ms	14ms	240µs
Seguridad	WEP 802.1x WPA	DES3 AES PKM-EAP		AES-CCM-128
Topología	Punto a punto Punto a multipunto Mesh	Punto a punto Punto a multipunto	Punto a punto Punto a multipunto	Punto a punto Estrella Mesh Árbol
Modulación	DSSS y OFDM	OFDM	FHSS	DSSS

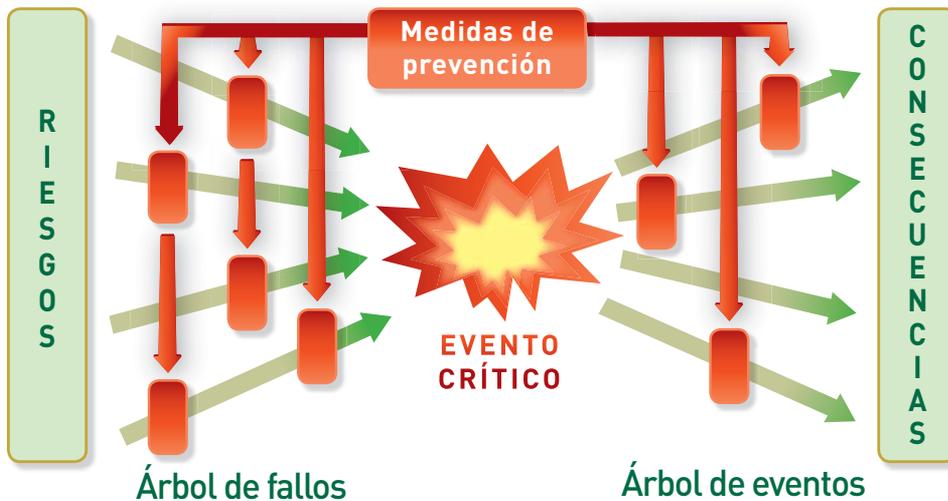


Gráfico 1: Representación simplificada de *bow-tie* (Dianous, Fiévez, 2006, p. 221; Delvosalle *et al.*, 2006, p. 201).

nología es de ancho de banda reducido (250 Kbps).

Para las aplicaciones que necesitan alcances superiores, se han seleccionado las tecnologías GPRS, Wi-Fi y WiMAX. Las peculiaridades de cada tipo de obra (civil –alejada de la ciudad– o edificación –integrada en el entorno urbano–) podrían hacer necesario el desarrollo de una red mixta, haciéndose uso de varias tecnologías, y siendo necesaria la creación de pasarelas de una a otra tecnología.

La tecnología ZigBee (inalámbrica) es la más adecuada para aplicaciones de edificación teniendo en cuenta el número de nodos y sensores, la autonomía, el alcance y la seguridad.

Objeto y alcance

La finalidad principal de este proyecto es la definición de un sistema inteligente basado en sensores capaces de detectar situaciones potenciales de riesgo con capacidad para tomar decisiones que eviten de una manera activa accidentes laborales y cuya implementación sea fácil y de bajo coste.

Antes de describir el sistema, consi-

deramos necesario mencionar sucintamente tres conceptos fundamentales en los que se basa:

■ Concepto de barrera de seguridad.

Una barrera de seguridad es una función implementada para la prevención, control o limitación de los daños de un riesgo de accidente^[3]. Los modernos modelos conceptuales de prevención de accidentes, como por ejemplo MORT^[4] (*Management Oversight & Risk Tree*), consideran dos tipos de barreras fundamentalmente en la reducción del riesgo de daño al trabajador: las barreras que evitan el evento del accidente y las que limitan los daños producidos. Las barreras no necesariamente son físicas, y pueden ser tanto sistemas lógicos como medidas de organización.

■ **Prevención activa.** La prevención activa es aquella que actúa de forma dependiente de las condiciones. Un sistema basado en el concepto de prevención activa adopta las medidas de prevención en función de la situación real.

■ **Inteligencia ambiental.** El paradigma de «ambiente inteligente» (AmI, *Ambient Intelligence*) está explicado en el documento ISTAG-*Information*

Society Technologies Advisory Group-, que presenta una visión de la Sociedad de la Información futura enfatizando en la proximidad al usuario, la eficiencia y el soporte a servicios distribuidos, la potenciación del usuario y la facilidad de interacción humana con el entorno. La población podrá estar rodeada de interfaces intuitivas e inteligentes embebidas en toda clase de objetos y en un ambiente capaz de reconocer y responder ante la presencia de diferentes individuos sin obstaculizar y de forma continua y no visible. Parte de la idea de que la tecnología debe estar diseñada para los usuarios y no los usuarios adaptarse a la tecnología^{[5][6]}.

Los principales requerimientos tecnológicos son:

- **Hardware** no obstructivo: miniaturización y nanotecnologías, dispositivos inteligentes, ordenadores embebidos, alimentación, sensores, activadores ...
- Infraestructuras de comunicaciones continuas basadas en acceso web fijo y móvil.
- Redes de dispositivos dinámicos y distribuidos, dispositivos interoperables y redes configurables a medida, inteligencia embebida en redes.
- Interfaces humanas similares a las naturales: agentes inteligentes, interfaces multimodales, modelos de percepción de contexto.
- Fiabilidad y seguridad: sistemas robustos y fiables, *software* capaz de autochequeo, auto-reparación y autoorganización

El sistema inteligente basado en sensores definido por este proyecto es, por tanto, un sistema de prevención activa basado en la implementación de barreras de seguridad mediante técnicas de inteligencia ambiental. La clave del éxito de la inteligencia ambiental reside en

desarrollar sistemas y tecnologías amigables, con buena respuesta, interconectados, sensibles al contexto, transparentes e inteligentes.

Funcionalidades y arquitectura

Funcionalidades: diseño basado en ambiente inteligente

El sistema se basa en que la potencia de procesado se empotra en los distintos objetos del sistema, fundamentalmente en los elementos inalámbricos. Es decir, los diferentes elementos inalámbricos –los elementos fijos (sensores ambientales y de ubicación), móviles (localización y consulta de los parámetros relativos a condiciones vitales de los trabajadores) y semi-estáticos (localización y consulta de las condiciones de operación de la maquinaria)– actuarían como objetos inteligentes cooperantes embebidos en un sistema bajo el paradigma de «ambiente inteligente».

Las principales funcionalidades que puede ofrecer un sistema basado en ambiente inteligente son:

■ **Detección de la situación y ubicación del personal en la obra.** La capacidad de detección de datos asociados a las personas, como su movilidad, ubicación, estado (por ejemplo, detección de un trabajador que no se mueve porque ha sufrido un accidente, o se ha caído, etc.), es una de las nuevas posibilidades ofrecidas por el sistema a desarrollar. Se trata de una actividad que se apoya, plenamente, en la capacidad introducida en la red de sensores para captar información del ambiente que los rodea. Asimismo, permite la detección de personal no autorizado en las instalaciones o en determinadas áreas.

■ **Detección de posibles afecciones al sistema.** La red de sensores permite identificar la exposición a ambientes tóxicos y peligrosos, a situaciones de baja visibilidad o de condiciones hidrotérmicas adversas.

■ **Capacidad de actuación en circunstancias de riesgo.** La respuesta del sistema puede consistir en alarmas a los medios de coordinación de seguridad o al propio trabajador, o bien en la actuación de elementos de protección (iluminación, ventilación, limitación de velocidad o sentido de la marcha de equipos y máquinas, etc.).

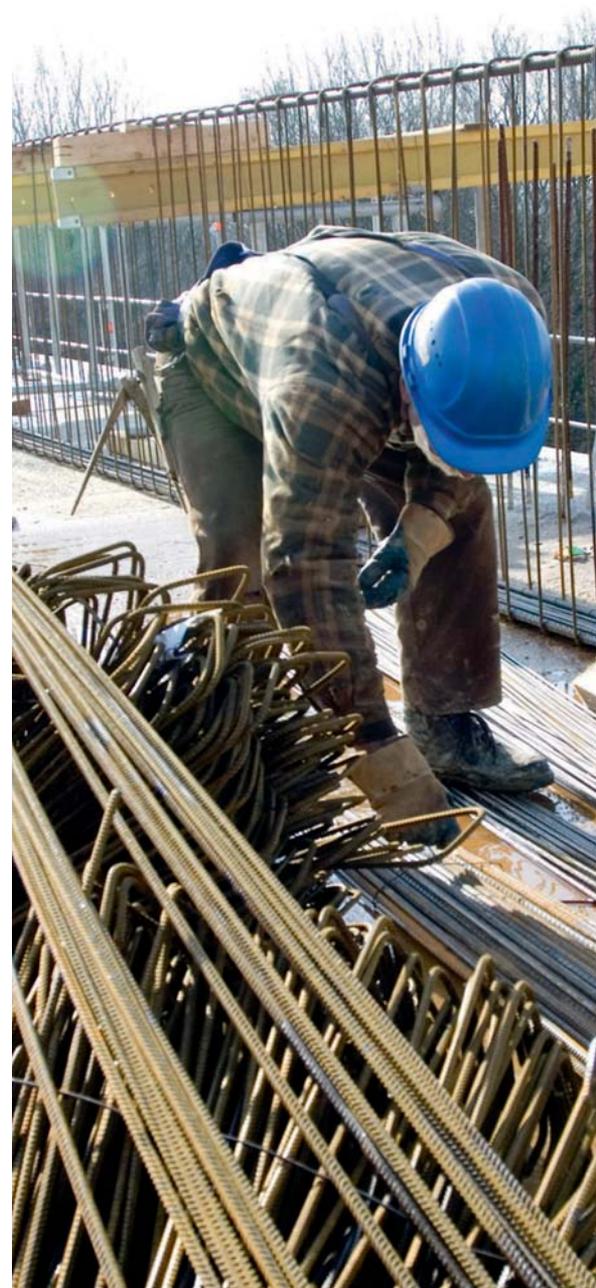
■ **Señalización activa.** El sistema permite informar de forma activa y sensible a la situación de la obra, proporcionando información del ambiente, de la situación de otros trabajadores y de su estado.

■ **Detección de situaciones de emergencia.** La instalación de distintos tipos de sensores en la obra permite la activación de los planes de emergencia basados en la información identificada.

■ **Capacidad para permitir monitorización remota de la instalación.** Dependiendo del tipo de atributos a controlar en cada tipo de obra, será o no necesario disponer de monitorización remota en tiempo real, sobre todo en casos en que se quieran controlar procesos de trabajo que puedan dar lugar a situaciones de emergencia o cuando los medios de coordinación, por el tamaño o complejidad de la obra, necesiten de información remota de la situación (túneles, edificios de gran altura, etc.).

Arquitectura básica del sistema

La infraestructura inteligente básica para el establecimiento de la red de comunicaciones y el procesado de la información estará compuesta por los siguientes elementos:



■ Nodos

■ **Instalaciones fijas.** Serán consideradas como los principales elementos constructivos de la infraestructura. Estarán equipadas con sensores inalámbricos capaces de capturar información del entorno que les rodea, *software* empotrado capaz de procesar la información captada utilizando algoritmos inteligentes, y dispositivos de comunicaciones capaces de transmitir la información a otros elementos del sistema.

■ **Elementos móviles o semi-estáticos de cada tipo de obra.** Serán ele-



LatinStock

mentos similares a las instalaciones fijas y, dependiendo de su situación geográfica, podrán estar equipados con los mismos sensores que estas. Deberán disponer de un *software* empotrado con el que sea posible procesar la información que es capturada por los sensores, así como equipos que transmitan esa información a otros elementos del sistema teniendo en cuenta que su localización no siempre será conocida.

- **Pasarela o nodo coordinador.** Será considerado el elemento principal de procesamiento de los datos que

llegarán provenientes del resto de elementos del sistema inteligente. Se desarrollará en código abierto, podrá monitorizar esa información y tendrá la posibilidad de interactuar con los elementos del sistema. La pasarela tendrá como tarea fundamental la monitorización de la obra; no obstante, recibirá mucha más información, como la de agentes ambientales, afecciones al sistema, etc. y todos los aspectos relacionados con la seguridad. Finalmente, la pasarela dotará al sistema con la capacidad de poder comunicarse con el exterior de forma bidireccional.

- **Capa física.** La capacidad que tienen que tener los enlaces de la red de comunicaciones de este trabajo no va a superar los 100 Kbps. Esto se debe a que la cadencia con que los sensores toman los datos es elevada en comparación con la toma de muestras de otras aplicaciones en la que la evolución de los datos es muy rápida. Sin embargo, el cambio que pueden sufrir los datos en un periodo de tiempo pequeño es poco probable en este tipo de aplicaciones. La capa física tendrá que ofrecer la suficiente conectividad para los sensores inalámbricos con los que se equiparán los nodos que forman parte de la infraestructura inteligente que se desarrolla en el proyecto. Para la transmisión de los datos procesados deberá existir una red de comunicaciones inalámbrica suficiente que conecte a todos los nodos del sistema.
- **Capa Middleware.** Será un *software* de conectividad que permitirá ofrecer un conjunto de servicios. Estos servicios harán posible el funcionamiento de las aplicaciones distribuidas que se desarrollan en el sistema inteligente, sobre la plataforma que se ha creado. Funciona como una capa de abstracción

de *software* distribuida y se sitúa entre la capa de aplicaciones y la capa física. La tarea principal de esta capa es hacer transparente a la capa de aplicaciones los detalles de bajo nivel del *hardware*, del sistema operativo y, especialmente, de los detalles de la distribución de los datos a través de una infraestructura distribuida. De esta forma, proporciona una interfaz abierta de programación de alto nivel que puede ser utilizada para aplicaciones externas o para poder interactuar con otras infraestructuras. La capa Middleware abstrae de la complejidad y heterogeneidad de la red de comunicaciones que se desarrolla en el proyecto, una red inalámbrica híbrida de sistemas empotrados. Esto facilitará la posibilidad de conexión/desconexión de los nodos a la red en tiempo real.

- **Capa de aplicaciones.** La capa de aplicaciones desarrolla las funcionalidades que se requieran en el sistema. Estas funcionalidades, ya descritas con anterioridad, hacen referencia a distintos aspectos de prevención activa a implementar.

Componentes del prototipo

Transreceivers. Los modelos seleccionados están basados en la tecnología Freescale, e incorporan integrados los módulos de radiofrecuencia.

Sensores. Se han seleccionado algunos de los sensores posibles (no todos). Asimismo, en la implantación del sistema no todos los sensores se integran en todos los nodos (por ejemplo, los nodos ligados a la infraestructura donde se lleva a cabo la obra no montan el acelerómetro). No obstante, los sensores considerados han permitido realizar pruebas para verificar que las funcionalidades son implementadas.

- **Sensor de temperatura.** Se ha elegido un sensor de bajo consumo con inter-

faz digital de comunicación de dos líneas. Este dispositivo puede operar en un rango de temperatura desde $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una resolución de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

■ **Acelerómetro.** Se ha usado un acelerómetro de tres ejes lineal de salida digital que incluye un sensor y una interfaz digital capaz de dar información sobre el sensor y proporcionar una señal externa de la medida de la aceleración a través de una interfaz serie. El dispositivo puede ser configurable para generar una señal de interrupción inercial *wake-up/free-fall* cuando se supere una aceleración determinada en alguno de los tres ejes.

■ **Sensor de luminosidad.** Se ha elegido un sensor de bajo consumo con interfaz digital. El dispositivo transforma la luminiscencia (el nivel de luz ambiental en lux) en una señal de salida digital accesible mediante el bus I2C.

Desarrollo de prototipos de nodos

Se han desarrollado dos tipos de nodos en referencia al *hardware*: nodos fijos y coordinador, por un lado, y nodos móviles. La diferencia principal entre ambos es que el nodo móvil tiene un acelerómetro de tres ejes. La estructura básica del primer tipo de nodo consta de:

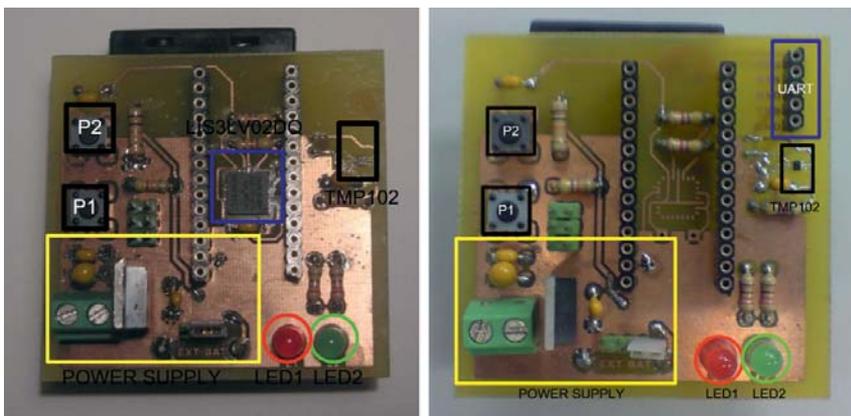


Figura 1. Primer prototipo. Nodos fijo y móvil.

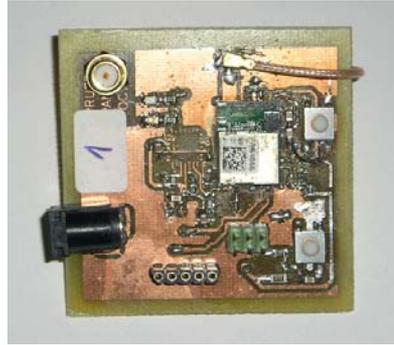


Figura 2. Segundo prototipo de nodo.

- *Transreceiver.*
- Sensor de temperatura.
- Acelerómetro (nodo móvil).

En la segunda versión de los nodos se ha optado por utilizar un *transreceiver* con antena externa, lo que proporciona un rango más elevado de funcionamiento y permite que el tamaño final de los nodos sea algo menor. A este nodo se le incorporó un sensor de luminosidad.

Pruebas del sistema prototipo y resultados

Diseño del escenario de pruebas

En este capítulo pretendemos demostrar la viabilidad de la tecnología seleccionada (IEEE 802.15.4 y Zigbee) para la monitorización activa de trabajadores. El escenario elegido se ha simplificado de

forma que la prueba pueda realizarse en el marco del presente proyecto y teniendo en cuenta las limitaciones temporales y de presupuesto.

En el escenario propuesto evaluaremos la capacidad del sistema para identificar la posición de un trabajador, para comprobar mediante un acelerómetro la actividad del sujeto y los posibles cambios en su estado. El sistema consta de nodos móviles (trabajadores) y fijos (obra). Los nodos fijos tienen una doble función: dotar de cobertura a la infraestructura y servir como referencia para calcular la posición de los nodos móviles. Además, existe un nodo central o coordinador, que se encargará de recopilar la información para proceder a su envío hacia el ordenador de gestión (figura 3).

Como se advierte, el nodo coordinador, en rojo, está conectado a un servidor central. Además existe una infraestructura desplegada por la obra (por ejemplo, nodos colocados en la señalización luminosa) de nodos que permiten ampliar la zona de cobertura, que servirán para localizar al trabajador (dado que la posición de la infraestructura es conocida, podremos triangular la posición del trabajador a partir del *Link Quality Indicator* o LQI, cuyo valor indica la distancia entre dispositivos que permite conocer su ubicación relativa según la intensidad de señal).

Para realizar las pruebas en el escenario ha sido necesario fabricar diferentes nodos:

■ **Nodo de referencia.** Se trata de un nodo que tiene una posición fija y conocida. Este nodo será configurado con los valores X e Y correspondientes a su localización. Su única tarea es esperar un mensaje *Broadcast* (a todos) con el valor LQI y su reenvío al nodo coordinador. Los nodos de referencia se comunican con los nodos sensores y con el nodo coordinador de nuestra red.

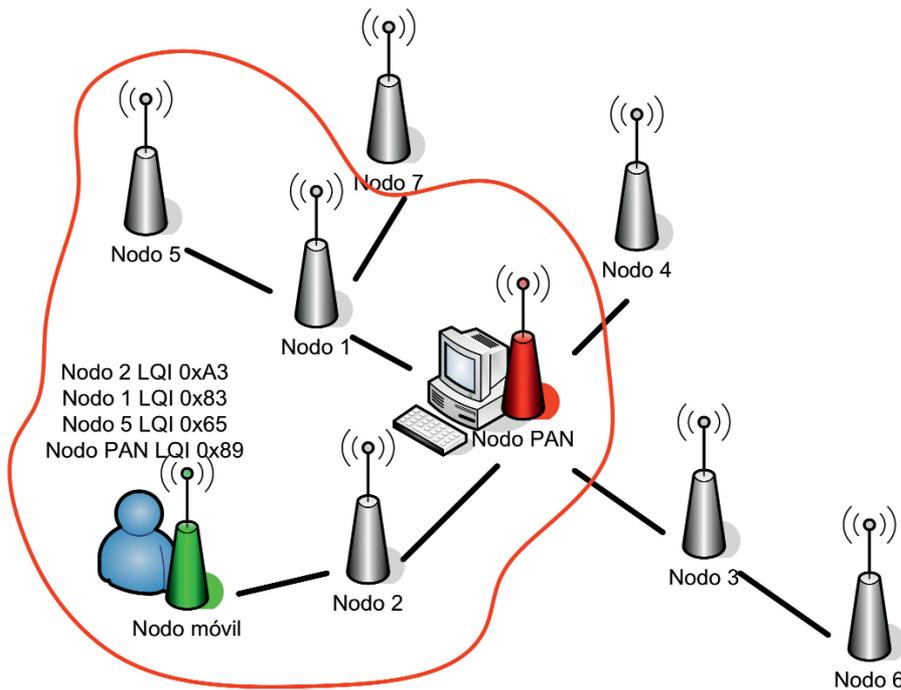


Figura 3. Arquitectura de la red.

- **Nodo móvil.** Este nodo, cada vez que quiera conocer su posición en la red, enviará un mensaje *Broadcast*. Además, está equipado con un acelerómetro para monitorizar los movimientos y situación del trabajador.
- **Nodo coordinador.** Este nodo es el que se encarga de recibir los mensajes de los nodos sensores y almacenar en una tabla los valores LQI de cada nodo sensor. Conocida la dirección del nodo de referencia, accederá a una tabla donde se almacena la correspondiente dirección fija de dicho dispositivo. De acuerdo a estos parámetros de entrada, se estimará la localización del dispositivo mediante el algoritmo de localización. Una vez obtenida dicha posición, esta será enviada al nodo coordinador.

Funcionalidad de la red

La evaluación de la implementación consta de las siguientes pruebas:

- Pruebas de evaluación de la funcionalidad de la red, por ejemplo, asen-

LA CLAVE DEL ÉXITO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL RESIDE EN DESARROLLAR SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS AMIGABLES, CON BUENA RESPUESTA, INTERCONECTADOS, SENSIBLES AL CONTEXTO, TRANSPARENTES E INTELIGENTES

timientos, retransmisiones, mensajes de multidifusión, auto-organización de la red, etc.

- Pruebas de localización del trabajador (nodo móvil).
- Pruebas de monitorización de eventos en el trabajador (nodo móvil): nivel de actividad del trabajador, caídas, etc.

Se ha diseñado un programa para gestionar el envío y recepción de los mensajes que se transmiten entre los módulos de radio con los que va equipada cada miembro del sistema. Dicha gestión de mensajes estará orientada a pro-

porcionar, en tiempo real, la información necesaria al nodo o equipo coordinador, para que este tenga una visión global de la localización y del estado del nodo móvil (trabajador).

Nodo coordinador. Este nodo comienza realizando un escaneo de detección de energía para hacer una elección óptima del canal en el que comenzará la red PAN –*Personal Area Network* (red de área personal)–. Una vez iniciada la red, el coordinador pasa a modo recepción a la espera de peticiones de asociación de otros dispositivos y a la espera de datos de información de los nodos de la red. El coordinador controla los nodos de la red mediante el inicio de un contador. Una vez finalice el contador, comprobará los nodos de los que ha recibido mensajes de información. Para los nodos de los que no ha recibido información, inicia el contador de mensajes perdidos correspondiente a ese nodo. Cuando se detecten tres mensajes perdidos consecutivos, asumirá que dicho nodo ha perdido la conexión y lo elimina de la lista de nodos pertenecientes a la red.

Nodo sensor. Se considera nodo sensor a todos aquellos distintos del nodo coordinador y del nodo móvil, y que se encontraran distribuidos por el escenario cubriendo el rango de este.

Los nodos sensores están continuamente en un bucle a la espera de recibir algún mensaje, que puede ser de dos tipos: mensajes *Broadcast* y mensajes retransmitidos desde otros nodos. Veamos cómo se gestionan los primeros. El nodo sensor recibe un mensaje *Broadcast* del nodo móvil y de la trama obtenida en dicho mensaje obtiene el valor LQI del enlace entre ambos.

El resto de mensajes recibidos por el nodo sensor serán *Unicast*. Si el mensaje recibido proviene de otro nodo sensor, contendrá los valores LQI del nodo del que proviene y de los correspon-

dientes nodos que estén asociado a este, por lo que lo único que se hará con este mensaje es añadir el valor LQI del nodo sensor y volverlo a reenviar al nodo al que esté asociado hasta que llegue al nodo coordinador. Además, el nodo sensor envía información de la temperatura ambiental y del nivel de luminosidad de la zona en la que se encuentra.

Nodo móvil. La aplicación diseñada para el nodo móvil se limita a enviar la información obtenida de los sensores y a enviar un mensaje *Broadcast* para que el resto de nodos puedan obtener el valor LQI de los respectivos enlaces. Para el procesamiento de la información se implementan los algoritmos detallados anteriormente.

Para conocer el estado del nodo móvil se ha empleado el sensor de temperatura y el acelerómetro de tres ejes. El dato que se proporcionará del trabajador será la temperatura, y mediante el procesamiento de la información del acelerómetro se podrá determinar si este respira o no y si en algún momento se produce su caída libre. De esta forma se puede distinguir entre los siguientes estados del trabajador: ACTIVO, ALARMA (movimiento brusco) y EMERGENCIA (no hay movimiento).

Pruebas de funcionalidad de la red

Las pruebas realizadas durante la implementación han sido pruebas finales al sistema, así como sucesivas pruebas durante el proceso de desarrollo. A continuación se describen las situaciones de prueba efectuadas durante la implementación del sistema:

■ Asociación de un dispositivo a la red.

Para comprobar la capacidad de un dispositivo final para unirse a una PAN, la prueba realizada consiste en que el coordinador, al encenderse, inicia una

PAN. Cuando se enciende el dispositivo final y se pulsa uno de los pulsadores de la placa, automáticamente escaneará los canales de frecuencia en busca de una red y se asociará a ella. El dispositivo final que quiere asociarse a la red elige uno de los coordinadores de PAN que han sido hallados durante el escaneo.

■ **Envío y recepción de datos.** Para comprobar la capacidad de enviar mensajes desde un dispositivo a otro, se almacenan las direcciones asignadas a cada dispositivo y se utilizan para enviar un mensaje de un dispositivo a

otro. El receptor permanecerá en modo recepción de datos mientras no esté ocupado.

■ **Rango.** Las placas prototipo para los nodos ofrecen un alcance de unos 800 metros en visión directa, mientras que en interiores no superan los 200 metros.

■ **Asentimiento y control de los nodos.** Para controlar los nodos que se encuentran en la red cada dispositivo tiene una tabla de nodos asociados (hijos). Para tener un control de la permanencia, este recibirá un mensaje de cada nodo hijo cada cierto instante de-



terminado. Por su parte, cada hijo tendrá que comprobar que ha recibido asentimiento de los mensajes enviados al coordinador. Mediante la realización de retransmisiones en caso de pérdida de mensajes, se determinará el número de intentos de retransmisión y, en caso de superar ese número, se llevará a cabo un autoreseteo por parte del dispositivo para volver a intentar asociarse a la red, bien con el antiguo coordinador o bien con un nuevo coordinador dentro de rango. El sistema, por tanto, se reconfigura en caso de pérdida de algún nodo en la red.

Localización de nodos móviles

El algoritmo de localización utilizado está basado en el LQI (*Link Quality Indicator*), cuyo valor disminuye con el aumento de la distancia entre dispositivos. Se han desarrollado distintos tipos de algoritmos de localización.

Uno de ellos, utilizado en los primeros prototipos de la red, se basaba en la transmisión de un mensaje *Broadcast*. El otro algoritmo utilizado se basa en realizar un escaneo para encontrar los nodos vecinos al nodo móvil, disminuyendo de es-

ta forma el tráfico de mensajes, limitándose a transmitir el valor de los nodos más cercanos. Ambos algoritmos se basan en última instancia en el valor de la calidad del enlace entre nodos, por lo que para conseguir una buena localización será necesario conocer la posición de los distintos nodos fijos.

El nodo coordinador es el que se encarga de recibir los mensajes de los nodos fijos y los transmite a través de las tramas de información por la interfaz que lo une al PC. Según estos valores se decidirá la estimación de la localización del nodo móvil, y por consiguiente, de la ubicación del nodo móvil (trabajador).

Los valores LQI se obtienen mediante un escaneo que realiza el nodo móvil cada cierto tiempo. El resultado del escaneo es una serie de nodos fijos vecinos identificados por la dupla dirección MAC del nodo y el valor LQI. El nodo móvil manda un mensaje con los valores LQI de cada nodo vecino al coordinador de la red. De esta forma el nodo móvil manda al coordinador solo los valores LQI de los nodos más cercanos a él, reduciendo así el tráfico de mensajes. Si no se manda el valor LQI de un nodo es porque el nodo está lo suficientemente alejado como para no recibir las primitivas de escaneo del nodo móvil.

Sin embargo, puede ocurrir que permaneciendo en un mismo lugar el nodo móvil no escanee siempre todos los nodos cercanos. Esto sucede porque el nodo móvil permanece un tiempo determinado en el estado de escaneo y puede ser que no todos los nodos respondan a la primitiva de escaneo. Por esta razón, la manera óptima de gestionar la localización de los nodos móviles en la pasarela de control conectada al nodo coordinador es mediante la realización de un promediado de los valores LQI de cada nodo fijo cada varios segundos, cuando se hayan tomados distintos valores LQI relativos a los nodos.



Latinstock

Los resultados de las pruebas realizadas no son suficientemente precisos (del orden de uno a dos metros) cuando se utiliza solo el LQI, por lo que en el futuro habrá que diseñar un algoritmo que también use el tiempo de propagación de la onda, el cual es insensible a los obstáculos. La precisión alcanzada permite delimitar la zona (interior a los nodos fijos correspondientes a su ubicación) en la que se encuentra un trabajador, pero no la posición del mismo dentro de la misma. Eso es así debido a que, dependiendo de la presencia de obstáculos, la medida del LQI se puede deteriorar.

Monitorización de los trabajadores

Para conocer magnitudes medidas en el nodo móvil (signos vitales y/ caídas) será necesario de dotar a dicho nodo de un acelerómetro.

Detección de la caída libre. Supongamos un nodo con una orientación arbitraria (figura 4). Sus ejes forman los ángulos α con respecto al eje x; β con respecto al eje y; e γ con respecto al eje z. De acuerdo a esto, las salidas de los acelerómetros son:

$$X_{OUT} = X_{OFFSET} + \left(\frac{\Delta V}{\Delta g} \cdot 1g \cdot \text{sen}\alpha \right)$$

$$Y_{OUT} = Y_{OFFSET} + \left(\frac{\Delta V}{\Delta g} \cdot 1g \cdot \text{sen}\beta \right)$$

$$Z_{OUT} = Z_{OFFSET} + \left(\frac{\Delta V}{\Delta g} \cdot 1g \cdot \text{sen}\gamma \right)$$

Donde:

V_{OUT} = Salida del acelerómetro en Voltios

V_{OFFSET} = Valor de *offset* a 0 g del acelerómetro

$\Delta V/\Delta g$ = Sensibilidad del acelerómetro

1 g = Gravedad de la tierra

Cuando el objeto cae, las aceleraciones en los tres ejes llegarán a valer cero sin importar la orientación del objeto, porque no se detectará ninguna aceleración en ningún eje ya que, como se explicó antes, los acelerómetros caen con la misma aceleración que la ejercida por la fuerza de la gravedad.

El algoritmo de detección de caída libre realiza un muestreo de los datos de los acelerómetros y supervisa dichas aceleraciones. Dependiendo de la orientación, cada acelerómetro tendrá un rango de aceleraciones entre 1 g (cuando el eje del acelerómetro se encuentre paralelo a la gravedad) y 0 g (cuando el eje se encuentre perpendicular a la gravedad). El S-factor es una forma de considerar el total de aceleración que actúa sobre el dispositivo en cierto instante.

$$S - factor = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \leq umbral$$

Durante la caída libre, los tres ejes llegarán a detectar 0 g. Como el S-factor viene definido por la aceleración total en los tres ejes y estas aceleraciones valen 0, el S-factor valdrá 0. La elección del valor umbral dependerá de los tiempos

de respuesta del sistema, de la precisión del convertidor A/D y de las características de los acelerómetros, como la sensibilidad, el *offset*, la variación con la temperatura y el número de muestras tomadas y el tipo de algoritmo. Este umbral se ha determinado experimentalmente entre 1 y 100 ms (figura 5).

Detección de signos vitales del trabajador. Cierta información de la lectura del acelerómetro nos permite detectar si el trabajador presenta actividad para poder enviar una alarma en caso contrario.

La frecuencia de oscilación es baja, por lo que el tiempo de adquisición de muestras fijado ha sido de 40 ms y serán necesarias al menos 200 muestras para tener un periodo de la señal. Según esto, el tiempo necesario para dar un diagnóstico de estado del usuario es de 8 segundos. La elección del umbral es crítica porque puede haber casos en los que el usuario esté en absoluto reposo y se considere una alarma por no detectar signo vital. Los resultados obtenidos son suficientemente robustos a pesar de la baja sensibilidad del acelerómetro y del ruido de cuantización del convertidor A/D.

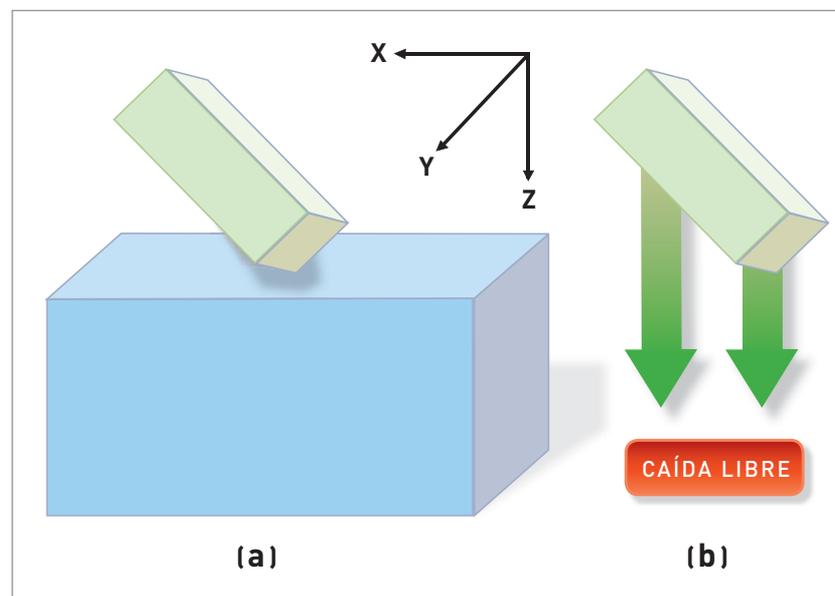


Figura 4. Modelo de la caída libre.

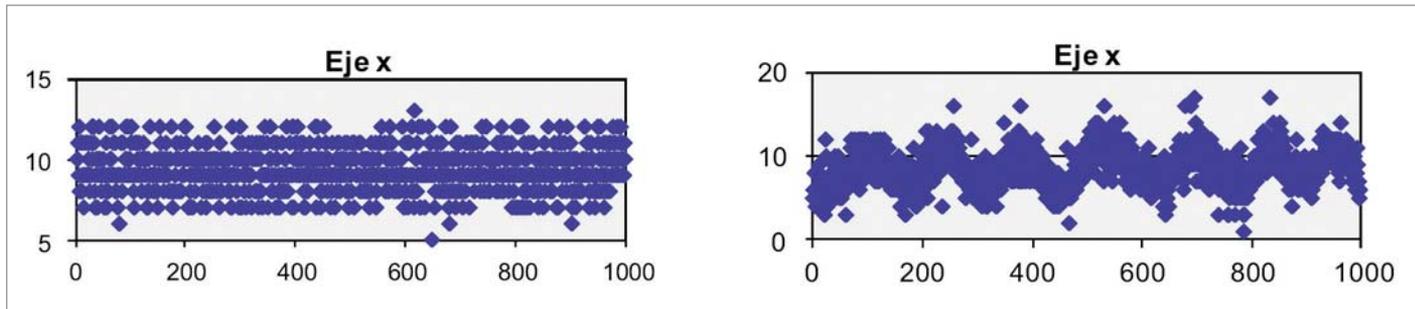


Figura 5. Diferencias de la respuesta en el acelerómetro (el gráfico de la derecha corresponde a cuando es llevado por el trabajador).

Conclusiones y futuros desarrollos

Los resultados experimentales obtenidos muestran que es posible diseñar un sistema que desarrolle las funcionalidades de un sistema de prevención activa a partir de una red de sensores inalámbrica bajo el paradigma de la inteligencia ambiental.

Algunas funcionalidades, como la detección de caída o la monitorización de signos vitales, son claramente posibles, mientras que otras, como la localización, todavía necesitan ser perfeccionadas. En un escenario de las dimensiones de una obra se puede tener comunicación directa entre todos los nodos, utilizando la extensión natural de cobertura que proporciona la tecnología IEEE 802.15.4. Aun así, se ha diseñado la red para que, en caso de pérdidas en la comunicación, el sistema se restablezca de forma transparente al usuario.

El estado actual de la técnica permite que el precio de implantación de esta solución sea rentable, más aún si se tiene en cuenta que todos los sistemas son reutilizables de una obra a otra. Esta solución no existe actualmente en el mercado, por lo que el presente trabajo sirve

como punto de partida para su desarrollo y para la creación de desarrollos pre-competitivos. Estos futuros desarrollos pueden ampliar la arquitectura básica probada e incluir sistemas basados en visión con cámaras IP, control de acceso a zonas de riesgo con RFID o la identificación no solo del personal, sino de su equipamiento y la maquinaria.

En cuanto al sistema de localización del nodo móvil en la red (trabajador), no se ha podido implementar el algoritmo deseado. Se pretendía tener conocimiento de las coordenadas aproximadas del nodo en el escenario conocidas las dimensiones de este a partir de un algoritmo de triangulación con los valores LQI de los nodos sensores, pero estos valores dependen en gran medida de la orientación de los nodos. De este modo, el sistema solo estima la zona en la que se encuentra el trabajador, pero no su posición con una precisión inferior al metro. Para una posible mejora, se debería aumentar el número de nodos fijos de la infraestructura (aumentar la redundancia del sistema) o bien añadir otros parámetros al algoritmo de cálculo (como el retraso de propagación de la onda). Sin embargo, los resultados preliminares son muy prometedores.

En cuanto a la monitorización del trabajador, los resultados obtenidos son aceptables a pesar de la baja sensibilidad de los acelerómetros y la resolución del convertidor A/D. Se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto a patrones del estado del trabajador, por lo que personalizando el *hardware* y utilizando los periféricos más adaptados a la aplicación que se pretende realizar se obtendría un sistema fiable y con unos resultados notablemente mejores. ♦

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado gracias a una ayuda a la investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

PARA SABER MÁS

- [1] INSHT (2010), Análisis de la mortalidad por accidente de trabajo en España 2005-2007.
- [2] N. Fourty, T. Val, P. Fraisse, J. Mercier, Comparative analysis of new high data rate wireless communication technologies «From Wi-Fi to WiMAX»(2005).
- [3] Johnson, W. G. (1980). MORT safety assurance systems. New York: Marcel Dekker.
- [4] Kjelle'n, U. (2000). Prevention of accidents through experience feedback. London: Taylor & Francis
- [5] ISTAG «Scenarios for ambient intelligence in 2010». <ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ist-tagscenarios2010.pdf>
- [6] ISTAG «Ambient Intelligence: from vision to reality». ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ist-tag-ist2003_draft_consolidated_report.pdf
- [7] <http://zigbee.org>

ES POSIBLE DISEÑAR UN SISTEMA QUE DESARROLLE LAS
FUNCIONALIDADES DE UN SISTEMA DE PREVENCIÓN
ACTIVA A PARTIR DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA
BAJO EL PARADIGMA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL