

Universidad de Huelva

**Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas
Informáticos y Automática**



**Desarrollo de sensores inalámbricos inteligentes de bajo
coste y alta eficiencia energética**

**Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:**

Juan Aponte Luis

Fecha de lectura: 4 de mayo de 2018

Bajo la dirección de los doctores:

Juan Antonio Gómez Galán

Fernando Gómez Bravo

Huelva, 2018





Universidad de Huelva

*Departamento de Ingeniería Electrónica,
de Sistemas Informáticos y Automática*

Programa de Doctorado

Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental

Tesis Doctoral

**Desarrollo de sensores inalámbricos
inteligentes de bajo coste y alta
eficiencia energética**

Autor

Juan Aponte Luis

Directores

Juan Antonio Gómez Galán

Fernando Gómez Bravo

Huelva, Febrero de 2018

A mis padres y a mi novia

A mis abuelos y familia

Agradecimientos

En primer lugar deseo mostrar mi más profundo agradecimiento a los directores de esta tesis, D. Juan Antonio Gómez Galán y D. Fernando Gómez Bravo, por todo el tiempo que me han dedicado durante la realización de la misma, por compartir conmigo sus conocimientos y por la gran ayuda que me han prestado en la labor de síntesis del trabajo realizado durante estos años.

Quiero también agradecer a mi novia y mis padres el gran esfuerzo que han realizado y el apoyo constante para facilitarme el largo camino hasta finalizar este trabajo. Por otro lado, agradezco la ayuda recibida y los consejos de dos compañeros de Ontech, Francisco Javier Alcina Espigado y Pedro Teixido Rovira.

Por último, también deseo agradecer al Grupo de Investigación “Ingeniería Biomédica” de la Universidad de Sevilla, y en particular a Dña. Laura María Roa Romero, el haberme permitido colaborar con el grupo para poder validar el desarrollo de uno de los trabajos realizados.

Resumen

En la última década, el uso generalizado de sistemas de control y supervisión de procesos ha deparado el desarrollo tecnológico de los sistemas de adquisición de datos. La especial necesidad de encontrar soluciones flexibles, que permitan la instalación sencilla de sensores, evitando complejas redes de cables, ha propiciado que el proceso de adquisición se realice de forma inalámbrica mediante dispositivos alimentados localmente por baterías. El auge de las tecnologías inalámbricas ha sido significativo gracias al ahorro de costes, tanto en lo que a la propia instalación se refiere, como en la posterior revisión y mantenimiento.

Esta tesis tiene por objeto el diseño, desarrollo y construcción de dispositivos sensores con características de bajo coste, reducido consumo de potencia y pequeñas dimensiones, garantizando siempre los requisitos exigidos en cada aplicación. Este trabajo atiende de forma práctica, mediante implementaciones reales, el desarrollo de sistemas de sensores completos, es decir, que considera de forma global la integración de sensores, acondicionamiento de señal, procesamiento y monitorización de datos, para la medida de variables de interés. El desarrollo de este planteamiento se ha particularizado en tres ámbitos distintos: médico, doméstico e industrial.

En el ámbito médico se desarrolla un nuevo método para detectar la frecuencia respiratoria (la cual está relacionada con diversas enfermedades) empleando tecnologías de detección no invasivas, de bajo coste y altamente sensibles. El diseño e implementación del mismo se ha realizado de acuerdo con los principios de detección capacitiva de los osciladores LC, solventando algunos inconvenientes mostrados por las alternativas tecnológicas disponibles actualmente.

En los campos doméstico e industrial se implementan dispositivos de detección de humos y de diferentes tipos de gases, respectivamente. Todos ellos tienen en común la optimización del consumo de potencia mediante estrategias hardware y software que garanticen un alto grado de autonomía de los nodos sensores, dada su naturaleza inalámbrica. Los dispositivos incluyen algoritmos de control capaces de evitar falsas alarmas en la detección. Además, están diseñados con reducidas dimensiones, con un enfoque versátil, de forma que puedan ser fácilmente escalables y adaptados a diferentes entornos.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice general	V
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.1.1 Campos de aplicación de las redes de sensores	6
1.2 Objetivos de la tesis	11
1.3 Organización de la tesis.....	12
Capítulo 2 Diseño e implementación de un sensor inteligente para la monitorización del ritmo respiratorio	23
2.1 Introducción	24
2.2 Consideraciones preliminares	28
2.2.1 Sensores capacitivos en aplicaciones médicas.....	28

2.2.2 Sensores capacitivos basados en oscilador	30
2.2.3 Conceptos básicos de osciladores. Tipos de osciladores	31
2.3 Descripción del sistema	35
2.3.1 Diseño optimizado del oscilador	37
2.3.2 Reducción del efecto de las capacidades parásitas.....	41
2.3.3 Diseño del electrodo	43
2.3.4 Acondicionamiento de la señal de salida.....	44
2.4 Resultados de simulación y experimentales.....	44
2.4.1 Estudio de sensibilidad.....	44
2.4.2 Estudio de interferencias	47
2.4.3 Detección del ritmo respiratorio	49
2.5 Conclusiones	52

Capítulo 3 Sistema inalámbrico de detección de gases con aplicación a entornos industriales..... 57

3.1 Introducción	58
3.2 Descripción y funcionamiento del sistema.	60
3.2.1 Nodo sensor	61
3.2.2 Estación base.....	63
3.2.3 Sistema de gestión de la información.	69
3.3 Administración de la red.....	69
3.3.1 Consideraciones preliminares.....	69
3.3.2 Conservación de la energía.....	75
3.4 Aplicación de monitorización y control.....	78
3.5 Resultados experimentales.....	81
3.6 Conclusiones.	83

Capítulo 4 Sistema inalámbrico de detección de humos con alto grado de autonomía energética para incendios en viviendas 87

4.1 Introducción	88
4.2 Descripción del dispositivo de detección.....	89
4.3 Implementación hardware.	94
4.4 Software.....	97
4.5 Diseño de la envolvente	98
4.6 Resultados experimentales.....	100
4.7 Conclusiones.	105
Capítulo 5 Detector de inundaciones inalámbrico de bajo coste para sistemas domésticos inteligentes	109
5.1 Introducción.....	110
5.2 Diseño hardware	112
5.2.1 Nodo del sensor de inundación inalámbrico.	113
5.2.2 Central de control.....	118
5.2.3 Nodo actuador	120
5.3 Gestión de la potencia y diseño del software.	123
5.4 Aplicación de monitorización y control.....	126
5.5 Conclusiones.	127
Capítulo 6 Conclusiones y líneas futuras de investigación ...	131
6.1 Conclusiones.	131
6.2 Líneas futuras de investigación.....	133
Publicaciones	137

Índice de figuras

Figura 1.1. Arquitectura de comunicación de una red WSN.....	3
Figura 1.2. Componentes de un nodo sensor.....	4
Figura 2.1. Representación de un oscilador en cuadripolos.	32
Figura 2.2. Respuesta del oscilador ante las diferentes condiciones de oscilación.....	33
Figura 2.3. Estructura básica de diversos osciladores senoidales.....	34
Figura 2.4. Topologías simplificadas de osciladores <i>Colpitts</i> y <i>Hartley</i> con transistor bipolar.....	35
Figura 2.5. Esquema del sistema de detección basado en un oscilador de <i>Colpitts</i> junto con las etapas de acondicionamiento.....	36
Figura 2.6. Esquema general del oscilador <i>Colpitts</i> utilizado.....	38
Figura 2.7. Circuito equivalente para señal variable.	39
Figura 2.8. Módulo y fase de la ganancia de lazo y densidad espectral de la tensión de salida del oscilador para (a) $Q = 1$ y (b) $Q = 10$	41
Figura 2.9. Representación de las capacidades parásitas del sensor capacitivo conectado a un paciente tumbado en la cama.....	42

Figura 2.10. Variaciones en frecuencia generadas por un incremento de 0.5 pF (parte superior de la figura) y de 1 pF (para inferior) respecto del valor de C_{MEDIDA} entre 50 pF y 130 pF.....	46
Figura 2.11. Esquema usado en la simulación de interferencias entre dispositivos sensores.	47
Figura 2.12. Simulación de la respuesta en frecuencia de dos sensores para varios casos distintos de estudio de interferencias. Los valores de C_{INTER} fijados son. (a) 0.1 pF, (b) 1 pF, (c) 5 pF, (d) 10 pF.	48
Figura 2.13. Fotografía del sistema de detección propuesto, compuesto por el sensor capacitivo y la electrónica de acondicionamiento.....	49
Figura 2.14. La señal respiratoria resultante después de la segunda etapa de procesamiento de ambos pacientes voluntarios.....	50
Figura 2.15. Señal de salida después de la tercera etapa de procesamiento de ambos pacientes voluntarios.....	51
Figura 3.1. Arquitectura de la red de sensores inalámbricos diseñada.....	61
Figura 3.2. Nodo de detección de gas.....	62
Figura 3.3. Imagen de la placa principal de la estación base.....	64
Figura 3.4. Diagrama de bloques de la estructura del firmware de la estación base..	65
Figura 3.5. Blindaje electromagnético para el módulo RF.	66
Figura 3.6. Antena diseñada y el esquema del módulo RF.....	66
Figura 3.7. Resultado de simulación del funcionamiento de la antena.	67
Figura 3.8. Teclado táctil de la estación base.	68
Figura 3.9. Topología tipo árbol de la red inalámbrica diseñada.	74
Figura 3.10. Imagen de la estación base y el sensor de gas, y el diseño del encapsulado.....	78
Figura 3.11. Vistas principales de la aplicación de monitorización.	80

Figura 3.12. Tiempo de respuesta de las medidas del detector de gas en tres casos. (a) Presión más alta, (b) Presión intermedia y (c) Presión más baja.....	82
Figura 4.1. Diagrama de los bloques que constituyen el nodo de detección.	90
Figura 4.2. Cápsula o cámara del sensor de humo.....	92
Figura 4.3. Interface de acondicionamiento de señal del sensor de humo.	92
Figura 4.4. Esquema del sensor de monóxido de carbono.....	93
Figura 4.5. Placa principal del dispositivo de detección de incendios. (a) Cara superior (b) Cara inferior.	94
Figura 4.6. Placa secundaria. (a) Cara superior (b) Cara inferior.....	95
Figura 4.7. (a) Esquema de sensor capacitivo para el panel táctil. (b) Circuito esquemático para el buzzer.	96
Figura 4.8. Diseño de la envolvente del detector de incendios.....	99
Figura 4.9. Detalle de la fabricación de la envolvente.....	99
Figura 4.10. Diagrama de flujo del proceso de detección.	102
Figura 4.11. Detección de fuego.....	103
Figura 4.12. Detección de vapor de agua.....	103
Figura 4.13. Aplicación móvil.....	105
Figura 5.1. Nodo del sensor de inundación inalámbrico. (a) Top. (b) Bottom.	114
Figura 5.2. Circuito esquemático del sensor de inundación.....	116
Figura 5.3. Cápsula del sensor de inclinación.....	117
Figura 5.4. (a) Envolvente del sensor de inundación. (b) Accesorio magnético para la instalación en una pared.	117
Figura 5.5. Imagen de la central de control.....	120

Figura 5.6. (a) Imágenes de la PCB del nodo actuador. (b) Sirena comercial. 121

Figura 5.7. Detalle del diseño de la envolvente del nodo actuador. 122

Figura 5.8. Algunas vistas de la aplicación móvil de monitorización. 126

Índice de tablas

Tabla 3.1. Clases de dispositivos en IEEE 802.15.4	73
Tabla 3.2. Función de los dispositivos (IEEE 802.15.4).....	73
Tabla 4.1. Factor de corrección dependiendo del lugar de instalación.....	101

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, el control automático de procesos se ha generalizado en innumerables contextos tecnológicos, abarcando desde entornos industriales hasta escenarios más cotidianos como los domésticos. Debido a la calidad requerida en los mismos y a los elevados costes que implica cometer fallos en ellos, es de vital importancia monitorizar muchas de las variables involucradas en el proceso. En este punto, la tecnología inalámbrica sensorial permite monitorizar de forma flexible y económica cualquier tipo de proceso y generar alertas, proporcionando una reducción de los costes de instalación y supervisión.

De forma tradicional, los sensores conforman numerosos sistemas y dispositivos electrónicos, de tal forma que la tecnología sensorial puede aplicarse a prácticamente a todas las áreas: industria, domótica, transporte, salud, medioambiente, defensa, etc., lo que la convierte en una tecnología transversal que continúa teniendo un gran potencial. Cuando estos dispositivos comenzaron a conectarse a Internet, nació el concepto de Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*) [1]. Durante los últimos años, debido a esta tendencia ha surgido una nueva generación de sensores que son independientes de un sistema electrónico concreto y que incorporan en un mismo dispositivo, el transductor (de la variable o variables que interesa medir), la alimentación del propio dispositivo y un módulo de comunicación dotado de cierta inteligencia propia, capaz de organizarse a sí mismo, de tener cierta capacidad de computación para formar los paquetes de datos, ejecutar algoritmos de protocolo y encriptación, además de interconectarse de forma inalámbrica con otros nodos semejantes a él. En este sentido, la microelectrónica ha permitido reducir el tamaño, consumo y coste de los dispositivos de medida hasta integrar todo un sistema en un solo chip SoC (*System On Chip*). La idea que se persigue es crear un entorno en el que la información básica proveniente de cualquiera de los elementos autónomos conectados pueda ser compartida con otros de una forma eficiente y en tiempo real.

Como resultado de este despliegue han surgido las denominadas *redes de sensores inalámbricos* (*Wireless Sensor Networks, WSN*), que consisten en redes constituidas por multitud de sensores individuales que intercambian información entre sí y/o con un nodo central, sin necesidad de cables y mediante un protocolo de comunicación preestablecido. Cada uno de los nodos de la red está conectado a uno o más dispositivos. Los nodos destinados a hacer mediciones son comúnmente llamados nodos sensores. Aquellos que se

encargan de retransmitir datos reciben el nombre de *routers*. Por último, existe un nodo encargado de intercambiar la información con otras redes, llamado estación base, nodo sumidero o pasarela. El usuario puede controlar la red a través de la estación base. La Figura 1.1 ilustra la arquitectura de comunicación de una red de sensores inalámbrica, así como el papel de los diferentes nodos que la componen [2].

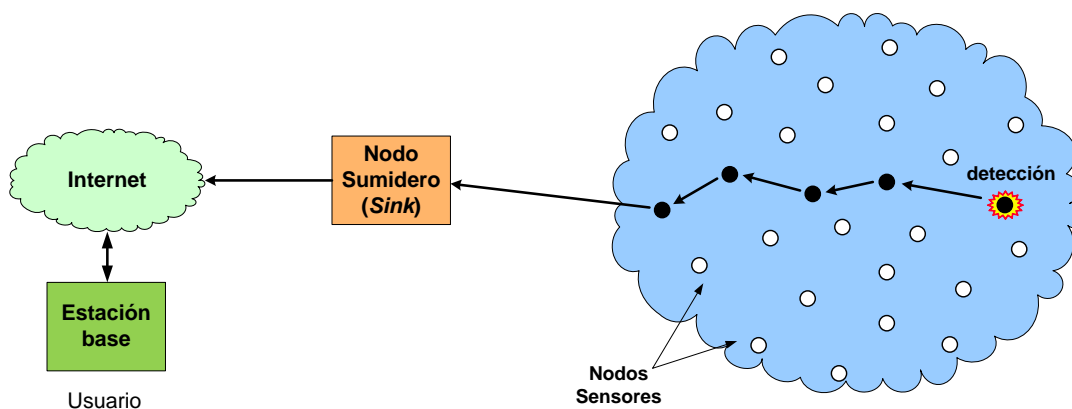


Figura 1.1. Arquitectura de comunicación de una red WSN.

Los datos son recogidos por los nodos sensores y retransmitidos al nodo sumidero, que se encuentra conectado a Internet o a otro tipo de redes. A través de estas otras redes, los datos obtenidos pueden ser finalmente recibidos por alguna aplicación. Los nodos sensores no tienen por qué tener una localización fija. De hecho, lo más usual es que las redes de sensores se desarrollen en entornos móviles y cambiantes y los dispositivos puedan encontrarse desplegados de manera aleatoria.

Por otra parte, cada nodo sensor está compuesto por una serie de elementos que suelen tener una serie de funcionalidades y componentes en común. Estos elementos básicos son los siguientes: los propios sensores, una unidad de procesamiento, una unidad de transmisión/recepción (*transceiver*) y una fuente de alimentación, normalmente una batería. Dependiendo de la

aplicación, la complejidad del nodo sensor puede incrementarse pudiendo existir elementos adicionales, tales como, un generador de energía para evitar el reemplazo periódico de la batería, un sistema de localización o un sistema de posicionamiento móvil. En la Figura 1.2 se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura interna de un nodo sensor [3].

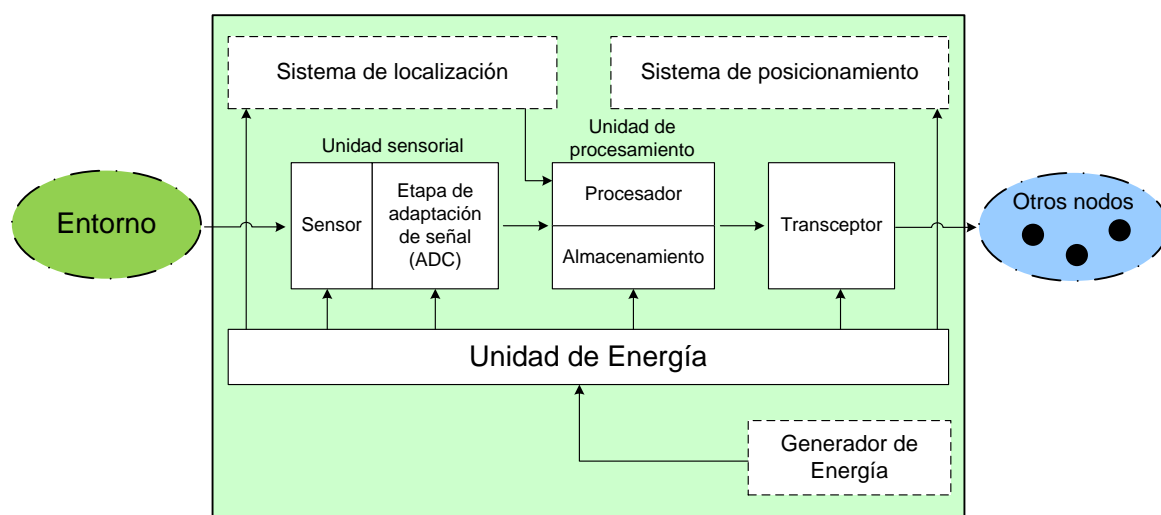


Figura 1.2. Componentes de un nodo sensor.

La unidad sensorial está formada por dos subunidades: uno o varios sensores que producen respuestas medibles ante cambios en fenómenos físicos; y por una etapa de procesamiento de señal. Estos elementos generan una señal analógica continua, que suele ser amplificada, filtrada y digitalizada por un convertidor analógico-digital, para posteriormente, ser enviada a la unidad de procesamiento.

En la unidad de procesamiento se encuentra el microcontrolador que procesa los datos recogidos y controla la funcionalidad del resto de elementos. Además, los datos son almacenados en la memoria del dispositivo, que en algunos casos puede ser extraíble. En el caso de la utilización de un estándar para la comunicación inalámbrica, este dispositivo procesador será el encargado de ejecutar los protocolos propios de dicho estándar.

El transceptor es el encargado de conectar el nodo a la red inalámbrica, y emplea habitualmente un dispositivo de radiofrecuencia (RF). Los dispositivos de radiofrecuencia presentan cierta complejidad al requerir modulación, filtrado, demodulación y circuitos de multiplexación, pero son los más utilizados debido a que el encapsulado que ofrecen es muy reducido, las tasas de datos son bajas y las frecuencias que emplean son reutilizables si los enlaces utilizados son pequeños en distancia. Estas características hacen posible el uso de ciclos de trabajo muy pequeños para la electrónica de radio, lo que repercute positivamente en el consumo del nodo sensor.

La alimentación mediante baterías es común en redes de sensores inalámbricos ya que en su lugar de ubicación no se dispone de una fuente de alimentación. Para ampliar la vida del nodo es obligatorio emplear técnicas de ahorro de energía a nivel hardware y software, e incluso emplear sistemas capaces de generar energía del entorno (*energy harvesting*).

Finalmente, mencionar que hay ocasiones donde es necesario conocer la localización del nodo con gran precisión, o incluso se necesita que el nodo se posicione en el lugar donde se necesita que realice sus mediciones.

Por otro lado, mencionar también que una red de sensores se caracteriza por las ventajas que ofrece el trabajo conjunto de los nodos sensores frente a las medidas proporcionadas por un sensor individual. Algunas de ellas son:

- Rango de sensibilidad mayor: un conjunto de nodos puede abarcar una mayor superficie de operación que uno solo.
- Redundancia: múltiples nodos cercanos unos a otros pueden incrementar la tolerancia a fallos.

- Mejora de la precisión: los nodos pueden colaborar entre sí y combinar sus datos obtenidos para mejorar la precisión de los datos medidos.
- Funcionalidad extendida: los nodos no sólo pueden actuar como sensores, también usan la capacidad de procesamiento que integran para llevar a cabo cálculos simples y transmitir, de esta manera, el dato requerido parcialmente procesado.

Entre los desafíos operativos a los que se enfrentan las redes WSN destacan: la eficiencia de energía; la capacidad limitada de almacenamiento y computación; los bajos anchos de banda y tasas de errores debidos a la naturaleza inalámbrica de la transmisión y a los entornos ruidosos; la escalabilidad debido al gran número de nodos sensores; la necesidad de mantener el funcionamiento en entornos adversos.

1.1.1 Campos de aplicación de las redes de sensores

Las aplicaciones de redes de sensores inalámbricas pueden ser clasificadas de forma general en dos categorías: monitorización remota y localización de objetos móviles. Ambas pueden dividirse en multitud de aplicaciones, tanto para entornos cerrados como abiertos. Exceptuando la localización de objetos móviles, cuyos datos necesitan ser actualizados en tiempo real, el resto de aplicaciones de monitorización remota normalmente se basan en realizar medidas periódicas y mandar las muestras de datos de tres formas: periódicamente en intervalos de tiempo predefinidos; como resultado de la ocurrencia de algún evento específico o el alcance de un umbral de alguna variable; o como respuesta a la petición de un usuario.

De forma concreta, entre las aplicaciones para monitorizar áreas o zonas de forma remota pueden destacarse: la monitorización del medioambiente y hábitats naturales; la agricultura de precisión (en la que se evalúan las condiciones óptimas para producir de manera eficiente y con el menor impacto medioambiental); la detección de incendios forestales; la monitorización de plantas y equipos industriales; el control de la contaminación del aire o de la calidad de aguas; el control de la climatización en interiores; la vigilancia militar; el establecimiento de alarmas inteligentes, etc. Por otro lado, también se pueden encontrar aplicaciones para objetos como: la monitorización estructural; la eco-fisiología vegetal; el mantenimiento basado en condiciones (*condition monitoring*); el mapeado de terrenos urbanos. Para el caso de aplicaciones orientadas a personas, se pueden mencionar: los diagnósticos médicos; los tratamientos de salud o monitorización de señales vitales y anomalías, entre otros.

De forma específica, en esta tesis doctoral se ha abordado el desarrollo de sensores con aplicación a dos campos de máximo interés en la actualidad: el diagnóstico médico, y la monitorización de parámetros en entornos domésticos e industriales.

En el ámbito de los *servicios de atención médica*, los sistemas de salud pública están comenzando a encontrar serias limitaciones: el aumento de los costes y la falta de apoyo médico adecuado, debido a la falta de recursos humanos y tiempo dedicado a la atención de los pacientes, inciden en el aumento de errores médicos cometidos. Estos factores están provocando un cambio donde se pretende fomentar la salud y el bienestar. Esta transformación es desafiante porque implica cambios en varios aspectos, tales como: (1) un cambio de la medicina reactiva a una medicina proactiva y preventiva; (2) el

tratamiento descentralizado de los hospitales a los hogares; y (3) dar más protagonismo a los ciudadanos para permitir una medicina colaborativa donde el paciente y el personal médico son los dos responsables de la gestión de la salud. A pesar de la resistencia de parte de la comunidad médica a adoptar nuevas tecnologías, principalmente debido al recelo sobre la exactitud y la eficacia de la utilización de estas herramientas en procesos bien definidos, los usuarios tienden a adoptar y aprobar el uso de tecnologías para la vigilancia de la salud.

La tendencia actual es el uso de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en los escenarios de atención médica. Comienza a ser común el uso de sensores portátiles, dispositivos móviles y la computación en la nube. La aplicación de esta tecnología ha ofrecido la oportunidad de realizar un seguimiento y un control remoto de los pacientes, monitorizando las señales de interés sin necesidad de interrumpir su vida normal en su domicilio, mejorando así su calidad de vida [4]. Se han planteado soluciones con dispositivos portátiles [5] o incluso insertados en la ropa del paciente [6], así como redes de sensores corporales implantables [7]. Entre las enfermedades recientemente controladas destacan, la hipertensión [8]-[10], la diabetes [11],[12], la pérdida de peso [13],[14] y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) [15]-[17]. La necesidad de estudiar cómo estos cambios pueden ocurrir ha llevado a la aparición de nuevas disciplinas en el área de las TICs como Telecare, Telemedicina, e-Salud, vida cotidiana asistida por el entorno (*Ambient Assisted Living, AAL*) y *Pervasive Healthcare* (salud omnipresente: atención médica a cualquier persona, en cualquier momento y en cualquier lugar, eliminando las restricciones de tiempo y ubicación) [18]-[19].

El nuevo paradigma que introduce el IoT se centra en impulsar la integración de la tecnología en las rutinas diarias. La investigación sobre cómo el IoT puede afectar el desarrollo de las aplicaciones de la atención de la salud es un proceso en marcha [20]-[22]. La disponibilidad de tecnologías inalámbricas, como BLE (*Bluetooth/Low Energy*), IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 (Wi-Fi), *Long-Term Evolution* (LTE) y 5G, y la convergencia hacia protocolos basados en IP son algunas de las razones para una integración más fácil de los dispositivos móviles y redes de sensores inalámbricos (WSN) [23]-[26]. Otras tecnologías que también pueden mejorar la integración son la identificación por radiofrecuencia (RFID), su derivación *Near Field Communication* (NFC) y perfiles de detección de proximidad BLE, que permiten una identificación más fácil de "cosas", ya sean personas o dispositivos, en escenarios de IoT [27].

En esta línea de la salud pública es importante el desarrollo de sensores de bajo coste, alta fiabilidad y elevado rendimiento para su uso en terapias médicas no invasivas. Las soluciones actuales promueven la miniaturización extrema para alcanzar la invisibilidad de los dispositivos de detección y conseguir una mayor aceptación por parte de los usuarios. También se vuelve prioritario el desarrollo de sensores no invasivos, de forma que la interacción entre sensor y paciente sea la mínima, disminuyendo de esta forma las molestias que sobre él pudiera causar sensor y facilitando por tanto la eficiencia de la medida.

Otra aplicación conocida de las redes de sensores es la monitorización de un elevado número de variables ambientales. Estas variables incluyen temperatura, humedad, luminosidad, ruido ambiente, presión, etc., y pueden variar dependiendo del entorno donde se ubique la red de sensores: en el ámbito doméstico o en las denominadas *smart home* es habitual monitorizar

otras variables, además de algunas de las mencionadas, como detección de humo, inundaciones por roturas de tuberías, etc. En el caso de los entornos *industriales* es habitual medir la concentración de determinados tipos de gases, vibraciones en motores, etc.

En el ámbito doméstico, el IoT ofrece soluciones atractivas en sistemas domóticos que abarcan varios aspectos de control como la climatización, el consumo energético o la seguridad del edificio; para el control ambiental se necesita conocer la temperatura y humedad de ciertos puntos del edificio para optimizar el funcionamiento de los equipos de aire acondicionado. Es normal que en estos sistemas cualquier anomalía que se produzca haga saltar una alarma que llega al propietario a través por ejemplo de su teléfono móvil [28]-[8].

En el ámbito de la industria pesada, como por ejemplo la industria petroquímica, y sobre todo aquellas que trabajan con productos con riesgo de explosión, es necesario monitorizar las condiciones ambientales dentro de la planta para garantizar la seguridad en los procesos, protegiendo a los equipos y al personal de planta [1]-[36]. Los detectores de gases forman parte del sistema de seguridad de una planta. El sistema de seguridad genera alarmas y, en algunos casos, es capaz de provocar una parada de emergencia. La red de sensores encargados de vigilar la presencia de posibles fugas de gases mide la concentración de gases inflamables o tóxicos que contienen el petróleo y el gas natural. Para detectar la presencia de un gas en un espacio determinado pueden utilizarse varios métodos de detección: electroquímicos, catalíticos o de conductividad térmica, ya sea para medir gases combustibles o no combustibles. Sensores de caudal, presión y temperatura también suelen formar parte de estos procesos.

En definitiva, el diseño, el desarrollo y la implementación de nodos sensores en muchas de las aplicaciones actuales viene marcado por la exigencia una serie de prestaciones comunes: (1) capacidad de operar con grandes restricciones de energía, (2) reducido tamaño, (3) facilidad de instalación y despliegue, (4) reducidos costes de mantenimiento. Otros requisitos demandados ya vienen particularizados por la aplicación en cuestión.

1.2 Objetivos de la tesis

El objetivo principal de la tesis es desarrollar dispositivos sensores de bajo coste, reducidas dimensiones y alto grado de autonomía energética de aplicación en el ámbito de la salud, la industria y *smart home*.

Recientemente el Grupo de Investigación "Sistemas Electrónicos y Mecatrónica" inició una nueva línea de trabajo en el diseño de redes inalámbricas sensoriales y de sistemas empotrados. Esta Tesis Doctoral pretende contribuir a este campo de investigación combinando el desarrollo de sensores y las comunicaciones inalámbricas.

En particular, los objetivos de esta tesis son los siguientes:

- Propuesta y validación experimental de un sistema de detección del ritmo respiratorio empleando tecnología no intrusiva, y con características de bajo coste y alta sensibilidad de detección, mediante los principios de sensorización capacitiva de los osciladores LC.
- Diseño, implementación y test de un sensor de incendios en el ámbito doméstico capaz de discriminar diferentes tipos de humos, reduciendo así las falsas alarmas de detección. Se ha pretendido además, desarrollar

un algoritmo para calibrar el dispositivo y que éste pueda ser ubicado en diferentes estancias de una vivienda con características de detección diferenciadas. También es objetivo de la Tesis, conseguir que el diseño sea compacto y de alta autonomía energética, para ser lo más transparente posible para el usuario.

- Diseño, implementación, validación y test de una red inalámbrica de sensores para la monitorización remota de parámetros en el ámbito de la industria, de forma específica, en la detección de diferentes tipos de gases. El trabajo realizado incluye el desarrollo de los nodos sensores, la central de control y el sistema de gestión de la información, prestando especial atención al diseño hardware y software para conseguir una optimización del consumo de potencia.
- Diseño de un sensor para detectar inundaciones en viviendas o instalaciones industriales con características de bajo coste, facilidad de instalación y mantenimiento. Este objetivo también incluye el desarrollo de una central de control que permite diferentes tipos de comunicaciones pudiendo adaptarse a varias tecnologías y frecuencias. Finalmente, también se ha implementado la red inalámbrica incluyendo un nodo actuador y una aplicación móvil para la gestión de la información.

Parte de este trabajo ha sido publicado en varios artículos de revistas y se ha presentado en varias ferias y eventos internacionales.

1.3 Organización de la tesis

Los contenidos de la tesis están organizados de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se presenta el diseño y desarrollo de un sensor para monitorizar el ritmo respiratorio. En primer lugar se describe brevemente la importancia de medir este parámetro para detectar diversas enfermedades, haciendo especial énfasis en la apnea del sueño, para la cual se mencionan las principales técnicas empleadas en su diagnóstico. A continuación, se especifican las características concretas que debe tener un sensor que pretenda emplearse en este tipo de aplicaciones. Se presenta el diseño del sensor basado en un oscilador LC y se tienen en cuenta el efecto de las capacidades parásitas y el diseño del electrodo. Finalmente, se ofrecen resultados de simulación y experimentales en los que además se realiza un análisis de sensibilidad y un estudio de interferencias. Este capítulo se corresponde con el desarrollo presentado en el artículo:

J. Aponte, L. Roa, J. A. Gomez-Galan, D. Naranjo Hernández, M. Estudillo-Valderrama, G. Barbarov, C. Rubia-Marcos. "Design and implementation of a smart sensor for respiratory rate monitoring". *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3019-3032, Feb. 2014.

Los siguientes capítulos de la tesis están orientados al diseño y desarrollo de sensores inalámbricos con aplicación a entornos domésticos e industriales, e intentando reducir el consumo de potencia para maximizar la autonomía de los nodos.

Así, en el Capítulo 3 se plantea el diseño de una red inalámbrica para detectar diferentes tipos de gases, como metano, propano o butano, en un entorno industrial. Se describe el diseño del nodo sensor, de la estación base, los detalles de la red inalámbrica con topología tipo árbol, y su aplicación para monitorización y control. Se proporcionan resultados experimentales de las

medidas tomadas para diferentes gases. Este capítulo se corresponde con el trabajo descrito en:

J. Aponte, J. A. Gómez-Galán, F. Gómez-Bravo, M. Sánchez-Raya, J. Alcina, and P. Teixedo, "An Efficient Wireless Sensor Network for Industrial Monitoring and Control", *Sensors*, vol. 18, no. 1, pp. 182, Enero 2018.

En el Capítulo 4 se presenta un sistema de detección de incendios en viviendas que combina varios tipos de sensores: humo, monóxido de carbono y temperatura, y que por tanto, no sólo detecta humo, sino que discrimina entre sus diferentes tipos. Esta característica permite reducir falsas alarmas. El nodo inalámbrico tiene un alto grado de autonomía de casi cinco años habiéndose reducido el consumo de potencia tanto a nivel de hardware como de software. Para todos los elementos que componen el nodo de detección, la solución alcanzada presenta unas dimensiones muy reducidas. El sistema puede ser ubicado en diferentes zonas de una vivienda para lo cual el algoritmo incluye una serie de coeficientes o factores de corrección que ajusta la sensibilidad del sensor a diferentes escenarios. Los resultados experimentales muestran como el sistema de detección es capaz de discernir entre situaciones de incendios reales de otras que no lo son. Este capítulo se corresponde con el desarrollo detallado en el artículo:

J. Aponte, J. A. Gomez-Galan, J. Alcina. "Low Power Wireless Smoke Alarm System in Home Fires". *Sensors*, vol. 15, pp. 20717-20729, Agosto 2015.

El Capítulo 5 también se enmarca dentro de las soluciones domésticas, y de forma particular presenta un sensor de inundación o detección de fugas de aguas, que si bien es un sensor menos utilizado en *smart homes*, no es menos

cierto que recientemente ha comenzado a incluirse en la lista de dispositivos habitualmente conectados dentro de una vivienda. Se presentan todos los detalles del diseño hardware, tanto del nodo inalámbrico de detección como de la central de control. Para completar el diseño de la red inalámbrica también se ha incluido el diseño de un nodo actuador formado por una sirena para avisar de forma acústica al usuario final. Se proporciona información de la estrategia seguida para la gestión del consumo de energía, así como del software desarrollado. Se ha implementado también una aplicación de monitorización y control desde un teléfono móvil. Este capítulo se corresponde con el trabajo enviado a la revista:

J. Aponte, J. Galán, F. Gómez-Bravo, J. Alcina, and P. Teixido. “Low cost wireless flood sensor for smart home systems”, enviado a la revista *Journal of Sensors*.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación.

Referencias del capítulo 1

- [1] L. Xu, W. He, and S. Li. "Internet of things in industries: A survey", *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2014, 10, 2233-2243.
- [2] P. Rawat, K, Deep Singh, H. Chaouchi, J. M. Bonnin. "Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies", *J Supercomput* (2014) 68:1-48.
- [3] C. Rubia-Marcos. "*Diseño de WSN con restricciones: perspectiva a nivel de circuito y a nivel de sistema*", Tesis Doctoral, Universidad de Huelva, 2011.
- [4] H. Alemdar, C. Ersoy. "Wireless sensor networks for healthcare: A survey", *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, Oct. 2010, pp. 2688-2710
- [5] U. Anliker, JA. Ward, P. Lukowicz, et al. "AMON: a wearable multiparameter medical monitoring and alert system", *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* Dec. 2004, 8(4), 415-427.
- [6] G. Cho, SK. Yoo. "Wearable ECG Monitoring System Using Conductive Fabrics and Active Electrodes", *Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction*, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [7] A. Darwish and A. E. Hassanien. "Wearable and Implantable Wireless Sensor Network Solutions for Healthcare Monitoring", *Sensors*, 2012; 12(9), 12375-12376.

- [8] P. Bernocchi, S. Scalvini, F. Bertacchini, F. Rivadossi, M.L. Muiesan, "Home based telemedicine intervention for patients with uncontrolled hypertension -A real life non-randomized study". *BMC Med. Inform. Decis. Mak.* 2014, 14, 52.
- [9] S. Omboni, R. Ferrari. "The role of telemedicine in hypertension management: Focus on blood pressure telemonitoring". *Curr. Hypertens. Rep.* 2015, 17, 21.
- [10] J.C. Sieverdes, M. Gregoski, S. Patel, D. Williamson, et al. "mHealth medication and blood pressure self-management program in Hispanic hypertensives: A proof of concept trial". *Smart Homecare Technol. Telehealth* 2013, 1, 1-10.
- [11] K. Carlisle, R. Warren. "A qualitative case study of telehealth for in-home monitoring to support the management of type 2 diabetes". *J. Telemed. Telecare* 2013, 19, 372-375.
- [12] A. Neinstein, J. Wong, H. Look, B. Arbiter, K. Quirk, S. McCanne, Y. Sun, M. Blum, S. Adi. "A case study in open source innovation: Developing the Tidepool Platform for interoperability in type 1 diabetes management". *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 2016, 23, 324-332.
- [13] C.L. Neumann, F. Wagner, J. Menne, C. Brockes, et al. "Body weight telemetry is useful to reduce interdialytic weight gain in patients with end-stage renal failure on hemodialysis". *Telemed. e-Health* 2013, 19, 480-486.

- [14] J.B. Wang, L.A. Cadmus-Bertram, L. Natarajan, M.M. White, et al. "Wearable Sensor/Device (Fitbit One) and SMS text-messaging prompts to increase physical activity in overweight and obese adults: A randomized controlled trial". *Telemed. e-Health* 2015, 21, 782-792.
- [15] B. Odeh, R. Kayyali, S. Nabhani-Gebara, N. Philip, P. Robinson, C.R. Wallace. "Evaluation of a Telehealth Service for COPD and HF patients: Clinical outcome and patients' perceptions". *J. Telemed. Telecare* 2015, 21, 292-297.
- [16] P. Whitten, M. Mickus. "Home telecare for COPD/CHF patients: Outcomes and perceptions". *J. Telemed. Telecare* 2007, 13, 69-73.
- [17] A.-K. Dyrvig, O. Gerke, K. Kidholm, H. Vondeling. "A cohort study following up on a randomised controlled trial of a telemedicine application in COPD patients". *J. Telemed. Telecare* 2015, 21, 377-384.
- [18] J.E. Bardram. Pervasive healthcare as a scientific discipline. *Methods Inf. Med.* 2008, 47, 178-185.
- [19] S.M. Riazul, D. Kwak, MD. Humaun, M. Hossain, K-S. Kwak. "The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey", *IEEE Access*, vol. 3, pp. 678-708, 2015.
- [20] U. Varshney. "Pervasive healthcare and wireless health monitoring". *Mob. Netw. Appl.* 2007, 12, 113-127.
- [21] N. Bui, M. Zorzi. "Health care applications: A solution based on the internet of things". *In Proceedings of the 4th International Symposium on*

- Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, Barcelona, Spain, 26–29 October 2011; pp. 1–5.
- [22] S.M. Razul Islam, D. Kwak, H. Kabir, M. Hossain, K.-S. Kwak. “The internet of things for health care: A comprehensive survey”. *IEEE Access* 2015, 3, 678–708.
- [23] L. Atzori, A.; Iera, G. Morabito. “The Internet of Things: A survey”. *Comput. Netw.* 2010, 54, 2787–2805.
- [24] J.A. Stankovic. “Research directions for the internet of things”. *IEEE Internet Things J.* 2014, 1, 3–9.
- [25] A. Aijaz, A.H. Aghvami. “Cognitive machine-to-machine communications for internet-of-things: A protocol stack perspective”. *IEEE Internet Things J.* 2015, 2, 103–112.
- [26] J. Ko, C. Lu, M.B. Srivastava, J.A. Stankovic, A. Terzis, M. Welsh. Wireless sensor networks for healthcare. *Proc. IEEE* 2010, 98, 1947–1960.
- [27] S. Amendola, R. Lodato, S. Manzari, C. Occhiuzzi, G. Marrocco. “RFID technology for IoT-based personal healthcare in SmartSpaces”. *IEEE Internet Things J.* 2014, 1, 144–152.
- [28] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications - concepts and real implementations", *Proc. IEEE*, 101(11), (2013), 2381-2396.

- [29] L.C. De Silva, C. Morikawa, I.M. and Petra. "State of the art of smart homes", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 2012. 1313-1321.
- [30] A. Sawada, T. Higashino, T. Oyabu, Y. Takei, H. Nanto, K. Toko. "Gas sensor characteristics for smoldering fire caused by a cigarette smoke". *Sens. Actuators B* 2008, 130, 88–93.
- [31] B. M. M. El-Basioni, S.M. Abd El-kader, M. A. and Fakhreldin. "Smart home design using Wireless Sensor Network and Biometric Technologies", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 2, no. 3, 2013. pp. 413-429.
- [32] N. M. Z. Hashim, N. B. Hamdan, Z. Zakaria, R. A. Hamzah, A. Salleh. "Flood Detector Emergency Warning System", *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol. 2, no. 8, 2013, pp. 2332-2336.
- [33] O. Casas, M. López, M. Quílez, X. Martinez-Farre, et al. "Wireless sensor network for smart composting monitoring and control", *Measurement*, 47 (2014), 483-495.
- [34] Z. Chen, Z. Shi, Q. Guo. "Design of wireless sensor network node for carbon monoxide monitoring". *Telecommun. Syst.* 2013, 53, 47–53.
- [35] Y. Yuan, Q. Xu, X. Guan, Z. Liu. "Industrial high-speed wireless synchronous data acquisition system with real-time data compression", *Measurement* 46 (2013) 3482–3487.

- [36] K. Arthi, A. Vijayalakshmi, and P. V. Ranjan. "Critical Event Based Multichannel Process Control Monitoring using WSN for Industrial Applications", *Procedia Engineering* 64 (2013) 142–148.

Capítulo 2

Diseño e implementación de un sensor inteligente para la monitorización del ritmo respiratorio

En este capítulo se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un sensor inteligente no invasivo para monitorizar el ritmo respiratorio. Este sensor está destinado a superar los inconvenientes de otros sistemas que están actualmente disponibles en el mercado y que son caros, incómodos, difíciles de instalar, proporcionan baja sensibilidad de detección y calibración poca o nula de paciente a paciente. El dispositivo se basa en la detección capacitiva por medio de un oscilador LC. Los resultados experimentales muestran que el sensor cumple los requisitos necesarios, lo que hace que el sistema de monitorización propuesto sea posible con la tecnología utilizada.

2.1 Introducción

La monitorización del ritmo respiratorio juega un papel importante en el control y seguimiento de enfermedades con alta prevalencia, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) [1] o la apnea del sueño [2],[3]. Con este objetivo, la detección del ritmo respiratorio se convierte en una alternativa utilizada frecuentemente, combinada también con la medición otras variables fisiológicas, como la frecuencia cardíaca o el porcentaje de saturación de oxígeno de la hemoglobina en sangre mediante pulsioximetría [4],[5].

La apnea del sueño es un trastorno frecuente en el que una persona hace una o más pausas en la respiración o tiene respiraciones superficiales durante el sueño. Las pausas pueden durar entre unos pocos segundos y varios minutos. A menudo ocurren entre 5 y 30 veces por hora, o incluso más. Por lo general, la respiración vuelve a la normalidad, a veces con un ronquido fuerte o con un sonido parecido al que una persona hace cuando se atraganta. Casi siempre la apnea del sueño es un problema crónico de salud que altera el sueño. La persona pasa de un sueño profundo a un sueño liviano cuando hay una pausa en la respiración o cuando la respiración se vuelve superficial. El síndrome de la apnea del sueño es una enfermedad muy frecuente. Se calcula que en España hay entre uno y dos millones de personas que la padecen, aunque sólo estén diagnosticados entre el 5-9 %. Si la apnea no recibe tratamiento puede aumentar el riesgo de sufrir presión arterial alta, arritmias, ataque cardíaco, accidente cerebrovascular (derrame cerebral), obesidad y diabetes.

A continuación, se describen brevemente las principales técnicas de detección –en particular las utilizadas en la apnea del sueño–, aunque sus conclusiones pueden extenderse al diagnóstico de otras patologías respiratorias:

La *polisomnografía* es la técnica de diagnóstico estándar para la apnea [6],[7]. Es una técnica neurofisiológica que estudia el sueño mediante el registro de múltiples parámetros fisiológicos. El paciente duerme durante un tiempo variable, normalmente unas 8 horas, mientras el polígrafo registra y almacena las diferentes señales fisiológicas; tras el registro, se realiza el análisis de los datos obtenidos por un especialista en trastornos del sueño. Es un procedimiento largo y laborioso que exige la presencia de personal calificado, además de ser costoso y desagradable para el paciente por la cantidad de electrodos y dispositivos que lleva incorporado.

La *poligrafía respiratoria* es otra técnica alternativa basada en el análisis de variables cardiorrespiratorias sin evaluar los parámetros neurofisiológicos. Constituye un método aceptado para el diagnóstico del Síndrome de Apnea-Hipopnea durante el Sueño (SAHS). Las ventajas de esta técnica son un menor coste, una disminución del tiempo de espera y reducida complejidad, y su principal inconveniente es que es una técnica invasiva.

En el mercado también existen dispositivos disponibles para personas que tienen apnea del sueño. El dispositivo CPAP (*Continuous positive airway pressure*) incluye una máscara, tubos y un ventilador. Usa presión de aire para empujar la lengua hacia adelante y abrir la garganta permitiendo que el aire pase a través de la garganta. Reduce los ronquidos y previene las molestias de la apnea. Un dispositivo de CPAP no cura la apnea del sueño; sin embargo, cuando se usa de la manera correcta, los problemas del sueño mejoran bastante. Una alternativa al CPAP, ya que a muchos pacientes les resulta incómodo e insoportable tener que dormir toda la noche con una mascarilla en la cara, es el dispositivo DAM (Dispositivo de Avance Mandibular). Se trata de una férula que mejora la respiración durante la noche. Ataca el punto más crítico del ronquido y evita el

bloqueo de las vías respiratorias. Presenta ventajas como su fácil uso y transporte, su efectividad y el hecho de ser un tratamiento reversible y no invasivo, presentando un 90% de efectividad.

La apnea del sueño se está convirtiendo es una enfermedad muy común, ya que afecta a un gran número de personas. Ante esta situación, la investigación para descubrir nuevos métodos de detección ha tomado un gran impulso y se están desarrollando nuevas tecnologías para diagnosticar esta enfermedad fácilmente. En los últimos años son varios los grupos de investigación que están desarrollando nuevos sistemas de monitorización intentando buscar soluciones a este problema. Las denominadas "*camas inteligentes*" [8] son capaces de medir el ritmo respiratorio de una persona mientras está acostada en una cama del hospital; además, estas camas pueden modificar su posición de forma automática para facilitar la respiración del paciente. Emplean sensores de presión situados debajo de un colchón de aire. Este sistema se presenta como un método no invasivo capaz de medir la respiración de una persona con precisión y sin contacto físico alguno, simplemente estando la persona acostada en la cama; sin embargo presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, debido a la naturaleza del método, las mediciones de la respiración se pueden ver afectadas por el peso y la posición del paciente. En segundo lugar, el algoritmo de detección tiene que adaptarse a las características específicas de cada paciente. Finalmente todo el sistema se encuentra a expensas de las características de la cama.

Se ha presentado también la "*nariz electrónica*", método con el que se busca simplificar el procedimiento del diagnóstico de la enfermedad. Este método está basado en una prueba sencilla, que dura unos pocos minutos en el centro de asistencia médica. Los resultados de la prueba, junto con otros síntomas, harán

que el especialista recomiende o no, un *screening* nocturno realizado con un "polígrafo respiratorio", logrando así un diagnóstico más efectivo. Esta tecnología es entre tres y cuatro veces más barata que la tradicional [9]. El *estudio de la voz* es otra técnica en proceso de desarrollo para el diagnóstico precoz, tanto en la detección de la apnea como en la evaluación del riesgo del paciente para desarrollarla.

Otra de las técnicas desarrolladas, es un sistema basado en *sensores de fluoruro de polivinilideno* (PVDF) con placas conductoras integrada en un cinturón portátil. Este sistema presenta propiedades piezoeléctricas. Dichas propiedades se utilizan para detectar el movimiento en la superficie del cuerpo correspondiente a los latidos del corazón, mientras que en las placas conductoras del cinturón se colocan tres sensores que miden una diferencia de potencial. Es un sistema basado en el uso de la variabilidad del ciclo respiratorio y de la frecuencia cardíaca. El sensor PVDF es el encargado de registrar la señal portadora, que posteriormente será filtrada y de la que se obtienen las señales de la respiración mediante un algoritmo de procesamiento de señales diseñado específicamente [10].

Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos, los sistemas actuales tienen todavía una serie de inconvenientes que dificultan la detección temprana de la apnea del sueño. Los principales inconvenientes detectados hasta ahora podrían resumirse en: (1) son invasivos y molestos para los pacientes; (2) su larga duración; (3) se basan en algoritmos con escasa calibración de paciente a paciente; (4) son costosos y (5) complejos de usar.

Este trabajo presenta el desarrollo de un sensor de bajo coste y no invasivo para monitorizar el ritmo respiratorio, que puede ser de utilidad para el seguimiento y diagnóstico de la apnea del sueño.

Concretamente se sacará partido de la caracterización dieléctrica del ser humano, que está determinada, entre otros factores, por la cantidad de aire que en cada momento se encuentra en los pulmones. Por tanto, esta característica se ve modificada por el rito de la respiración. Este hecho servirá para poder medir dicho ritmo en base a los efectos que el cambio dieléctrico genera en un circuito electrónico.

2.2 Consideraciones preliminares

2.2.1 Sensores capacitivos en aplicaciones médicas

La importancia de utilizar sensores fiables, económicos y con alto rendimiento para terapias médicas no invasivas es cada vez mayor, ya que las tendencias pronostican un aumento significativo en el seguimiento y el control de los pacientes desde su domicilio familiar [11]. En el presente trabajo, para la medición del ritmo respiratorio, fue elegida la tecnología basada en la detección capacitiva, en lugar de otras soluciones (ver [12]-[14]), ya que presenta las siguientes ventajas:

- El precio del sensor sería bajo ya que está hecho de componentes electrónicos estándar.
- Los sensores capacitivos se utilizan mucho en la industria y resultan bastante eficientes. Por lo tanto, consideramos que la adaptación a un sector diferente, como es el cuidado de la salud, podría ser factible y beneficioso.
- Su configuración interna les permite cumplir el requisito de evitar el contacto entre los electrodos y el paciente.

- La resolución de los sensores capacitivos en distancias cortas es bastante alta.
- Las variaciones dieléctricas producidas entre los electrodos son los parámetros más relevantes para las alteraciones que tienen lugar en la frecuencia de funcionamiento de los sensores capacitivos. En nuestro caso, el dieléctrico esencial es el aire dentro de los pulmones.

Una de las aplicaciones equipadas con sensores capacitivos se ha aplicado con éxito para controlar la presión intraocular[15],[16] y la presión intracraneal [17]. Las actividades en las que los sensores capacitivos han sido más utilizados en medicina son las medidas de presión, aunque estos sistemas capacitivos también se han aplicado en algunos otros proyectos relevantes en el campo médico. Los acelerómetros son un ejemplo de lo anterior, ya que son instrumentos utilizados para medir la inclinación en los segmentos corporales y la actividad física diaria en pacientes en rehabilitación [18]. En estos dispositivos, el uso de la capacitancia para medir el desplazamiento mejora significativamente la sensibilidad. Otro uso de sensores capacitivos incluye el diagnóstico de enfermedades pulmonares a través de mediciones de humedad (sensores de humedad). En este tipo de dispositivos, una capa químicamente absorbente, comúnmente un polímero, se coloca entre los electrodos paralelos de un condensador. De este modo, la humedad se detecta como un cambio en la capacidad debido a la variación de la constante dieléctrica cuando se absorben las moléculas de agua en el polímero [12].

Una de las aplicaciones más relevantes relacionada con el diseño presentado en este capítulo sería la utilización de sensores capacitivos para monitorizar el ritmo respiratorio en tiempo real. Así, en [14] se diseñó y fabricó un cinturón ubicado en el abdomen el cual consigue medir la tasa del ritmo

respiratorio de forma eficiente mediante un circuito capacitivo diferencial con apantallamiento. Como resultados relevantes de este trabajo cabe destacar que el diseño del circuito es lineal con suficiente resolución para medir una amplia gama de respiración normal y respiración profunda. El sensor fue diseñado para ser extremadamente resistente a las no linealidades producidas por perturbaciones externas.

2.2.2 Sensores capacitivos basados en oscilador

Los estudios realizados demuestran que el uso de sensores capacitivos en aplicaciones médicas está aumentando progresivamente debido a las ventajas que presentan: tamaño reducido, alta sensibilidad, bajo coste y menos consumo de energía. Entre todos los sensores capacitivos, los sensores capacitivos basados en osciladores son la tecnología más extendida. Este tipo de sensores genera una señal sinusoidal cuya frecuencia viene fijada a través del valor de la inductancia y del condensador utilizado. La frecuencia de oscilación se utiliza como parámetro para determinar el valor de la capacidad a medir. Las principales ventajas de los sensores capacitivos basados en osciladores son las siguientes:

- Alta sensibilidad en frecuencia con respecto a las variaciones en la capacidad que se desea medir.
- Estabilidad de frecuencia ante fenómenos tales como vibraciones, cambios de temperatura, cambios en la tensión de alimentación, etc.

Este tipo de sensores capacitivos está formado por un oscilador y la capacidad medida, que incluye la capacidad de los electrodos y el condensador del dieléctrico.

El *oscilador* genera una señal de media-alta frecuencia (kHz-MHz), utilizando componentes activos (transistor, amplificador operacional) y una red resonante (bobina, condensador). Una de las características más relevantes para la sensibilidad del sensor diseñado consiste en obtener variaciones considerables en la frecuencia de funcionamiento a través de pequeños cambios en la capacidad de los electrodos. Esta particularidad la proporcionan los osciladores a través de su red de resonancia.

La *capacidad medida* consta de dos partes claramente diferenciadas: los electrodos y el dieléctrico presente entre los mismos. Dichos elementos son elementales para determinar la sensibilidad del sensor y sus posibles aplicaciones.

- *Electrodos*: Son varias placas metálicas con una forma geométrica y un tamaño determinado conectados a la salida del oscilador.
- *Dieléctrico*: En nuestro caso tendremos dos dieléctricos, el aire y el cuerpo humano (piel, líquidos, etc.), que producirán una modificación en el valor del condensador.

2.2.3 Conceptos básicos de osciladores. Tipos de osciladores

El oscilador es el elemento clave en este tipo de sensores capacitivos cuyo correcto funcionamiento será esencial para la eficacia y sensibilidad del propio sensor. Un circuito con una red de realimentación oscilará si la ganancia en la entrada es mayor que la unidad y tiene un desplazamiento de fase nulo. En tal caso, las oscilaciones crecerán hasta que el comportamiento no lineal de sus componentes activos limite a la unidad la ganancia en el lazo de realimentación.

En la Fig. 2.1 se muestra la descomposición de un oscilador en dos cuadripolos asociados: uno de ellos es un amplificador de ganancia $A(j\omega)$, y el otro un circuito de realimentación con función de transferencia $\beta(j\omega)$.

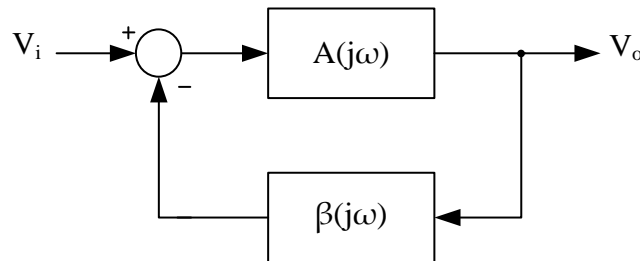


Figura 2.1. Representación de un oscilador en cuadripolos.

La función de transferencia de dicho sistema viene dado por:

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega)\beta(j\omega)} \quad (2.1)$$

Para que se mantenga la oscilación es necesario que la salida del lazo $-A(j\omega)\beta(j\omega)$ tenga una señal igual a la entrada del amplificador. De este modo, la oscilación se mantendría sin necesidad de una señal a la entrada del circuito. Por tanto, la condición de oscilación se puede expresar como:

$$-A(j\omega) \cdot \beta(j\omega) = 1 \quad (2.2)$$

que requiere que el módulo de la ganancia sea la unidad y el desfase del lazo sea nulo. Esta condición equivale la existencia de un polo en el eje $j\omega$ en la función de transferencia $H(j\omega)$. Realmente, para que comience la oscilación es necesario que dicho polo se encuentre en el semiplano real positivo, lo cual se puede expresar mediante dos condiciones:

$$|-A(j\omega) \cdot \beta(j\omega)| \geq 1 \quad (2.3)$$

$$\text{Fase } [-A(j\omega) \cdot \beta(j\omega)] = 0 \quad (2.4)$$

La primera expresión se conoce como *condición de arranque* y establece que la ganancia total del lazo abierto deber ser mayor que la unidad. La segunda es la *condición de equilibrio de fases* que permite la realimentación positiva del oscilador. La condición de arranque se puede verificar en una banda más o menos ancha, mientras que la condición de equilibrio de fases únicamente se cumple a la frecuencia de oscilación. Si la condición de arranque se mantuviera, la oscilación crecería indefinidamente. En la práctica, al aumentar el nivel de oscilación, el elemento activo entra en régimen no lineal hasta que se alcanza una condición estacionaria de oscilación, haciéndose la ganancia en lazo abierto igual a la unidad.

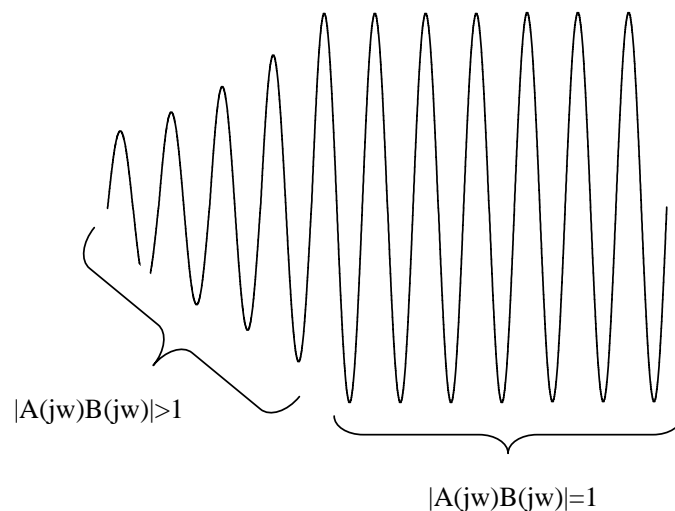


Figura 2.2. Respuesta del oscilador ante las diferentes condiciones de oscilación.

Dentro de los muchos tipos de osciladores que existen, el estudio se centró en los osciladores senoidales de tipo LC. Los osciladores LC utilizan un circuito

tanque LC cuya frecuencia de operación es simplemente la frecuencia de resonancia y su ancho de banda es una función del factor de calidad Q del circuito. Dichos osciladores se implementan mediante circuitos formados por una bobina y un condensador en paralelo (tanque LC). Su funcionamiento se basa en el intercambio de energía eléctrica y magnética entre el condensador y la bobina. Estos osciladores han sido ampliamente aplicados en la industria para detectar la presencia de objetos y medir niveles en depósitos y contenedores, ya que es una solución de bajo coste, altamente sensible y no requiere contacto directo con el objeto medido.

Este tipo de oscilador genera una onda senoidal por medio de amplificación y realimentación. Su esquema genérico se muestra en la Figura 2.3 que corresponde a un diagrama formado por dos impedancias Z_1 y Z_2 en paralelo con la entrada y la salida de un dispositivo activo amplificador (que generalmente suele ser un FET, un transistor bipolar, o un amplificador operacional) y una tercera impedancia Z_3 en la red de realimentación.

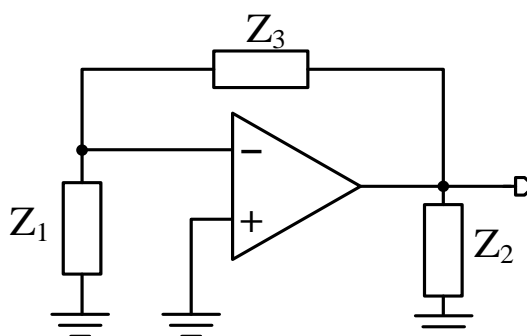


Figura 2.3. Estructura básica de diversos osciladores senoidales.

Los osciladores LC se emplean en general a frecuencias mayores de 100 kHz, ya que a frecuencias menores, el factor de calidad Q es bajo y afecta negativamente a la estabilidad en frecuencia; además, las bobinas se vuelven

poco prácticas al ser de elevado tamaño. Para frecuencias menores de 100 kHz, se trata de evitar el uso de bobinas empleándose osciladores RC.

Del esquema anterior se derivan dos familias de osciladores muy utilizados: *osciladores Colpitts* formados por dos condensadores y una inductancia, y *osciladores Hartley* formados por dos inductancias y un condensador. Las disposiciones para la configuración de emisor común de forma simplificada y omitiendo las polarizaciones, se muestran en la siguiente figura.

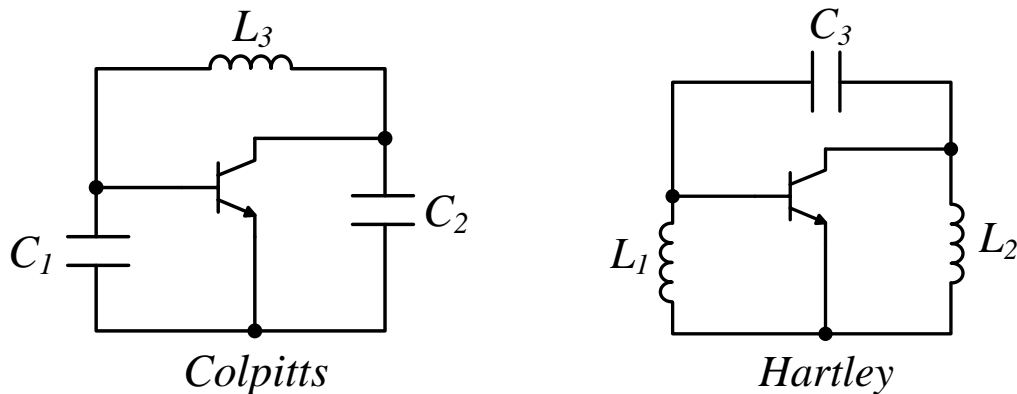


Figura 2.4. Topologías simplificadas de osciladores *Colpitts* y *Hartley* con transistor bipolar.

2.3 Descripción del sistema

La Figura 2.5 muestra un esquema del diseño propuesto. La primera etapa constituye un oscilador Colpitts diseñado para conseguir un factor de calidad lo bastante elevado. Se pretende alcanzar una buena estabilidad de la frecuencia, optimizar el punto de operación del transistor, así como usar un transistor con una muy baja capacidad en la unión colector-base. La segunda etapa de diseño incluye una red formada por una resistencia y dos diodos antiparalelos derivados a tierra, que están acoplados al oscilador para mejorar el rendimiento. Esto aporta varias mejoras al sistema: evita la oscilación en el

circuito del sensor basado en el amplificador operacional; mejora el factor de calidad; y establece una tensión de entrada constante al amplificador operacional para aumentar la estabilidad del sistema.

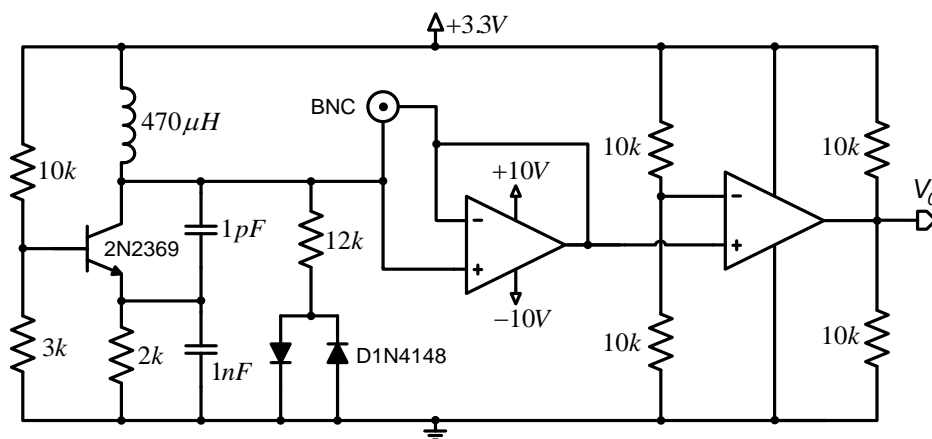


Figura 2.5. Esquema del sistema de detección basado en un oscilador de Colpitts junto con las etapas de acondicionamiento.

La tercera etapa permite reducir el efecto de las capacidades parásitas generadas por el propio circuito, por los electrodos o por el cuerpo humano mediante la creación de un apantallamiento empleando un amplificador operacional configurado como seguidor de tensión. Por último, se lleva a cabo una etapa de acondicionamiento de señal formada por un amplificador operacional adicional, trabajando en este caso como comparador que proporciona una onda cuadrada con voltaje constante. Esta señal se aplicará posteriormente a un microcontrolador para procesarla y obtener la frecuencia de operación del oscilador. El sensor capacitivo se conecta en el conector BNC. Más adelante, se indica cómo una modificación en su capacidad determina un cambio de la frecuencia de trabajo del oscilador.

La clave del éxito en el diseño de un sistema de detección capacitivo que esté basado en osciladores y que satisfaga las expectativas de obtener una resolución lo suficientemente buena en la frecuencia medida para capturar el

ritmo respiratorio, es hacer un diseño optimizado del oscilador y elegir apropiadamente el diseño de los electrodos y su tamaño. En cualquier caso, también es importante estudiar al detalle todas las capacidades parásitas implicadas en la medición del sensor y todas las interferencias externas que puedan cambiar la medida de la frecuencia.

2.3.1 Diseño optimizado del oscilador

La configuración base común del oscilador Colpitts fue utilizada para el diseño del dispositivo sensor presentado, ya que es muy utilizada en aplicaciones industriales debido a su robustez. Sin embargo, su uso en aplicaciones biomédicas ha sido algo menos habitual. Oum *et al.* [19] usó una topología Colpitts para la medición del ritmo respiratorio y obtuvo un diseño simple, de bajo coste y altamente sensible.

El presente trabajo propone varias mejoras que proporcionan mayor sensibilidad a las mediciones del ritmo respiratorio bajo condiciones más adversas. El principal objetivo es diseñar e implementar un circuito oscilador que minimice la capacidad parásita generada por el propio circuito, y que permita la medición de la capacidad real producida entre los electrodos y el cuerpo humano, con alta sensibilidad a los cambios de capacidad.

La estabilidad en frecuencia es la capacidad de un oscilador para mantener una frecuencia fija, y suele considerarse a corto o a largo plazo. A corto plazo está principalmente afectada por las fluctuaciones de voltajes de funcionamiento en continua, mientras que a largo plazo existe una dependencia del envejecimiento, los cambios de temperatura y la humedad ambiental. En los mencionados osciladores LC, los factores de calidad Q son relativamente bajos, permitiendo que el tanque del circuito resonante oscile sobre un amplio rango

de frecuencias. La estabilidad de la frecuencia se proporciona como un porcentaje de cambio de frecuencia (tolerancia) relativa al valor deseado.

La Figura 2.6 muestra el esquema del oscilador Colpitts en configuración de base común utilizado para el diseño propuesto. El circuito tanque contiene la autoinducción L_t y los condensadores C_1 y C_2 . El condensador C_f es la capacidad producida por los electrodos colocados sobre el cuerpo humano. R_e es una pequeña resistencia que evita que el comportamiento del oscilador dependa de la impedancia de entrada del transistor (a la que llamaremos r_e). La resistencia de carga es R_L , la cual está conectada al colector a través del condensador de desacoplamiento en continua C_C . Las resistencias R_1 , R_2 y R_E se utilizan para polarizar el circuito y no afectan en pequeña señal al utilizar el condensador de base C_B y la bobina choque de radiofrecuencia RFC .

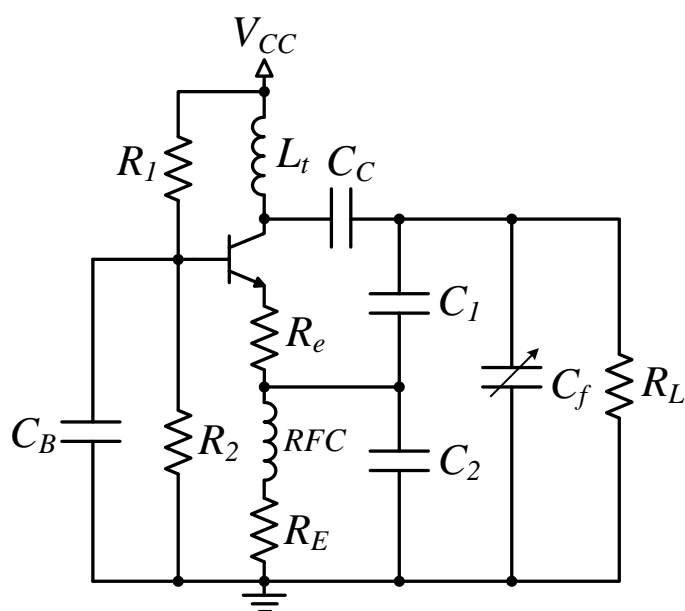


Figura 2.6. Esquema general del oscilador Colpitts utilizado.

En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente para señal variable donde se ha incluido la resistencia parásita r_c asociada a la bobina del circuito tanque, la impedancia de entrada del transistor r_e y la capacidad de la unión

colector-base C_{cb} . El circuito se puede simplificar de forma que R_p es la resistencia resultante de transformar r_c a su equivalente paralelo; R_s y C_s resultan de transformar el circuito oscilador formado por C_1 , C_2 y $R_i = (R_e + r_e)$; finalmente, $R_0 = (R_L \parallel R_p \parallel R_s)$ y $C_t = (C_{cb} \parallel C_s)$. Las capacidades de desacoplo C_B y C_c se deben elegir de modo que se comporten como cortocircuitos efectivos a la frecuencia de oscilación. Igualmente, la bobina de choque de radiofrecuencia debe elegirse para que se comporte como un circuito abierto a la frecuencia de oscilación. Los valores de las resistencias de polarización R_E , R_1 y R_2 se establecen teniendo en cuenta el punto de polarización del circuito.

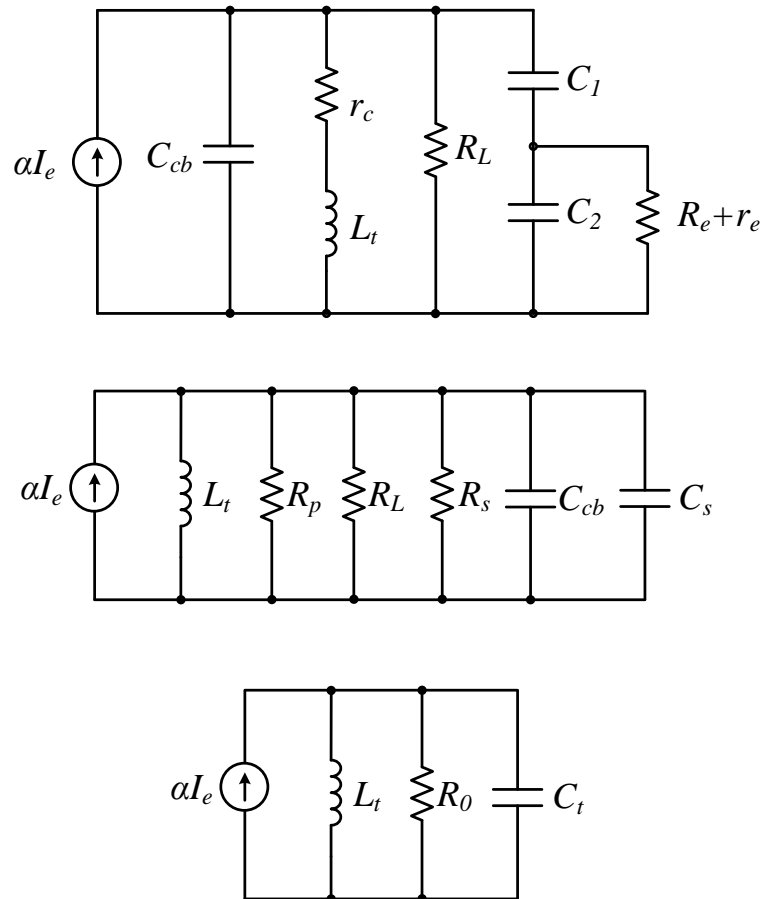


Figura 2.7. Circuito equivalente para señal variable.

El diseño del oscilador está normalmente condicionado por las especificaciones (generalmente relacionados con la frecuencia de oscilación y la

potencia que debe suministrarse a una determinada resistencia de carga), y los componentes disponibles. Sin embargo, en nuestro caso, el diseño del oscilador está determinado por la capacidad C_f , el factor de calidad Q que pretendemos asegurar y la potencia máxima suministrada a la carga. La capacidad C_f , formada por ambos electrodos, los cuales estarían conectados al paciente por el pecho y espalda en una primera aproximación, es muy similar a la capacidad producida por el cuerpo humano. Se tomó una capacidad de 150 pF como referencia, de acuerdo a los estudios previos [20]-[22].

Para el análisis de la potencia suministrada a la carga, el oscilador debe estar diseñado para condiciones de máxima transferencia a la carga, lo que significa que R_0 debe ser igual a la mitad de R_L , donde R_0 es la resistencia equivalente del circuito sin la carga R_L . La frecuencia de oscilación depende directamente de la bobina y la capacidad como se recoge en la siguiente ecuación: $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_t C_t})$, donde $C_t = [C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)] + C_{cb}$, y C_{cb} es la capacidad parásita entre el colector y la base del transistor. El factor de calidad viene expresado por $Q = 2\pi f_0 R_0 C_t$ y es un parámetro importante ya que cuanto mayor sea, menor será el ruido del oscilador, como se muestra gráficamente en la Fig. 2.8.

Los valores de los componentes del circuito se determinan con el objetivo de lograr condiciones de oscilación permanente en el sistema. Se utilizó una bobina con un valor superior al empleado en [19] para mejorar la sensibilidad del circuito, a pesar de que aumente el ruido externo. Se utiliza un transistor de tipo RF con una pequeña capacidad colector-base (alrededor de 0.5 pF) para reducir el impacto de la tensión de entrada del circuito sobre la sensibilidad del circuito. Los valores de la resistencia de base del transistor se eligieron desde el

punto óptimo en la recta de carga, para lograr así que el transistor opere en unas óptimas condiciones de oscilación.

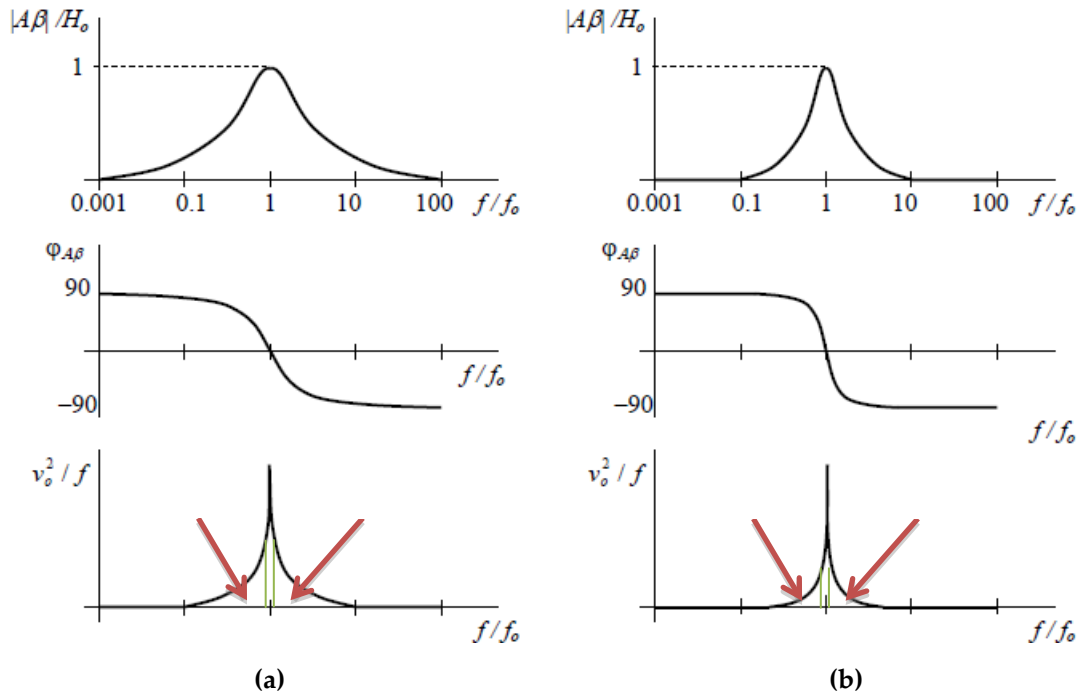


Figura 2.8. Módulo y fase de la ganancia de lazo y densidad espectral de la tensión de salida del oscilador para (a) $Q = 1$ y (b) $Q = 10$.

2.3.2 Reducción del efecto de las capacidades parásitas

Con el objetivo de reducir las capacidades parásitas generadas por el propio circuito y los electrodos frente a la capacidad producida por los electrodos y el cuerpo humano, se ha considerado establecer una pantalla entre los electrodos y la tierra. Dicha pantalla se obtiene estableciendo la estructura metálica de la cama al mismo potencial que la salida del oscilador a través de un amplificador operacional en la configuración de seguidor de tensión. En la Figura 2.9 puede verse el esquema propuesto y las capacidades más importantes que afectan a la medida.

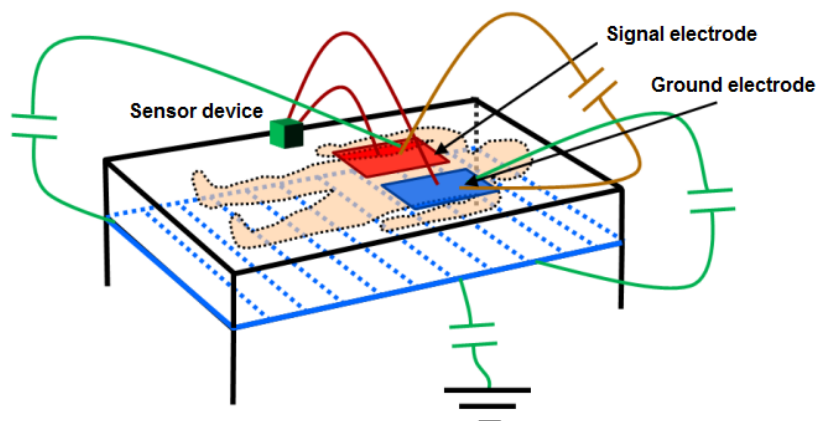


Figura 2.9. Representación de las capacidades parásitas del sensor capacitivo conectado a un paciente tumbado en la cama.

La configuración de seguidor de tensión proporciona dos ventajas significativas que provienen de las propias especificaciones de los operacionales: impedancia de entrada muy grande e impedancia de salida baja. Utilizando un amplificador operacional que mantenga estas prestaciones en las frecuencias de trabajo, la capacidad que se forma entre la pantalla y el electrodo de masa será muy pequeña, ya que la impedancia de salida del operacional es baja. La capacidad que existe entre el electrodo de señal y la pantalla, aunque físicamente pudiera tener un valor elevado (≈ 150 pF), puede considerarse despreciable ya que los valores de potencial son prácticamente los mismos. Por último, la pantalla minimiza los efectos de la capacidad existente entre el electrodo de masa y la tierra, ya que esta configuración favorece que las líneas de campo desde el electrodo de señal eviten la tierra en favor de un camino más directo hacia el electrodo de masa. Otros efectos parásitos se eliminan estableciendo también este potencial en la malla de los cables coaxiales que conectan los electrodos al dispositivo.

2.3.3 Diseño del electrodo

En esta etapa de diseño, se describen las diversas configuraciones empleadas en el estudio del efecto de los electrodos: tamaño de los electrodos, forma geométrica, material, posición y número de electrodos empleados. En el esquema propuesto para la monitorización del ritmo respiratorio, se ha considerado disponer sobre una cama un par de electrodos metálicos cubiertos de un material aislante. Sobre los electrodos se sitúa el cuerpo de la persona monitorizada de modo que la capacidad generada entre ellos se ve afectada por el cuerpo humano. Con el objeto de obtener una configuración adecuada, se desarrollaron una serie de electrodos co-planares en diversas configuraciones:

- 1) Dos electrodos rectangulares de tamaño 9 x 24 cm separados una distancia de 2 cm.
- 2) Dos electrodos formados en 8 disposiciones de 55 x 1 cm intercalados entre sí en una configuración interdigital con 1 cm de separación.
- 3) Dos electrodos rectangulares de tamaño 14 x 25 cm separados 1 cm.
- 4) Dos electrodos rectangulares de tamaño 14 x 25 cm separados 2 cm.
- 5) Dos electrodos rectangulares de tamaño 14 x 25 cm separados 3 cm.
- 6) Dos electrodos rectangulares de tamaño 22 x 4 cm separados 1 cm.
- 7) Dos electrodos rectangulares de tamaño 22 x 4 cm separados 2 cm.
- 8) Dos electrodos rectangulares de tamaño 22 x 4 cm separados 3 cm.

También se desarrolló un esquema compuesto solamente por el electrodo de señal (10 x 10 cm), formándose entonces la capacidad con el plano de tierra del dispositivo.

2.3.4 Acondicionamiento de la señal de salida

Finalmente, la última etapa simplifica el método utilizado en el acondicionamiento de la señal usado en [19] (derivada, amplificación y detección de envolvente). En esta etapa un amplificador operacional configurado como comparador transforma la onda sinusoidal de entrada en una onda cuadrada limitada en amplitud. El microcontrolador PIC18LF2431 de Microchip cuenta el número de flancos de subida de la señal durante un periodo de tiempo, y a partir de estos datos, establece la frecuencia de oscilación instantánea del sensor capacitivo. El sistema también incluye un módulo ZigBee para enviar datos de forma remota a través de la comunicación inalámbrica.

2.4 Resultados de simulación y experimentales

El dispositivo sensor propuesto ha sido simulado y fabricado para testear su eficiencia, robustez e idoneidad para la medida del ritmo respiratorio. Con este propósito, en primer lugar se analizó la sensibilidad y la interferencia con otros receptores. Posteriormente, el dispositivo fabricado fue probado en dos pacientes con diferentes características físicas.

2.4.1 Estudio de sensibilidad

La sensibilidad del sensor capacitivo es un parámetro crítico para la detección fiable del ritmo respiratorio, ya que el sistema de detección se basa en

la medida de las variaciones de capacidad que normalmente se producen como consecuencia de dos factores:

- Cambios en el dieléctrico generado entre los electrodos del sensor capacitivo.
- Aumento de las capacidades parásitas producidas entre los electrodos del sensor capacitivo y la tierra (tanto la flotante como la fija).

Se ha realizado un estudio de sensibilidad para determinar los rangos de capacidad que son adecuados para un funcionamiento robusto del dispositivo. Para poder llevar acabo dicho análisis, el diseño desarrollado se ha simulado con el programa LTSpice IV, variando la capacidad con el cuerpo humano (C_{MEDIDA}). Esta capacidad depende del tipo, la forma y el tamaño de los electrodos empleados, así como de la disposición de los electrodos en relación con el cuerpo humano.

Para desarrollar un sistema robusto que minimice los efectos de interferencias externas y el ruido, se ha establecido un margen de seguridad en las medidas de 1 kHz (experimentalmente el margen de error estaba en torno a los ± 200 Hz). Un primer estudio experimental proporcionó un valor en torno a 50 pF para la capacidad con el cuerpo humano, oscilando el sensor a 874.2 kHz. Utilizando este valor como referencia en las simulaciones, el valor de la capacidad se incrementó en 0.1 pF para comprobar la sensibilidad del diseño a variaciones en la capacidad con el cuerpo humano. Este incremento redujo la frecuencia de oscilación alrededor de 1 kHz, justo en el límite del margen de seguridad, por lo que puede considerarse que el dispositivo no es adecuado para detectar variaciones en la capacidad de 0.1 pF.

Posteriormente se analizaron las variaciones en frecuencia producidas por un incremento de 0.5 pF en el valor de la capacidad del cuerpo humano. Se tomaron diferentes valores de C_{MEDIDA} . El dispositivo sensor mostró un comportamiento adecuado en términos de sensibilidad para valores de C_{MEDIDA} entre 50 pF y 130 pF, que corresponde al rango de frecuencias desde 602.9 kHz a 874.2 kHz, como se muestra en la parte superior de la Figura 2.10, donde los incrementos de frecuencia son superiores a 1 kHz en todo el rango mencionado.

Igualmente se hicieron simulaciones pero realizando incrementos de 1 pF en el valor nominal de C_{MEDIDA} , mostrando el dispositivo sensor una adecuada sensibilidad para un rango de frecuencias entre 508 kHz y 1488 kHz, que corresponde con valores nominales de C_{MEDIDA} entre 50 pF y 200 pF, respectivamente. Los resultados se muestran en la parte inferior de la Figura 2.10.

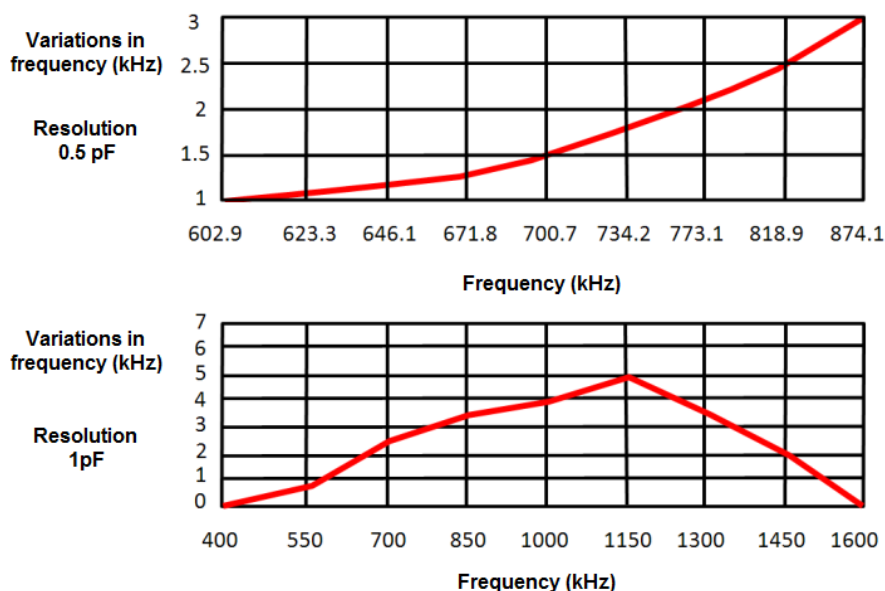


Figura 2.10. Variaciones en frecuencia generadas por un incremento de 0.5 pF (parte superior de la figura) y de 1 pF (para inferior) respecto del valor de C_{MEDIDA} entre 50 pF y 130 pF.

2.4.2 Estudio de interferencias

Otro de los factores que pueden afectar al sensor son las interferencias de dispositivos colindantes trabajando a frecuencias similares. Este efecto ha sido modelado a través de la capacidad C_{INTER} entre ambos circuitos como se muestra en la Figura 2.11. Con el software LTSpice IV podemos determinar una primera aproximación de la distancia mínima libre de interferencias.

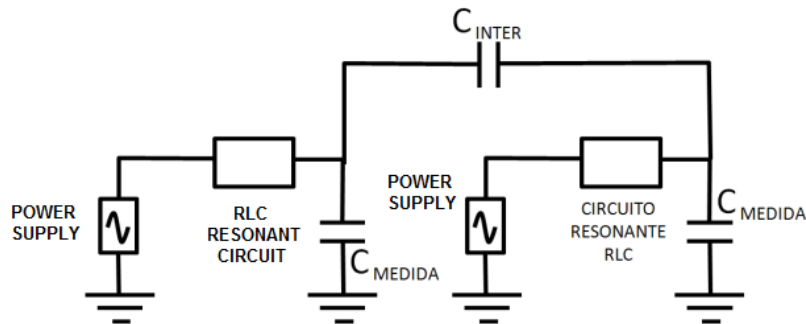
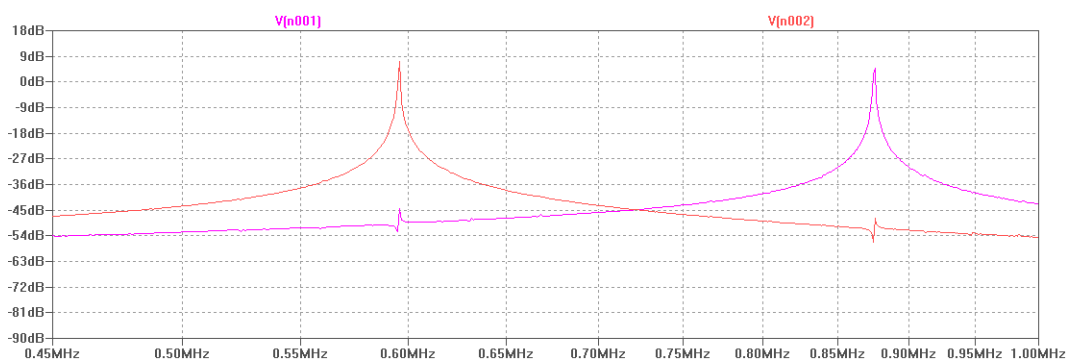
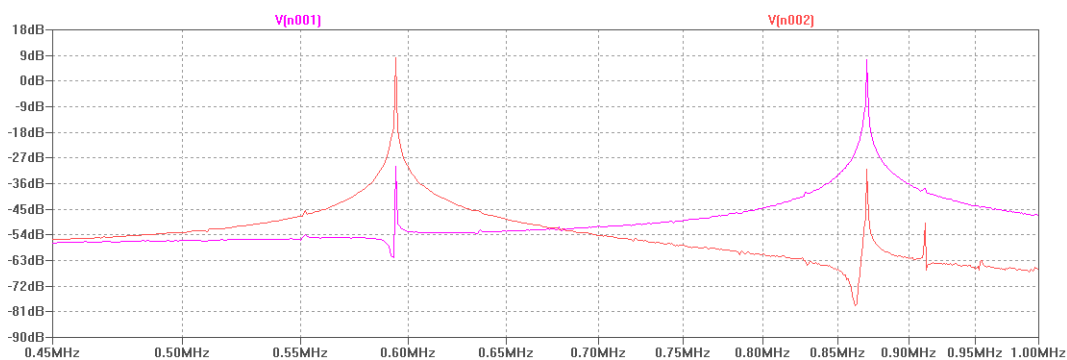


Figura 2.11. Esquema usado en la simulación de interferencias entre dispositivos sensores.

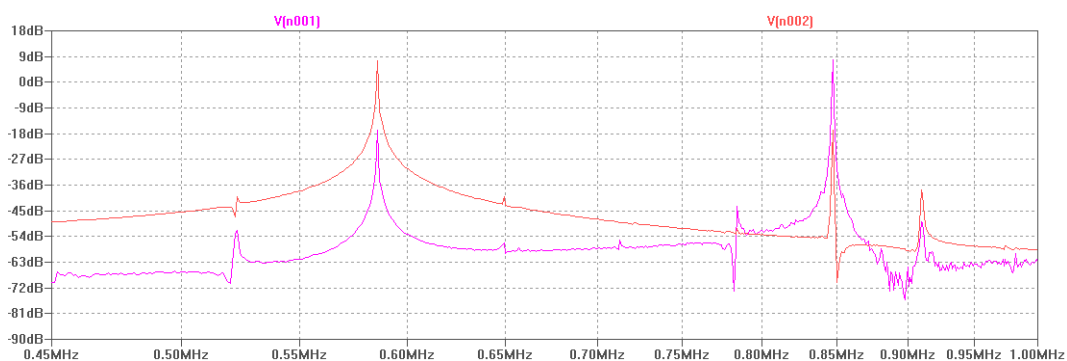
Se obtuvo una interferencia insignificante para los valores de capacidad (C_{MEDIDA}) en ambos circuitos de 30 pF y 50 pF (dos capacidades asociadas a frecuencias de oscilación experimentales) y un valor de capacidad de 0.1 pF para C_{INTER} . El valor de C_{INTER} corresponde a una distancia aproximada de 2 metros, que fue experimentalmente establecida por medio de un medidor de capacidad. Si se fija un valor de 1 pF para C_{INTER} la interferencia permanece despreciable, como se muestra en la parte superior de la la Figura 2.12. Esta capacidad de 1 pF corresponde aproximadamente a una distancia de 1 metro. Sin embargo, un valor de 5 pF para C_{INTER} , asociado a una distancia de 30 cm, empieza a mostrar una interferencia apreciable. En principio, se tomó este valor como límite de seguridad entre dispositivos sensores. Para un valor de 10 pF, asociado a una distancia de 10 cm, la interferencia es máxima.



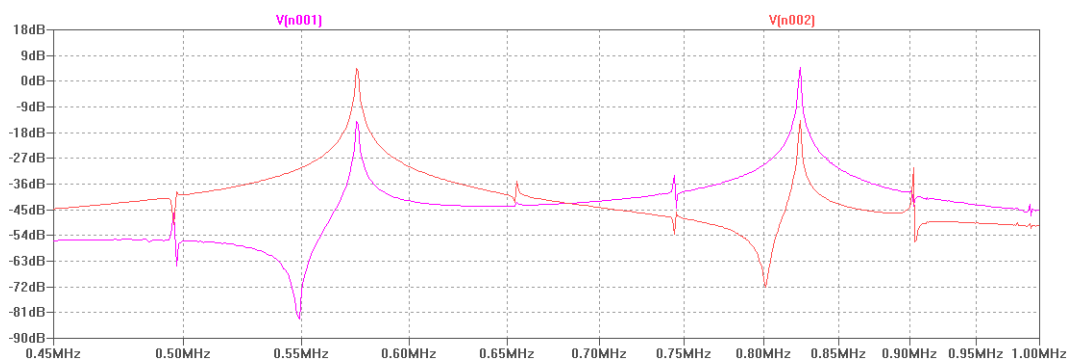
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.12. Simulación de la respuesta en frecuencia de dos sensores para varios casos distintos de estudio de interferencias. Los valores de C_{INTER} fijados son. (a) 0.1 pF, (b) 1 pF, (c) 5 pF, (d) 10 pF.

2.4.3 Detección del ritmo respiratorio

Para probar la fiabilidad del sensor, se realizó una prueba experimental de acuerdo con el sistema diseñado, y que se muestra en la Figura 2.13.

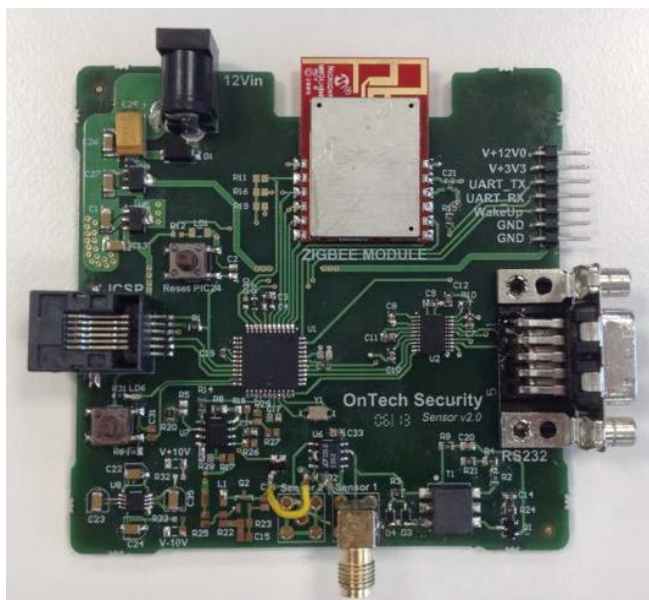
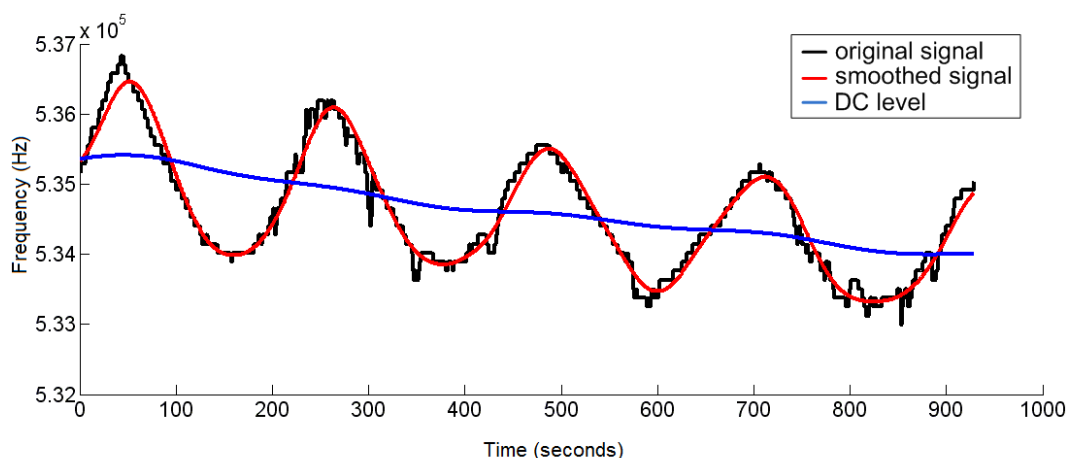


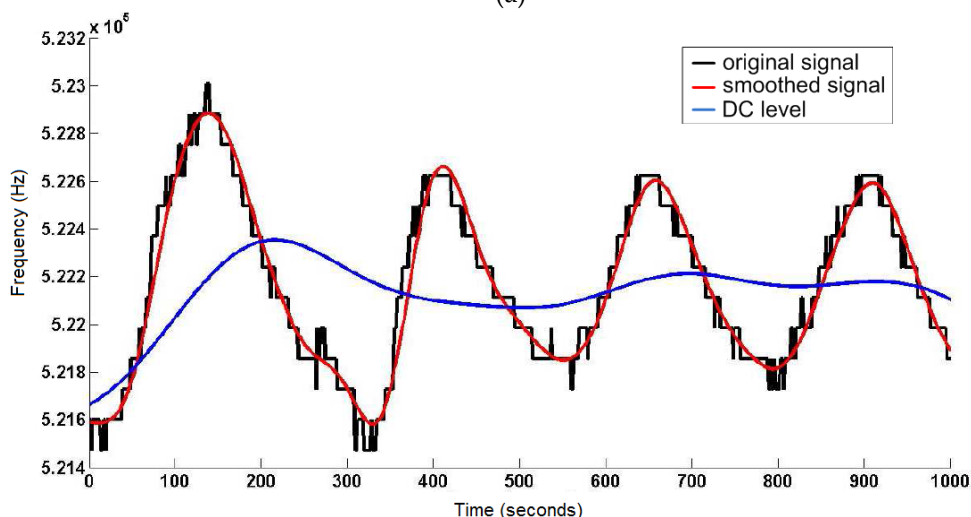
Figura 2.13. Fotografía del sistema de detección propuesto, compuesto por el sensor capacitivo y la electrónica de acondicionamiento.

Sobre un colchón hinchable de tamaño 2 x 2 m situado a 30 cm del suelo se situaron los electrodos en las configuraciones planteadas en el apartado 2.3.3. En un primer estudio, dos voluntarios varones con edades de 35 y 29 años, alturas de 1.82 y 1.75 m, y pesos de 99.5 y 80 Kg, se situaron en diversas posiciones (boca arriba, boca abajo, de forma lateral) sobre los electrodos, a la altura del pecho. Las frecuencias instantáneas de oscilación del dispositivo se enviaron a un ordenador a través del puerto serie con una tasa de 32 muestras por segundo. Los datos fueron procesados en MATLAB mediante un algoritmo de 3 etapas. En la primera se realiza un filtrado paso bajo tipo Butterworth de orden 4 y frecuencia de corte 0.32 Hz de la señal con la intención de suavizarla y eliminar las componentes de ruido. En la segunda etapa se realiza otro filtrado paso bajo, también Butterworth de orden 4, con una frecuencia de corte

mucho más baja (0.064 Hz) con el objeto de extraer la componente continua de la señal, ya que se detectó experimentalmente una deriva en el nivel de continua. Los resultados se muestran en la Figura 2.14.



(a)

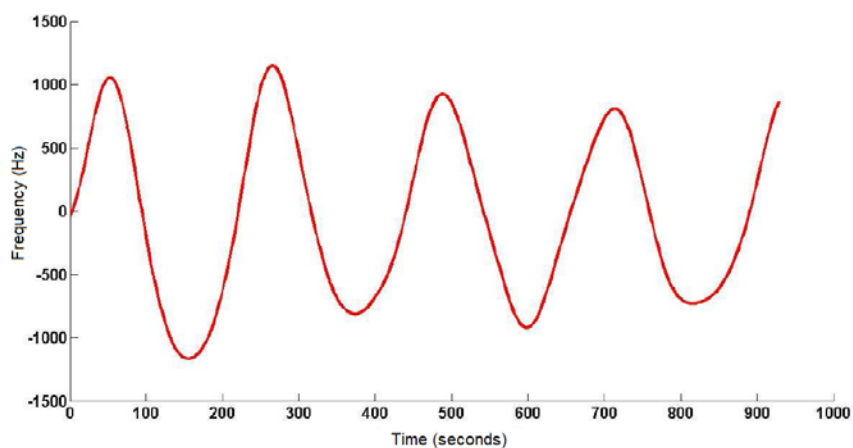


(b)

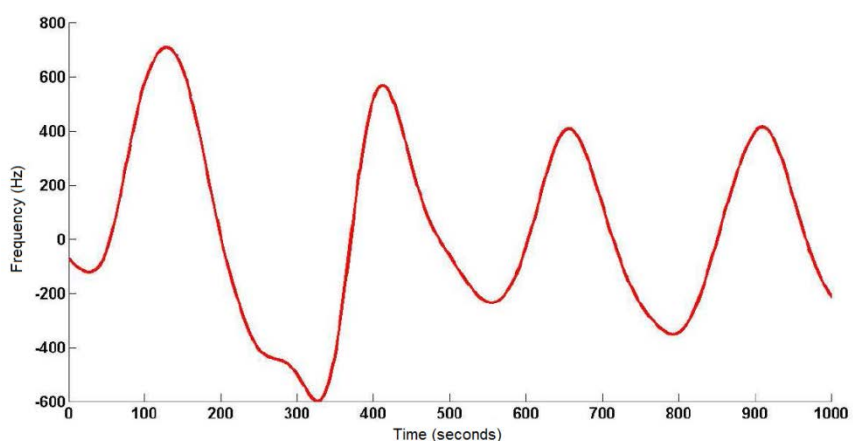
Figura 2.14. La señal respiratoria resultante después de la segunda etapa de procesamiento de ambos pacientes voluntarios.

La Figura 2.15 muestra la señal de salida de la tercera etapa, que es la diferencia entre las señales de las dos etapas anteriores. La señal resultante refleja los movimientos respiratorios más claramente y el ritmo respiratorio instantáneo se puede obtener dividiendo el número de cruces por cero de la

señal (sólo en el flanco de subida o de bajada) por el período en el que se han procesado las muestras.



(a)



(b)

Figura 2.15. Señal de salida después de la tercera etapa de procesamiento de ambos pacientes voluntarios.

En todos los casos probados fue posible extraer la señal del ritmo respiratorio, aunque fue necesario ajustar los parámetros del oscilador con objeto de adaptarlo a las características específicas del usuario (personalización), ya que la capacidad generada era diferente en cada uno de ellos. El proceso de identificación se realizó de manera visual con la

colaboración del sujeto monitorizado, al hallar una correspondencia directa entre el movimiento torácico y las transiciones en la curva de señal obtenida. Los mejores resultados se obtuvieron para los electrodos interdigitados con el paciente boca arriba, y para un único electrodo de señal (10 x 10 cm) con el cuerpo boca abajo.

Las señales de la Fig. 2.15 son acondicionadas por un circuito comparador que las convierte en señales cuadradas, las cuales son procesadas posteriormente por el microcontrolador. Estas señales no se han mostrado ya que no aportan visualmente ninguna información adicional de especial interés.

2.5 Conclusiones

La importancia del seguimiento de las patologías respiratorias se pone de manifiesto, en los cada vez mayores esfuerzos, dedicados a descubrir nuevos métodos de detección del ritmo respiratorio que hagan frente a las carencias mostradas por las alternativas disponibles hoy en día. En este contexto, este trabajo presenta una nueva aproximación a este problema basado en las nuevas tendencias de monitorización inteligente. Con este objetivo, el sistema hace uso de tecnologías de detección no intrusivas, de bajo coste y con alta sensibilidad de detección, de acuerdo con los principios de detección capacitiva de los osciladores LC. Se ha realizado un estudio detallado de las principales interferencias que se pueden producir en el sensor propuesto, así como un análisis profundo de sensibilidad con respecto a la capacidad a medir.

Los resultados de la simulación muestran un amplio rango de funcionamiento del sensor capacitivo presentado. Por lo tanto, el ritmo respiratorio puede medirse en cualquier paciente sin tener que modificar el sensor. Se ha observado que las interferencias producidas por dispositivos

trabajando a frecuencias similares y a distancias próximas, podrían provocar errores en las mediciones del dispositivo sensor. Para reducir las interferencias externas, se propone el desarrollo de un sistema de pantalla, ya que se observó que reducía las capacidades parasitarias existentes.

Los resultados obtenidos sugieren que esta propuesta cumple con los requisitos de partida y hace viable el sistema presentado para monitorizar las enfermedades respiratorias. El sensor presentado puede integrarse en una plataforma multimodal para el cuidado online de la salud y el desarrollo a distancia de las capacidades de personalización del algoritmo de detección. El dispositivo sensor desarrollado puede extenderse a otras aplicaciones relacionadas con mediciones del ritmo cardíaco o ECG (electrocardiograma) mediante sensores capacitivos o para detectar caídas de pacientes o personas mayores.

Referencias del capítulo 2

- [1] Torres-Cebrián; Sarlabous-Uranga L.; et al. "Evaluación de la actividad de los músculos inspiratorios mediante señales mecanomiográficas en pacientes con EPOC durante un protocolo de carga experimental", *XXVIII Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, 2010.
- [2] S. Redline, G. Yenokyan, et al. "Obstructive Sleep Apnea–Hypopnea and Incident Stroke. The sleep heart health study". *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2010, pp. 269-277.
- [3] J.B. Jimison. "Home monitoring of computer interactions for the early detection of dementia", *26th Annual International Conference of the IEEE*, 2004, pp. 4533-4536.
- [4] M. Adnane, Z. Jiang. "Detecting Specific Health-Related Events Using an Integrated Sensor System for Vital Sign Monitoring", *Sensors*, 2009, pp. 6897-6912.
- [5] N. Nikolaus, A.H. Eliasson, N. Cordula. "Overnight Pulse Oximetry for Sleep-Disordered Breathing in Adults", *Chest Journal*, 2001, pp. 625-633.
- [6] F. Segarra, N. Roure, E. Estivill. "Polysomnography and other sleep studies", *Acta Otorrinolaringol Esp.*, 2010, pp 45-48.
- [7] D.J. Barttlet, A. Williams, S. Nathaniel. "Predictors of primary medical care consultation for sleep disorders", *Sleep Med.*, 2008, pp. 857-864.
- [8] V. Verhaert. "Unobtrusive Assessment of Motor Patterns During Sleep Based on Mattress Indentation Measurements", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2011, pp. 787-794.
- [9] K. Malakuti. "Towards an Intelligent Bed Sensor: Non-intrusive Monitoring of Sleep Irregularities with Computer Vision Techniques", *20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2010, pp. 4004-4007.
- [10] ASL. Chan. R.W.W. Lee, et al. "Nasopharyngoscopic evaluation of oral appliance therapy for obstructive sleep apnea", *Eur Respir J.*, 2010, pp. 836-842.
- [11] J.B. Jimison. "Home monitoring of computer interactions for the early detection of dementia", *26th Annual International Conference of the IEEE*, 2004.

- [12] Z.A. Strong, A.W. Wang, C.F. McConaghy. "Hydrogel-actuated capacitive transducer for wireless biosensors", *Biomed Micro-devices*, 2002, pp. 97-103.
- [13] Y. Huang, et al. "Fabricating capacitive micro machined ultra-sonic transducers with wafer-bonding technology", *J. Microelectromech*, 2003, pp. 128-137.
- [14] C.R. Merritt, H. Troy Nagle, E. Grant. "Textile-Based Capacitive Sensors for Respiration Monitoring", *IEEE Sensors Journal*, 2009, pp. 71-78.
- [15] Y. Backlund, L. Rosengren, B. Hok. "Passive Silicon Transensor Intended for biomedical, Remote Pressure monitoring", *Sens Actuators*, 1990, pp. 58-61.
- [16] J. Coosemans, M. Catrysse, R. Puers. "A readout circuit for an intra-ocular pressure sensor", *Sens. Actuators A*, 2004, pp. 432-438.
- [17] C. Hierold, et al. "Low power integrated pressure sensor for medical application", *Sens Actuators A*, 1999, pp.58- 67.
- [18] H.J. Luinge, P.H. Veltink. "Inclination measurement of human movement using a 30D accelerometer with auto calibration", *IEEE T Neur Sys Reh*, 2004, pp. 112-121.
- [19] J. Ho-Oum, H. Koo, S. Hong. "Non-contact Heartbeat Sensor using LC oscillator circuit", *30th Annual International IEEE EMBS Conference*, 2008, pp. 4455-4458.
- [20] Jiusheng, Huang Zhan Cheng, Wu Shanghe Liu. "Why the Human Body Capacitance is so Large", *IEEE Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, Proceedings*, 1997, pp. 135-138.
- [21] A. Sălceanu, O. Neacșu, V. David, E. Luncă. "Measurements upon Human Body Capacitance: Theory and Experimental Setup", *RTD National Programme CEEEX*, 2004.
- [22] A. E. Seaver. "Human Body capacitance: A review", *ESA Annual Meeting Proceedings*, Laplacian Press: Morgan Hill, CA, pp.16-28, 1997.

Capítulo 3

Sistema inalámbrico de detección de gases con aplicación a entornos industriales

En este capítulo se presenta el diseño y la implementación de una red de sensores inalámbricos para el control remoto de parámetros industriales. El sistema consta de una estación base, un nodo de detección de gases, una red de nodos sensores inalámbricos con topología tipo árbol y una aplicación para la monitorización en tiempo real desde un ordenador remoto y un teléfono móvil. El desarrollo que aquí se presenta incorpora novedades científicas respecto a los sistemas existentes en relación al bajo consumo y la fiabilidad. El sistema asegura la calidad y seguridad industrial, y el sistema de medición y vigilancia logra un control eficiente en operaciones industriales. La robustez del sistema desarrollado y la seguridad en las comunicaciones se garantiza tanto a nivel hardware como software. El sistema es flexible y puede adaptarse a diferentes entornos. Las pruebas del sistema confirman la viabilidad de la implementación

propuesta validando los requisitos funcionales de los dispositivos desarrollados, la solución de la red y la gestión del consumo de potencia.

3.1 Introducción

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) han surgido como una de las tecnologías más prometedoras para el futuro. Algunos de los posibles ámbitos de aplicación son la salud, militar, el medio ambiente y la agricultura, la industria, el transporte y la seguridad del sistema [1]-[9]. A diferencia de otras redes, las WSN están diseñadas para aplicaciones específicas y, por lo tanto, deben cumplir un conjunto de requisitos que difiere de una aplicación a otra. Por lo tanto, los investigadores deben abordar una variedad de desafíos que faciliten el despliegue generalizado de la tecnología WSN en diferentes dominios del mundo real. Como resultado, se han dedicado grandes esfuerzos para superar el problema de ahorro de energía.

Las plantas industriales integran sensores que están conectados a la estación de control a través de cables o de manera inalámbrica para una detección y monitorización continua del estado del sistema. No obstante, la tecnología inalámbrica proporciona un soporte adecuado para la industria ofreciendo ventajas como bajos costes de instalación, escalabilidad, flexibilidad, ausencia de cableado, capacidad de procesamiento inteligente, gran movilidad y facilidad de implementación en comparación con las soluciones cableadas convencionales. Todas estas ventajas abren un prometedor campo de investigación para la industria, ya que se espera un crecimiento considerable en un futuro no muy lejano.

Para la monitorización y control de las actividades de un proceso específico en la industria, la arquitectura de red, los mecanismos y los

algoritmos desarrollados deben garantizar una comunicación de alta calidad y fiabilidad del sistema [10],[11]. Además, como las condiciones ambientales pueden ser difíciles, las implementaciones en la industria deben garantizar la fiabilidad de los datos en todo momento. Por último, el diseño de una red de comunicación industrial debe garantizar la disponibilidad de los datos, la autenticidad y la confidencialidad [12].

No es fácil para el diseñador de WSN seleccionar las soluciones más eficientes que se deban considerar para el diseño de una arquitectura WSN para una aplicación específica. El trabajo presentado en este capítulo aborda algunas de las limitaciones de recursos de una WSN para aplicaciones industriales relacionadas con el consumo limitado de energía, el rango de comunicación, el ancho de banda, la capacidad de procesamiento y el almacenamiento. La investigación abarca varias áreas, desde la optimización de la capa física hasta las soluciones de la capa de red.

Se ha elegido el estándar IEEE 802.15.4 para las comunicaciones, porque en los últimos años se ha convertido en una referencia para las aplicaciones inalámbricas con bajas tasas de datos y alta eficiencia energética [13]-[16]. De hecho, la mayoría de las tecnologías WSN se realizan mediante la adaptación de del estándar IEEE 802.15.4 que utiliza diferentes frecuencias y protocolos. Este estándar, diseñado específicamente para las redes LR-WPAN (*low-rate wireless personal area network*), es un protocolo de baja complejidad que ofrece características de bajo coste y energía, así como una alta versatilidad para el desarrollo de diferentes topologías. Hemos dedicado esfuerzos a desarrollar una pila de protocolo específica ya que la aplicación objeto de este trabajo requiere una respuesta rápida y oportuna. La arquitectura de red está diseñada para satisfacer requisitos específicos de la aplicación.

El sistema propuesto puede ampliarse fácilmente para poder incorporar varios sensores al nodo detector diseñado o incluso incluir nuevos nodos de detección para medir otras magnitudes físicas o parámetros de interés. La transmisión inalámbrica se utilizó para integrar todas las señales de los sensores que permitían la centralización y el control en tiempo real. La gestión centralizada ahorra mano de obra, aumenta la eficiencia y reduce los costes en seguridad industrial.

El trabajo que se presenta en este capítulo incorpora novedades significativas en términos de eficiencia energética y fiabilidad, presentando resultados originales en cuanto al diseño hardware/software y a la configuración del protocolo de red utilizado.

3.2 Descripción y funcionamiento del sistema.

Una red WSN consiste en pequeños dispositivos sensores espacialmente distribuidos formando una red auto-organizada de bajo nivel, que envía los datos recogidos a través de enlaces inalámbricos a nodos receptores. Después, los nodos receptores procesan o analizan los datos localmente, o están conectados a otras redes que realizan una monitorización y un control en tiempo real. Por lo general, las características intrínsecas de la red de sensores inalámbricos presentan nuevos desafíos en el diseño hardware, protocolos de comunicación y diseño de aplicaciones. Esto requiere la modificación de protocolos heredados para redes inalámbricas convencionales o el diseño de nuevos protocolos y algoritmos de comunicación efectivos.

La Figura 3.1 muestra los tres diferentes subsistemas del sistema diseñado: los dispositivos sensores, la estación base y el sistema de gestión de información.

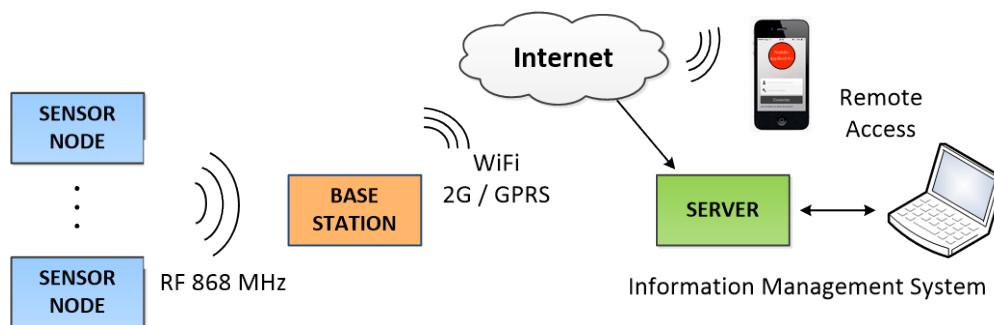


Figura 3.1. Arquitectura de la red de sensores inalámbricos diseñada.

3.2.1 Nodo sensor.

Los sensores recopilan los datos periódicamente o cuando se produce actividad: por ejemplo, cuando un valor excede de un umbral, o a petición del usuario. Los nodos sensores/detectores alternan entre ciclos de trabajo y ciclos de bajo consumo de energía cuando el nodo está en reposo. Esta cuestión permite que los nodos sensores sean autónomos, manteniendo el consumo de energía al mínimo y extendiendo su funcionalidad durante un período de tiempo razonable.

Los nodos detectores utilizan baterías. Por lo tanto, es esencial un funcionamiento eficiente de la energía para garantizar la supervivencia de los nodos sensores y maximizar la vida útil de la red. También se ha implementado un protocolo eficiente para ahorrar energía y garantizar que los datos detectados se entreguen de forma fiable al nodo receptor. Los nodos sensores se han implementado con una topología tipo árbol. Tanto la topología de red empleada como el protocolo permiten que el sistema diseñado aumente su escalabilidad conteniendo entonces un mayor número de nodos detectores. De esta forma, se han implementado nodos sensores de bajo coste y de pequeño tamaño. La latencia también ha sido tomada en cuenta para el funcionamiento práctico. La latencia es un factor importante para la fiabilidad del sistema, como el caso de una respuesta de emergencia, y la precisión en la notificación de

datos en caso de que haya mucha frecuencia de actualizaciones periódicas de los datos.

La Figura 3.2 muestra la placa del nodo detector. El diseño hardware consiste en un sensor de gas analógico, un módulo de procesamiento de datos (microcontrolador), un módulo de comunicación inalámbrica (transceptor inalámbrico) y un módulo de energía.

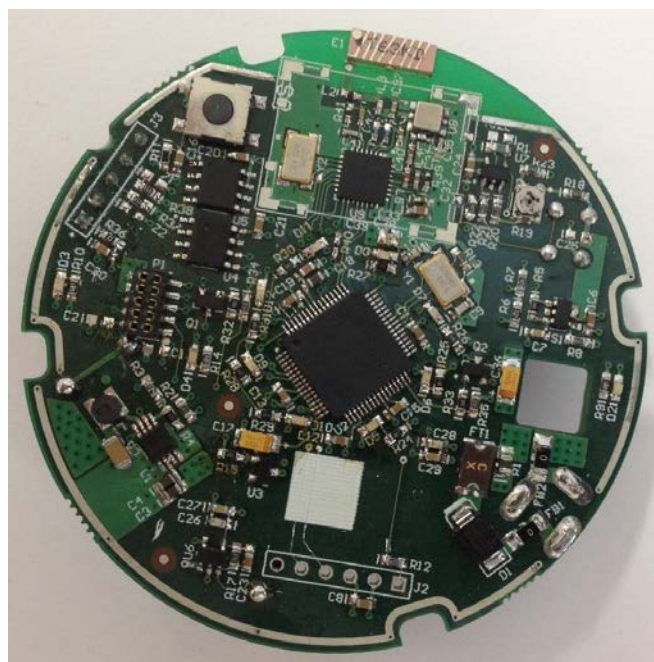


Figura 3.2. Nodo de detección de gas.

El sensor de gas se compone de todos los circuitos necesarios para la detección de metano, butano y propano. El sistema de detección se completa incluyendo un sensor de monóxido de carbono (CO). Tanto el sensor de gas como el sensor de CO se ubican en la parte inferior de la placa.

Se ha elegido el sensor de gas analógico TGS6810 de Figaro. Se trata de un sensor compacto cuya estabilidad, rápida respuesta y salida lineal lo hacen adecuado para detectar gases combustibles. El circuito de acondicionamiento de señal es básicamente un puente de *Wheatstone*, cuya tensión de salida diferencial

se convierte en una señal no-diferencial y se amplifica mediante una etapa amplificadora no-inversora. La alta sensibilidad de este sensor puede detectar fugas de gas muy pequeñas en las primeras etapas de la fuga, evitando así accidentes debido a explosiones, incendios o inhalaciones. En relación con el sensor de CO, se ha utilizado el TGS5342 de Figaro. Este sensor genera una corriente pequeña, lineal con la concentración de CO, que se transforma en una tensión de salida utilizando la combinación de un amplificador operacional y una resistencia. La señal de salida de los sensores analógicos se convierte en un valor binario utilizando el convertidor analógico/digital del propio microcontrolador.

3.2.2 Estación base.

El núcleo del sistema es la estación base que centraliza todas las señales del sistema. A este nodo se le llama también puerta de enlace o nodo receptor (coordinador) y coordina la red, recibe los datos de los nodos sensores, los procesa y los almacena en el sistema de gestión de la información. A pesar de que la estación base está normalmente conectada a una fuente de alimentación, también está sujeta a restricciones de energía. El hardware de la estación base se divide en dos placas de circuito impreso. La placa principal es el núcleo de la estación base e incluye los siguientes elementos: un circuito de comunicación RF (radiofrecuencia) compatible con el utilizado por los nodos sensores, un sistema de alimentación (batería interna, cargador de batería), un sistema de comunicación externo, circuitos de control y procesamiento de datos (MCU). La Figura 3.3 muestra detalles de la implementación de hardware de esta placa base.

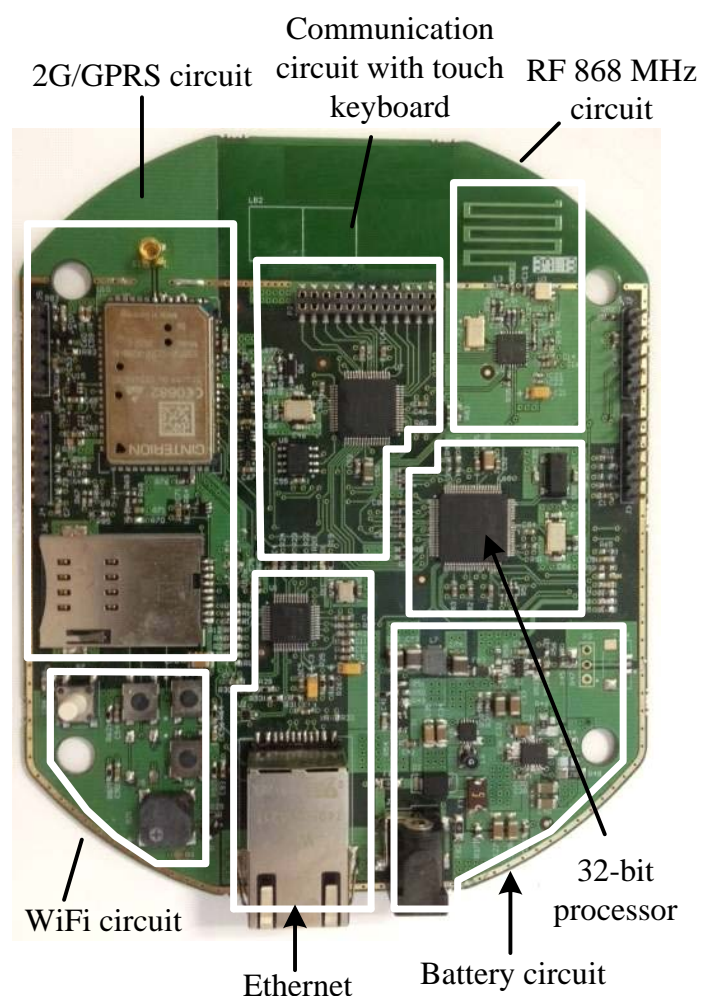


Figura 3.3. Imagen de la placa principal de la estación base.

La estación base está estructurada en un diseño multiprocesador con dos circuitos de control independientes como se muestra en la Figura 3.4: uno basado en el microcontrolador PIC24FJ128GA306 de 16 bits, y otro basado en el microcontrolador PIC32MX795F512L de 32 bits, ambos de Microchip. Estos microcontroladores cumplen con todas las especificaciones necesarias y las principales tareas asignadas a cada uno son las siguientes: el microcontrolador de 16 bits controla el teclado táctil capacitivo y sus LEDs, las comunicaciones SPI con el circuito RF 868 MHz para la transmisión inalámbrica de datos con los nodos detectores y se comunica con el microcontrolador de 32 bits para sincronizar con el mundo externo todos los eventos que se producen en los

periféricos inalámbricos conectados al sistema. El microcontrolador de 32 bits realiza las tareas de gestión del firmware principal y controla el sistema de comunicación exterior, que utiliza otras tecnologías (Ethernet, WiFi y módulos 2G/GPRS) mediante las cuales la estación base puede retransmitir la información recopilada por los nodos detectores al mundo exterior. Por lo tanto, la versatilidad de la estación base garantiza una comunicación factible con el servidor e Internet a través de conexiones cableadas e inalámbricas. La comunicación se asegura además con el módulo 2G/GPRS para pérdidas de conexiones Ethernet y WiFi, haciendo que el sistema sea más robusto incluso para evitar sabotajes.

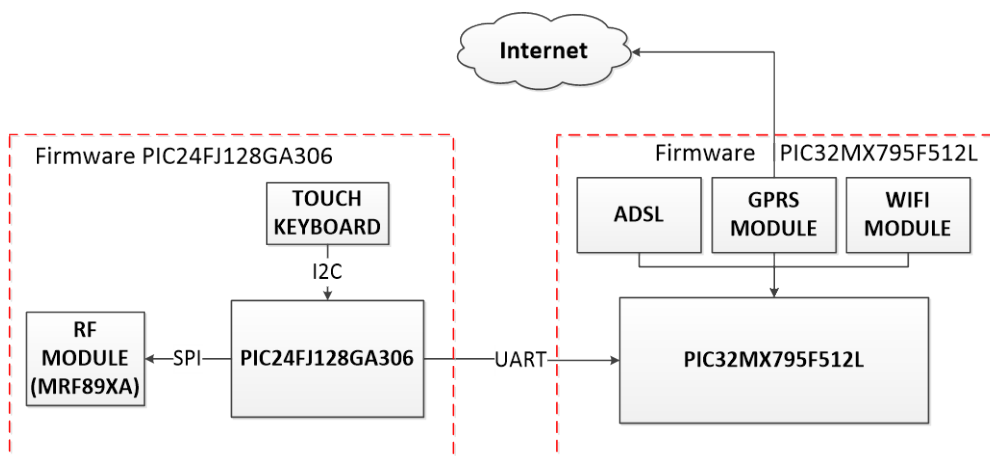


Figura 3.4. Diagrama de bloques de la estructura del firmware de la estación base.

El módulo de radio de corto alcance intercambia datos vía inalámbrica a 868 MHz siguiendo una secuencia de datos específica, que se ha desarrollado conciliando las características más apropiadas de IEEE 802.15.4 y MiWi para la aplicación en cuestión. Además, se han implementado algoritmos de cifrado para mejorar la seguridad de las comunicaciones de RF, como se discutirá más adelante. También se ha incluido un blindaje electromagnético para evitar problemas de interferencia entre el circuito RF y los circuitos adyacentes como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.5. Blindaje electromagnético para el módulo RF.

El módulo de radio se basa en el transceptor MRF89XA de Microchip, seleccionado por su bajo consumo de energía para una vida útil de la batería más larga, particularmente de los nodos sensores. Se ha elegido una solución de bajo coste diseñando una antena en la propia placa, para evitar el uso de antenas convencionales o elementos comerciales que agreguen más coste al dispositivo. La Figura 3.6 muestra la antena diseñada y el esquema del módulo RF.

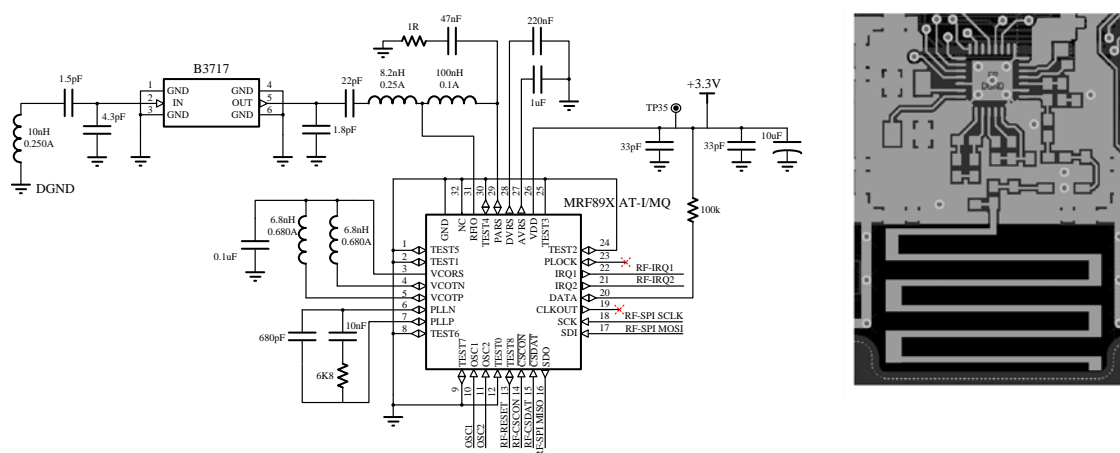


Figura 3.6. Antena diseñada y el esquema del módulo RF.

Se ha utilizado software de simulación para antenas de alto rendimiento. Los resultados mostrados en la Figura 3.7 garantizan el funcionamiento correcto.

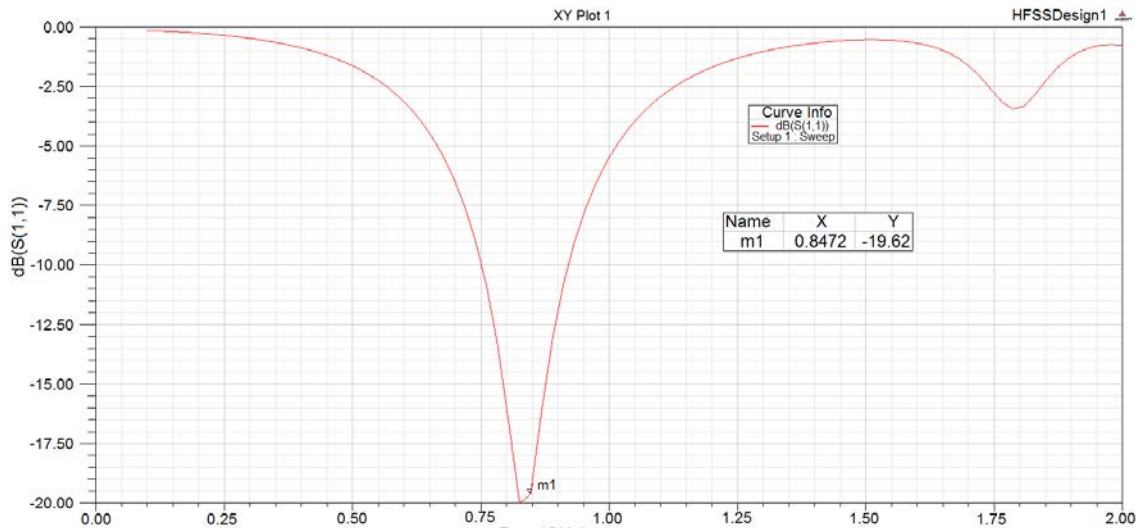


Figura 3.7. Resultado de simulación del funcionamiento de la antena.

La estación base está conectada a la fuente de alimentación, pero también puede alimentarse a través de una batería. Se han incluido circuitos adicionales basados en el cargador lineal integrado bq24070 de Texas Instruments como un dispositivo de gestión de potencia del sistema. Este enfoque combinado permite que la estación base se alimente de manera simultánea mientras la batería se está cargando y evita ciclos de carga/descarga para prolongar considerablemente la duración de la batería. Si se produjera un corte de energía eléctrica, la estación base podría seguir funcionando correctamente durante un período adicional de 10 horas.

Por otro lado, la placa secundaria de la estación base incluye un teclado táctil capacitivo con electrónica asociada y LEDs como se muestra en la Figura 3.8.

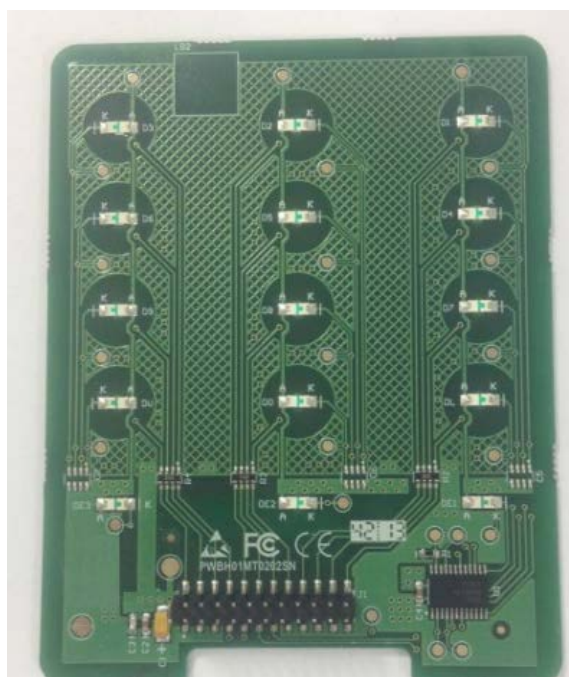


Figura 3.8. Teclado táctil de la estación base.

El diseño de esta placa y la integración en la estación base ha sido un reto, ya que debe unirse la tecnología de detección capacitiva para detectar el tacto (sólo funciona con un dedo humano), con la adecuada elección de los materiales que permiten la transmisión de señales desde el dedo del usuario al sensor de la placa (almohadilla de cobre). Para el diseño de esta placa, se utilizaron al principio las entradas del teclado capacitivo que están disponibles en el microcontrolador de 16 bits. Después de rigurosas pruebas preliminares, se produjeron impulsos aleatorios debido al ruido externo, y además, la sensibilidad no era del todo correcta. Así que se utilizaron los controladores CAP1166 con sensores capacitivos especialmente adecuados para estas aplicaciones, proporcionando resultados satisfactorios después de repetir los ensayos. La inclusión del teclado táctil en la estación base aumenta la versatilidad del sistema. Aunque el sistema es controlado remotamente, el teclado táctil capacitivo también permite al usuario introducir manualmente códigos para habilitar o deshabilitar diferentes partes del sistema.

3.2.3 Sistema de gestión de la información.

Es necesario definir y recoger varios datos de estado del sistema además de los datos procedentes de los nodos sensores. Además, es importante ajustar las configuraciones del sistema de forma remota y la actualización y ampliación de los programas de software. Por último, la monitorización remota del estado del sistema es útil para el desarrollo del sistema, su depuración y mantenimiento.

El sistema de gestión de información incluye una aplicación web y una aplicación móvil iOS y Android, que permiten el control de todos los parámetros del sistema y la supervisión de alarmas y eventos. La aplicación web permite configurar el sistema desde un ordenador remoto a través de Internet por parte de usuarios autorizados, accesible a través del sistema de comunicación exterior. La aplicación móvil también proporciona alertas en tiempo real.

La monitorización y control completo para aplicaciones de la industria implica la medición de varias magnitudes físicas para mejorar la calidad de los procesos. El sistema inalámbrico diseñado es redimensionable y, por lo tanto, el número de cantidades a medir es fácilmente ampliable.

3.3 Administración de la red.

3.3.1 Consideraciones preliminares.

Inicialmente, se partió de un conocido protocolo de código abierto propuesto por el fabricante del transceptor, llamado MiWi. Se trata de una solución de bajo coste para aplicaciones en las que se requiere bajo consumo de energía, pocos recursos computacionales y bajas tasas de datos. Está basado en

el estándar IEEE 802.15.4, específicamente diseñado para redes LR-WPAN, que ofrece una alta versatilidad para el desarrollo de diferentes topologías.

Las pruebas preliminares realizadas con MiWi concluyeron que no es lo suficientemente robusto y estable para la aplicación en cuestión. Concretamente, presenta grandes latencias, las cuales también fueron variables y nunca deterministas; incluso a veces bloqueaban parte del hardware lo cual requería atención inmediata del procesador debido a que MiWi realiza un uso intensivo de los ciclos de ocupado y espera. El ciclo de trabajo es uno de los elementos más utilizados para reducir el consumo de potencia durante el tiempo de espera o reposo (*busy-wait*). Además, es una de las principales fuentes de malgasto energético. Por lo tanto, para el firmware de las comunicaciones RF se prefirió desarrollar una pila de protocolo específica. Las principales características de la pila de protocolo desarrollada son las siguientes:

- Controlador de SPI con un mecanismo de interrupción para minimizar la latencia y el ciclo de ocupado-reposo del microcontrolador.
- Controlador para el transceptor MRF89XA de Microchip. El controlador está preparado para trabajar en segundo plano, por lo que no utiliza los ciclos de ocupado-reposo, por lo que no hay latencia.
- Una capa de acceso al medio (MAC) que es responsable de la comunicación entre los nodos de enrutamiento a través de una única dirección fija, leída desde la EEPROM. Esta capa también está diseñada para minimizar los ciclos de ocupado y espera, y durante la mayor parte del proceso se realiza en segundo plano, reduciendo la latencia tanto como sea posible. Para el

diseño de esta capa se consideraron aspectos del IEEE 802.15.4, tales como tiempos de espera o formatos de trama.

- Una capa de enlace lógico (LLC, *logical link layer*). Esta capa maneja el direccionamiento lógico de los nodos, la asignación de roles dentro de la red (coordinador PAN, coordinador o dispositivo final (*end devices*)), asignación de direcciones lógicas (que no está fijada), gestión de rutas, descubrimiento de redes, control de tráfico y gestión de los tipos de consumo. El diseño de esta capa también está diseñado para minimizar los tiempos de ocupado y espera, y la latencia. La capa de cifrado AES128 es la responsable de cifrar los mensajes que se enviarán a los otros dispositivos para mejorar la seguridad.
- Capa de presentación: Esta capa (por encima de la capa LLC) realiza las funciones de una interfaz entre la secuencia de datos y el nodo. Es responsable de configurar la pila de protocolo y coordinar su funcionamiento.
- Driver para EEPROM. Es responsable del acceso a la EEPROM sin interferir con el módulo de radio. Esto impide un alto acoplamiento entre ellos, ya que ambos pueden funcionar asincrónicamente, compartiendo el mismo bus SPI.

La pila de protocolo diseñada se realizó en capas para que se puedan utilizar independientemente y desacoplar así los diferentes niveles de funcionalidad, permitiendo un mayor código, portabilidad, adaptación al nuevo hardware y una mejor depuración y testeo. El mismo esquema de direccionamiento propuesto por MiWi y el soporte para topologías de red tipo árbol (proporcionado por la capa LLC) se han utilizado en el nuevo código.

El objetivo principal del diseño es minimizar la latencia y el uso del procesador casi sin ciclos de ocupado y espera. Por lo tanto, todo el diseño se basa en el uso de interrupciones para el controlador SPI. Todas las funciones se implementan como máquinas de estado en las que cada estado es activado por una interrupción cuando termina la operación anterior.

La comunicación de eventos asíncronos, como la recepción de mensajes nuevos o la interrupción (caída) de la red se realiza a través de un conjunto de *callbacks* agregadas a las API de cada capa. Esta estructura (aunque el desarrollo ha sido algo más complejo que en el caso de pilas de protocolo como MiWi) ha permitido reducir al máximo el uso del procesador y la pila de protocolo apenas influye en los demás componentes de los nodos. El consumo de potencia también se reduce debido a que la CPU está más tiempo en reposo.

MiWi, que es similar a la definida por IEEE 802.15.4, soporta los tres tipos de red: estrella (*Star*), árbol (*Tree*) y malla (*Mesh*) y define dos tipos de dispositivos: FFD (*full-function devices*) y RFD (*reduced-function devices*) como se muestra en Tabla 3.1. Los roles de los nodos pueden dividirse en Coordinador PAN, Coordinador y Dispositivo Final (*end device*) como se muestra en la Tabla 3.2. Los nodos sensores pueden actuar como dispositivo de función completa (FFD) o dispositivo de función reducida (RFD). En FFD, los nodos nunca duermen ya que necesita transmitir la información desde el dispositivo RFD al nodo receptor. Mientras que un RFD sólo se despertará un cierto tiempo para recopilar los datos del sensor, reenviarlo al FFD y pasa de nuevo al modo de reposo o dormido. Por lo tanto, en la actual implementación, los nodos sensores actúan como RFD y el coordinador como FFD.

Clase de dispositivo	Servicios ofrecidos	Ruta de alimentación	Configuración de baja potencia
Dispositivo de función completa (FFD)	Todos	Red eléctrica	Siempre ENCENDIDO
Dispositivo de función reducida (RFD)	Limitados	Baterías	Siempre EN REPOSO

Tabla 3.1. Clases de dispositivos en IEEE 802.15.4

Función del dispositivo	Clase de dispositivo (IEEE)	Función en la red
Coordinador PAN	FFD	Sólo uno por red. La creación de red, asignar direcciones y mantener la tabla de conexiones.
Coordinador	FFD	Opcional. Hacer más grande el alcance de la red y hacer que sea posible añadir más dispositivos a la red. Funciones de control y monitorización.
Dispositivo final	FFD o RFD	Funciones de control y monitorización.

Tabla 3.2. Función de los dispositivos (IEEE 802.15.4).

Los nodos sensores deben utilizar modos de funcionamiento de bajo consumo para lograr una buena eficiencia energética que asegure la autonomía. Se ha implementado una red tipo árbol debido a que los nodos sensores deben configurarse como dispositivos de función reducida (RFD) con capacidad para entrar en modo de reposo, en el cual el consumo se puede considerar insignificante. La Figura 3.9 muestra la topología tipo árbol de la red. El responsable de la gestión de la red es un nodo Coordinador PAN. Este Coordinador PAN asigna las direcciones a todos los END devices y a los demás coordinadores. Un nodo coordinador también asigna direcciones a los nodos

END devices situados dentro de su rango de transmisión, si previamente se han agregado a la red.

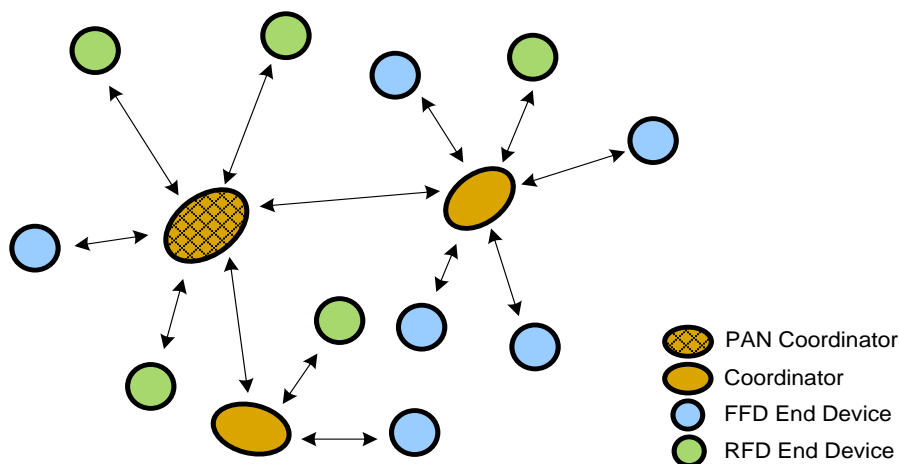


Figura 3.9. Topología tipo árbol de la red inalámbrica diseñada.

El protocolo de acceso al medio que se ha elegido se corresponde con la especificación IEEE 802.15.4. La capa diseñada está situada por encima de la capa MAC y por debajo de las capas superiores y debe especificar los siguientes mecanismos:

- 1) Asignación de direcciones a nuevos nodos que se incluirán en la red.
- 2) Los elementos necesarios para crear una topología de red basada en una topología tipo árbol.
- 3) Enrutamiento de mensajes dentro de la red si se requieren varios saltos para llegar al destino.
- 4) Averiguar cuándo un nodo pierde la conexión con su coordinador.
- 5) Configuración de la seguridad.

- 6) Configuración de los parámetros de eficiencia energética, como la potencia de transmisión, la sensibilidad y los estados de reposo del transceptor.
- 7) Evitar la pérdida de mensajes incluso si el nodo destino está en modo dormido.

La seguridad es crítica a la hora de diseñar un sistema de comunicación inalámbrica. Cualquier intrusión puede resultar en una situación dañina o incluso desastrosa, por ejemplo en plantas industriales. La red diseñada incluye mecanismos de seguridad y cifrado de mensajes para mantener la integridad de los datos y evitar la interceptación de los datos transmitidos entre nodos de la red. Con respecto al control de flujo, cuando un nodo desea acceder al medio para la transmisión de un mensaje, se utiliza un mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) sin ranura (*un-slotted*) y sin balizas (*non-beacons*), definidos en IEEE 802.15.4.

3.3.2 Conservación de la energía.

La optimización energética puede realizarse a diferentes niveles. Como los nodos sensores operan a través de una fuente de energía limitada (baterías), el hardware eficiente para el funcionamiento de bajo consumo requiere estados de energía seleccionables (despertarse o dormirse). De esta manera, el nodo detector sólo se alimentará durante el tiempo específico para el proceso de recogida de datos; después pasará al modo de reposo hasta la siguiente ronda de recogida de datos. Como en el modo de reposo el transceptor está deshabilitado, es necesario establecer algún tipo de protocolo para evitar la pérdida de mensajes.

Como se mencionó anteriormente, sólo los END devices pueden entrar en modo reposo o dormido. El mecanismo que evita la pérdida de mensajes cuando los END devices están en reposo, es hacer que los coordinadores almacenen mensajes dirigidos a sus END devices. Estos últimos deben solicitar explícitamente los datos a los coordinadores utilizando los comandos de solicitud de datos (*Data Request*) definidos por el estándar IEEE 802.15.4. Por lo tanto, también tendremos un control de flujo en el caso de que un END device tarde demasiado tiempo en procesar un mensaje antes de que pueda recibirlo el siguiente. La primitiva de la gestión de la energía, que en principio sólo tiene sentido para el caso de un END device, permite controlar la forma en que se solicitan datos a los coordinadores.

Obviamente, el nodo receptor o coordinador requiere alta capacidad de procesamiento para coordinar toda la actividad de la red, y por lo tanto, necesita el mayor consumo energía de entre todos los dispositivos de la red.

Es necesario un análisis detallado del consumo de potencia para determinar la capacidad requerida de la batería recargable y asegurar la autonomía del sistema. El consumo de energía de cada dispositivo se determina por la medición del consumo de corriente y el tiempo gastado en cada uno de sus modos de operación. Las pruebas se realizaron para cuatro estados funcionales: transmisión de datos, adquisición, escucha y modo de espera para una potencia de transmisión de 13 dBm. El consumo de energía medido para el estado de transmisión es de 12,8 mA; adquisición 6,52 mA; escucha 2,99 mA; y estado de reposo 100 nA. El tiempo total transcurrido desde que el nodo se activa, recibe los mensajes pendientes y regresa al modo de reposo también se midió resultando en 140 μ s.

El consumo de corriente para el transceptor se limitó a $150 \mu\text{A}$ en un cierto período de tiempo. Por lo tanto, debe cumplirse la siguiente expresión:

$$F_{tw} \cdot I_w + F_{ts} \cdot I_s \leq I_{max}$$

donde F_{tw} es la fracción de tiempo que el transceptor está encendido, e I_w es el consumo de corriente del transceptor en ese estado; mientras que F_{ts} es la fracción de tiempo que el transceptor está en modo reposo o dormido, e I_s es el consumo de corriente en este mismo estado. Como $F_{ts} = (1 - F_{tw})$, la expresión anterior se puede reescribirse como: $F_{tw} \leq (I_{max} - I_s) / (I_w - I_s)$. Sustituyendo los valores de la corriente medida: $F_{tw} \leq (150 \mu\text{A} - 100 \text{nA}) / (12.8 \text{mA} - 100 \text{nA}) \sim 0.0117$. Considerando el consumo de potencia por hora, el tiempo que el transceptor puede permanecer en modo activo es $T_w = 0.0117 \cdot 3600 \text{ sg} = 42.16 \text{ sg}$. Por lo tanto, el transceptor permite realizar un número muy alto de peticiones por hora ($42.16 \text{ sg} / 140 \mu\text{s} = 3 \cdot 10^5$).

El nivel de tensión de la batería se monitoriza como parte del servicio remoto de monitorización del estado del sistema. La supervisión casi en tiempo real de estos datos de estado del sistema es importante para determinar la eficiencia de la batería y la detección temprana de la degradación severa de la batería, evitando así fallos del sistema y la pérdida de datos importantes del sensor.

Una vez que se validó el hardware y se aseguró su adecuado funcionamiento, el siguiente paso fue revisar el software que incorpora modos de bajo consumo en todos los nodos, excepto los alimentados por la red eléctrica (estación base). De esta manera se consigue suficiente autonomía para asegurar que los nodos funcionaran durante un año.

La Figura 3.10 muestra la implementación final de la estación base y el sensor de gas, así como el encapsulado diseñado para protegerlos. Las dimensiones finales del encapsulado del sensor son 70 mm de diámetro y una altura de 30 mm. Para la estación base son 140 mm de diámetro y 35 mm de altura.



Figura 3.10. Imagen de la estación base y el sensor de gas, y el diseño del encapsulado.

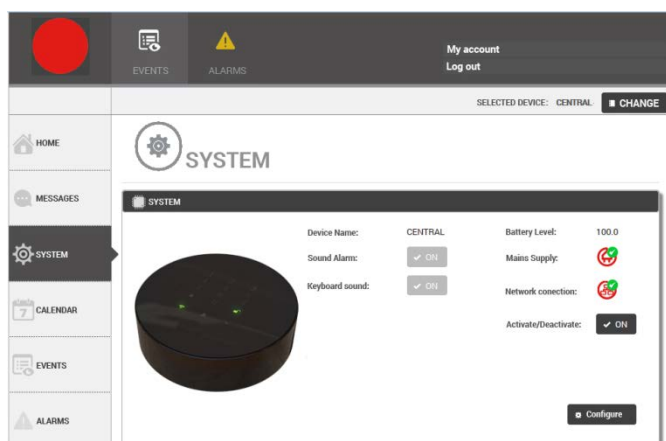
3.4 Aplicación de monitorización y control.

Una interfaz gráfica de usuario permite la monitorización en tiempo real de las magnitudes físicas y del nivel de batería de todos los nodos activos. Además, todos los datos medidos por los nodos deben ser conservados para su posterior procesamiento. Esta información permite al usuario actuar en cualquier momento sobre el sistema.

La aplicación web y las aplicaciones móviles permiten al usuario configurar todos los dispositivos del sistema inalámbrico, así como la monitorización y notificación de las alarmas. La Figura 3.11 muestra la vista

principal de la aplicación de monitorización y control remoto. Las características principales son las siguientes:

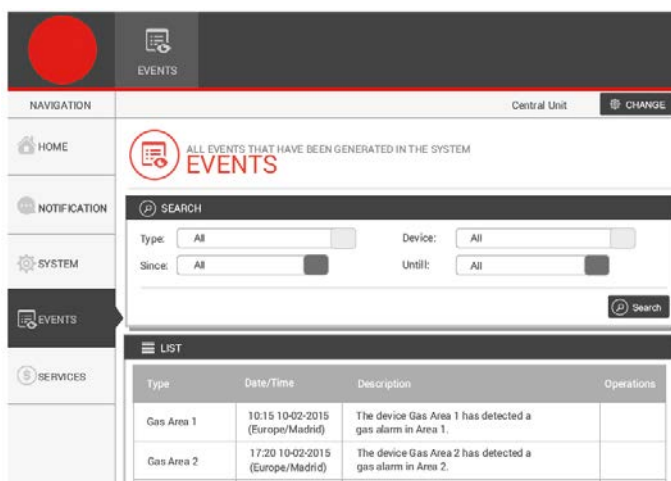
1. Registro y acceso al panel de control. Los usuarios pueden registrarse a través del portal web, que incluye sus datos de usuario y credenciales. Una vez dentro de la aplicación, se pueden configurar y supervisar los diferentes dispositivos del sistema.
2. Los métodos de notificación sobre las alarmas y eventos proporcionados por el sistema (SMS, correo electrónico y notificaciones móviles) se pueden cambiar, así como se puede seleccionar qué contactos deben recibir dichas notificaciones.
3. La configuración de la estación base y los periféricos que componen el sistema permite al usuario activarlos, deshabilitarlos, realizar cambios en la configuración de cada dispositivo, cambiar los umbrales de detección, los períodos de detección, etc.
4. Monitorización de eventos. Se pueden filtrar y listar por el sistema los diversos sucesos generados. Estos sucesos se refieren a los cambios en la configuración de dispositivos y en los accesos al sistema.
5. Control de alarmas: Se pueden filtrar y listar por el sistema los diversos sucesos que se han generado.



(a)

Image	Name	Serial number	Model	Version	Battery	Operations	Condition
	Gas Area 1	TAW-GS-0012	GAS SENSOR	1.2			ON
	Gas Area 2	TAW-GS-0013	GAS SENSOR				ON

(b)



(c)

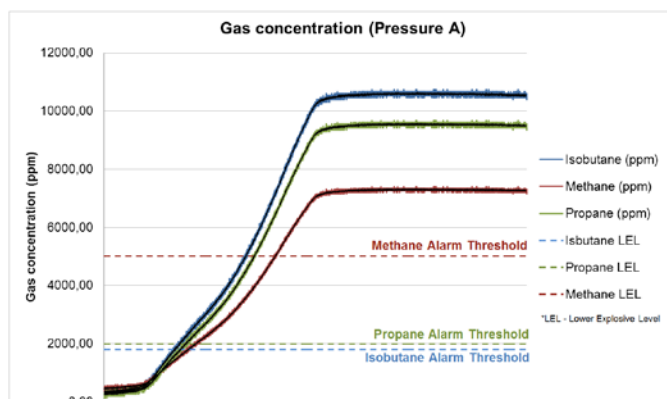
Figura 3.11. Vistas principales de la aplicación de monitorización.

3.5 Resultados experimentales

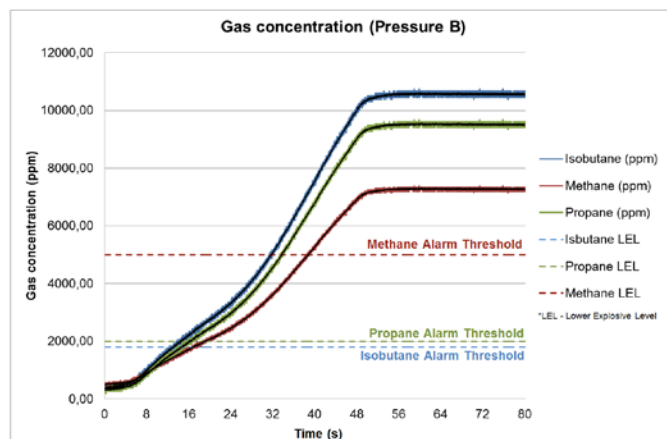
Los sensores demostraron ser robustos y con un rendimiento muy alto. El sensor de gas cumple con la normativa UNE-EN 50194 y permite la detección de gases tóxicos y explosivos como butano, propano, metano, gas ciudad, gas natural y otros. El detector de gas está calibrado para detectar la presencia de gases con un nivel de concentración del 10% de L.E.L. (Límite de explosión inferior) correspondiente a: 5.000 p.p.m. de metano, 2.000 p.p.m. de propano y 1.800 p.p.m. de butano, siguiendo la normativa UNE mencionada.

La Figura 3.12 muestra tres casos de valores medidos para butano, metano y propano. Las pruebas se realizaron en una sala de dimensiones 3 m x 5 m y 2,5 m de altura. Los gases se introdujeron a tres presiones diferentes A, B y C (la presión A es la más alta y la presión C la más baja). A continuación, se midió el volumen de gas en la habitación durante 80 segundos.

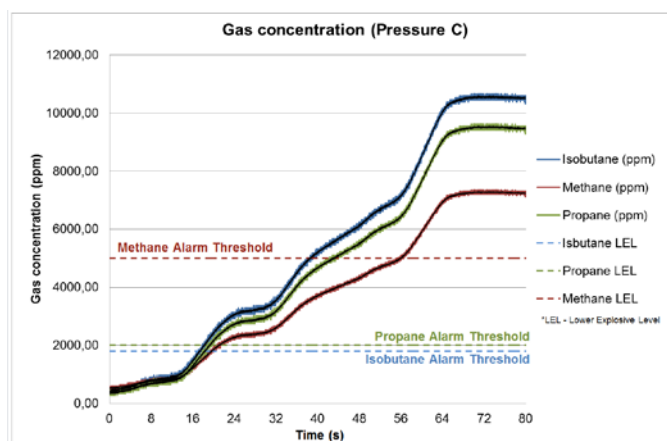
Se puede observar, que en el caso de la presión más alta (A), el sensor de gas responde más rápido y la concentración medida de gas es también mayor; en la situación contraria está el caso de la presión más baja (C). Cuando alguno de los niveles umbrales anteriormente mencionados (líneas punteadas) se supera, el detector activa un indicador luminoso de alarma durante 5 segundos para confirmar la detección y evitar falsas alarmas. Una vez transcurrido este tiempo, si se mantiene el nivel de detección, se activa la alarma de la aplicación móvil. Cuando el detector, en estado de alarma, detecta un nivel de concentración de gas inferior al 10% de L.E.L. durante un cierto tiempo, se desactiva tanto la luz indicadora de alarma como la salida de alarma para la aplicación móvil.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12. Tiempo de respuesta de las medidas del detector de gas en tres casos. (a) Presión más alta, (b) Presión intermedia y (c) Presión más baja.

3.6 Conclusiones.

Este capítulo se presenta el desarrollo y la implementación de una red de sensores inalámbricos diseñados para ser capaz de ser empleada en un entorno industrial. Esto, requiere por tanto, el diseño de nodos robustos, así como fiabilidad y seguridad en las comunicaciones. De forma específica, el sistema inalámbrico incluye el desarrollo de un nodo de sensor de detección de gas de bajo coste y con tamaño optimizado, una estación base y una interfaz gráfica de usuario para el acceso remoto a condiciones industriales y control y monitorización en tiempo real. El sistema ha sido desarrollado para ser fácilmente redimensionado y que pueda medir otros parámetros de interés. Se han diseñado e implementado todas las facetas del sistema de monitorización, tales como la actividad de detección, la transmisión desde nodos detectores a la estación base, la transmisión remota desde la estación base al centro de control o sistema de gestión de información, el almacenamiento de datos y la monitorización. El sistema requiere de bajo mantenimiento e incluye gestión energética. La flexibilidad y robustez del sistema permite que pueda ser utilizado para realizar monitorización remota en otro tipo de entornos, como edificios de viviendas o incluso minas de carbón.

Referencias del capítulo 3

- [1] O. Casas, M. López, M. Quílez, X. Martínez-Farre, G. Hornero, C. Rovira, M. R. Pinilla, P. M. Ramos, B. Borges, H. Marques, P. Silva-Girão, "Wireless sensor network for smart composting monitoring and control", *Measurement*, 47 (2014), 483-495.
- [2] P. Rawat, K. Deep Singh, H. Chaouchi, and J.M. Bonnin, "Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies", *The Journal of Supercomputing*, 68(1) (2014), 1-48.
- [3] F. Viani, "Opportunistic occupancy estimation in museums through wireless sensor networks", *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(8), (2015), 1975-1977.
- [4] X. Yu, P. Wu, W. Han, Z. Zhang, "A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture", *Computer Standards & Interfaces* 35 (2013), 59-64.
- [5] Y.-C. Du, Y.-Y. Lee, Y.-Y. Lu, C.-H. Lin, M.-J. Wu, C.-L. Chen, T. Chen, "Development of a Telecare System Based on ZigBee Mesh Network for Monitoring Blood Pressure of Patients with Hemodialysis in Health Care Centers", *Journal of Medical System* 35 (2011), 877-883.
- [6] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications - concepts and real implementations", *Proc. IEEE*, 101(11), (2013), 2381-2396.
- [7] C. Alippi, R. Camplani, C. Galperti, and M. Roveri, "A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring", *IEEE Sensors Journal*, 11 (2011), Vol. 11, No. 1, 45-55.
- [8] J. Gutiérrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. A. Porta-Gándara, "Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 63 (1), (2014), 166-176.
- [9] J. V. Capella, A. Bonastre, R. Ors, M. Peris, "In line river monitoring of nitrate concentration by means of a Wireless Sensor Network with energy harvesting", *Sensors and Actuators B*, 177 (2013), 419-427.
- [10] I. Ege, M. Gökhan- Sensoy, O. Kalender, S. Nazlibilek, and H. Citak, "A new wireless asynchronous data communications module for industrial applications", *Measurement*, 46 (2013), 2672-2681.

- [11] Y. Yuan, Q. Xu, X. Guan, and Z. Liu, "Industrial high-speed wireless synchronous data acquisition system with real-time data compression", *Measurement*, 46 (2013), 3482-3487.

- [12] K. Arthi, A. Vijayalakshmi, and P. Vanaja-Ranjan, "Critical Event Based Multichannel Process Control Monitoring using WSN for Industrial Applications", *International Conference on Design and Manufacturing, IConDM* (2013), 142-148.

- [13] E. Toscano, and L. Lo Bello, "Multichannel Superframe Scheduling for IEEE 802.15.4 Industrial Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(2) (2012), 337-350.

- [14] X. Li, C.J. Bleakley, and W. Bober, "Enhanced beacon-enabled mode for improved IEEE 802.15.4 low data rate performance", *Wireless Networks*, 18(1), (2012), 59-74.

- [15] T. Torfs, T. Sterken, S. Brebels, et al., "Low power wireless sensor network for building monitoring", *IEEE Sensors Journal*, 13(3), (2013), 909-915.

- [16] J.A. Lopez Riquelme, F. Soto, J. Suardíaz, P. Sánchez, A. Iborra, J.A. Vera, "Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain", *Computer and Electronics in Agriculture*, 68(1), (2009), 25-35.

Capítulo 4

Sistema inalámbrico de detección de humos con alto grado de autonomía energética para incendios en viviendas

En este capítulo se presenta un novedoso sensor para la detección de incendios en entornos domésticos. Su originalidad reside en el diseño hardware/software que permite integrar eficientemente distintos tipos de sensores y reducir las falsas alarmas. El detector de incendios utiliza una combinación de varios sensores que no sólo detecta humo, sino que discrimina entre diferentes tipos de humo. Esta característica evita falsas alarmas y advierte de diferentes situaciones. El consumo de energía se optimiza tanto en términos de hardware como de software proporcionando un alto grado de autonomía de casi cinco años. Los datos almacenados en el dispositivo se

transmiten a través de comunicaciones inalámbricas hacia una estación base. El bajo coste y diseño compacto proporciona muchas perspectivas de aplicación.

4.1 Introducción

La detección de incendios en el hogar es una temática de gran preocupación, y por lo tanto, se dedican muchos esfuerzos a diseñar sistemas de detección automática en la mayoría de los países desarrollados [1],[2]. Un sistema de alarma contra incendios debe informar de manera fiable y oportuna a los ocupantes del edificio sobre la presencia de indicadores de incendio, tales como humo o altas temperaturas. Un detector de incendios suele estar implementado mediante un detector de humos [3]-[5] debido a su capacidad de detección temprana de incendios, su rápido tiempo de respuesta y su coste relativamente bajo. Otras opciones para la detección de incendios se basan en sensores de gas [6],[7] o sensores de temperatura [8]. Los detectores de incendios que utilizan un único sensor, generalmente un sensor de humo, presentan altas tasas de falsas alarmas debido a los cambios de temperatura [9]. El sensor de humo se basa en la refracción de luz infrarroja (IR) debido a la presencia de humo en una cápsula pequeña. Tanto los LED infrarrojos como los fotodiodos dependen de la temperatura, y por lo tanto la sensibilidad del detector de humos también depende de la temperatura ambiente, aunque este efecto suele ser cancelado en dispositivos de alto rendimiento [10]. Por lo tanto, un detector de incendios que combina varios tipos de sensores proporciona un sistema de alarma de incendios más eficiente [11].

Las soluciones convencionales de sistemas de detección de incendios se basan en sistemas con cable, como el CAN en bus, debido a la alta seguridad en aplicaciones críticas. Aunque la red tipo bus ha mejorado considerablemente en

capacidad de expansión y mantenimiento, los sistemas inalámbricos se han vuelto más atractivos en los últimos años ofreciendo una solución de bajo coste y flexibilidad espacial. Una red de sensores inalámbricos requiere nodos sensores de tamaño pequeño para facilitar su despliegue y un consumo de energía limitado debido a su funcionamiento con batería [12]-[16]. Un sistema inalámbrico contra incendios debe garantizar la funcionalidad y la seguridad de las comunicaciones RF, evitando notificaciones de falsas alarmas. Además, el sistema debe notificar el fallo de los componentes y el daño físico o intento de sabotaje, facilitando el mantenimiento y reduciendo así costes innecesarios.

La novedad del trabajo presentado reside en el diseño hardware que permite la integración de forma eficiente de un conjunto de sensores cuyas mediciones cooperan con el fin de detectar un incendio. Igualmente original es el desarrollo del software que incorpora un algoritmo que reduce el número de falsas alarmas.

4.2 Descripción del dispositivo de detección

El dispositivo de detección desarrollado permite implementar una red inalámbrica en la que los datos recopilados son enviados a una estación base para su posterior procesamiento. La estación base sirve como puerta de enlace entre los nodos de los sensores y los usuarios. También se ha desarrollado una aplicación móvil para notificar al usuario en tiempo real sobre un aviso de incendio. La red de sensores inalámbricos recoge los datos para la detección de un incendio en el hogar, analiza los datos de detección y en caso de ser necesario activa con precisión una alarma de incendio. El diseño cumple con las exigencias de pequeño tamaño y bajo consumo de potencia que demanda un nodo inalámbrico. El despliegue de alto número de nodos sensores también

necesita una solución de bajo coste. El sistema realiza medidas de diferentes parámetros para la detección temprana de incendios en el hogar. El nodo incluye sensores analógicos para medir el humo, el monóxido de carbono (CO) y la temperatura.

La Figura 4.1 muestra los bloques que constituyen del dispositivo desarrollado. Se compone de un microcontrolador, un transceptor de radio de corto alcance, una batería, un sensor de CO, un sensor de humo, sensores de temperatura, un botón táctil capacitivo, un diodo LED de color rojo y un zumbador. Todo el sistema está protegido por una caja de protección específica.

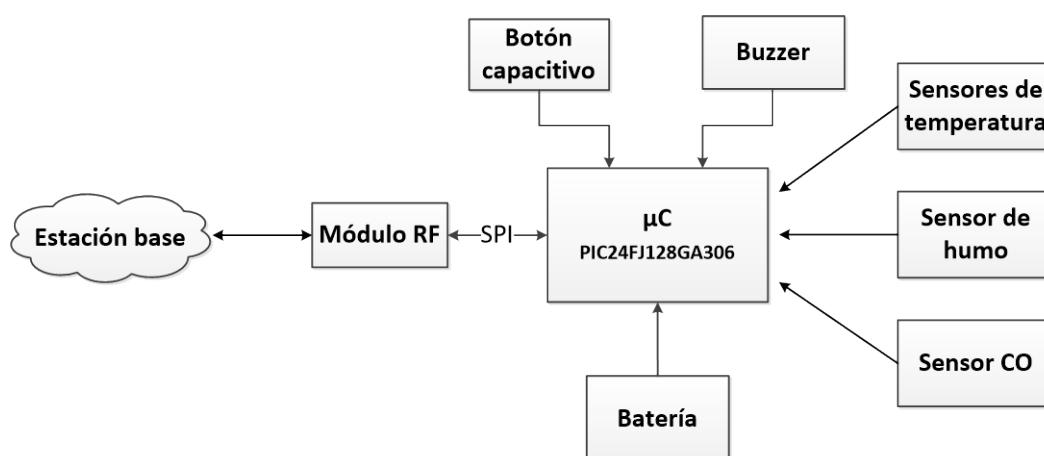


Figura 4.1. Diagrama de los bloques que constituyen el nodo de detección.

El diseño del dispositivo de detección de incendios se distribuye en dos placas de circuito impreso. La más simple de ellas incluye el circuito para manejar y controlar un botón táctil y un zumbador, mientras que la placa principal incluye todos los circuitos de detección de incendios requeridos, indicador luminoso, procesamiento de datos y transmisión inalámbrica de datos.

La placa principal es la parte más importante del dispositivo de detección, ya que reúne todas las mediciones de humo, gas y temperatura y las envía a la

central de control como alarmas. La adecuada gestión de energía requiere electrónica de bajo consumo para sensores, microcontroladores, interfaces de acondicionamiento y transceptor. El microcontrolador elegido fue el PIC24FJ128GA306 de Microchip. El módulo de radio intercambia datos con el nodo de la estación base vía inalámbrica a 868 MHz, siguiendo el estándar IEEE 802.15.4. El nodo de la estación base actúa como pasarela entre la red de sensores y el usuario (o las oficinas si el sistema se utilizara para aplicaciones industriales). La fuente de alimentación consta de una sola batería de litio AA CR123-3V 1600 mAh. Se garantiza una gran autonomía del dispositivo de detección con un cuidadoso hardware ya que el diseño se ha hecho eligiendo elementos que aseguren una funcionalidad adecuada con bajo consumo de potencia. Además, el software también incorpora modos de ahorro de energía. Estas estrategias a nivel hardware y software han conseguido que la batería dure alrededor de 5 años.

Módulo de radio: El módulo de radio se basa en el transceptor MRF89XA de Microchip, uno de los dispositivos de menor consumo de energía disponible.

Sensor de temperatura: El sensor de temperatura MCP9700A es un sensor analógico de baja potencia y bajo coste que no requiere un circuito adicional de acondicionamiento de la señal. El voltaje de salida se conecta directamente a la entrada ADC del microcontrolador. Este sensor resulta adecuado para aplicaciones que requieran la medida de un cambio relativo de temperatura.

Detector de humos. Este sensor es responsable de la detección de humo a través de técnicas optoelectrónicas y funciona según el principio de dispersión de la luz. Utiliza un haz de luz emitido por un diodo emisor de luz (LED) SFH4551 de Osram accionado en una cápsula oscura que impide que el receptor (un fotodiodo SFH2500, de Osram) detecte el paso de luz debido a la absorción

de la luz por el material de color negro. Dentro de esta cápsula, cuando las partículas de humo entran en el trayecto de la luz, la luz choca con las partículas y es reflejada hacia el dispositivo fotosensible alertando así al microcontrolador. La Figura 4.2 muestra la geometría de la cápsula.

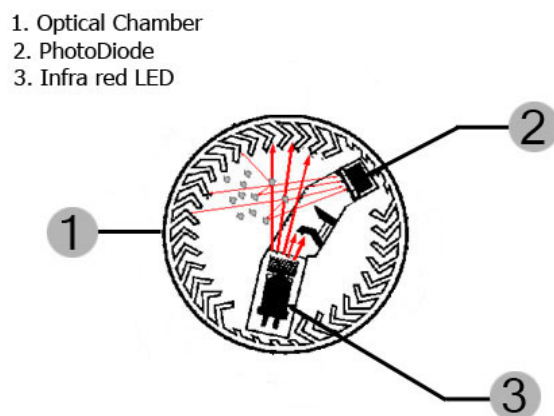


Figura 4.2. Cápsula o cámara del sensor de humo.

La Figura 4.3 muestra el esquema del circuito del sensor de humo. Esta topología es muy atractiva, ya que requiere menos componentes que la forma convencional [17],[18].

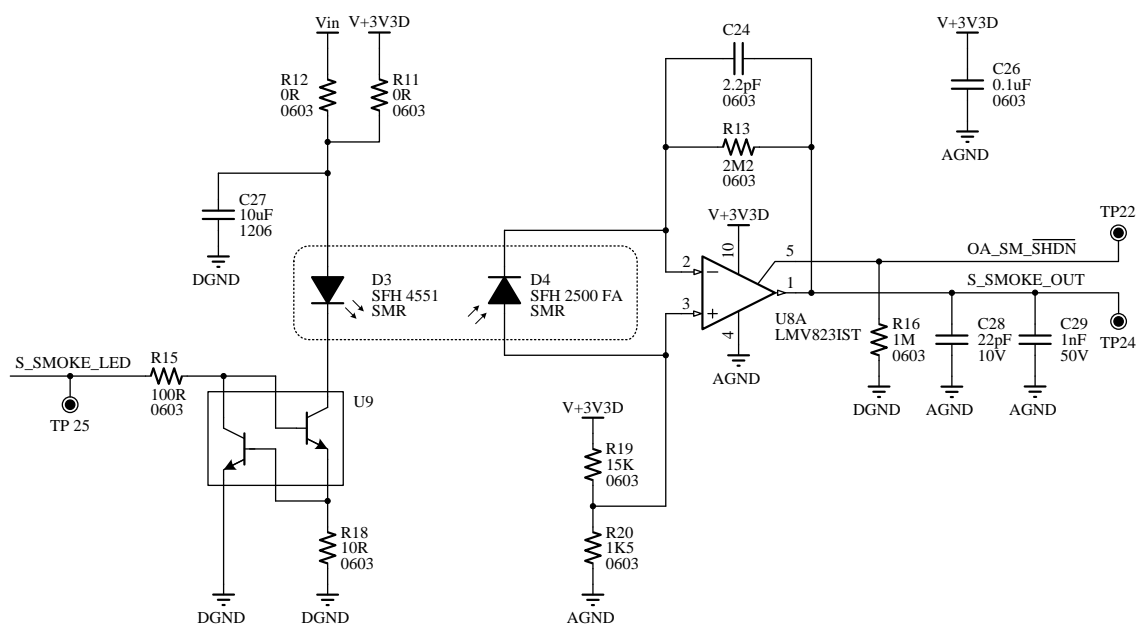


Figura 4.3. Interface de acondicionamiento de señal del sensor de humo.

El fotodiodo funciona con polarización cero dando como resultado una operación lineal más precisa y con menos ruido. Además, esta configuración es más adecuada para aplicaciones de precisión a expensas de la velocidad de conmutación. La corriente del fotodiodo se convierte en un voltaje utilizable utilizando un sólo amplificador operacional como convertidor de corriente a tensión [19]. La resistencia de realimentación se ajusta para cumplir con el rango de sensibilidad requerido. Un condensador de compensación también se coloca en el bucle de realimentación.

Sensor de CO. Este sensor mide el nivel de monóxido de carbono típicamente producido en la combustión de materiales en un incendio en el hogar. Se ha elegido el sensor TGS5342 de Fígaro porque presenta un tamaño compacto, larga vida, buena estabilidad a largo plazo y alta precisión. Puede detectar concentraciones de tan sólo un 1% de CO en un alto rango de temperaturas. Este sensor es crucial para diferenciar el humo del vapor de agua o el humo producido por la combustión de la madera. La Figura 4.4 muestra el circuito básico de medición del sensor de CO basado en un simple amplificador de transresistencia.

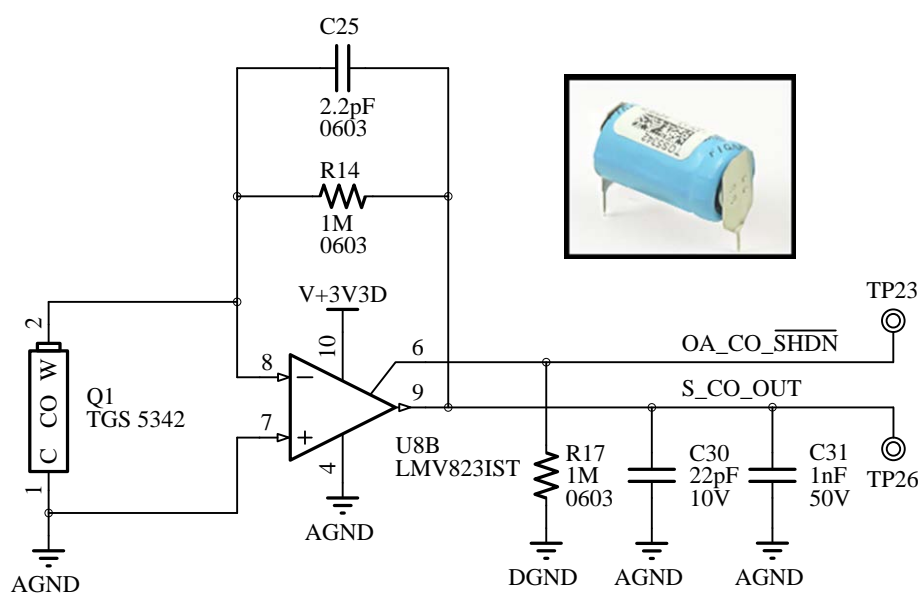
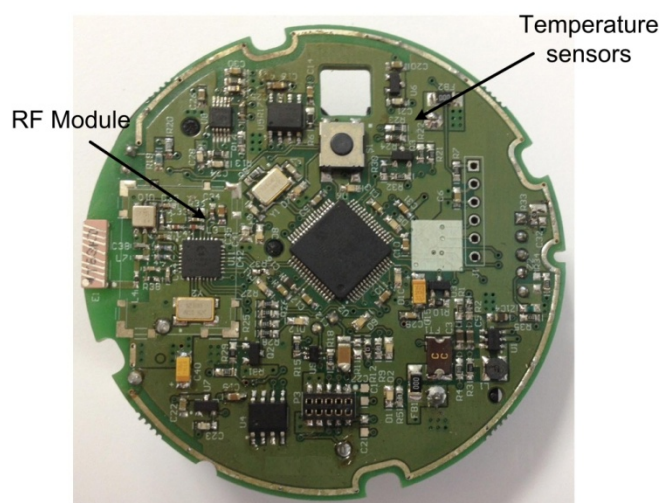


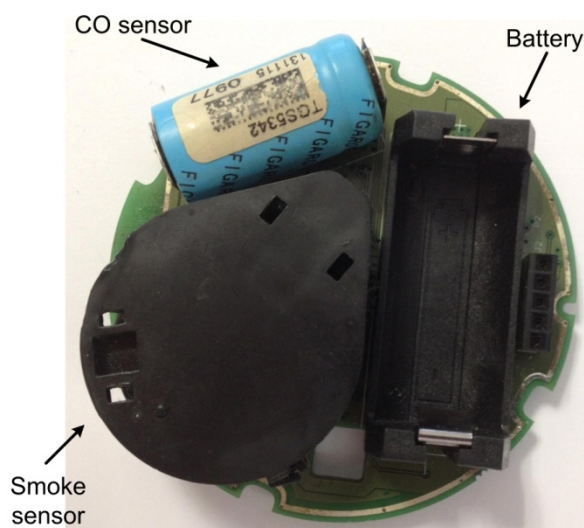
Figura 4.4. Esquema del sensor de monóxido de carbono.

4.3 Implementación hardware.

El microcontrolador gobierna el dispositivo de detección inalámbrico y controla la obtención de datos desde los sensores especificados, el procesamiento de señales, la gestión de datos y las comunicaciones. La señal de salida de los sensores analógicos se convierte en un valor binario utilizando el convertidor analógico a digital del microcontrolador. La Figura 4.5 muestra una imagen detallada de la placa principal del dispositivo desarrollado.



(a)



(b)

Figura 4.5. Placa principal del dispositivo de detección de incendios. (a) Cara superior (b) Cara inferior.

Los sensores de temperatura, el microcontrolador, los LEDs y el módulo de radio están en la cara superior de la placa de circuito impreso, mientras que el detector de monóxido de carbono y la batería están en la cara inferior. Se ha empleado un *shield* electromagnético, diseñado para evitar problemas de interferencia entre el circuito de RF y los circuitos adyacentes.

Existen muy pocos detectores de humos comerciales o detectores de incendios que incluyan un sensor de CO. El dispositivo desarrollado incluye este elemento presentando además un diseño compacto, siendo probablemente el detector de incendios más pequeño que incluya un sensor de CO.

En cuanto a la placa secundaria, tiene como funcionalidad capturar eventos de pulsaciones con el botón táctil capacitivo, y gestiona el uso de los diferentes sonidos del *buzzer* para advertir al usuario de la presencia de humo/fuego. Esta placa contiene un *buzzer*, un panel táctil capacitivo, un sensor que detecta manipulaciones indebidas (*tamper sensor*) y la circuitería para controlar todos estos elementos, como se muestra en la Figura 4.6. El sensor de manipulación detecta la apertura indebida del encapsulado o envoltorio o el intento de sabotaje.

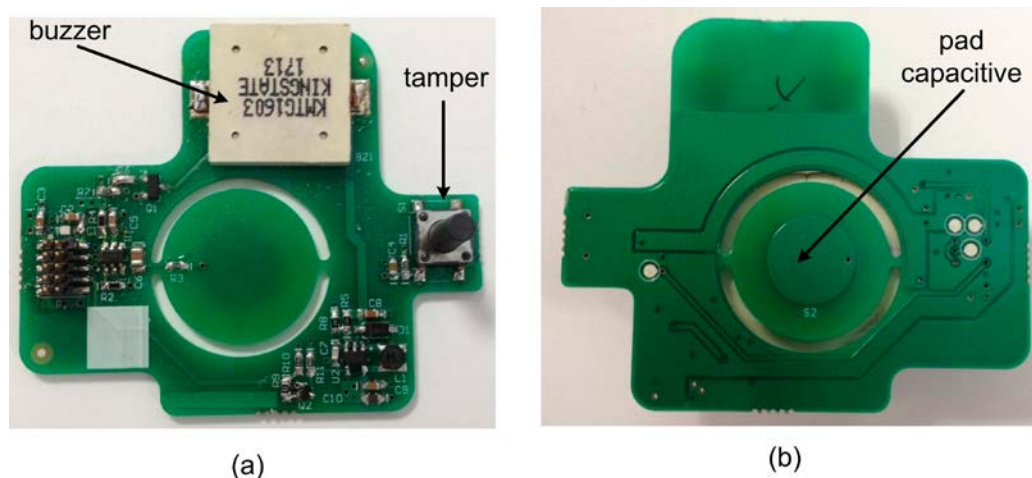


Figura 4.6. Placa secundaria. (a) Cara superior (b) Cara inferior.

El botón táctil permite que el usuario encienda o apague el dispositivo inalámbrico de detención de incendios. El sensor de una sola tecla AT42QT1010-TSHR de Atmel fue elegido para la detección táctil por su capacidad para generar una interrupción táctil. Esto da como resultado una mejora significativa en las especificaciones de consumo de potencia y autonomía, ya que el microcontrolador no necesita comprobar continuamente el estado del botón; se puede despertar desde su estado de bajo consumo o reposo por la interrupción generada por el sensor táctil. La Figura 4.7 muestra el circuito del sensor capacitivo para el panel táctil y el esquema del circuito para el buzzer.

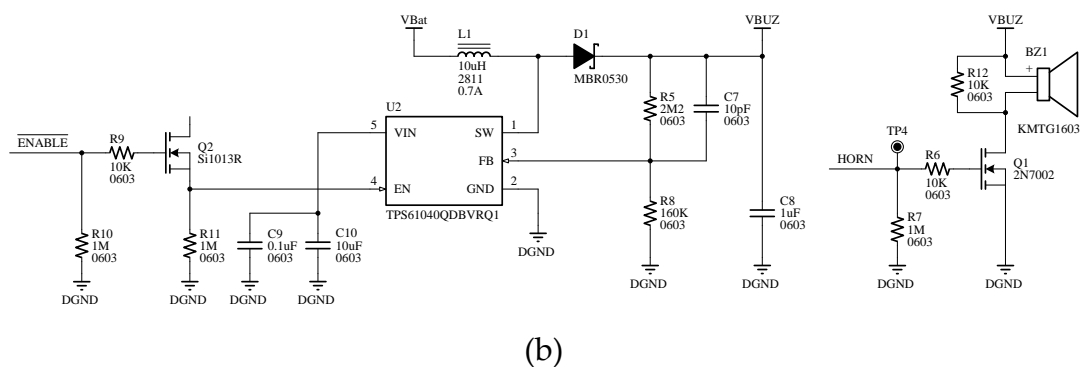
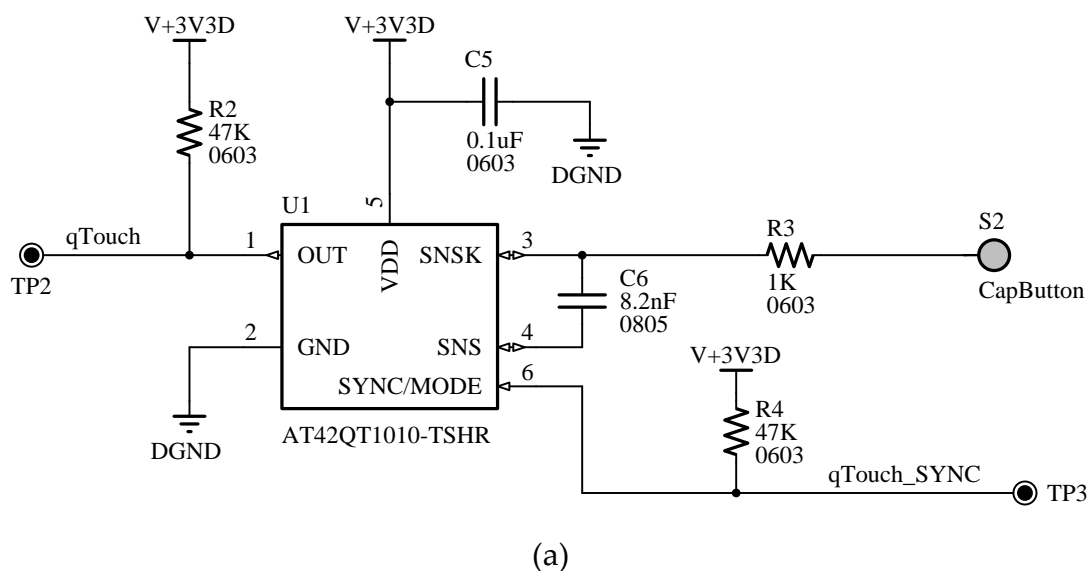


Figura 4.7. (a) Esquema de sensor capacitivo para el panel táctil. (b) Circuito esquemático para el buzzer.

4.4 Software

A nivel de firmware, se ha desarrollado una pila de protocolo específica para las comunicaciones de RF. Los test preliminares, que se realizaron sobre el protocolo MiWi propuesto por el fabricante, proporcionaron resultados inestables en términos de altas latencias (que además eran variables, nunca deterministas), y a veces también se bloqueó parte del hardware lo que requería atención inmediata del procesador (MiWi utilizó de manera intensiva ciclos de trabajo-reposo). Además, se han implementado algoritmos de cifrado para mejorar la seguridad de las comunicaciones RF.

La pila de protocolo desarrollada utiliza un controlador SPI gestionado por interruptores para reducir al máximo la latencia y los ciclos de trabajo-reposo del microcontrolador. El controlador para el transceptor está preparado para trabajar en segundo plano (*background*), de modo que no consuma ciclos de trabajo-reposo, para que no exista latencia.

La pila diseñada se ha realizado por capas, de modo que unas puedan ser utilizadas con independencia de otras y desacoplando los diferentes niveles de funcionalidad, lo que permite una mayor portabilidad del código, adaptación a nuevo hardware y mejor depuración y pruebas. Se ha mantenido el mismo esquema de direccionamiento propuesto por MiWi y soporte para una topología de red tipo árbol (proporcionado por la capa LLC). El diseño se ha realizado pensando en reducir al máximo la latencia y el uso del procesador, casi sin ciclos de trabajo-reposo. Por ello, todo el diseño se basa en el uso de interrupciones dentro del controlador SPI. Todas las funciones se implementan como máquinas de estado en las que cada estado es activado por una interrupción cuando termina la operación anterior. La comunicación de eventos asíncronos, como la recepción de mensajes nuevos o la caída de la red se realiza

a través de un conjunto de *callbacks* añadidas a las API de cada una de las capas. Gracias a esto, aunque el desarrollo ha sido algo más complejo que en el caso de *stacks* como MiWi, se ha conseguido reducir al máximo el uso del procesador, y el *stack* apenas tiene impacto en el resto de componentes de los nodos. También se ha reducido el consumo (la CPU está libre más tiempo).

El nodo sensor también incluye la funcionalidad *bootloader*. El objetivo es doble: en primer lugar, permite actualizar el firmware de forma remota para ahorrar costes de mantenimiento. En segundo lugar, se puede comprobar el buen funcionamiento del hardware cargando una aplicación de test, para luego, terminar la fase de test de programación cargando la aplicación final. A nivel de software, el *bootloader* requiere unas estructuras de memoria y unos protocolos de comunicaciones y compartición de datos. A nivel de hardware, se ha incluido una memoria flash externa para almacenar el nuevo firmware a cargar, sin que este se pierda o pueda quedar corrupta la memoria del microcontrolador en caso de fallo de alimentación o comunicaciones en el proceso de actualización remota.

4.5 Diseño de la envolvente

La Figura 4.8 y la Figura 4.9 muestran la envolvente diseñada para proteger el dispositivo de detección del entorno. Se trata de una caja cilíndrica con el lado metálico perforado para permitir la entrada de humos y gases, y un panel frontal provisto de un botón táctil capacitivo. La envolvente no afecta al tiempo de respuesta, la precisión de los sensores y la transmisión de datos. Las dimensiones finales de la envolvente del sistema de detección son de 70 mm de diámetro y una altura de 30 mm.

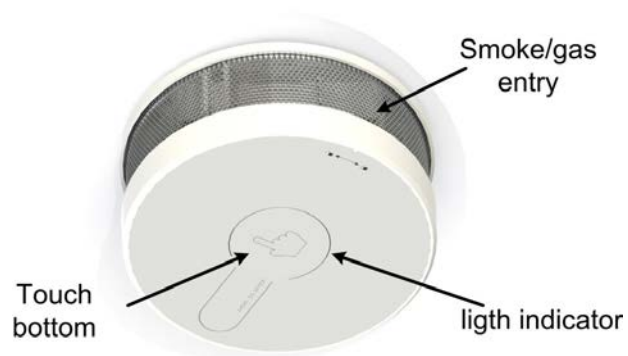


Figura 4.8. Diseño de la envolvente del detector de incendios.

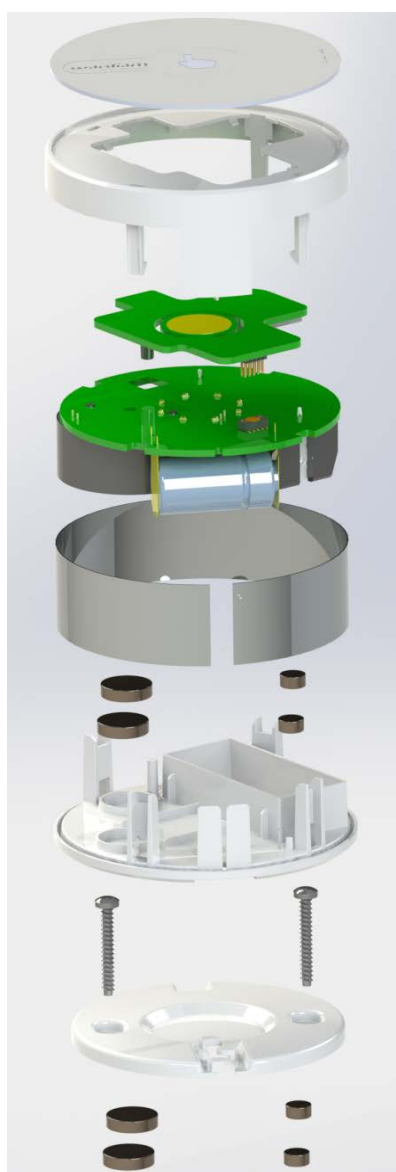


Figura 4.9. Detalle de la fabricación de la envolvente.

4.6 Resultados experimentales.

Se validaron las soluciones hardware y software propuestos y se evaluaron las prestaciones de funcionamiento de los dispositivos tales como rango, flexibilidad y robustez. El dispositivo de detección de incendios combina tres tipos de sensores: humo, temperatura y monóxido de carbono, disminuyendo así el número de falsas alarmas debido al vapor de agua, humo de tabaco, etc.

El proceso de detección de incendios se realiza directamente por la aparición de humo, permitiendo localizar el sitio del fuego y la propagación del mismo con precisión. El uso de un sensor de CO y sensores de temperatura aumenta la fiabilidad del sistema y reduce las falsas alarmas.

En cuanto al algoritmo de detección de alarmas, se basa en la detección conjunta de los tres parámetros. El detector monitoriza constantemente las tres variables de entrada y realiza una selección en tiempo real de una combinación lineal adecuada con la forma dada por:

$$FD = (K_s \times \Delta SK + K_c \times \Delta CO + K_T \times \Delta T) \times K_H$$

donde K_s es el factor de corrección de humo, K_c es el factor de corrección de CO, K_T es el factor de corrección de temperatura, K_H es la altura de instalación, ΔSK es el delta en el nivel del sensor de humo, ΔCO es el delta en el nivel del sensor de CO y ΔT es el delta en el nivel del sensor de temperatura. Por lo tanto, se asignan factores de corrección a cada sensor según el lugar de instalación en el hogar, logrando una sensibilidad más o menos estable. La cantidad resultante FD representa la medida instantánea de peligro procedente de un incendio particular. Mediante una adecuada ponderación de FD , se

pueden conseguir sensibilidades diferentes para diferentes aplicaciones con el mismo detector. Los tres factores de corrección K_S , K_C y K_T toman valores entre 0 y 1. Dependiendo del lugar de la instalación, estos valores pueden categorizarse como altos, medios o bajos. En la Tabla 4.1 se ilustra la asociación de estas categorías a distintos lugares de la casa.

Habitación instalada	Humo (K_S)	Temperatura (K_T)	CO (K_C)
Cocina	Bajo	Bajo	Bajo
Pasillo	Alto	Alto	Alto
Salón	Medio	Bajo	Alto
Habitaciones	Medio	Alto	Alto
Habitación infantil	Medio	Alto	Alto
Garaje	Bajo	Alto	Bajo

Tabla 4.1. Factor de corrección dependiendo del lugar de instalación.

La Figura 4.10 muestra el diagrama de flujo detallado del proceso de detección.

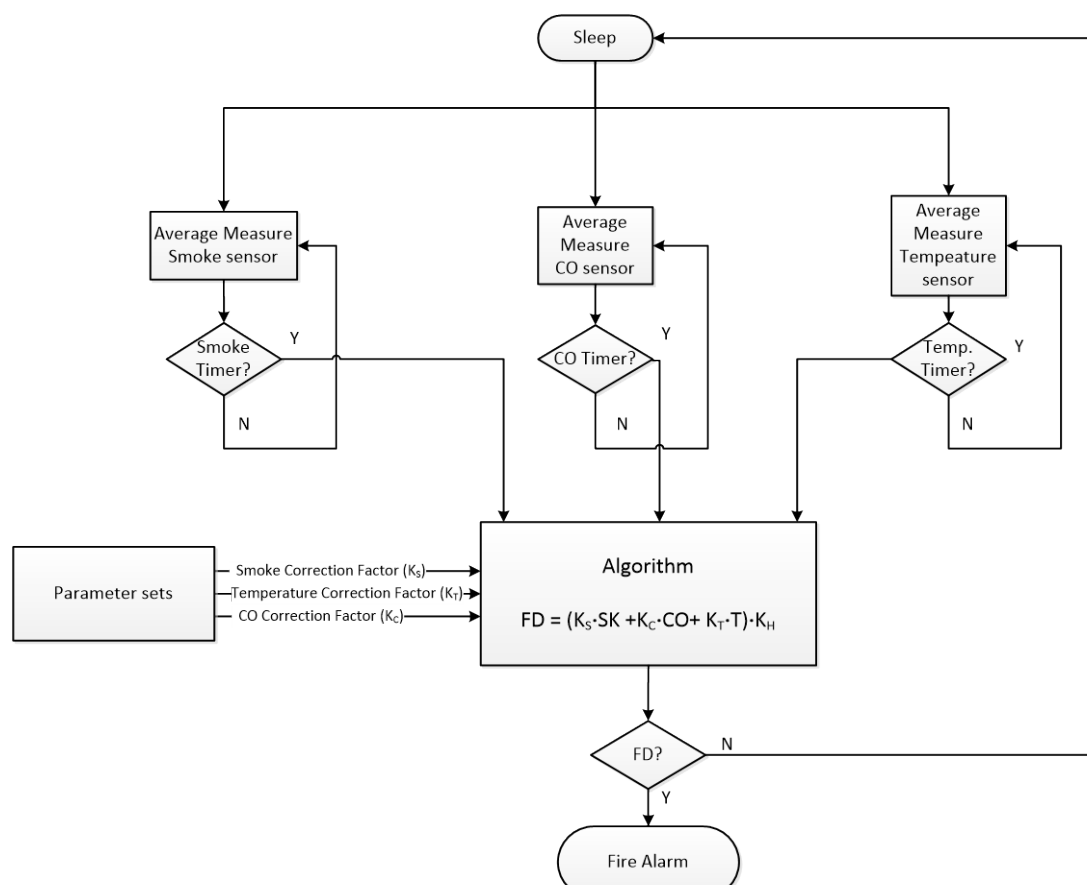


Figura 4.10. Diagrama de flujo del proceso de detección.

La Figura 4.11 y la Figura 4.12 muestran diferentes escenarios de detección de incendios. La figura 4.12 muestra los valores medidos por los tres sensores (temperatura, humo y CO) del dispositivo inalámbrico de alarma contra incendios para una detección de humo debido a vapor de agua y la 4.11 una detección debido a un incendio real. Se puede observar que los valores medidos por todos los sensores aumentan. Lo que realmente discrimina la detección de incendio de otros tipos de vapores (como el vapor de agua) es la presencia de CO, que se libera durante la combustión. Así, la Figura 4.11 muestra la detección de fuego y el sistema activa una alarma. Por otra parte, la Figura 4.12 muestra cómo el dispositivo desarrollado evita una falsa detección de incendio ya que las variaciones de los sensores detectan el vapor de agua debido a que la concentración de CO no se ha incrementado.

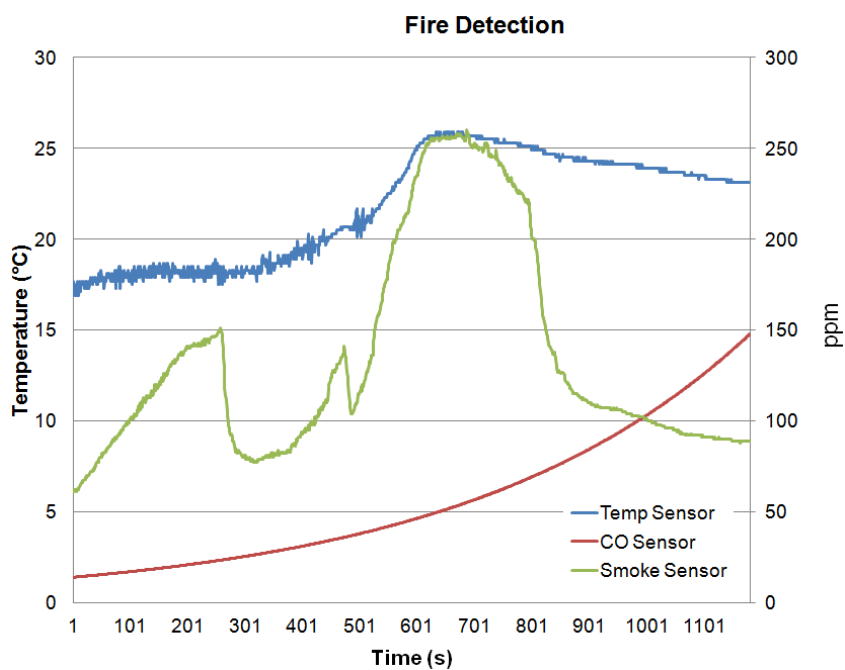


Figura 4.11. Detección de fuego.

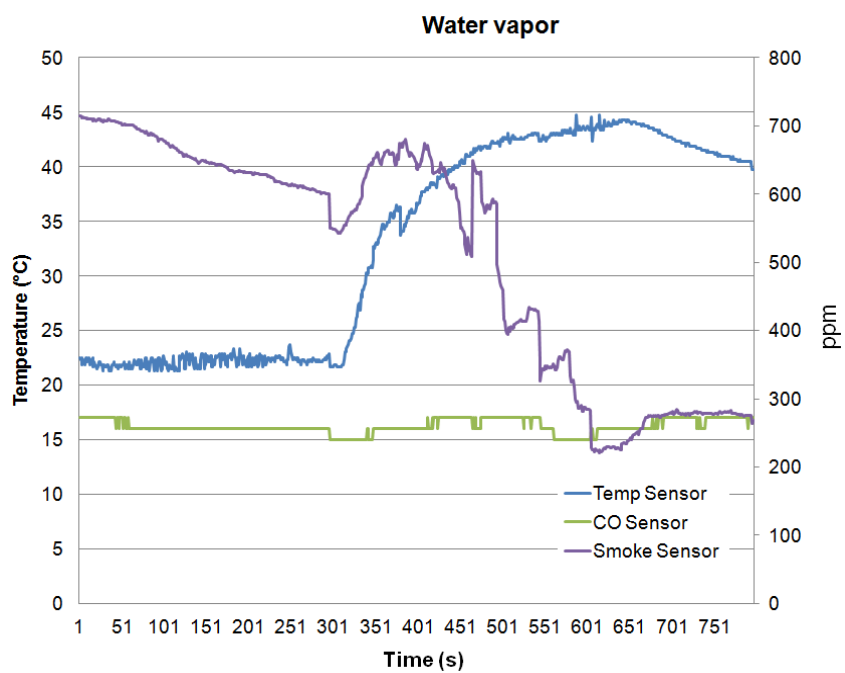


Figura 4.12. Detección de vapor de agua.

Se realizaron varias pruebas para comprobar que la ubicación de la batería que alimenta al nodo y del sensor de CO no obstruían la entrada de humo en la cápsula del sensor, de manera que la sensibilidad de la detección no se vea afectada por la dirección del flujo del humo. En primer lugar, se retiró la cápsula del sensor de CO; y en segundo lugar, se eliminaron tanto la cápsula del sensor de CO como la batería. Los resultados medidos mostraron que se alcanzó el mismo nivel de humo en todos los casos, pero el tiempo de respuesta fue más rápido cuando se extrajo el sensor de CO y la batería. La relación del tiempo de respuesta es de aproximadamente 50 muestras (alrededor de 2,5 sg). En la mayoría de los casos, este retraso es insignificante.

El sensor sólo se alimenta durante la recogida de datos. En el modo de reposo el transceptor está desactivado, pero el protocolo desarrollado evita la pérdida de mensajes. Es necesario estimar el consumo de potencia para garantizar la autonomía. El nodo de detección está siempre en modo de reposo (*sleep*) o bajo consumo de energía, y sólo envía un mensaje de nodo activo diariamente (para notificar al sistema que el sensor está operando). Esto representa un ciclo de trabajo de un segundo cada 24 horas, es decir, un ciclo de trabajo de 0,0011%. En términos de consumo, representa un consumo medio de 16 μAh . Además, el dispositivo sensor recoge una medida de temperatura y de humo cada 30 sg, que requiere un tiempo de aproximadamente 50 μs ; el consumo medio para la adquisición es de aproximadamente 12 μAh . Puesto que el consumo medio del dispositivo en el modo de reposo es de aproximadamente 8 μA , el consumo de corriente total promedio es de 36 μAh . Para la batería usada de 3V/1600 mAh (tipo CR123), la autonomía estimada es de 4,75 años.

Por otro lado, el sistema diseñado puede ser controlado por medio de una aplicación móvil, desarrollada para iOS y Android. Permite la activación y desactivación del sistema, e incluye funcionalidades adicionales. La aplicación móvil se ha desarrollado utilizando Objective C y Java para iOS y Android, respectivamente. Se conecta a servidores de aplicaciones y servicios de notificación tanto de Apple como de Google para generar notificaciones *push* para alarmas y que el usuario pueda recibir información instantánea sobre cualquier suceso que ocurra en el sistema. La Figura 4.13 muestra la aplicación móvil con diferentes funcionalidades.



Figura 4.13. Aplicación móvil.

4.7 Conclusiones.

Se ha presentado un dispositivo de alarma de detección de incendios inalámbrico de bajo consumo y de bajo coste. El dispositivo de detección utiliza la combinación de un sensor de humo, sensores de temperatura y un sensor de CO para proporcionar una mejor detección de incendios. El dispositivo reduce las tasas de falsas alarmas y proporciona una alta fiabilidad. El diseño compacto

y el enfoque inalámbrico garantizan una instalación sencilla del sistema en los edificios y de fácil mantenimiento. Se han elegido componentes hardware que aseguran la funcionalidad y el bajo consumo de energía. La gestión de energía a nivel de software permite al sistema ahorrar energía, ya que el dispositivo sólo consume 36 μAh , lo que garantiza una autonomía de casi 5 años con la batería instalada. Se ha diseñado una envolvente fiable y robusta para proteger el dispositivo de detección.

Referencias del capítulo 4

- [1] M. Ahrens. "Smoke Alarm Presence and Performance in U.S. Home Fires". *Fire Technol.* 2011, 47, 699–720.
- [2] S. Feo-Arenis, B. Westphal, D. Dietsch, M. Muñoz, A. Siyar Andisha. "The Wireless fire alarm system: Ensuring conformance to industrial standards through formal verification". In *Lecture Notes in Computer Science*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2014; Volume 8442, pp. 658–672.
- [3] R.A. Aspey, K.J. Brazier, J.W. Spencer. "Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis". *IEEE Sens. J.* 2005, 5, 1050–1056.
- [4] J. Li, S. Wang, Z. Dou, Z. Yang. "Discrimination of smoke particles using infrared photoelectrical detection". *Int. J. Infrared Millim. Waves* 2001, 22, 141–151.
- [5] K. Müller, M. Loepfe, D. Wieser. "Optical simulation for fire detectors". *Fire Safety J.* 2006, 41, 274–278.
- [6] M. Shi, A. Bermak, S. Chandrasekaran, A. Amira, S. Brahim-Belhouari. "A committee machine gas identification system based on dynamically reconfigurable FPGA". *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 403–414.
- [7] A. Sawada, T. Higashino, T. Oyabu, Y. Takei, H. Nanto, K. Toko. "Gas sensor characteristics for smoldering fire caused by a cigarette smoke". *Sens. Actuators B* 2008, 130, 88–93.
- [8] A.J. Skinner, M.F. Lambert. "Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies". *IEEE Sensors J.* 2006, 6, 1473–1481.
- [9] S.-J. Chen, D.C. Hovde, K.A. Peterson, A.W. Marshall. "Fire detection using smoke and gas sensors". *Fire Safety J.* 2007, 42, 507–515.
- [10] Z.J. Aleksic. "The analysis of the transmission-type optical smoke detector threshold sensitivity to the high rate temperature variations". *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2004, 53, 80–85.
- [11] J. Cheon, J. Lee, I. Lee, Y. Chae, Y. Yoo, G. Han. "A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector". *IEEE Sens. J.* 2009, 9, 914–920.

- [12] Z. Chen, Z. Shi, Q. Guo. "Design of wireless sensor network node for carbon monoxide monitoring". *Telecommun. Syst.* 2013, 53, 47–53.
- [13] Y. Zeng, C.J. Sreenan, L. Sitanayah, N. Xiong, I.H. Park, G. Zheng. "An emergency-adaptive routing scheme for wireless sensor networks for building fire hazard monitoring". *Sensors* 2011, 11, 2899–2919.
- [14] P. Rawat, K.D. Singh, H. Chaouchi, J.M. Bonnin. "Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies". *J. Supercomput.* 2014, 68, 1–48.
- [15] T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal. "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey". *Comput. Netw.* 2014, 67, 104–122.
- [16] J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, S. Sendra. "A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification". *Sensors* 2009, 9, 8722–8747.
- [17] B.C. Baker. *Photodiode Monitoring with Op Amps*; Application Bulletin AB-075; Burr-Brown Corp.: Tucson, AZ, USA, 1994.
- [18] Maxim Integrated Products. *Amplifier Provides Signal Conditioning for Piezofilm Sensors*; Application Note 1127; 2002.
- [19] M. Yamashita. Amplification Circuit for Electric Charge Type Sensor. *U.S. Patent Appl.* 2002/0 125 943 A1, 19 March 2002.

Capítulo 5

Detector de inundaciones inalámbrico de bajo coste para sistemas domésticos inteligentes

En este capítulo se presenta el diseño de un sensor de inundaciones inalámbrico para detectar la presencia de agua en el suelo, que proporciona una alerta temprana para inundaciones. Se despliega una red de sensores inalámbricos que recogen las mediciones de los nodos sensores. Una central de control coordina la red y procesa los datos. Los usuarios pueden consultar de manera remota la presencia de agua, el estado de las baterías de un nodo específico e información sobre su funcionalidad y alarmas, gracias a una aplicación de software. También se comunican los avisos al usuario a través de una sirena audible dentro de la casa. El dispositivo que se ha diseñado es barato y fácil de implementar y mantener, por lo que es muy adecuado para el usuario final. La novedad del mismo reside fundamentalmente en el diseño, que

incorporación de la redundancia en el sistema de comunicación y la incorporación de un elemento de almacenamiento que añade más versatilidad al sistema.

5.1 Introducción.

En los últimos años muchos de los nuevos sistemas de casas inteligentes han añadido detectores de fugas de agua a su lista de dispositivos conectados [1]. Se pueden situar cerca de electrodomésticos como una lavadora, lavavajillas o calentador de agua, o pueden montarse en el sótano, cocina, baño o garaje para prevenir roturas de cañerías. La importancia de la detección temprana es crucial para evitar estas situaciones.

La mayoría de los sensores de detección de fugas de agua para hogares utilizan una batería e incluyen alguna variedad de tecnología inalámbrica de bajo consumo. Las tecnologías de comunicación inalámbrica han avanzado rápidamente y el uso de redes de sensores inalámbricos (WSN) se ha extendido a un gran número de aplicaciones, como la domótica, la vigilancia del medio ambiente, la monitorización de la salud, etc., debido a sus prometedoras ventajas [2]-[8]. Las WSN eliminan la necesidad de cableado de nodos sensores en la vivienda y reduce los costes de instalación y mantenimiento. Como ya se ha comentado anteriormente, el estándar IEEE 802.15.4 es adecuado para la implementación a bajo coste, bajo consumo de energía, control fiable y aplicaciones de monitorización en tiempo real dentro de las casas inteligentes. Una preocupación importante sobre los nodos de sensores inalámbricos es la gestión eficiente de la energía [9].

La implementación del dispositivo inalámbrico implica la integración de diferentes áreas como electrónica, informática y sistemas de comunicación. El

sistema recoge la información de los sensores, la procesa y activa las salidas. El sensor propuesto es también una iniciativa de teleasistencia y tecnología de asistencia electrónica, que puede ayudar a las personas que tienen dificultades debido a su edad o discapacidad, para que vivan de manera segura e independiente en sus propias casas [10]-[12].

Sin embargo, hasta ahora había dos inconvenientes significativos para desarrollar sensores inteligentes en áreas aisladas: el coste de los componentes y la vida útil de la batería. Además, se requiere una supervisión de los sensores de vez en cuando para comprobar el estado del nodo y sustituir las baterías. Como consecuencia, se tenía como objetivo diseñar e integrar una solución que permitiera un largo periodo de tiempo sin mantenimiento y no tener que realizar visitas para reemplazarlos. Para esta propuesta, este trabajo presta especial atención a conseguir un nuevo diseño electrónico, un nuevo modo de control operativo y una estrategia de comunicación eficiente que consiga un sensor con gran autonomía y con capacidades de autochequeo.

El dispositivo desarrollado es un sistema de bajo coste y bajo consumo de potencia que hace posible una integración fácil de los nodos sensores en sistemas domésticos inteligentes. El usuario puede acceder desde el exterior del hogar a través de una red doméstica externa, como la red móvil o Internet.

Una ventaja muy competitiva del sensor propuesto es que los electrodos para medir la presencia de agua, detectan el nivel de agua a dos alturas, de modo que se puede distinguir entre la presencia de agua accidental (por ejemplo, al caer un vaso o un cubo de agua) o una inundación (tubería rota, entrada de agua desde el exterior, etc.). Este hecho es muy interesante para minimizar las falsas alarmas.

Las estrategias de gestión de energía han aumentado de manera espectacular debido al uso de dispositivos portátiles y a la intensa área de investigación sobre redes de sensores inalámbricos que suelen emplear dispositivos con batería. Gracias a los resultados de este trabajo, a través de una elección adecuada de componentes hardware de bajo consumo y una solución WSN personalizada se puede prolongar la vida útil de la batería para que la autonomía del sistema se amplíe.

Esta investigación tiene como objetivo contribuir a la tendencia de desplegar tecnologías en entornos reales y durante periodos de largo plazo, reduciendo la complejidad del sistema e implementando soluciones que proporcionen ventajas tangibles a la vida cotidiana del usuario final. Este capítulo presenta detalles sobre el diseño, la instalación y la evaluación de una red WSN formada por detectores de inundación para avisos en tiempo real, utilizando la tecnología inalámbrica IEEE 802.15.4. Aunque el principal objetivo de aplicación sea para viviendas inteligentes, el sistema también podrá utilizarse para la industria, ya que puede detectar la presencia de agua u otros líquidos en sótanos, plantas de fábrica, laboratorios u otros lugares.

El trabajo detallado en este capítulo, incorpora como novedad un diseño electrónico que representa una optimización del consumo, aumentando la autonomía del nodo, así como el desarrollo de un procedimiento redundante en la comunicación que permite aumentar la fiabilidad del sistema.

5.2 Diseño hardware

El detector de inundaciones es un dispositivo diseñado para detectar fugas de agua en ambientes domésticos. El nodo inalámbrico de sensado se desarrolló según los requisitos de tamaño eficiente, bajo coste y baja disipación de

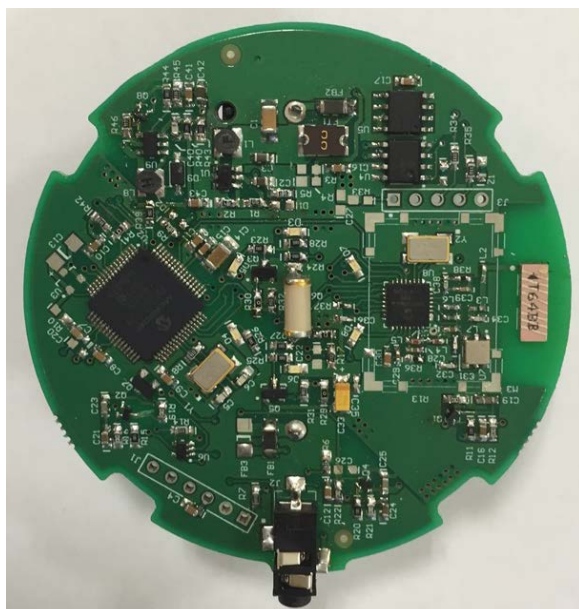
potencia. Funciona igual que una alarma de agua tradicional, sin embargo, está conectado a la red doméstica y puede enviar un aviso al usuario permitiendo ahorrar costes en la reparación de daños ocasionados por el agua.

La red WSN implementada está compuesta por cinco nodos detectores de inundación (aunque es fácilmente escalable) y una pasarela o central de control. Se ha incluido también una sirena para avisar de modo audible de la presencia de agua. El detector de inundaciones detecta la acumulación de agua en una superficie y envía los datos a través de un módulo inalámbrico que permite la comunicación con el sistema principal. Los nodos sensores pueden comunicarse entre ellos y con una red externa a través de Internet o por satélite usando la central de control. Los sensores se conectan a la central de control y el usuario podrá consultar el estado del dispositivo a través de un teléfono móvil o una *tablet*. Si el dispositivo detecta agua, se emitirá un aviso al usuario (normalmente un texto o una notificación *push*). Además, el nodo inalámbrico también incluye un sensor de inclinación (para que el usuario sepa si alguien lo movió), un sensor de temperatura, un buzzer y dispositivos luminosos.

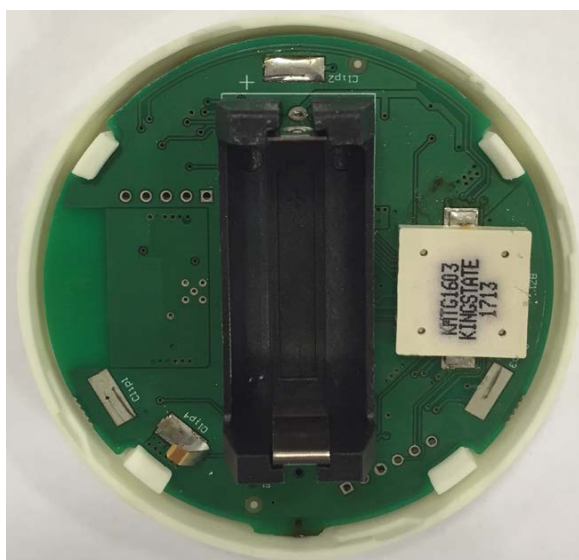
5.2.1 Nodo del sensor de inundación inalámbrico.

El nodo detector incluye todos los circuitos necesarios para detectar la presencia de agua a dos niveles, medir la inclinación, procesar los datos, las señales luminosas y enviar alarmas por radiofrecuencia (RF). El hardware se distribuye en una sola placa de circuito impreso. La placa del detector de inundación se muestra en la Figura 5.1 y contiene: una batería; un microcontrolador de 16 bits para controlar el hardware, realizar mediciones y detecciones electrónicas de los niveles de agua; un módulo RF; y una alarma para avisar al usuario sobre la presencia de agua. También contiene un dispositivo para detectar la apertura del dispositivo con fines de manipulación

o sabotaje. El inclinómetro que incluye el nodo sensor permite al sistema identificar una posible corriente de agua, si ésta mueve el nodo, o conocer si el dispositivo ha sido reubicado o manipulado.



(a)



(b)

Figura 5.1. Nodo del sensor de inundación inalámbrico. (a) Top. (b) Bottom.

Para el diseño del nodo detector inalámbrico, se han considerado características tales como: tecnología de radiofrecuencia robusta, componentes de bajo consumo de energía, uso de fuentes de energía duraderas y tamaño reducido. Con el fin de aumentar la vida útil de la batería, se han desarrollado las áreas de diseño relacionadas con la gestión de energía y la pila de protocolo. El consumo de energía por nodo está optimizado de tal manera que únicamente pueden alimentarse por baterías. En particular, se ha realizado un diseño cuidadoso del detector de inundación en el diseño del hardware, las comunicaciones inalámbricas y el firmware, de modo que con una única batería tipo CR123 se logra una autonomía superior a 5 años.

En cuanto al módulo de radio, transmite y recibe datos a través de un estándar de comunicaciones. Se determinó la selección del protocolo de comunicación inalámbrica considerando la velocidad de transmisión de datos, el bajo consumo de potencia y el coste. El estándar IEEE 802.15.4 es el más adecuado para cumplir con los requisitos de la aplicación objeto de este capítulo. Este estándar es adecuado para aplicaciones en las que el volumen de datos a transferir es bajo, pero hace posible que los nodos de la red se alimenten por batería sin recargar durante un largo período de tiempo. Además, este estándar presenta una gran capacidad de expansión de la cantidad de nodos de la red. El módulo de radio se basa en el transceptor MRF89XA de Microchip, uno de los dispositivos de menor consumo de energía disponibles, e intercambia datos con el nodo central de control vía inalámbrica a 868 MHz.

La Figura 5.2 muestra el esquema de circuito del sensor de inundación. Este circuito es responsable de medir los dos niveles de agua y se basa en un circuito digital que detecta los diferentes niveles de inundación debido a los electrodos colocados en la parte inferior de la PCB. Por lo tanto, este circuito

tiene un consumo de corriente estática prácticamente de cero amperios y sólo funciona en presencia de agua, ahorrando así consumo de energía. Si se detecta una inundación, la salida del circuito se activa y el microcontrolador abandona el estado de reposo en el que estaba.

Por otra parte, el detector de inclinación se basa en una cápsula SQ-SEN-815B de *Signal Quest* para medir inclinaciones de 15 grados en cualquier dirección (Figura 5.3). Como se ha mencionado anteriormente, este elemento es muy útil para detectar el movimiento del sensor, ya sea por una corriente de agua o por inundación o bien por un intento de manipulación. Es un circuito digital prácticamente sin consumo que no compromete las especificaciones de autonomía y consumo de energía que se intenta perseguir en este capítulo.

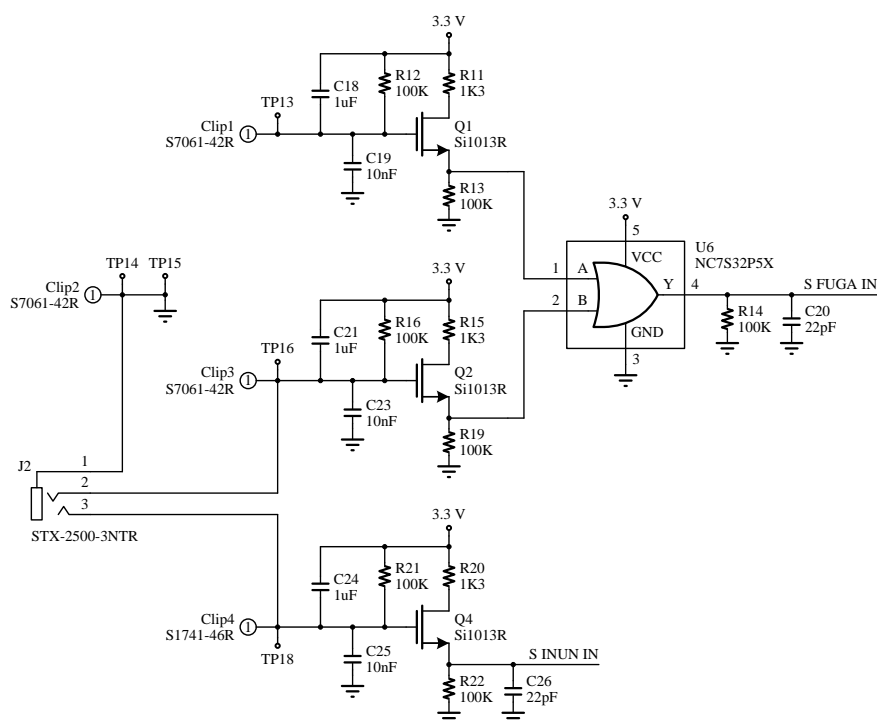


Figura 5.2. Circuito esquemático del sensor de inundación.

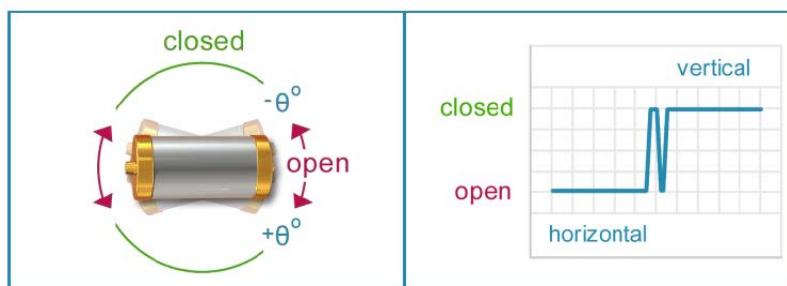


Figura 5.3. Cápsula del sensor de inclinación.

La envolvente del sensor de inundación es cilíndrica, con electrodos que tocan la superficie plana de contacto y que detectan la presencia de agua u otro líquido conductor como se muestra en la Figura 5.4(a). Este sensor se puede colocar en el suelo o en la pared. Para la instalación en la pared se ha diseñado un accesorio que una vez fijado a la pared, (con adhesivo) se fija magnéticamente al sensor como se muestra en la Figura 5.4(b).



(a)



(b)

Figura 5.4. (a) Envolvente del sensor de inundación. (b) Accesorio magnético para la instalación en una pared.

5.2.2 Central de control.

La central de control realiza el procesamiento de datos y las comunicaciones con el servidor y se ha diseñado con una estructura modular. Esta central de control tiene diferentes módulos de comunicación, tanto cableados como inalámbricos y seis ranuras de expansión para módulos de uso general (sensores, entradas y salidas, comunicaciones, etc.). El sistema de control se rige por el microprocesador PIC32MZ1024 de 32 bits de Microchip, con una frecuencia de reloj de hasta 140 MHz y las siguientes características: 80 pines de E/S, 32 canales de entrada analógica, buses de comunicación UART, SPI, I2C y USB y un reloj de tiempo real (RTC). El sistema puede ser alimentado a cualquier voltaje de entrada entre 15 V y 36 V. El circuito de potencia tiene tres módulos principales para reducir la tensión de entrada a 5 V, que se requiere para alimentar algunos circuitos digitales y para obtener una tensión de alimentación dual (± 12 V) para el circuito analógico. A partir del voltaje de la batería, se generan otras dos tensiones: una de 3.3 V para alimentar todas las partes de control y una segunda de 5 V para alimentar los circuitos de comunicación. El objetivo es que la central de control nunca pierda la conexión con el servidor y pueda enviar alarmas y sucesos incluso cuando la red eléctrica esté cortada. La batería seleccionada de 4500 mAh y 3.7 V proporciona suficiente energía para garantizar la conectividad a lo largo de 12 horas en caso de emergencia.

Puesto que el diseño se centra en el sector de las comunicaciones, las comunicaciones se realizan de forma redundante para evitar la pérdida de conectividad y, por lo tanto, la central de control tiene los siguientes tipos de comunicaciones: Ethernet, RS485, USB, Wi-Fi y GSM/GPRS/3G/4G. Ethernet, Wi-Fi y comunicaciones 2G/3G/4G que se utilizan para establecer la

conectividad a un servidor o la nube. El orden de prioridad para el uso de la red es Ethernet, WiFi y 2G / 3G / 4G, de modo que la central de control siempre se conectará primero por Ethernet. Cuando ocurre una pérdida de conexión o si los ajustes del usuario lo establecen, el dispositivo intenta realizar la comunicación por una de las otras dos formas. Se ha proporcionado una ranura de expansión compatible con algunos estándares de la industria, como Xbee y módulos de click, para comunicaciones 2G/3G/4G. Este hecho aumenta la flexibilidad del diseño, ya que permite la colocación de módulos de diferentes tecnologías y frecuencias en función de los países a los que se destine el sistema inalámbrico. Por otra parte, se incluye una conexión USB para aplicaciones donde la instalación sea local, de modo que el dispositivo se conecte directamente a un PC.

Finalmente, se proporciona una comunicación industrial serie RS485 para otras aplicaciones donde se necesiten comunicaciones entre sensores, sin una conexión de red. Además, también pueden aplicarse para alimentar dispositivos conectados en cascada con objeto de facilitar su instalación. Adicionalmente, en cualquiera de las ranuras de expansión equipadas con los buses SPI e I2C, y salidas digitales y analógicas, se puede conectar un módulo de comunicación tipo ZigBee, 6LoWPAN o similar.

Todas las conexiones que no sean inalámbricas están diseñadas con aislamiento galvánico utilizando circuitos integrados aislantes, de tal manera que aíslan las comunicaciones de la red para evitar la pérdida o alteración de mensajes en caso de picos de voltaje transitorios no deseados.

La central de control incluye una ranura de tarjeta de almacenamiento de hasta 4 GB. El sistema detecta que la memoria está conectada y, en caso afirmativo, creará un histórico de eventos que se pueden descargar a posteriori,

extrayendo la propia tarjeta a través de cualquiera de los circuitos de comunicación cuando se restablece la comunicación. Cada módulo de expansión tiene un circuito de control de potencia que se deshabilitará si es necesario, para poner el dispositivo en un modo de consumo de energía ultra bajo, prolongando la autonomía de la batería interna. La Figura 5.5 muestra detalles de la implementación de hardware del control central.

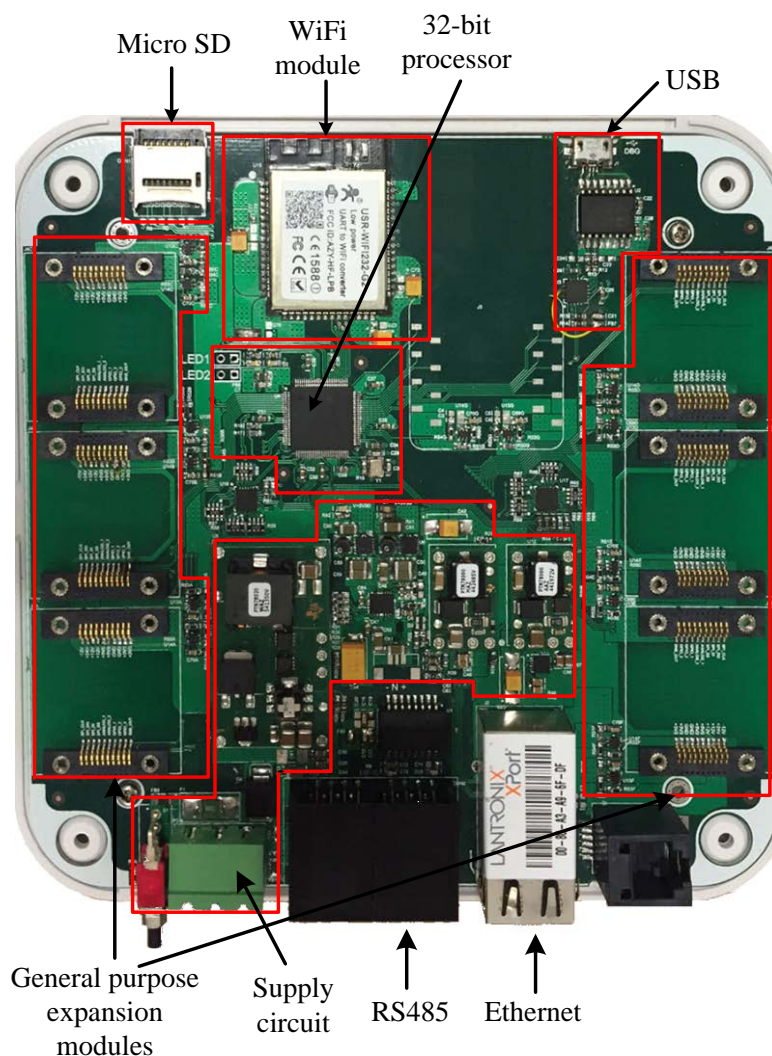
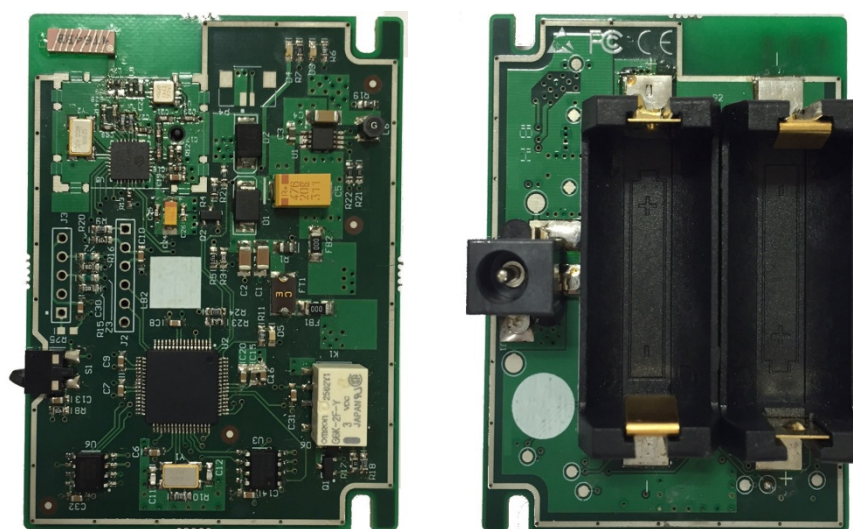


Figura 5.5. Imagen de la central de control.

5.2.3 Nodo actuador

La sirena es el dispositivo encargado de avisar acústicamente a los usuarios de la existencia de avisos en el sistema. Como los otros bloques del

sistema, el diseño de la sirena busca mejorar la eficiencia energética y reducir el tamaño. Este dispositivo lleva una alimentación externa, aunque también incluye dos baterías CR123 para que siga funcionando en caso de un fallo de alimentación. Se puede instalar sobre una mesa o pared y sus dimensiones son 88 mm x 63 mm. El circuito de la sirena se ha implementado en una única placa de circuito impreso de dos capas como se muestra en la Figura 5.6(a).



(a)



(b)

Figura 5.6. (a) Imágenes de la PCB del nodo actuador. (b) Sirena comercial.

El circuito contiene la electrónica necesaria para las comunicaciones RF, la gestión adecuada de la sirena (indicación acústica) y una apertura anti-manipulación. Toda la electrónica, que incluye el mismo microcontrolador de

16 bits y el módulo RF descritos anteriormente, se ubican en la cara superior de la PCB, mientras que las baterías y la entrada de alimentación se colocan en la cara posterior.

Se utiliza una sirena comercial de 120 dB para la emisión de la señal acústica, que puede funcionar de 3 V a 12 V y consume una potencia máxima de 12 W. Esta sirena está conectada a la placa con cables personalizados, como se muestra en la Figura 5.6(b). El diseño de la envolvente del nodo actuador de la sirena se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7. Detalle del diseño de la envolvente del nodo actuador.

5.3 Gestión de la potencia y diseño del software.

Las aplicaciones emergentes con alto grado de autonomía, como los nodos de detectores inalámbricos miniaturizados, requieren sistemas que gestionen la energía de forma eficiente. Para ello, un sistema inalámbrico requiere llevar a cabo estrategias tanto a nivel de hardware como de software. Como se ha comentado anteriormente, los elementos hardware han seleccionado para garantizar un funcionamiento correcto con bajo consumo de energía. Además, el software también incorpora modos de ahorro de energía.

En el nodo detector de inundaciones, el consumo de energía ultra bajo se logra manteniendo el microcontrolador apagado (sin fuente de alimentación) la mayor parte del tiempo. Un temporizador discreto se encarga de encender periódicamente el microcontrolador. En el caso del detector de inundaciones, el hardware también está preparado para encender instantáneamente el microcontrolador en caso de detección de agua. Esta característica elimina la necesidad de revisar periódicamente el sensor de agua, y permite extender el período de encendido a decenas de minutos o incluso unas pocas horas. Cada vez que el microcontrolador se activa, se analiza el origen de la reactivación. Si no se encuentra ninguna alarma de agua, se envía un mensaje de confirmación junto con la información de estado (nivel de batería, alimentación externa, intensidad de la señal de RF, etc.). Una vez que la unidad de control reconoce el mensaje de confirmación, el microcontrolador libera su fuente de alimentación y vuelve a su estado de reposo. Toda la operación tarda normalmente unos pocos milisegundos consumiendo alrededor de 15 mA de corriente promedio.

Si se detecta una alarma de agua cuando se analiza la fuente que ha reactivado el sistema, el proceso es muy similar al ya comentado salvo que se envía un mensaje de alarma en lugar de un mensaje de confirmación. La

duración de la tarea es la misma, y los recursos utilizados también son comunes. Por otro lado, la probabilidad de que tal evento ocurra es realmente pequeña. Por lo tanto, este evento se puede ignorar al estimar la duración de la batería.

La implementación actual del detector de inundaciones disminuye el ciclo de trabajo hasta el 0,005% en modo activo. Un ciclo de trabajo tan bajo permite aumentar la vida útil de la batería del dispositivo durante 10 años con una pequeña batería CR2016 de tipo botón.

Es importante mencionar que este enfoque presenta algunos desafíos, debido a que el microcontrolador pierde la memoria RAM cuando se apaga. Esto obliga al firmware a almacenar el contexto de ejecución en el gestor de versiones del nodo. Con el fin de reducir el coste y la tasa de fallos, se ha decidido que es mejor utilizar la memoria flash interna del microcontrolador. Este tipo de memoria normalmente admite alrededor de 100 Kciclos, suficiente para almacenar con seguridad el programa de ejecución en el ciclo de trabajo mencionado. La unidad de control dispone de alimentación externa. Por esta razón, nunca es tan atractivo el invertir esfuerzo en reducir su consumo de energía como investigar en la reducción de consumo de energía de los nodos inalámbricos. Una parte importante de la energía gastada en estos nodos está asociada a las comunicaciones, y aquí es donde la unidad de control puede aportar un ahorro de energía importante para los nodos asociados mediante el uso de técnicas *time slots*.

La unidad de control mantiene una lista de nodos asociados y planifica el tiempo de cada uno de ellos para escuchar y transmitir. La unidad de control transmite periódicamente una trama a todos los nodos de forma simultánea (*broadcast*) para que todos los nodos sepan cuándo deben escuchar o transmitir,

si es necesario. Este mecanismo reduce la probabilidad de colisiones a prácticamente cero, evitando reintentos de paquetes y extendiendo la duración de la batería del nodo.

Se han utilizado técnicas de salto de canal junto con *time slots*. La combinación de ambas técnicas se conoce como *Time Slot Channel Hopping* (TSCH). TSCH no sólo evita la colisión entre los nodos del sistema, sino que también puede manejar fuerte ruido eléctrico de radio que bloquea uno o más canales. La unidad de control comparte esquemas de salto de canal con sus nodos asociados. Mediante el uso y el esquema acordado todos los nodos pueden predecir qué canal utilizar en cada ranura o *slot*. Además, cuando algunos canales son bloqueados o prohibidos por cualquier motivo, la unidad de control puede realizar "listas negras" de canales para mantener el ancho de banda.

Un pequeño inconveniente de esta técnica es que la inscripción de nodos se hace más compleja. Por definición, un nodo no puede "hablar" hasta que reciba el permiso de la unidad de control. Por lo tanto, no se puede realizar una detección automática de nodos a menos que un *slot* específico tenga permitido tal propuesta. Un enfoque alternativo para la detección automática es el de actualizar la lista de nodos asociados a través de otros canales. En este caso, el usuario puede agregar nodos al sistema a través del sitio web, la aplicación *iOs* o la aplicación *Android*. Una vez hecho esto, un servidor en la nube solicitará a la unidad de control que registre un nuevo nodo en su lista de nodos asociados. A partir de este momento, la unidad de control asigna *slots* al nodo específico para que puedan comunicarse.

Una vez que se complete el proceso de inscripción, el sistema se convierte en autónomo, garantizando una alta legibilidad incluso si todas las comunicaciones con la nube se cortaran.

5.4 Aplicación de monitorización y control

Como el sistema inalámbrico ha sido concebido de manera que pueda incorporar otras variables de detección dentro de la vivienda, todos los sistemas domésticos se integran en una unidad de control centralizada accesible desde otro dispositivo móvil inalámbrico, como *smartphones* y *tablets*. Por lo tanto, la central de control interactúa con el usuario final a través de un servidor web para la visualización de datos en tiempo real, una aplicación iOS o Android se está ejecutando en terminales móviles. La Figura 5.8 muestra algunas vistas de la aplicación móvil para monitorización y control con diferentes funcionalidades.

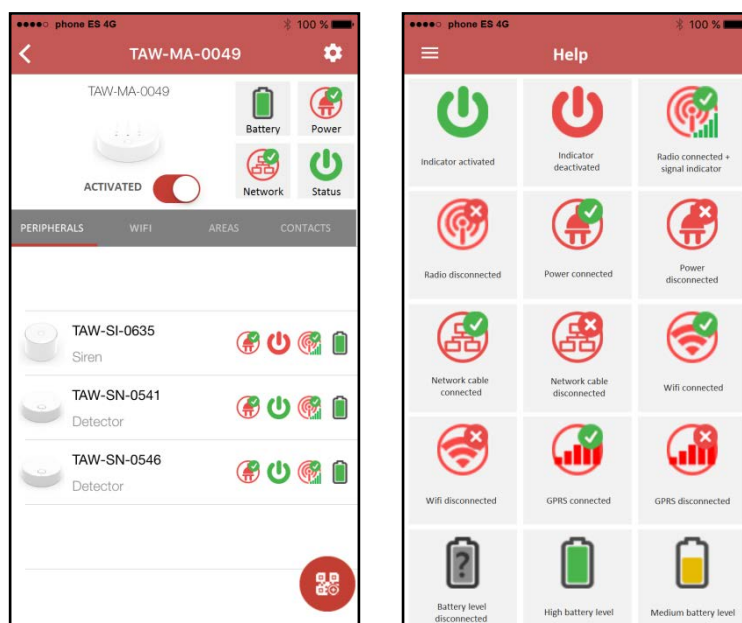


Figura 5.8. Algunas vistas de la aplicación móvil de monitorización.

5.5 Conclusiones.

Se ha presentado un sistema de detección de inundaciones de bajo consumo para redes de sensores inalámbricos. El sensor diseñado permite a los usuarios controlar los dispositivos domésticos de forma local y remota más fácilmente y puede utilizarse para alertar en caso de desastres en el hogar. Se ha desplegado una red de sensores inalámbricos donde se han desarrollado nodos detectores de inundaciones, nodos actuadores y una central de control. Para cada nodo, se ha descrito en detalle los componentes hardware y el software. Las señales de comunicación de la red de sensores a la central de control se conectaron correctamente utilizando el estándar IEEE 802.15.4. La interfaz gráfica de usuario para aplicaciones móviles permite el acceso remoto y el control y monitorización en tiempo real de varios parámetros de funcionamiento. El resultado es una infraestructura de bajo coste, altamente fiable y redimensionable, con aplicación en hogares inteligentes, también denominados *smart homes*.

Referencias del capítulo 5

- [1] L.C. De Silva, C. Morikawa, and I. M. Petra. "State of the art of smart homes", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 2012, 1313-1321.
- [2] P. Prasad. "Recent trend in wireless sensor network and its applications: a survey", *Sensor Review*, vol. 35, no. 2, 2015, pp. 229-236.
- [3] J. Marais, R. Malekian, N. Ye, and R. Wang, "A review of the topologies used in smart water meter networks: A wireless sensor network application", *Journal of Sensors*, 2016, doi: 10.1155/2016/9857568.
- [4] K. Vairamani, N. Mathivanan, K. Arun Venkatesh, U. Dinesh Kumar. "Environmental parameter monitoring using Wireless Sensor Network", *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 56, no.4, 2013, pp. 468-471.
- [5] C.-I. Wua, H.-Y. Kung, C.-H. Chen, and L.-C. Kuo. "An intelligent slope disaster prediction and monitoring system based on WSN and ANP", *Expert Systems with Applications*, vol. 41, 2014, pp. 4554-4562.
- [6] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa. "Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications - concepts and real implementations", *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 11, 2013, pp. 2381-2396.
- [7] B. M. M. El-Basioni, S.M. Abd El-kader, and M.A. Fakhreldin. "Smart home design using Wireless Sensor Network and Biometric Technologies", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 2, no. 3, 2013, pp. 413-429.
- [8] N. M. Z. Hashim, N. B. Hamdan, Z. Zakaria, R.A. Hamzah, and A. Salleh. "Flood Detector Emergency Warning System", *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol. 2, no. 8, 2013, pp. 2332-2336.
- [9] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal. "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey", *Computer Networks* vol. 67, 2014, pp. 104-122.
- [10] S. Stowe, and S. Harding. "Telecare, telehealth and telemedicine", *European Geriatric Medicine*, vol. 1, 2010, pp. 193-197.
- [11] Y.-C. Du, Y.-Y. Lee, Y.-Y. Lu, C.-H. Lin, M.-J. Wu, C.-L. Chen, and T. Chen. "Development of a Telecare System Based on ZigBee Mesh Network for

Monitoring Blood Pressure of Patients with Hemodialysis in Health Care Centers", *Journal of Medical System*, vol. 35, 2011, pp. 877-883.

- [12] K.J. Turner, and M.R. McGee-Lennon. "Advances in telecare over the past 10 years", *Smart Homecare Technology and TeleHealth*, vol. 1, 2013, pp 21-34

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

En este capítulo se repasan los resultados y conclusiones más significativos obtenidos a lo largo de esta tesis. El objetivo del apartado 6.1 es realizar un resumen de las principales contribuciones del trabajo, corroborando así el cumplimiento de los objetivos propuestos en el Capítulo 1. Además, en el apartado 6.2, se proponen una serie de líneas de trabajo futuras relacionadas con este trabajo.

6.1 Conclusiones.

El presente trabajo de tesis pretende ser una contribución en el desarrollo de sensores de bajo coste y de gran autonomía energética con aplicación a

diversos campos. Prácticamente todo el trabajo realizado se ha basado en aplicar estrategias hardware y software para reducir el consumo de los nodos sensores, además de conseguir diseños compactos y que alcancen las prestaciones requeridas para cada aplicación. El interés en reducir el consumo está suscitado por la proliferación de las redes de sensores inalámbricas. En los siguientes párrafos se realiza un recorrido a lo largo del trabajo efectuado estableciendo algunas conclusiones generales.

El Capítulo 1 simplemente pretende situar el contexto de trabajo de esta tesis y de una manera breve justifica el auge de las comunicaciones inalámbricas y la necesidad de diseñar y desarrollar nodos sensores con alta grado de autonomía energética.

En el Capítulo 2 se ha presentado un sensor para medir el ritmo respiratorio, que es un parámetro empleado en la detección de algunas enfermedades. El sensor presenta ventajas respecto de otras soluciones disponibles en el mercado en términos de coste, facilidad en su instalación, no invasivo, y elevada sensibilidad en la detección. El diseño del sensor es completamente electrónico y se basa en la tecnología capacitiva por medio de osciladores LC.

En el Capítulo 3 se ha presentado una red de sensores inalámbricos que detecta diferentes tipos de gases y que puede ser fácilmente escalable y adaptarse a otros entornos, lo cual la hace muy adecuada para aplicarse en el control remoto de parámetros industriales. El desarrollo incorpora novedades científicas respecto a los sistemas existentes en relación al bajo consumo y la fiabilidad. La robustez del sistema desarrollado y la seguridad en las comunicaciones se garantiza tanto a nivel hardware como software. Las pruebas del sistema confirman la viabilidad de la solución propuesta validando los

requisitos funcionales de los dispositivos desarrollados, la solución de la red y la gestión del consumo de potencia.

En el Capítulo 4 se ha presentado un dispositivo inalámbrico de detección de incendios de bajo consumo y de bajo coste. El dispositivo de detección utiliza la combinación de un sensor de humo, sensores de temperatura y un sensor de monóxido de carbono para minimizar las falsas alarmas que habitualmente se producen en este tipo de detectores. Se ha conseguido un diseño de muy reducidas dimensiones y con un consumo tan reducido que permiten una fácil instalación sin prácticamente tareas de mantenimiento. Un algoritmo de calibración desarrollado permite ubicarlo en diferentes estancias de una vivienda garantizando su correcto funcionamiento.

Por último, en el Capítulo 6 se ha presentado un sensor inalámbrico que detecta inundaciones de agua en viviendas proporcionando directamente al usuario una alerta temprana. Los usuarios pueden controlar fácilmente los dispositivos domésticos tanto de forma local y como remota. Se ha desplegado una red de sensores donde se han desarrollado nodos detectores de inundaciones, nodos actuadores y una central de control. El resultado es una infraestructura de bajo coste, altamente fiable y redimensionable y que se puede incorporar a la lista de sensores que habitualmente se incluyen en los denominados hogares inteligentes.

6.2 Líneas futuras de investigación.

Como nuevas líneas de investigación de interés que se abren a partir de este trabajo de tesis se pueden destacar las siguientes:

- Optimización y mejora del sensor de humo incluyendo una pequeña cámara térmica dentro de la envolvente del sensor que permita, no sólo alertar de la presencia de un incendio y su ubicación, sino incluso avisar a los servicios de emergencia las zonas de la vivienda en la que se encuentran personas.
- Emplear el sensor de tecnología capacitiva basado en oscilador del Capítulo 2 para otro tipo de aplicaciones. El circuito oscilador podría rediseñarse para generar tensiones de varias decenas de voltios en un electrodo capacitivo y crear un campo electromagnético. La modificación de este campo por el acercamiento de una persona/animal/objeto al electrodo generaría un cambio en la frecuencia de oscilación. Este cambio en la frecuencia, junto con otros parámetros ambientales como temperatura, humedad, etc., serían procesados por un algoritmo el que tomaría decisiones sobre las actuaciones a efectuar. Estos nuevos desarrollos podrían tener aplicación en los siguientes campos:
 - Sistema de seguridad doméstico e industrial.
 - Alarmas preventivas: posibilidad de detectar al intruso de forma anticipada al robo.
 - Discriminativa: dicha tecnología podría permitir diferenciar de forma robusta entre personas, animales y objetos.
 - Robótica colaborativa.
 - Convivencia de robots y personas en el mismo entorno de trabajo.
 - Militar:
 - Detección de artefactos explosivos enterrados tanto metálicos como no metálicos.

- Nuevas estrategias hardware y software que mejoren la optimización del consumo en nodos inalámbricos, podrían extrapolarse al desarrollo de otro tipo de sensores.

Publicaciones

Artículos en revistas internacionales

1. **Juan Aponte-Luis**, Laura Roa Romero, Juan Antonio Gomez-Galan, David Naranjo Hernández, Miguel Estudillo-Valderrama, Gerardo Barbarov, Carlos Rubia-Marcos. "Design and implementation of a smart sensor for respiratory rate monitoring". *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3019-3032, Feb. 2014. (DOI: 10.3390/s140203019).
2. **Juan Aponte-Luis**, Juan Antonio Gomez-Galan, Javier Alcina. "Low Power Wireless Smoke Alarm System in Home Fires". *Sensors*, vol. 15, pp. 20717-20729, Agosto 2015. (DOI: 10.3390/s150820717).
3. **Juan Aponte-Luis**, J. A. Gómez-Galán, F. Gómez-Bravo, M. Sánchez-Raya. J. Alcina, and P. Teixido, "Industrial real-time monitoring and control system using a wireless sensor network". *Sensors*, vol. 18, no. 1, pp. 182, Enero 2018. (DOI: 10.3390/s18010182).

Presentaciones en eventos internacionales

1. *ISC East 2015*, 18-19 Noviembre 2015, New York (EEUU).
2. *Consumer Electronics Show (CES 2016)*, 6-9 Enero 2016, Las Vegas (EEUU).
3. *SICUR 2016*, 17-22 Febrero 2016, Madrid (ESPAÑA)
4. *ISC West 2016*, 6-8 Abril 2016, Las Vegas (EEUU).
5. *IFSEC 2016*, 21-23 Junio 2016, Londres (UK).
6. *Consumer Electronics Show (CES 2017)*, 5-9 Enero 2017, Las Vegas (EEUU).
7. *Expo Seguridad 2017*, 14-16 Marzo 2017, Mexico DF. (MEXICO).
8. *ISC West 2017*, 5-7 Abril 2017, Las Vegas (EEUU).