



Disponible en [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 8 (2011) 371–384



[www.elsevier.es/RIAI](http://www.elsevier.es/RIAI)

## Monitorización de la Condición Física de Personas en Espacios Confinados Mediante Etiquetas RFID con Sensores y Redes Inalámbricas Eficientes

Javier G.-Escribano <sup>a,\*</sup>, Andrés García <sup>a</sup>, Miguel de la Fuente <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Grupo Autolog. E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Camilo José Cela. 13071 Ciudad Real, España.

<sup>b</sup> Lipsoft Electronics. Ctra. Espeluy, 11. 23730 Villanueva de la Reina (Jaén), España.

---

### Resumen

La situación y la condición física de los trabajadores que realizan su labor en el interior de ciertos espacios confinados o peligrosos es una información muy importante. Las empresas de seguridad laboral consideran crucial obtener tal información para poder observar y determinar los riesgos potenciales a los que el personal puede estar sometido. Los sistemas que se han venido utilizando no incluyen en la mayoría de los casos la monitorización personalizada de cada individuo. En este trabajo se ha diseñado un sistema basado en “Wireless Sensor Networks” energéticamente eficientes y RFID para conseguir el posicionamiento y la monitorización de personas que trabajan en el interior de espacios confinados potencialmente peligrosos. El sistema diseñado es capaz de identificar a cada trabajador, localizarlo y enviar datos relativos a su situación física tanto si éste se encuentra en un espacio libre como cerrado. Además, en situaciones de emergencia como caídas libres o pérdidas del conocimiento, el sistema envía una alarma. Los resultados demuestran que la utilización de este sistema permite conocer en tiempo real, y de forma energéticamente eficiente, la posición de cada trabajador, y analizar el riesgo potencial al que el mismo se expone en cada momento. Al mismo tiempo, en caso de emergencia, el sistema permite una mayor rapidez en la intervención ya que por un lado, se sabe dónde y por qué se ha producido la alarma; y por otro, se conocen las condiciones físicas del trabajador en ese momento.

Copyright © 2011 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

*Palabras Clave:*

Acelerómetros, Sistemas de Emergencia, Control Automático, Redes, Ingeniería de Sistemas, Algoritmos de Enrutamiento, Transceptores, Telecomunicaciones.

---

### 1. Introducción

Cada año en la Unión Europea se producen un total de 5.720 accidentes relacionados con el trabajo y millones de personas sufren daños o su salud se ve seriamente afectada en los lugares de trabajo (European Agency, 2000). Por este motivo, la seguridad en el trabajo se ha convertido en una de las preocupaciones más importantes para los gobiernos

europeos. La introducción de nuevas normas de seguridad e higiene ha permitido la proliferación de empresas que trabajan por la seguridad y evalúan los riesgos laborales. Aquellas organizaciones cuyo personal realiza su labor en entornos peligrosos son las potenciales clientes de las anteriores.

Los entornos peligrosos o de riesgo son aquellos en los que existen ciertos agentes mecánicos, químicos o biológicos que pueden dañar la salud o la integridad física del ser humano. La

---

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [javiergescribano@gmail.com](mailto:javiergescribano@gmail.com),  
[andres.garcia@uclm.es](mailto:andres.garcia@uclm.es), [tecnico@lipsoftelectronics.com](mailto:tecnico@lipsoftelectronics.com)  
URL: <http://autolog.uclm.es>

ubicación de estos agentes suele ser el interior de un espacio cerrado, con aberturas limitadas de entrada y salida, ventilación natural desfavorable, y con espacio suficiente en su interior para permitir la movilidad de un ser humano (Veasey, McCormick, et al., 2006). A este tipo de espacios se les suele llamar espacios confinados. Algunos espacios confinados típicos son: depósitos, pozos, silos, alcantarillas o túneles; como se muestra en la Figura 1. Normalmente, los trabajadores que se encuentran en el interior de estos lugares no tienen una comunicación directa con el exterior. En caso de accidente, es muy importante saber de antemano cuál es la posición de cada trabajador dentro del espacio confinado, así como conocer el procedimiento de actuación para poder proceder a su rescate. Otro de los requerimientos importantes para las empresas del sector de la seguridad es el poder conocer cuáles han sido las circunstancias físicas en el entorno que han podido causar el accidente. En cualquier caso, las empresas necesitan conocer la posición de cada trabajador y sus condiciones físicas.

En el presente trabajo se propone la utilización de un sistema basado en RFID activo y una Red Inalámbrica de Sensores (WSN: *Wireless Sensors Network*). La parte RFID se compone de lectores y etiquetas activas con sensores. Estas etiquetas son capaces de recoger información sobre el estado físico de la persona que las lleva.

Además la localización de cada trabajador se obtiene a partir de la identificación de la pulsera y la posición de la antena utilizada para comunicarse con ella. El lector RFID al mismo tiempo se auto-enruta dentro de una red ZigBee de lectores móviles. De esta forma la información llega al nodo coordinador, desde donde se envían los datos al centro de control en tiempo real. El bajo consumo energético de que dispone el sistema, permite su utilización de forma autónoma y portátil.

Este artículo está estructurado en una serie de apartados cuyo contenido se describe a continuación. En primer lugar, en el apartado dos, se hace una revisión de los elementos utilizados actualmente por las empresas de seguridad para tener un acceso directo a la información de los trabajadores así como el uso de las tecnologías propuestas para monitorización de condiciones humanas. En el apartado tres se presenta la implementación física del sistema y sus componentes, y en el apartado siguiente se explica el funcionamiento de cada uno de éstos de forma detallada; así como los métodos empleados para mejorar la eficiencia y reducir el consumo en las comunicaciones inalámbricas. En el apartado cinco se presentan los resultados obtenidos con la utilización del sistema desarrollado. Finalmente, en el último apartado, se exponen las conclusiones y se plantean posibles líneas de trabajo para desarrollos futuros.

## 2. Tecnología Empleada para la Monitorización Humana

Según la Administración para la Seguridad y Salud Laboral (*Occupational Safety and Health Administration*, OSHA) de la Comisión Europea, la prevención es la mejor herramienta para evitar que se produzcan accidentes en los entornos laborales.



Figura 1: Ejemplos típicos de trabajos realizados en espacios confinados: pozos y tuberías, y depósitos metálicos.

La información es fundamental a la hora de definir las tareas preventivas. Tanto los trabajadores como las empresas de seguridad deben conocer en todo momento cuáles son los potenciales riesgos que pueden existir en el ambiente de trabajo. Algunos de los riesgos más comunes son los golpes, las caídas a distintos niveles, la fatiga física, el ambiente inadecuado (temperaturas extremas, vibración, ruido), la iluminación deficiente o la mordedura de roedores entre otros (Gómez, 2007). La evaluación de los riesgos debe siempre llevarse a cabo con antelación al desarrollo de cualquier buena práctica a implantar.

Las empresas de seguridad obtienen la mayoría de la información a partir de los datos obtenidos por los sensores que se encuentran en el interior de los espacios confinados. Normalmente, son éstas las que definen las prácticas de seguridad y los equipos que los trabajadores deben utilizar para prevenir accidentes o simplemente para poder permanecer en el interior de dichos espacios. Para las empresas de gestión de riesgos laborales es muy importante conocer qué trabajadores se encuentran en el interior y en el exterior de un espacio confinado en cada momento. Por ejemplo, antes de acceder a un recinto el trabajador debe estar informado de los riesgos que se puede encontrar, y disponer de una autorización de entrada por escrito. En la actualidad no existe ningún medio automático para certificar la presencia de un trabajador en el interior de un espacio confinado. No obstante, es muy importante la comunicación con el trabajador que está en el interior del sitio confinado. La tarea de establecer una comunicación de este tipo actualmente resulta bastante compleja. Esto es debido a que las características físicas de los espacios no permiten la utilización de medios convencionales, como el teléfono móvil. Para solucionarlo, las empresas suelen emplazar a un trabajador en el exterior el cual se encarga de comunicarse por radio o por cable con el que se encuentra en el interior, y de observar en cada momento la situación física de éste último.

En otros muchos casos, la tecnología actual sí que es capaz de ayudar en las tareas de monitorización humana. En este sentido, la utilización de redes de sensores inalámbricas (WSN) es ya una realidad. En (Virone, Wood, et al., 2006) se puede encontrar un ejemplo donde se utiliza una red de sensores para la monitorización de la salud humana en entornos médicos, realizando medidas de luz, temperatura, movimiento, actividad humana, pulso, ritmo respiratorio, etc. El sistema se utiliza en entornos domésticos en (Stankovic, Cao, et al., 2005), y es capaz de informar al médico sobre las circunstancias del paciente en cada momento. Además, los

sensores corporales pueden estar incluidos en la ropa del que los lleva puestos como en (Pandian, Safeer, et al., 2008). Otros casos, en los que también se utilizan las WSN, son los de monitorización de las condiciones ambientales. La detección precoz de incendios es una de las aplicaciones para las que se utilizan los sensores en (Bayo, Antolín, et al., 2010). También la medida del nivel de ruido en entornos urbanos (Santini & Vitaletti, 2007) es un ejemplo de aplicación muy interesante.

La tecnología RFID activa con sensores se utiliza ampliamente ya en el seguimiento de productos especiales y en la recogida de datos del entorno. En el trabajo de (Deicke, Grätz, et al., 2010) se implementa un sistema para conocer la procedencia de neumáticos así como los valores de presión y temperatura del aire en su interior utilizando etiquetas RFID activas con sensores que se comunican de forma inalámbrica con los lectores en el exterior. La investigación en la incorporación de los sensores en las etiquetas RFID ha resultado en la búsqueda de la reducción del consumo de dichas etiquetas para alargar su tiempo de operación (De la Fuente, García, et al., 2007). Un ejemplo de aplicación de dichas etiquetas es el de (Abarca, De la Fuente, et al., 2009) en el que mediante etiquetas de RFID activas se consigue monitorizar las características de los productos hemoderivados utilizados en hospitales desde su extracción, en la fase posterior de almacenamiento y hasta su utilización. A continuación se va a analizar más en detalle el proceso de fusión de la RFID y las WSN, que será más adelante utilizado en este trabajo para el seguimiento de personas.

### 2.1. Utilización de las WSN y RFID

Las similitudes existentes entre las etiquetas RFID activas y los nodos sensorizados, especialmente si las primeras han sido provistas con sensores, han promovido que los investigadores consideren que pueden interaccionar y operar conjuntamente. En el trabajo de (Liu, Bolic, et al., 2008) se estudian los beneficios obtenidos con la integración de ambas tecnologías. Con la utilización de RFID se añade en (Raad, Sheltami, et al., 2010) una nueva característica a la monitorización tradicional de pacientes de un hospital; ya que esta tecnología permite la identificación de éstos tanto dentro como fuera del mismo.

En los trabajos referenciados anteriormente se utilizan conjuntamente RFID y WSN. Sin embargo, la RFID es considerada en la mayoría de los casos como un elemento que añade más información, como un sensor más, en la WSN. En algunos casos, los sensores se encuentran en el interior de los lectores RFID y se utilizan etiquetas pasivas. En otros, son los propios sensores activos los que disponen de conexión con etiquetas RFID. En cualquier caso, la información relativa a los sensores se envía utilizando un protocolo de comunicaciones determinado y la parte de identificación global de la etiqueta (código UPC) se suele enviar utilizando los protocolos definidos por EPC Global. Para integrar en un solo protocolo toda la información se está desarrollando un estándar de comunicación, basado en el EPC Class1 Gen2, que sea capaz de incluir la información procedente de los posibles sensores presentes en las etiquetas RFID activas actuales. En esta línea, (Harrop & Das, 2009) introduce el concepto de

“RFID EPC Generation 3”. Tras el enorme auge experimentado por la segunda generación de EPC, la tecnología RFID activa va a cobrar un mayor protagonismo a partir de la aparición de esta nueva generación. Otros autores (Palomo-López, Vales-Alonso, et al.) han incorporado sus aportaciones a los protocolos existentes, basados en CSMA, para etiquetas activas. En el trabajo de (Sánchez, Kim, et al., 2009) la tecnología RFID activa y con sensores es empleada para la monitorización de elementos del entorno. El objetivo es conseguir que todos los elementos sean capaces de transmitir no solamente su identidad sino también información relativa a su condición física. A estos elementos se les conoce ya con el nombre de “Smart Objects” y al lugar donde se emplazan “Smart Environment”. La integración de RFID y WSN se hace patente, y se le ha denominado en este trabajo como “Wireless Sensors and RFID for Smart Environments (WISSE)”.

El objetivo del presente trabajo no es la realización de un nuevo protocolo para la utilización de forma global de las etiquetas activas. Se persigue en este caso resolver un problema real, mediante la fusión de RFID y WSN en una única plataforma.

### 3. Implementación del Sistema

La tecnología más ampliamente utilizada en comunicaciones a nivel de usuario en la actualidad es sin duda el teléfono móvil. Sin embargo, como explicábamos anteriormente, el uso de estos dispositivos en los espacios confinados no es siempre posible. Como alternativa se propone en este trabajo la utilización de WSN y RFID. De este modo la comunicación por radio se realiza entre puntos de transmisión que forman una red de enrutadores, que reciben y envían actuando como repetidores de la señal. RFID permite la identificación inequívoca de cada trabajador, el cual dispone de una etiqueta activa, que además recoge información gracias a sus sensores.

En el sistema diseñado conviven RFID y WSN, de forma que la información se recoge a través de lectores y etiquetas activas y estos son además nodos de una red a gran escala como ocurría en (G.-Escribano, García, et al., 2009). El sistema propuesto en (G.-Escribano, García, et al., 2008) fue depurado y rediseñado teniendo en cuenta las exigencias que se tenían en la aplicación de la manipulación de los recursos de un aeropuerto y se conectó a una herramienta de visualización en (García, De las Morenas, et al., 2010). En el desarrollo que ahora proponemos existen dos niveles de comunicación: una red inalámbrica ZigBee y un protocolo de UHF, propietario de Texas Instrumens (TI), llamado SimpliciTI (Figura 2). La WSN utilizada se basa en el protocolo conocido como ZigBee (PHY and MAC of IEEE 802.15.4). Analizando los resultados obtenidos en (Lee, Su, et al., 2007), se ha escogido este protocolo por ser sencillo, mucho más que los protocolos inalámbricos Wi-Fi o WiMax (IEEE 802.15.11), y a la vez eficiente en la transmisión de datos, ya que consume un menor número de recursos que Bluetooth (IEEE 802.15.1) o el UWB (IEEE 802.15.3), además de ofrecer un mayor alcance. El protocolo de

comunicación entre lectores y etiquetas RFID es el *SimpliciTI*. Dicho protocolo, como se comentó anteriormente, es propiedad de TI, y el código fuente del mismo acompaña a los dispositivos RF que esta compañía distribuye. Los dispositivos RF utilizados en este sistema, que se explican en mayor detalle más adelante, son de marca TI, y eso explica la elección de dicho protocolo. Según describe en (Friedman, 2008b): “*SimpliciTI* es un protocolo simple creado para las pequeñas redes RF. En tales redes se utilizan típicamente dispositivos con baterías que requieren un largo tiempo de operación, una baja tasa de transmisión de datos y un corto ciclo de servicio, en los que existe un limitado número de nodos comunicándose al mismo tiempo [...]”.

La red de comunicaciones *ZigBee*, es una red mallada compuesta por tres tipos de elementos: los coordinadores de la *Personal Área Network* (PAN), los enrutadores y los dispositivos finales. De forma resumida las redes *ZigBee* son redes dinámicas que funcionan de la siguiente manera: los coordinadores crean las redes ofreciendo para ello una dirección de red a quienes lo soliciten, ya sean enrutadores o dispositivos finales. Los enrutadores cuando entran en la red piden una dirección de red y ofrecen direcciones de subred a quién se las pida; y los nodos finales solo piden direcciones de red. Los enrutadores sirven, por tanto, como repetidores de la información que les llega de las subredes hacia los nodos que tienen por encima. Los lectores RFID pueden programarse como dispositivos finales o como enrutadores. En este desarrollo los utilizamos únicamente como enrutadores, ya que así cuando se utilice un lector RFID, también se tendrá un repetidor de información. En definitiva, los elementos físicos que conforman el sistema son:

- Nodos *PAN Coordinator*
- Nodos *Router-Reader*
- Etiquetas activas: aquí llamadas *Sensor Watch*

En la Figura 3 aparecen imágenes de los diferentes dispositivos (desarrollados por el Grupo Autolog – UCLM) y su aspecto final. Se ha añadido también, junto a ellas, un esquema de conexión de los diferentes componentes que forman parte de cada uno de los nodos, donde se puede observar la estructura y el tipo de microcontrolador de que disponen.

### 3.1. Sensor Watch

Como se mencionaba en el apartado anterior, en este trabajo se utiliza una etiqueta RFID activa de pulsera a la que se ha denominada “*Sensor Watch*”. La utilización de este nombre no es fruto del azar, ya que como se puede observar en la Figura 3a, es un reloj de pulsera lo que se utiliza para la monitorización individual de personas. Más concretamente, el reloj utilizado es un reloj programable y con sensores, de la firma Texas Instruments, comercializado bajo la etiqueta ez430-Chronos. Pese a que inicialmente se desarrolló un dispositivo propio, su sustitución por este modelo comercial se ve fundamentada en varias razones, algunas de ellas las exponemos a continuación:

- El ez430-Chronos es un dispositivo robusto y fiable, con un precio razonablemente bajo (35€). El material de que

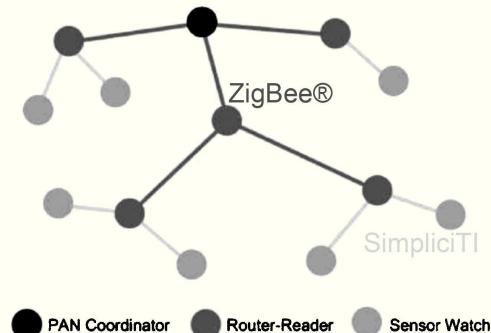


Figura 2. Esquema de comunicaciones entre los distintos módulos del sistema.

está fabricado es resina natural, un material inocuo a la mayoría de las reacciones químicas y la caja es estanca y sumergible hasta una profundidad de 30 metros.

• Este reloj lleva integrado el microcontrolador CC430F6137 de la misma compañía, que es accesible para su programación mediante la utilización de una clavija al efecto. Además, dicho microcontrolador incluye un transceptor de RF a 1GHz, responsable de la transmisión de las tramas de información de forma inalámbrica.

La utilización de este kit de evaluación permite al usuario disponer de gran cantidad de código fuente, como librerías de operaciones o drivers, ya listo para integrar en la aplicación que se pretenda desarrollar.

## 4. Operación del Sistema

En este apartado se va a explicar en detalle la operación de todo el sistema desarrollado. En primer lugar se comenta el funcionamiento de cada uno de los elementos del sistema y a continuación se expone en más detalle el protocolo de comunicación entre los *Sensor Watch* y los *Router-Reader*, así como el que existe entre éstos últimos y los nodos que se sitúan por encima en la red *ZigBee*. En ambos protocolos la eficiencia energética representa el objetivo principal. El fin último es conseguir el mayor tiempo de operación de aquellos módulos que trabajan de forma independiente y se alimentan a partir de baterías. Dichos nodos son los más utilizados, ya que en los espacios confinados, no se suele disponer frecuentemente de una fuente de alimentación adecuada.

El funcionamiento del conjunto del sistema está orientado a la reducción del consumo energético. En general, todos los elementos permanecen en estado dormido, y se despiertan únicamente para ver si existen datos nuevos. De forma que el tiempo que cada uno permanece encendido depende de si hay o no datos que transmitir.

### 4.1. Dispositivos del sistema

En primer lugar, el *Sensor Watch* realiza la recogida de datos referentes a sensores. Esta información pasa a ser enviada al *Router-Reader* más cercano. Una vez allí, la información procedente de sensores, junto con la identificación del *Sensor Watch* que la ha recogido y el primer

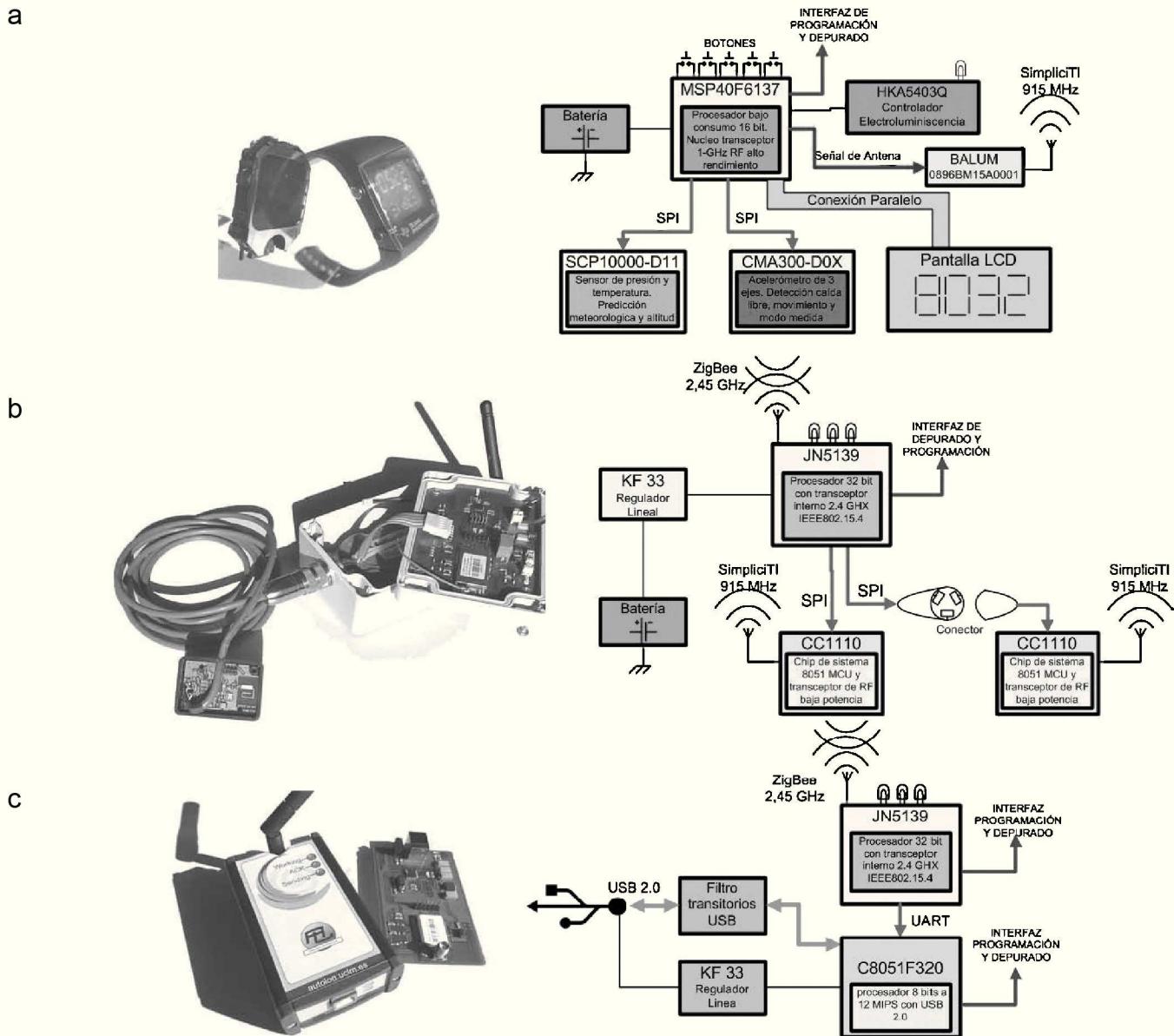


Figura 3. Esquema y aspecto final de cada uno de los dispositivos del sistema: Sensor Watch (a), Router-Reader (b) y PAN Coordinator (c)

Router-Reader que lo ha leído, se transmite a través de la red, hasta alcanzar el PAN Coordinator. A continuación se explica la operación del Sensor Watch que aparece representada en el diagrama de bloques de la Figura 4. La aplicación comienza con la inicialización del sistema y de las variables. En el diagrama se observan tres hilos de operación independientes que aparecen tras la inicialización. Estos hilos son el programa principal, las interrupciones de los puertos y las del temporizador. El funcionamiento del Sensor Watch se basa en la recogida de datos del acelerómetro que lleva incluido. El dispositivo detecta cuándo se produce una caída libre, o cuándo el movimiento del operario está por debajo de un umbral. En ambos casos se envía un mensaje de alarma hacia

el Router-Reader. Para detectar la inmovilidad el reloj compara el valor actual medido por los acelerómetros con las medidas del caso anterior, y esto ocurre cada vez que se produce una interrupción del temporizador. El acelerómetro es el encargado de detectar la situación de caída libre, lanzando una interrupción por un puerto. En el hilo del programa principal se observa como el dispositivo se encuentra normalmente en modo de bajo consumo, y empieza a operar cuando ocurre un Wake-up Event. Este evento puede ser activado mediante un botón o porque el acelerómetro detecte que el usuario ha empezado a moverse. En este último caso, el reloj envía un mensaje hacia el Router-Reader, indicando la situación de retorno a la actividad.

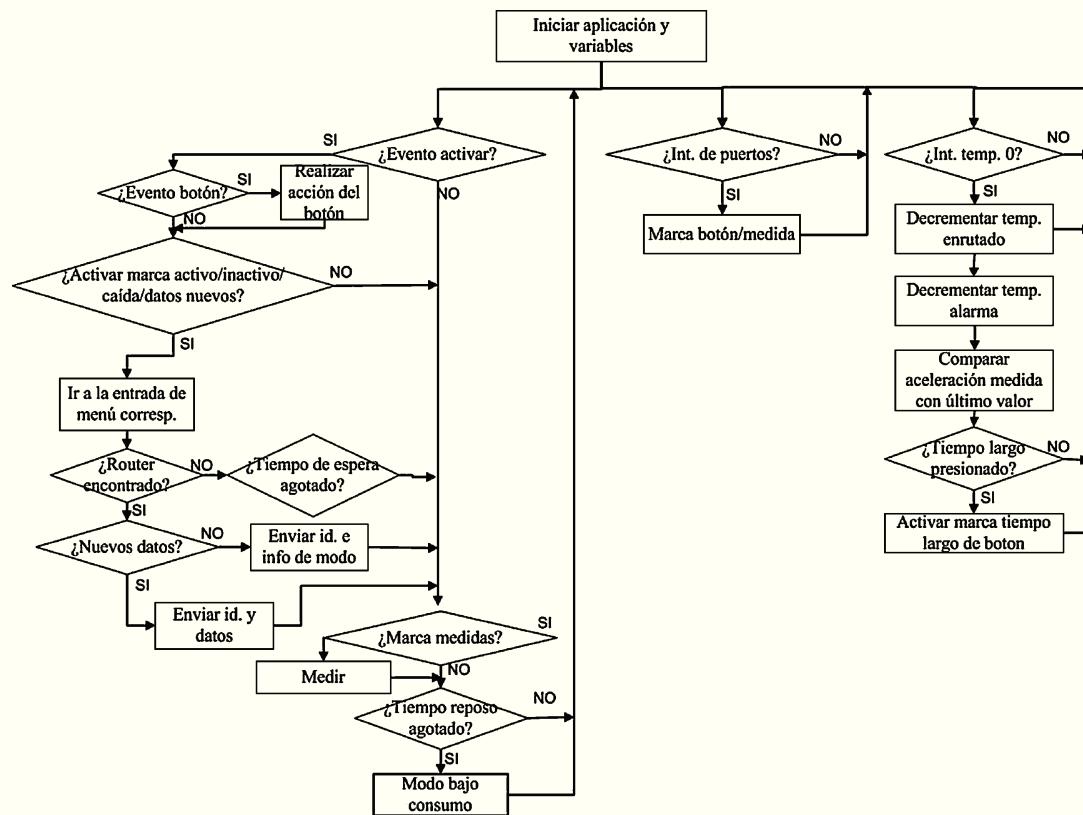


Figura 4. Diagrama de flujo con la operación del Sensor Watch.

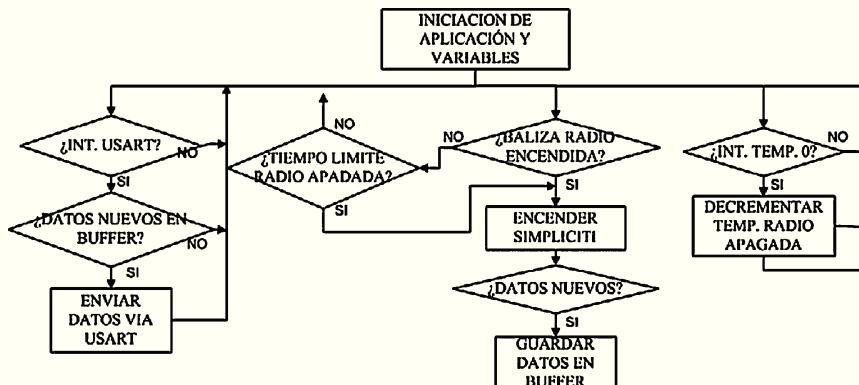


Figura 5. Operación del microcontrolador CC1110 dentro del Router-Reader.

La operación de los Router-Reader es algo más compleja, ya que estos dispositivos tienen dos microcontroladores (CC1110 y JN5139), como se puede observar en la Figura 3b. En consecuencia, se puede dividir el funcionamiento en dos partes correspondientes a cada uno de ellos. Por un lado, el funcionamiento del CC1110 aparece de forma esquemática en la Figura 5. Como se puede observar, existen tres hilos, correspondientes al programa principal, los puertos y el temporizador 0, como ocurría en el caso del Sensor Watch. El hilo principal enciende la radio, espera a recibir nuevos datos a través del SimpliciTI, y los guarda en un buffer. Este microcontrolador enciende la parte de radio cada dos segundos aproximadamente y la vuelve a apagar. El hilo de interrupción

por USART, se activa cuando ocurre un requerimiento de datos desde el JN5139 a través de este puerto. Este hilo, se encarga de enviar los datos que hay en el buffer al citado microcontrolador.

Por otro lado, la operación del JN5139 se recoge esquemáticamente en la Figura 6a. En el programa principal únicamente se hacen peticiones de datos al CC1110 a través del puerto USART y se envían utilizando la red ZigBee. Una vez que los ACK han sido devueltos, el nodo vuelve a dormirse durante unos cinco segundos, periodo al que denominamos más adelante como GAP.

El diagrama de bloques con el funcionamiento del dispositivo PAN Coordinator está representado en la Figura 6b.

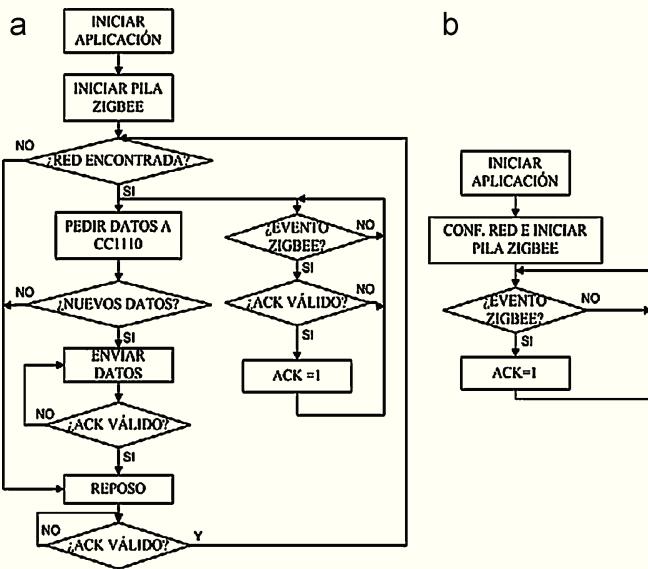


Figura 6. Operación del microcontrolador JN5139 en el Router-Reader (a) y en el PAN Coordinator (b).

Como se puede observar, la operación de este nodo es bastante sencilla, ya que únicamente está alerta a los posibles datos que le llegan a través de su red y los envía vía USB, sin tener que entrar en un estado de bajo consumo ni reinicializarse.

#### 4.2. Protocolos de comunicación utilizados

El sistema hace uso de dos protocolos de comunicación: el ZigBee y el SimpliciTI. El porqué de su elección lo exponíamos en el apartado 3, a la vez que describíamos la implementación física de los mismos. A continuación se va a describir con más detalle el funcionamiento de cada uno de ellos.

El ZigBee (ZigBee, 2008) es un protocolo establecido basado en las nuevas investigaciones sobre algoritmos de red para la construcción de redes ad-hoc de baja velocidad. Este estándar basa sus niveles más bajos (PHY, MAC y DLL) en el estándar WPAN, IEEE802.15.4, y por tanto el patrón de datos que se envía por la red es similar, con direcciones de origen, destino, longitud de trama, datos y ACK. La modulación utilizada es BPSK, en los rangos de frecuencia pequeños, y QPSK en los mayores, con una tasa máxima de transmisión de 20 y 250 kbps respectivamente. La utilización del CSMA/CD evita la existencia de colisiones entre los distintos nodos que intentan acceder al mismo tiempo al uno y al otro.

El protocolo SimpliciTI (Friedman, 2008a, 2008b), es el utilizado por los dispositivos de Texas Instruments: el CC1110 de Router-Reader y el CC430F6137 del Sensor Watch. Este protocolo utiliza el rango de frecuencias 906-924 MHz y una transmisión de datos inferior a los 40kBps. La arquitectura en niveles de red es más sencilla que para otro tipo de redes: básicamente existen 3 capas, una de control del hardware (BSP) y la radio (MRFI); una capa de red (NWK), que se encarga de mover las colas de transmisión y recepción; y la

capa de aplicaciones, con funciones como *Ping*, *Link*, *Join*, etc. La capa de NWK, se encarga de la gestión de los puertos, de modo que cuando se realiza un *Link*, se asigna un puerto a la aplicación y este queda abierto hasta que lo vuelva a cerrar la capa de red. Existen varios tipos de dispositivos: los *End Device* (ED), los *Access Point* (AP), y *Polling Device* (PD). Las redes se pueden formar a partir de dos ED, en cuyo caso actúan como peer-to-peer; o también se puede utilizar un AP, con lo que van a poder conectar un mayor número de ED. La función *Join* se utiliza para que los AP puedan enviar datos desde otros puntos de la red a los ED. En el caso de este trabajo se utilizan redes en árbol, en los que el *Router-Reader* es un AP y los *Sensor Watch* son ED de la red SimpliciTI.

#### 4.3. Modelo de eficiencia energética propuesto

La reducción del consumo energético es uno de los principales objetivos de este trabajo, debido a que se busca la mayor autonomía y tiempo de operación de aquellos elementos que se alimentan con baterías: los *Sensor Watch* y los *Router-Reader*. Se han realizado diferentes ajustes en el uso de los protocolos para conseguir este objetivo. En la comunicación con SimpliciTI se realiza el control del nivel de acceso a los AP. Así, en el caso de que el *Sensor Watch* tenga que enviar un mensaje de caída libre, de inmovilización o de vuelta al movimiento, este ED realiza únicamente la función *Link*, ya que no espera recibir datos desde el AP. La información correspondiente a los diferentes eventos se encuentra en el último byte de la dirección de red del dispositivo (Figura 7a). Solamente en el caso que el usuario exija la transmisión de datos de todos los sensores, se implementa todo el protocolo, incluyendo la función *Join*, lo que implica la transferencia de datos bidireccional y la mayor longitud de las tramas enviadas (Figura 7b), por lo tanto un mayor consumo energético. La reducción del consumo energético se consigue además mediante la reducción del ciclo de servicio (*duty cycle*). De este modo, y para el caso de los transceptores CC1110 de los *Router-Reader*, éstos no funcionan al 100%, sino que se apagan y encienden cada cierto tiempo para comprobar la existencia de nuevos datos. En el caso de los *Sensor Watch*, estos sólo intentan enrutararse y enviar datos en caso de que ocurran eventos: la caída libre, la inactividad o el paso a la actividad; o cuando el usuario indique expresamente que va a realizar el envío de datos.

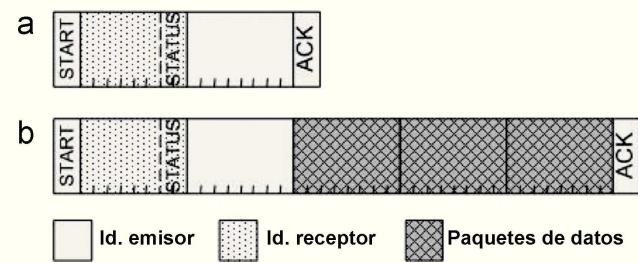


Figura 7. Tramas de datos utilizadas en SimpliciTI: trama de identificación y envío de eventos básicos (a); y trama de envío bidireccional de datos (b).

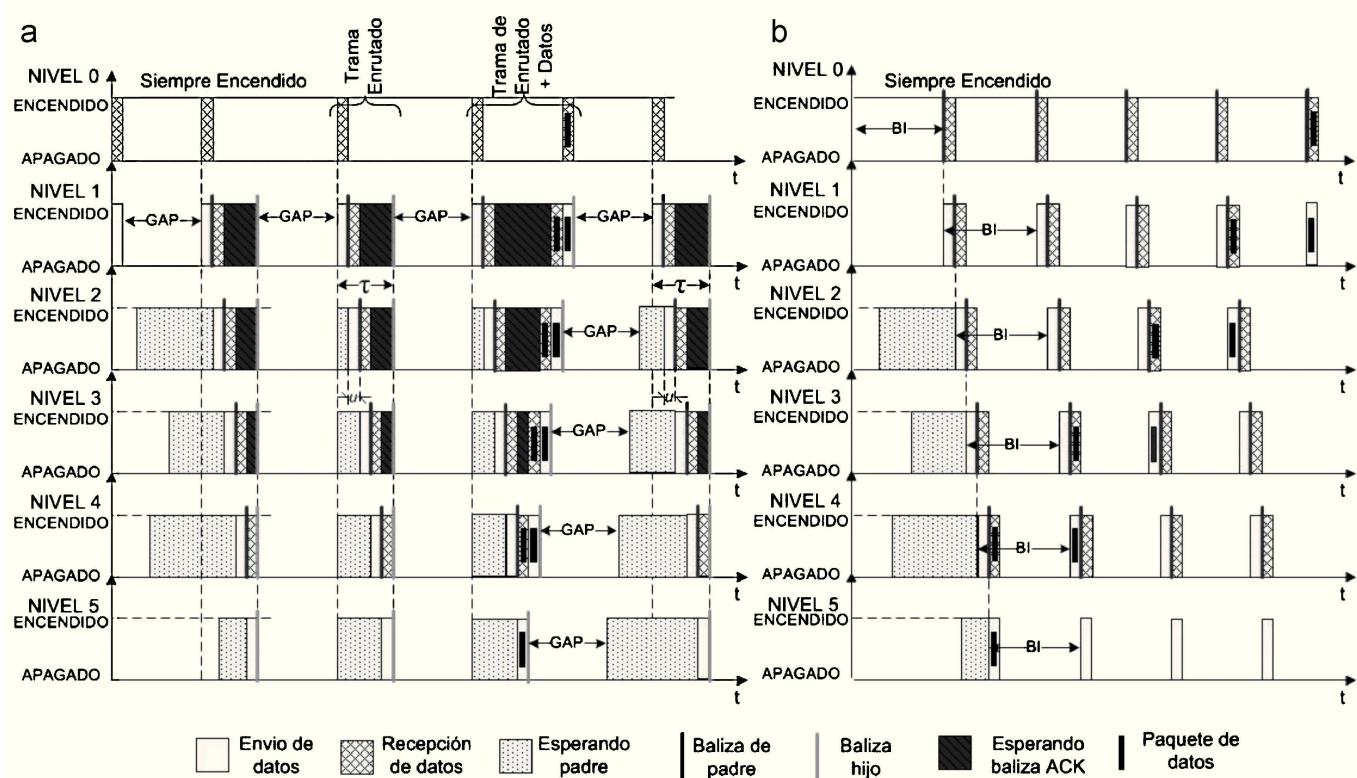


Figura 8. Sincronización entre padres-hijos, en una red de tipo árbol de seis niveles utilizando el sistema de balizado TDDBS (a) y el “Beacon-Mode” de ZigBee (b).

El mayor consumo de los dispositivos Router-Reader se debe a la activación, enrutamiento y envío de datos vía ZigBee. Según la normativa del protocolo ZigBee, la utilización de balizas es una opción disponible. Sin embargo, en este caso no se utiliza el modo balizado, sino que se parte de la utilización del Time Division Beacon Scheluling (TDBS) (Koubâa, Cunha, et al., 2008), que consiste en el uso de nuestras propias “periodic beacon frames”, que son las que ordenan la desactivación de los dispositivos (Figura 8). Los nodos se reactivan tras el paso de un periodo de tiempo (GAP). En este trabajo, se utiliza una red de tipo árbol formando un esquema de padres-hijos (*parent-child*).

Según este esquema, los padres son aquellos enrutadores que se encuentran a un nivel de red superior que los enrutadores hijos. Los padres serán los encargados de enviar las balizas a sus hijos, indicando el momento en que estos pueden desactivarse, nunca antes. Del mismo modo, los hijos pueden tener a su vez otros hijos, a los que enviarán las balizas de desactivación únicamente cuando hayan recibido las suyas por parte de sus progenitores, y así sucesivamente. Por otro lado, los padres no pasan a la inactividad hasta que todos los hijos no hayan terminado sus propias operaciones, es decir, tienen que enviar hacia sus progenitores otra baliza de desactivación. En la Figura 8a se explica de forma gráfica como se suceden las sincronizaciones entre padres e hijos de una red con seis niveles de jerarquía y un único nodo por nivel. El esquema propuesto se ha denominado *Time Division Double-Beacon Scheluling* (TDDBS), debido a que se requiere

la utilización de dos balizas por ciclo. Comparando el modelo propuesto con el “Beacon-Mode” de ZigBee (Figura 8b), se puede observar como el envío de un paquete de datos desde un nodo en el último nivel hasta el coordinador para el caso ZigBee requiere mucho más tiempo que para el TDDBS.

En la figura se señala como  $\tau$  al tiempo en que se activa la radio en el nodo y  $u$  a la unidad mínima de tiempo para realizar una transmisión-recepción de datos. Según se muestra en la figura, el proceso de sincronización entre los diferentes niveles jerárquicos ocurre al principio cuando la red se está formando, y ajusta el momento en que todos los nodos se desactivan teniendo en cuenta que la activación inicial de cada uno de ellos se produce en instantes diferentes. Si un dispositivo se activa, pero no hay ningún parent activo, éste tendrá que esperar a tener un parent antes de enviar toda la información. Como se puede observar en la Figura 8a, en caso de que se haga únicamente la petición de red, el tiempo que los diferentes enrutadores están encendidos es mucho menor que cuando se tienen que enviar además los datos de sensores.

#### 4.4. Cálculo teórico del tiempo de operación

Conocer el tiempo de operación de un dispositivo, es decir el tiempo que este puede operar independientemente utilizando las baterías de que dispone, es un requisito en la mayoría de los sistemas móviles. A la hora de calcular el tiempo de operación, hay que comparar la energía disponible en las baterías con la potencia consumida por los enrutadores.

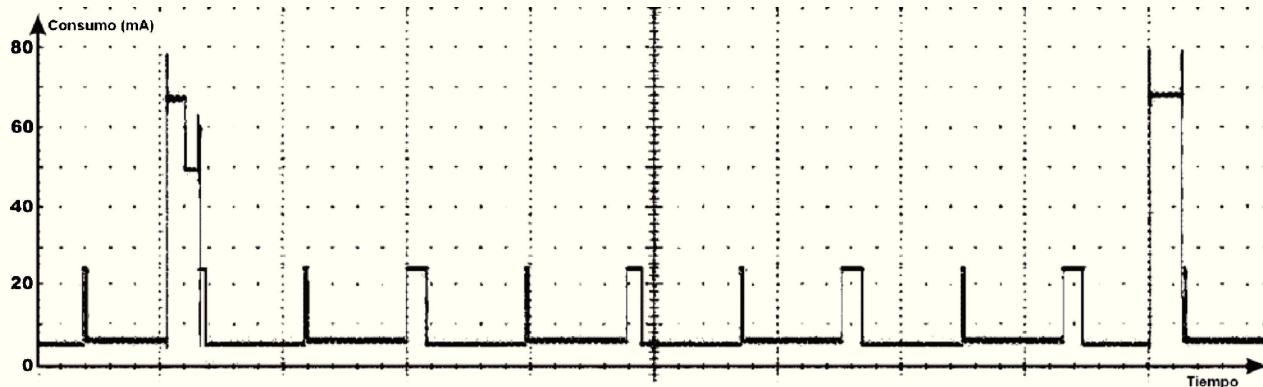


Figura 9. Gráfica que muestra el consumo real de un Router-Reader.

Hemos realizado mediciones, utilizando un osciloscopio, del consumo energético en tiempo real de un *Router-Reader* (Figura 9). Como se puede observar, existen tres niveles de consumo de corriente: un nivel mínimo de unos 50  $\mu$ A, otro sobre los 22 mA y otro nivel que se encuentra rondando los 68 mA. El primero corresponde con el estado de bajo consumo, el segundo corresponde a la alimentación de la radio *SimpliciTI* y el de mayor consumo a los períodos de enrutamiento y envío de datos a través de *ZigBee* hacia el coordinador.

La energía total consumida por un dispositivo será el resultado de multiplicar la corriente por la tensión de alimentación y por el tiempo. En el caso que nos ocupa, y utilizando superposición para calcular la energía total, se pueden separar los consumos energéticos en distintas partes, cada una debida a un nivel diferente de consumo. Para cada nivel  $i$  la energía total consumida se puede obtener a partir del producto de tiempo total por la media de potencia, como se muestra en (1).

$$E_{Ti} = P_{AVi} \cdot t \quad (1)$$

En nuestro estudio, en vez del tiempo total de operación, se utiliza el ciclo de servicio. Para ello utilizamos la definición de potencia media a partir del ciclo de servicio, según (2). Con ello se puede expresar la energía total consumida ( $E_T$ ) por un dispositivo de  $n$  niveles de consumo, en un periodo de tiempo  $T$ , utilizando el ciclo de servicio de cada uno de ellos en (3).

$$P_{AV} = \frac{p \cdot \tau}{T} = p \cdot d_C \quad (2)$$

$$E_T = \sum_{i=1}^n p_i \cdot d_{Ci} \cdot t = V \cdot t \cdot \left( \sum_{i=1}^n i_i \cdot d_{Ci} \right) \quad (3)$$

Donde:

$P_{AV}$ : potencia media consumida

$T$ : duración del ciclo

$\tau$ : periodo de tiempo en que se produce el consumo energético en el nivel  $i$ .

$V$ : tensión de alimentación (se supone constante)

$i_i$ : corriente instantánea consumida en el nivel  $i$

$d_{Ci}$ : tiempo de servicio para el nivel  $i$

#### -Cálculo del ciclo de servicio para el nivel de consumo ZigBee

Calcular el ciclo de servicio supone averiguar el tiempo en que un dispositivo permanece encendido. El ciclo de servicio para el nivel de consumo *ZigBee* ( $\tau_Z$ ) depende de varios parámetros, como se podía ver en la Figura 8; se trata de los siguientes: el número de niveles jerárquicos en la red, el número de hijos que tiene cada nodo y si los dispositivos únicamente se enrutan, o si además envían información de sensores a los niveles superiores. En la Figura 8a se observa que aquellos nodos que se apagan antes, tienen que esperar hasta que sus progenitores se activen para poder empezar a transmitir de nuevo. Y ese tiempo de espera coincide con el tiempo que se han adelantado. Es decir, en una red sincronizada, todos los dispositivos tienen una  $\tau$  idéntica. Por lo tanto, nos queda únicamente calcular este valor.

En primer lugar se ha de calcular la duración del periodo necesario para el enrutamiento ( $\tau_r$ ). Analizando el periodo de enrutamiento de una red de tipo árbol, como la de la Figura 10, se enrutan primero todas las ramas del primer nivel de forma sucesiva. Luego, justo después de que la primera rama progenitora se haya enrutado, lo hacen sus hijas sucesivamente; y cuando la primera hija está enrutada, lo hacen sus descendientes, y así hasta que se completa el árbol. Utilizando el sistema de numeración de nodos de la Figura 10 ( $R_{jklm...}$ ), el tiempo empleado para enrutar toda la red será el que necesita el último nodo que se enruta. Es decir, aquel en el que la suma de sus índices da el máximo valor, según (4).

$$\tau_r = \max(\tau R_{jklm}) \quad (4)$$

Donde:

$$\tau R_{jklm} = u \cdot (j + k + l + m + ...)$$

Ahora calculamos la duración del periodo en los casos que existe enrutamiento más envío de datos ( $\tau_d$ ). Observando de nuevo la Figura 8 y la Figura 10, vemos que la duración del enrutamiento es idéntica a la del caso anterior, por lo que se calcula con (4). Mientras que la duración del envío de datos se

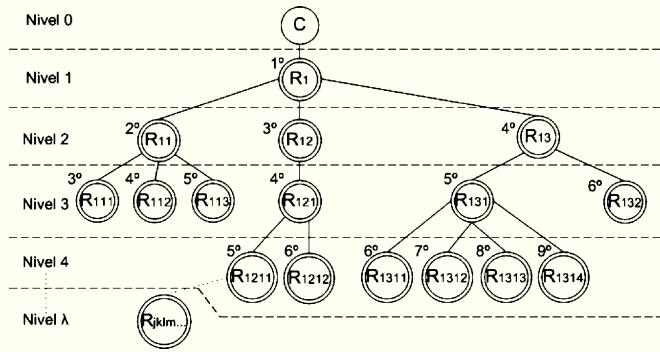


Figura 10. Secuencia de enrutamiento de una red de tipo árbol de cuatro niveles de jerarquía.

obtiene a partir de (5), donde  $\lambda$  es el orden del nivel jerárquico de red en que se encuentra el dispositivo.

$$\tau_d = \max(\tau R_{jklm}) + \lambda \cdot u \quad (5)$$

Por último, el ciclo de servicio para el nivel de consumo energético ZigBee se obtiene con (6). Se utilizan ahora dos coeficientes de peso ( $\omega_r$  y  $\omega_d$ ), para realizar una media ponderada y tener en cuenta que los ciclos con envío de datos generalmente son mucho menos frecuentes que aquellos en los que se realiza únicamente el enrutamiento.

$$\begin{aligned} \tau_z &= \omega_r \cdot \tau_r + \omega_d \cdot \tau_d \\ d_{CZ} &= \frac{\tau_z}{T_z} = \frac{\omega_r \cdot \max(\tau R_{jklm}) + \omega_d \cdot (\max(\tau R_{jklm}) + \lambda \cdot u)}{T_z} \end{aligned} \quad (6)$$

#### - Tiempo de operación de un ejemplo real

Utilizando las expresiones obtenidas, se puede calcular el tiempo de operación estimado de un Router-Reader a modo de ejemplo. Para ello, vamos a utilizar la red que hemos puesto como ejemplo en la Figura 10. Hasta ahora no habíamos hablado del cálculo del ciclo de servicio para los otros niveles de consumo energético. En el caso de la red SimpliciTI, al ser una red con un proceso de enrutado similar al del ZigBee, el cálculo del ciclo de servicio es también muy parecido. El tipo de red SimpliciTI (S) que utilizamos como ejemplo dispone únicamente de dos niveles (el 0 y el 1), con dos dispositivos en cada uno. El ciclo de servicio de la parte de bajo consumo ( $L$ ) es el restante hasta llegar al 100% en el dispositivo que poníamos como ejemplo en la Figura 9. Los parámetros que utilizamos en el cálculo se obtienen a partir de las figuras y las configuraciones de red mencionadas:

$V=3.3$  V,  $i_Z=68$  mA,  $i_S=22$  mA,  $i_L=0,05$  mA,  $ET=1,2$  V x 3 pilas (en serie de 2650 mAh)=9540 mWh

Ahora calculamos los distintos ciclos de servicio:

- Para la red ZigBee:

$$t_{offZ} = 16 \text{ s}, \tau_r = 0.5 \text{ s}, \lambda = 4, \omega_{rZ} = 0.95, \omega_{dZ} = 0.05$$

$$u_z = \frac{\tau_{rZ}}{\max(j+k+l+m)} = \frac{0.5}{8} = 0.0625$$

$$d_{CZ} = \frac{\tau_z}{T_z} = \frac{0.95 \times 0.5 + 0.05 \times (0.5 + 0.25)}{16.5125} = 31 \times 10^{-3}$$

- Para la red SimpliciTI:

$$t_{offS} = 2 \text{ s}, \tau_r = 0.04 \text{ s}, \lambda = 1, \omega_{rS} = 0.5, \omega_{dS} = 0.5$$

$$u_s = \frac{\tau_{rS}}{\max(j)} = \frac{0.04}{2} = 0.02$$

$$d_{CZ} = \frac{\tau_z}{T_z} = \frac{0.5 \times 0.04 + 0.5 \times (0.04 + 0.02)}{2.05} = 24 \times 10^{-3}$$

- Para el estado de bajo consumo:

$$d_{CZ} = 1 - 32 \times 10^{-3} - 25 \times 10^{-3} = 0.943$$

De éste modo se obtiene el tiempo de vida esperado para un dispositivo de esta red como:

$$t = \frac{E_T}{V \left( \sum_{i=1}^n i_i \cdot d_{ci} \right)} = 1076 \text{ hs.} \cong 1.5 \text{ meses}$$

## 5. Aplicación del Sistema en una Instalación Real con Espacios Confinados

En este apartado se explica la implementación del sistema en un entorno físico real. Este entorno real es la zona de bidones de almacenamiento de combustible de una importante empresa de refinado de petróleo en las proximidades de nuestra universidad. En esta instalación, los trabajadores encargados del mantenimiento y reparaciones se introducen en los bidones para realizar su labor. La empresa de seguridad provee a los trabajadores de todo el material necesario para evitar cualquier riesgo. Entre los materiales entregados están los Sensor Watch y el resto de elementos de nuestro sistema. En la Figura 11 aparecen representados los distintos dispositivos emplazados en diferentes posiciones del entorno real. Se puede observar como los trabajadores se encuentran tanto en el interior como en el exterior de los bidones. Los nodos PAN Coordinator se encuentran conectados a un ordenador en el punto de control del sistema. Los nodos Router-Reader se adhieren a cada uno de los depósitos, en la parte exterior, de forma que pueda existir la comunicación libre entre ellos. Y los Sensor Watch los llevan los operarios en sus muñecas.

### 5.1. Experimentos y mediciones realizados

Para llevar a cabo las mediciones de las variables indicadoras del comportamiento del sistema en el entorno real se han realizado una serie de experimentos. Según las

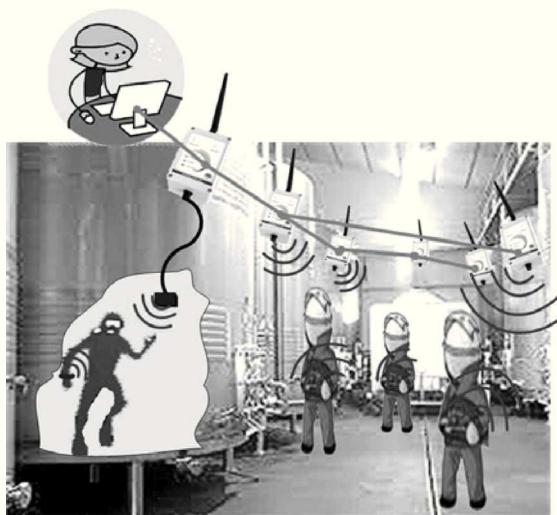


Figura 11. Elementos del sistema en diferentes puntos de una instalación real con espacios confinados.

variables a medir se han efectuado pruebas de alcance de los nodos y los relojes con objeto de observar la influencia de los posibles obstáculos y elementos metálicos. Además se han realizado otras pruebas para medir la influencia de la utilización de un gran número de nodos en el tiempo de vida y la eficiencia de las comunicaciones.

Las distancias medidas entre los distintos nodos ZigBee en campo abierto, para observar su alcance, arrojan unos resultados excelentes. Aunque se ven enormemente reducidas cuando entran en escena elementos metálicos, como los bidones. El mismo efecto, tienen los obstáculos metálicos en el funcionamiento de los *Sensor Watch*. Para una red de 8 nodos con 3 trabajadores en su interior se consiguen alcances de unos 30 metros entre nodos y en torno a los 10 o 15 metros entre los relojes y los *Router-Reader*.

De las pruebas de colisiones y apantallamientos debidos a los objetos que se encuentran en la zona de trabajo resulta una conclusión muy clara: las paredes de los bidones metálicos impiden el paso de las ondas electromagnéticas a su interior. Debido a la necesidad y extrema importancia del acceso a las condiciones de los trabajadores en el interior de los bidones, en esta aplicación, además ha sido necesaria la utilización de un elemento en el interior de los depósitos, que se conecta por cable al *Router-Reader* exterior, de forma que se pueda comunicar el interior del espacio confinado con el espacio libre.

Este elemento es un lector RFID con su antena incorporada (como se puede apreciar en la Figura 3b), que dispone de otro transceptor CC1110 como el utilizado en el *Router-Reader*. El apantallamiento entre bidones, que disminuía el alcance de la red, se ha resuelto mediante la colocación de *Router-Reader* en ambos lados de los mismos formando una matriz, con lo que se consigue un acceso a más del 80% del espacio de trabajo. Debido a la potencia utilizada por los *Sensor Watch*, no ha existido un gran problema derivado del apantallamiento por la cercanía al cuerpo de los trabajadores. Este efecto se ve además mitigado en gran medida por el continuo movimiento de los brazos en diferentes direcciones.

Con la configuración alcanzada para evitar los apantallamientos producidos por los bidones metálicos, se han realizado pruebas con diferentes tamaños de redes. Desde redes sencillas con menos de una decena de *Router-Reader*, lo que es realmente el caso más habitual, hasta otras más complejas de tamaño medio o grande con 30, 40 ó 50 nodos. En la gráfica de la izquierda de la Figura 12 se observa cómo el número de nodos utilizado aumenta la complejidad de las redes, por lo que el tiempo de operación de cada *Router-Reader* se ve drásticamente reducido para redes de más de 15 nodos.

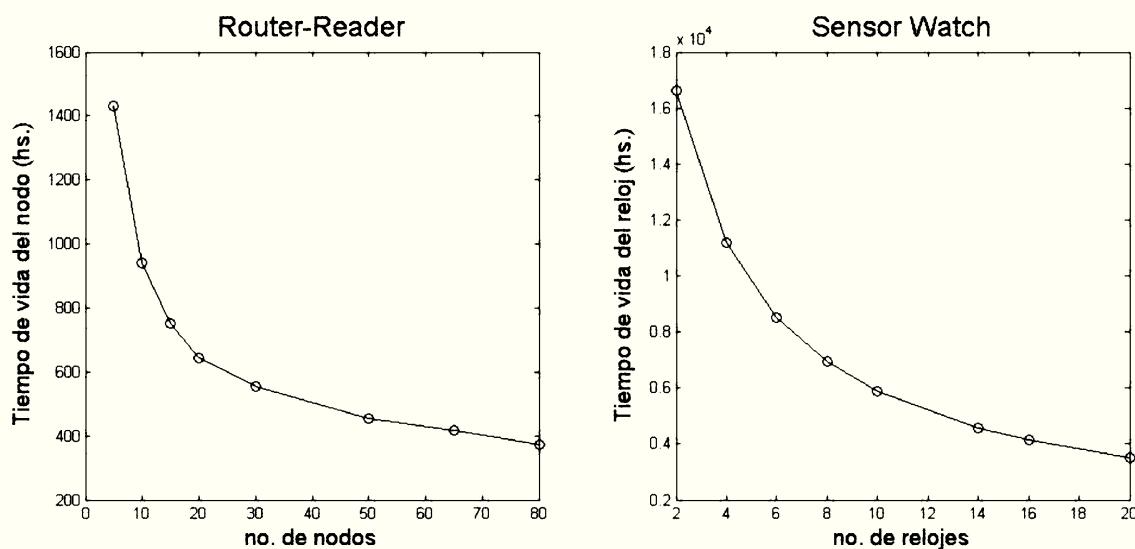


Figura 12. Relación entre el número de nodos utilizado en la red y la duración de las baterías (tiempo de operación) de los diferentes dispositivos de forma individual.

En la gráfica de la derecha (Figura 12) se puede observar como la cantidad de *Sensor Watch* que transmiten a un mismo enrutador también influye en el tiempo de operación individual de cada uno de ellos. Resultado más óptima aquella configuración en la que no confluyen más de 4 o 6 relojes al mismo tiempo; lo que suele ser habitual.

### 5.2. Análisis comparativo de los resultados

A continuación se realiza un análisis comparativo entre los valores obtenidos utilizando las expresiones y medidas realizadas en el laboratorio del apartado 4 y los datos obtenidos de las mediciones realizadas sobre el sistema en su aplicación real. Para realizar las medidas de consumo energético de los distintos dispositivos se realizan mediciones de corriente consumida por los *Router-Reader* y los *Sensor Watch* con el osciloscopio de forma similar a las que aparecen en la Figura 9. Sin embargo, la influencia de los obstáculos que se han mencionado anteriormente influye enormemente en el funcionamiento de los nodos.

El tiempo de vida de los mismos disminuye ya que para conseguir una correcta comunicación se requiere de un mayor consumo energético y más tiempo de actividad debido a las interferencias. En comparación con los tiempos de vida de la red de 14 nodos del apartado 4, se observa en la Figura 12, como para una red de este tamaño esos tiempos se han reducido en un 25%.

Como un análisis adicional, se compara a continuación el modelo de comunicación propuesto, el TDDBS, con el modelo “Beacon-Mode” del protocolo ZigBee y con el modo clásico sin balizas. Para ello se han programado en los *Router-Reader* los distintos modos de funcionamiento, ya que esto no requería ninguna modificación física. Las mediciones se realizan de

forma análoga a la anterior para el consumo energético, y observando el tiempo total de enrutado de los nodos para medir la eficiencia de las comunicaciones. Así, se observa en la Figura 13 como el sistema TDDBS tiene un consumo intermedio entre en elevado consumo del modo normal y el bajísimo consumo del “Beacon-Mode”. Esto se debe a que, según se ha podido demostrar, para el “Beacon-Mode” el periodo de enrutamiento ( $\tau_r$ ) es proporcional al número de hijos y hermanos que tiene un nodo y por tanto no es un valor fijo para todos los nodos (Figura 8b). Sin embargo, la diferencia entre unos y otros, además de en el consumo energético, radica en la eficiencia en la comunicación. Para el caso del ZigBee “Beacon-Mode”, no existe una sincronización ascendente entre los hijos y los padres de la red. Por lo tanto, el momento de envío de datos solamente ocurre en aquellos ciclos en que los hijos se han encendido al mismo tiempo que los padres. Por ejemplo, si un hijo del cuarto nivel jerárquico tiene un dato que enviar, no lo hará hasta que su progenitor esté disponible y esto a veces no ocurre hasta el siguiente ciclo. Además, una vez que la información pase a manos de su progenitor, éste puede que tenga que esperar al siguiente ciclo antes de enviarle la información a su padre, y así sucesivamente. De este modo, en este caso el tiempo necesario para el envío de un paquete de datos utilizando el ZigBee “Beacon-Mode” es de cuatro ciclos, mientras que utilizando el sistema TDDBS se consigue que el envío se realice todo en el mismo ciclo, acercándose al funcionamiento en tiempo real.

En la Figura 13 aparece la gráfica del tiempo empleado en el envío de datos utilizando los diferentes esquemas. Como se puede observar, el modelo TDDBS propuesto es más eficiente en el envío de datos en relación con el consumo, que cualquiera de los modos ZigBee.

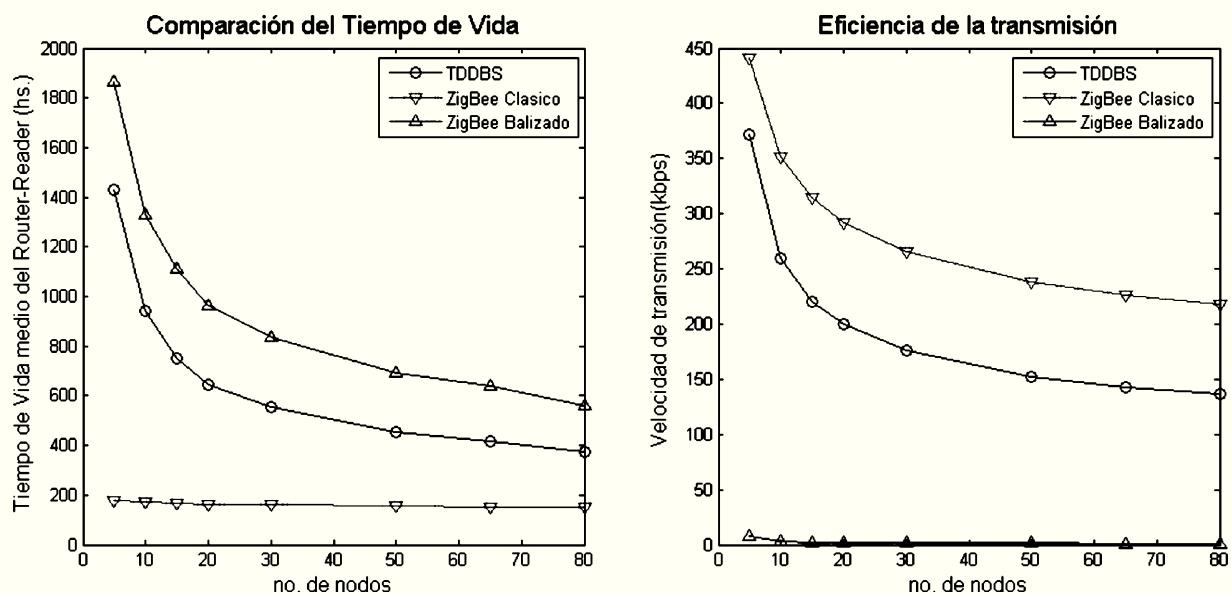


Figura 13. Comparación del sistema TDDBS con los modos ZigBee normal y “Beacon-Mode”

## 6. Conclusiones y Trabajo Futuro.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un sistema de seguimiento de las condiciones de personas que trabajan en el interior de espacios confinados. El objetivo de este trabajo es la identificación, localización y envío de datos referentes a los trabajadores a las diferentes estaciones de control. El sistema además es capaz de detectar las situaciones de emergencia que puedan acontecer, como las caídas libres o las pérdidas de conocimiento. Las empresas de seguridad en el trabajo consideran muy valiosa esta información, especialmente en casos de accidente y situaciones de emergencia, para discernir donde se encuentran los trabajadores y poder identificar las causas que originan tales situaciones.

El sistema desarrollado se basa en la utilización de dos redes de comunicación inalámbrica: una de muy bajo consumo y baja tasa de transmisión de datos que utiliza el protocolo *SimpliciTI* de Texas Instruments; y otra, con un consumo más elevado y un alcance muy superior que utiliza *ZigBee*.

La instalación final del sistema en el entorno real consta de tres tipos de elementos: los *PAN Coordinator*, los *Router-Reader* y los *Sensor Watch*. Los primeros se encargan de formar la red *ZigBee* de largo alcance y los segundos comunican las pulseras sensorizadas con la red, utilizando el protocolo *SimpliciTI*. En este trabajo utilizamos los sensores de que disponen los *Sensor Watch*: acelerómetros, medidores de presión, etc, para monitorizar las condiciones físicas de los trabajadores y lanzar las alarmas correspondientes en caso de emergencia.

Por otro lado, se ha implementado en el sistema un modelo de eficiencia energética en la comunicación al que hemos denominado TDDBS. Este modelo es similar al modelo balizado propuesto en el protocolo *ZigBee*; pero en este caso hemos añadido la utilización de una baliza de apagado que se envía desde el pariente “más joven” de la red cuando éste ha acabado de realizar todas las tareas de red necesarias. De esta forma conseguimos que todos los nodos de la red se sincronicen a la hora de enviar y recibir datos y que el consumo energético sea más homogéneo entre todos ellos. En comparación con el “*Beacon-Mode*” propuesto por la Alianza *ZigBee*, a pesar de que nuestro modelo tiene un consumo energético más elevado, éste permite una comunicación en tiempo real independientemente de cómo sea el tamaño de la red. La comunicación en tiempo real es comparable con la que existe en el modelo clásico de *ZigBee*, pero con un consumo energético mucho más reducido. En conclusión, se ha conseguido un sistema más eficiente en términos energéticos y que permite el envío de datos en tiempo real. Además, según el análisis de los resultados realizado, el sistema se encuentra preparado para su utilización en espacios confinados de forma autónoma; ya que dispone de un tiempo de operación lo suficientemente elevado. Aunque hay que tener en cuenta ciertas consideraciones a la hora de instalar un sistema de estas características, como son los posibles apantallamientos e interferencias debidos a los obstáculos existentes.

Como trabajo pendiente para el futuro se encuentra la elaboración de un sistema, en forma de programa que se ejecute en el punto de control, que mejore el procesado de la

información que llega por la red. De forma que, utilizando la información proporcionada por esta interfaz de usuario, sea posible establecer las pautas para la toma de decisiones con respecto a la gestión de recursos, así como la seguridad en las operaciones de mantenimiento y trabajos en espacios confinados.

## English Summary

### **Human Condition Monitoring in Confined Spaces Through RFID Sensor Tags and Energy-Efficient Wireless Networks.**

#### **Abstract**

Tracking and physical condition monitoring of people who find themselves in hazardous situations, and therefore may require special attention, is crucial to improving their safety. The systems that are commonly used for this purpose do not include individual monitoring or are too expensive and intrusive to be deployed in common situations. In this project, a system based on energy-efficient Wireless Sensor Networks and RFID has been developed to achieve the positioning and monitoring of people in hazardous situations. The system that has been designed is capable of identifying each individual, locating him or her, send data regarding their physical situation and ascertain whether they are located in an open or closed space. Furthermore, in emergency situations such as a fall or loss of consciousness, the system is also capable of triggering the corresponding alarm. The results show that the use of this system allows us to find out the location and state of a person, as well as providing an analysis of the potential risks at each moment, in real time and in an energy-efficient way. In an emergency, the system also allows for a quicker intervention, as it not only provides the location and causes of the event, but also informs about the physical condition of the individual at that moment.

#### **Keywords:**

Accelerometers, Alarm systems, Autonomous Control, Networks, Systems Engineering, Routing algorithms, Transponders, Telecommunication

## Referencias

- Abarca, A., De la Fuente, M., Abril, J. M., García, A., & Pérez-Ocón, F., 2009. Intelligent sensor for tracking and monitoring of blood temperature and hemoderivatives used for transfusions. Sensors and Actuators A: Physical, 152(2), 241-247.
- Bayo, A., Antolín, D., Medrano, N., Calvo, B., & Celma, S., 2010. Development of a Wireless Sensor Network System for Early Forest Fire Detection. Paper presented at the RFID Systech 2010, Ciudad Real, Spain.
- De la Fuente, M., García, A., Abril, J., Abarca, A., & G.-Escribano, J., 2007. Developments in Sensorised Smart RFID Tags

- Monitoring and Traceability of Sensitive Products. Paper presented at the RFID SysTech 2007, Duisburg, Germany.
- Deicke, F., Grätz, H., & Fischer, W.-J., 2010. System design by simulation – A case study for sensor tags embedded in tyres. International Journal of RF Technologies: Research and Applications, 2(1), 37-51.
- European Agency, f. S. a. H. a. W., 2000. Legislation and standards of the European Agency for Safety and Health at Work. Bilbao.
- Fiedman, L. 2008a. SimpliciT! simple modular RF network developers notes (pp. 10): Texas Instruments.
- Fiedman, L. 2008b. SimpliciT! simple modular RF network specification (pp. 20): Texas Instruments.
- G.-Escribano, J., García, A., Wissendheit, U., Loeffler, A., & Pastor, J., 2009, May. Analysis of the applicability of RFID & wireless sensors to manufacturing and distribution lines trough a testing multi-platform. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Viña del Mar, Chile, 1379-1385.
- G.-Escribano, J., García, P., García, A., De la Fuente, M., & Pastor, J., 2008, June. RFID System for Airport Control on a MAS-DUO Agents Platform. Paper presented at the RFID SysTech 2008, Freiburg, Germany.
- García, P., De las Morenas, J., Otamendi, J., García, A., De la Fuente, M., & G.-Escribano, J., 2010, July 1-2. Wireless Sensor Networks and RFID for Improving Information Visibility in Airport Ground Handling Management Paper presented at the 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, Portugal, 201-206.
- Gómez, G. 2007. Prevención de Riesgos para Trabajos en Espacios Confinados. In Sigimo (Ed.). Mérida, Spain: Siprevex.
- Harrop, P., & Das, R. 2009. Wireless Sensor Networks 2009-2019: the new market for Ubiquitous Sensor Networks (USN). In <http://www.idtechex.com>. (Ed.): *IDTechEx Inc.*
- Koubâa, A., Cunha, A., Alves, M., & Tovar, E., 2008. TDBS: a time division beacon scheduling mechanism for ZigBee cluster-tree wireless sensor networks. Real-Time Systems, 40(3), 321-354.
- Lee, J., Su, Y., & Shen, C., 2007, Nov. 5-8. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. Paper presented at the IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 46-51.
- Liu, H., Bolic, M., Nayak, A., & Stojmenovic, I., 2008. Taxonomy and Challenges of the Integration of RFID and Wireless Sensor Networks. IEEE Network, 22(6), 26-35.
- Palomo-López, A., Vales-Alonso, J., Bueno-Delgado, M., Egea-López, E., & Alcaraz, J. On the optimal configuration of CSMA-MS algorithm. Paper presented at the The Third International EURASIP Workshop on RFID Technology, La Manga, Spain. 112-118.
- Pandian, P., Saifeer, K., Gupta, P., Shakunthala, D., Sundersheshu, B., & Padaki, V., 2008. Wireless sensor network for wearable physiological monitoring. Journal of networks, 3(5), 21.
- Raad, M. W., Sheltami, T., & Deriche, M., 2010, September. A ubiquitous mobile telemedicine system for the elderly using RFID. Paper presented at the The Third International EURASIP Workshop on RFID Technology, La Manga, Spain, 16-21.
- Sánchez, T., Kim, D., Huerta Canepa, G., & Koumadi, K., 2009. Integrating Wireless Sensors and RFID Tags into Energy-Efficient and Dynamic Context Networks. The Computer Journal, 52(2), 240.
- Santini, S., & Vitaletti, A., 2007. Wireless Sensor Networks for Environmental Noise Monitoring. Paper presented at the 6. GI/ITG Workshop on Sensor Networks, Aachen, Germany. 98.
- Stankovic, J., Cao, Q., Doan, T., Fang, L., He, Z., Kiran, R., Lin, S., Son, S., Stoleru, R., & Wood, A., 2005, June 2-3. Wireless sensor networks for in-home healthcare: Potential and challenges. Paper presented at the High Confidence Medical Device Software and Systems (HCMDS) Workshop, Philadelphia, 2-3.
- Veasey, D., McCormick, L., Hilyer, B., Oldfield, K., Hansen, S., & Krayer, T., 2006. Confined space entry and emergency response: Wiley-Interscience.
- Virone, G., Wood, A., Selavo, L., Cao, Q., Fang, L., Doan, T., He, Z., & Stankovic, J., 2006, April. An advanced wireless sensor network for health monitoring. Paper presented at the Transdisciplinary Conference on Distributed Diagnosis and Home Healthcare (D2H2), 2-4.
- ZigBee, A. 2008. ZigBee Specification. Revision 3. USA: ZigBee Alliance