

Capítulo 1

Introducción

Debido a la importancia que están adquiriendo las redes de sensores inalámbricas, se ha pensado en implementar un sistema de medición y control para un área de especial interés: gestión eficiente de la energía eléctrica.

Partiendo de la idea de un trabajo anterior, se desarrollará un sistema inalámbrico que, adaptado y localizado en las tomas de corriente de un edificio, pueda realizar medidas eléctricas, tales como tensión e intensidad, valores eficaces, potencia consumida... Además, se incluirá la medición de distorsión de la señal a través de los armónicos, un problema importante en empresas o industrias. También se añadirá la posibilidad de interactuar con cada uno de los sensores (individualmente o en grupo) de forma que se puedan modificar los umbrales permisibles o activar/desactivar un equipo que esté conectado a esa toma. Todo esto sin olvidar las ventajas que puede aportar un sistema inalámbrico y de bajo consumo.

Este capítulo describe los conceptos de domótica e inmótica, así como las tecnologías actuales de redes de sensores (estándares, sistemas operativos...). Después se presenta el concepto de armónico de una onda y los problemas que pueden plan-

tear. Para finalizar, se presentan los objetivos a alcanzar en el trabajo y la estructura del resto de documentación escrita.

1.1 Domótica e Inmótica

Por el concepto domótica¹ se entiende el conjunto de tecnologías aplicadas al control y automatización en la vivienda de forma inteligente, que permitan una gestión eficiente de la energía, aportando seguridad y confort al usuario.

Entre las aplicaciones más importantes de la domótica se encuentran:

- **Ahorro energético.** Se puede tratar desde dos puntos: el tipo de aparatos o electrodomésticos que se usan (clasificación energética); y gestión eficiente de dichos aparatos. La domótica se centra en éste último. Por ejemplo, programando y planificando zonas para la climatización o realizando una gestión eléctrica (activar/desactivar aparatos según su uso).
- **Confort.** Acciones que facilitan las tareas cotidianas de una vivienda. Iluminación (apagado/encendido de las lámparas, regulación de la intensidad luminosa según la situación, selección iluminación natural/artificial...). Integración de los distintos dispositivos (video-portero, teléfono, televisor, equipos multimedia...). Creación de interfaces de usuario simples y útiles.
- **Seguridad.** Se trata de una red para proteger tanto los bienes como la integridad de los habitantes de la casa. Uso de alarmas anti-intrusión, detección de incendios, escapes de gas... o sistemas de teleasistencia médica.
- **Comunicaciones.** Cómo interactúan los distintos dispositivos domóticos entre ellos. Facilidad en el acceso a información o control sobre los actuadores desde fuera de la vivienda (gestión remota).
- **Accesibilidad.** Uno de los puntos destacados de esta área es facilitar la realización de tareas domésticas a personas con algún tipo de discapacidad. De hecho,

¹ Según el DRAE, proviene de la unión de “domus” (casa en latín) e “inform-ática”: conjunto de sistemas que automatizan las diferentes instalaciones de una vivienda.

los destinatarios de estas tecnologías son todas las personas, pues la domótica no es un objetivo, sino un medio.

El sector de la domótica ha evolucionado considerablemente desde los últimos años. En la actualidad existen soluciones dirigidas a todo tipo de viviendas. Además, se ofrecen más variedad de productos y funcionalidad por menos dinero, debido al abaratamiento de componentes y evolución de la tecnología empleada.

Otro aspecto a tener en cuenta es que cada vez son más sencillos de instalar y utilizar. Los servicios postventa aseguran el correcto mantenimiento de los equipos.

En definitiva, la domótica contribuye a aumentar la calidad de vida, consiguiendo una vivienda más funcional, que combina ambientes domésticos, profesionales y de ocio en un mismo edificio.

El término inmótica extiende la idea de domótica a edificios de uso industrial (o sector terciario) como oficinas, edificios corporativos, de ocio... con los mismos objetivos que ésta. Se puede decir que la inmótica integra a la domótica interna dentro de una estructura de red. Se trata de un ejemplo claro de sistema de control distribuido. En la Figura 1.1 se ilustra un esquema típico de una red inmótica.

Las ventajas se pueden agrupar según el grupo de personas beneficiadas:

- El **propietario del edificio**, que obtiene grandes beneficios al utilizar la energía de una forma más inteligente. Además puede ofrecer servicios novedosos a los posibles clientes.
- **Personal de mantenimiento y seguridad**. Los sistemas de monitorización permiten alertar de problemas que puedan ocurrir, incluso antes de que tengan lugar (prevención). Las tareas de vigilancia se facilitan (por ejemplo, mediante sistemas de video).
- Por último, los **usuarios del edificio**: mayor comodidad o confort (regulación de las condiciones ambientales, adecuación de la iluminación...) y seguridad personal.

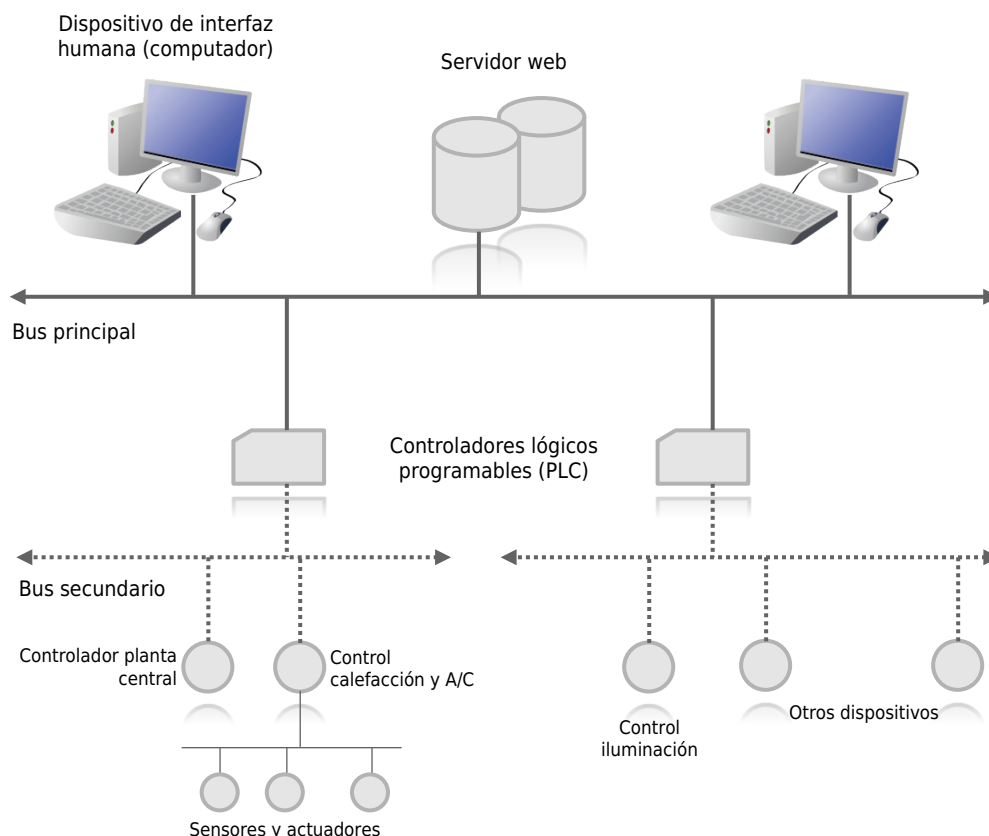


Figura 1.1 Estructura de ejemplo de red inmótica

La mayoría de redes inmóticas están compuestas por dos buses (principal y secundario) conectados a través PLC (controladores de alto nivel), controladores de bajo nivel, sensores/actuadores y una interfaz de usuario. Los protocolos usados de comunicación usados suelen ser BACnet (Building Automation and Control NETWORKS), ARCnet (Attached Resource Computer NETWORK), Ethernet, F.O, RS-232 (serie) o una red inalámbrica.

Se denomina edificio inteligente a aquél que incorpora sistemas de información en toda su extensión: control y monitorización automatizados, gestión y mantenimiento de los diferentes sistemas, todo ello realizado de forma óptima e integrada. Se podrá acceder tanto local como remotamente.

1.1.1 Ejemplos de construcciones inteligentes

VIVIENDA UNIFAMILIAR (MADRID)

Proyecto realizado por la empresa Domonova Soluciones Tecnológicas S.L. (sede en Sevilla). Las imágenes de la Figura 1.2 muestran el resultado. Se trata de un proyecto altamente integrado, con servicios de alto valor añadido y facilidad de uso por parte de los habitantes.



Figura 1.2 Instalación domótica en vivienda unifamiliar

De izquierda a derecha y de arriba a abajo: (1) sala de cine HD con sonido surround 5.1, (2) sistema de iluminación con tecnología LED, (3) videoportero de alta gama integrado.

DELHI INTERNATIONAL AIRPORT LTD.

La Terminal 3 del aeropuerto internacional de La India fue desarrollada por Entelechy Systems. La Asociación KNX otorgó en 2010 el premio en la categoría de proyecto comercial. Además, se instalaron más de 11000 dispositivos de KNX. Uno de los puntos fuertes de la Terminal es su sistema de iluminación exterior (Figura 1.3): más de 100000 puntos de luz, los cuales son gestionados de forma eficiente usando protocolos abiertos desarrollados por KNX.



Figura 1.3 Terminal 3 del Aeropuerto Internacional de Delhi

1.2 Red de sensores inalámbrica (WSN)

Consiste en una red constituida por nodos, que son pequeños dispositivos equipados fundamentalmente por un sistema de comunicación radio (en el caso de las redes inalámbricas), un microcontrolador (preferentemente de bajo consumo) y un conjunto de sensores y/o actuadores.

El tamaño de estos dispositivos es variable, si bien suele ser pequeño, lo cual facilita su instalación en cualquier posición. Respecto al consumo energético, los nodos se diseñan para que puedan funcionar de forma autónoma, mediante batería, durante largos periodos de tiempo (pueden llegar a años).

Un ejemplo de WSN se ilustra en la Figura 1.4.

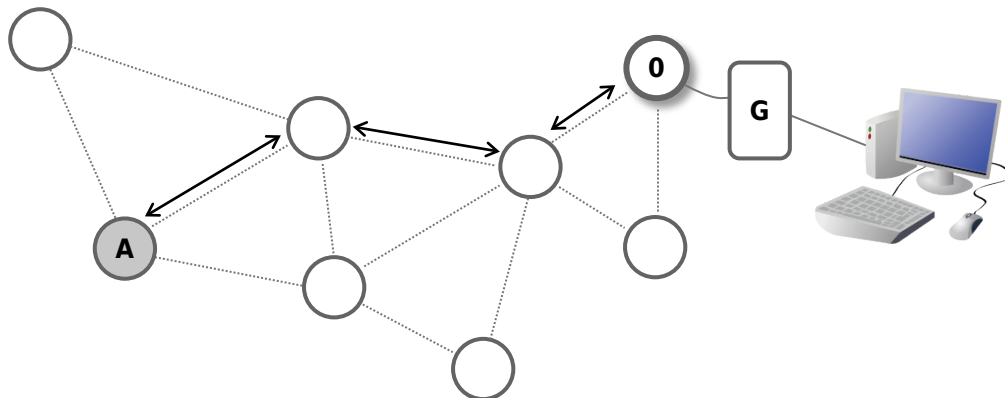


Figura 1.4 Ejemplo de red de sensores inalámbrica

Las líneas discontinuas indican los enlaces radio establecidos entre nodos vecinos (la configuración depende de la topología de red usada). Las flechas indican la transferencia de datos entre un nodo remoto (A) y el nodo que actúa de recolector de datos (0) entre la red. En general suele existir una pasarela (G) que comunica la red inalámbrica con el sistema de monitorización/control (PC). Aunque en un principio solo se usaba para recoger datos de la red, ahora la información viaja en los dos sentidos, es decir, desde el PC pueden enviarse comandos hacia los nodos.

Entre las principales características de una red de sensores destacan

- Restricciones de consumo de energía por parte de los nodos. Se necesitan bajos consumos para evitar cambiar la batería cada poco tiempo.
- Capacidad de funcionamiento ante fallos en los nodos (bloqueo del programa interno del sensor, caída de un enlace radio...).
- Creación de una red dinámica. Por ejemplo, ante cambios de posición de un nodo, reestructuración de los enlaces radio.
- Escalabilidad de la red, añadiendo nuevos nodos a ésta.

- Operación de red automática (sin necesidad de un operador).

Los nodos de las redes son conocidos también como *motes*, quizás por analogía con una mota de polvo (debido a su reducido tamaño).

1.2.1 Estándares WSN

Existen varios estándares ya en funcionamiento, y otros bajo desarrollo. Distintos organismos trabajan en este campo:

- IEEE² en su estándar 802.15.4 se centra en el medio físico y el control de acceso a este por diversas aplicaciones. También trabaja en 802.11 (redes de área local inalámbricas, WLAN).
- ZigBee es una especificación de protocolos cuyos niveles inferiores son proporcionados por IEEE 802.15.4.
- DASH7. Se trata de un estándar abierto desarrollado para WSN. En este caso, las normas están recogidas en ISO/IEC 18000-7.
- IETF³ establece protocolos para niveles superiores.
- ISA⁴ proporciona soluciones que cubren desde el nivel más bajo (físico) hasta las aplicaciones. Por ejemplo, ISA100.11a.

1.2.2 Sistemas operativos

Los sistemas operativos destinados a redes de sensores son mucho más simples que los de propósito general, fundamentalmente por dos motivos: las plataformas *hardware* están muy definidas y es posible hacer un sistema adaptado a los dispositivos; las exigencias energéticas y de gasto deben ser las mínimas.

Uno de los primeros sistemas operativos fue TinyOS, que está diseñado desde el principio para WSN. Está basado en eventos. Se tendrán programadas acciones ca-

² *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

³ *Internet Engineering Task Force.*

⁴ *International Society of Automation.*

da vez que ocurran determinados eventos. También es posible programar tareas (la gestión del microcontrolador la realiza de forma automática el programador interno del sistema). Para la programación se utiliza el lenguaje nesC⁵.

LiteOS es otro sistema operativo de tiempo real diseñado para estas redes. Basado en sistema UNIX (hilos). Posibilidad de programación en lenguaje C.

Contiki está preparado para trabajar con sistemas que tengan restricciones de memoria (esto incluye redes de sensores).

1.3 Armónicos en instalaciones eléctricas

La red de distribución de electricidad de un edificio (o una vivienda) se lleva a cabo usando una onda de tipo sinusoidal a una determinada frecuencia⁶. Sin embargo, puede ocurrir que la onda de corriente no sea exactamente sinusoidal, esto es, esté distorsionada.

La distorsión es ocasionada por sinusoides de mayor frecuencia (múltiplos de la fundamental) que se superponen a la onda principal. Esta distorsión significa que la distribución de la energía eléctrica sufre perturbaciones y que la calidad de la alimentación no será óptima.

Hace algo más de una década, los armónicos no se consideraban un problema, pues los efectos adversos provocados por lo general no revestían importancia. Sin embargo, la introducción masiva de la electrónica de potencia en los equipos ha hecho que este fenómeno sea más grave en una gran cantidad de sectores económicos.

⁵ *Network Embedded Systems C. Se trata de un dialecto del lenguaje C, si bien se han añadido funciones para trabajar con eventos.*

⁶ *En regiones de Europa, Asia y África se trabaja fundamentalmente a frecuencia 50 Hz. Existe otra frecuencia usada para la distribución de electricidad: 60 Hz. Algunas zonas con dicha frecuencia son América del Norte, Central y parte de América del Sur.*

1.3.1 Origen de los armónicos

Los armónicos son provocados básicamente por cargas no lineales⁷. Algunos ejemplos de estas cargas:

- Electrodomésticos, como televisores, hornos microondas, iluminación fluorescente...
- Equipos de oficina: ordenadores (fuente de alimentación), multifunciones, faxes, SAI...
- Dispositivos con saturación magnética (transformadores).
- Equipos industriales, soldadoras, hornos de arco, de inducción, rectificadores...
- Variadores de velocidad para motores de corriente continua o asíncronos.



Figura 1.5 Dispositivos con cargas no lineales

Ejemplos de dispositivos que introducen armónicos (distorsión) en la red. De izquierda a derecha: (1) fuente de alimentación de un PC, (2) tubo fluorescente y (3) motor asíncrono industrial.

Se denomina rango de un armónico y se representa por h al valor que indica el múltiplo del armónico fundamental. Por ejemplo, para una frecuencia fundamental de 50 Hz, el armónico de rango $h = 3$ tendrá frecuencia $3 \cdot 50 = 150$ Hz. En la Figura 1.6 se muestra una representación eléctrica del efecto del armónico.

⁷ Al contrario que ocurre con las cargas lineales, cuando se le aplica a la entrada una señal sinusoidal, la salida es la onda sinusoidal deformada o distorsionada.

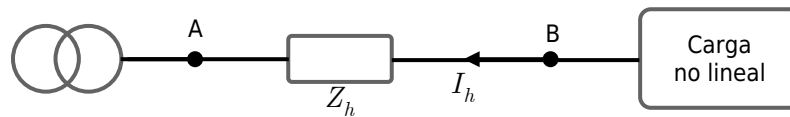


Figura 1.6 Diagrama con impedancia de armónico

Se muestra la impedancia Z_h correspondiente al armónico de rango h . Cuando la intensidad armónica circula a través de la impedancia, se crea una tensión armónica dada por la Ley de Ohm: $U_h = Z_h \cdot I_h$, lo que provoca que la tensión en el punto B se distorsione. Todos los dispositivos que reciban alimentación a través del punto B sufrirán esa distorsión.

1.3.2 Efectos de los armónicos

Fundamentalmente, se produce una degradación en la calidad de la alimentación eléctrica. Los efectos negativos son más acusados en grandes edificios:

- Sobrecargas en las redes de distribución debido al aumento en la corriente en valor eficaz.
- Sobrecargas en los conductores neutros debido al aumento acumulativo en los armónicos de tercer orden.
- Sobrecargas, vibración y envejecimiento prematuro de generadores, transformadores y motores, así como aumento del ruido del transformador.
- Sobrecargas y envejecimiento prematuro de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia.
- Distorsión de la tensión de alimentación que puede perturbar las cargas sensibles.
- Perturbaciones en las redes de comunicación y en las líneas telefónicas.

Lógicamente, estos problemas llevan asociada una repercusión económica:

- El envejecimiento prematuro del equipo hace que se tenga que sustituir con más frecuencia (a menos que se sobredimensione desde el principio).
- Las sobrecargas en la red de distribución pueden necesitar niveles de contratación de potencia superiores y aumentar las pérdidas.
- La distorsión de las ondas de corriente produce disparos intempestivos que pueden detener la producción.

* * *

En el Anexo A se describen los fundamentos teóricos utilizados (análisis de Fourier) para el estudio cuantitativo de los armónicos, así como los principales indicadores de distorsión empleados.

1.4 Propuestas y objetivos en el trabajo

A raíz de lo tratado en los puntos anteriores, se propone hacer uso de las redes inalámbricas de sensores en el ámbito de gestión energética de un edificio (podría aplicarse tanto a uso industrial o empresarial como a un entorno doméstico).

El presente trabajo surge a partir del realizado en (Larios Marín, y otros, 2009). En éste, se realizaba un estudio de los diferentes sistemas de comunicación de redes de sensores (tanto cableadas como inalámbricas). Después se desarrollaba un *hardware* para realizar mediciones eléctricas. Posteriormente, se implementaba el *software* o programa para los sensores y un sistema de monitorización (conocido como SCADA⁸).

Respecto a la parte física, en dicho trabajo se empleó una tecnología cableada RS-485 siguiendo las especificaciones del protocolo de comunicaciones Modbus. Se utilizó un microcontrolador MSP430F47166 y se incorporó un control de carga. En la parte de aplicación, fundamentalmente se realizaban medidas relacionadas con la corriente eléctrica presente en una toma: valores medios y eficaces (RMS) de tensión e intensidad, energía, frecuencia de la señal, potencias (activa, reactiva, aparente) o factor de potencia.

La idea es por tanto tomar como base los objetivos de dicho trabajo (medidas eléctricas) pero modificando algunos aspectos:

- **Sistema *hardware*.** Se optará por usar sensores inalámbricos (motes). Una de las ventajas más sobresalientes es precisamente que no necesitan cable para transportar la información. Esto dota al sistema de monitorización de gran fle-

⁸ *Supervisory Control And Data Acquisition.*

xibilidad: el sensor se puede instalar con facilidad en cualquier toma eléctrica, incluso cambiarse de un lugar a otro sin afectar al funcionamiento de la red.

Para el desarrollo del trabajo se ha contado con el modelo Tmote Sky (de la empresa Sentilla). En el Capítulo 2 se describen sus características técnicas.

El hecho de utilizar estos sensores implica la programación en nesC, para lo cual serán necesarios una preparación y aprendizaje de este lenguaje (formando esta tarea una parte fundamental del trabajo).

- **Funciones en el sensor inalámbrico.** Se han mantenido los puntos del trabajo antes mencionado, tales como medidas de valores medios, eficaces, distintas formas de potencia eléctrica, factor de potencia... si bien se le ha añadido una importante característica: control de armónicos en la red. Anteriormente se ha descrito en qué consisten, cómo se originan y los problemas que pueden traer a los equipos conectados a la red eléctrica. Todos los cálculos relacionados se efectúan internamente en cada uno de los sensores, devolviendo los datos prácticamente procesados al nodo central o base.

- Con relación al **sistema de monitorización**, se utilizará MATLAB. Si bien este *software* no es utilizado en sistemas comerciales, desde el punto de vista académico es interesante estudiar este programa para captar y/o enviar datos en una red de sensores inalámbrica, usando protocolos conocidos como TCP/IP, y una pasarela.

En el apartado de pruebas reales, ante la dificultad de trabajar con osciloscopios y generadores de onda del Laboratorio, se usará preferentemente un *software* de edición de audio para generar la onda adecuada (simulando la de una red eléctrica) y LabVIEW para recoger y comprobar que los datos calculados por los motes son los correctos.

1.5 Estructura del documento

A continuación se detalla la organización del resto del documento.

- **Capítulo 2.** Plataforma *hardware*. Estudio del modelo de sensor utilizado en el trabajo (Tmote Sky). Se centra en los bloques fundamentales de éste: microprocesador (familia MSP430 de Texas Instruments); interfaz radio, dando una visión general de los protocolos de comunicación más importantes (estándar IEEE 802.15.4, ZigBee y DASH7); chip transceptor de radio (CC2420); comunicación USB del sensor a través de un convertidor a estándar RS-232.

Se continúa estudiando las características del dispositivo Tmote Connect (pasarela que enlaza una red de sensores inalámbricos con una red de área local LAN).

También se justifica el uso de sensores (inalámbricos) en este tipo de sistemas.

- **Capítulo 3.** Sistema operativo TinyOS. Introducción al sistema operativo y al lenguaje nesC. Se comienza con la terminología básica del lenguaje; se explican los dos grandes bloques en los que se estructuran los códigos: signatura e implementación. Tipos de interfaces; explicación de una aplicación simple de ejemplo; gestión de tareas (prioridades). Para finalizar, se estudian los sistemas de comunicación: radio (protocolos inalámbricos más importantes) y serie (a través de la conexión USB del dispositivo).

En este capítulo se dan por tanto las bases del lenguaje nesC para poder comprender mejor el desarrollo de la aplicación del trabajo.

- **Capítulo 4.** Aquí se darán los detalles específicos propios de la aplicación desarrollada. Entre ellos: sistema de identificación de los sensores; temporización; operaciones al arrancar el nodo; gestión de entradas/salidas digitales; conversión analógico-digital (y procesamiento de medidas); uso de la memoria flash externa; protocolos de radio y puerto serie utilizados (con sus configuraciones). Después se describen los bloques de código: funciones auxiliares, y las distintas tareas programables (conversiones, procesamiento de medidas, envío de datos...).

Para finalizar, se describe la configuración necesaria para la pasarela de datos, y cómo acceder a éstos. Sistema de monitorización y control con MATLAB (funcionamiento de la aplicación).

- **Capítulo 5.** Se centra en las pruebas que se efectúan en el sistema, para comprobar su correcto funcionamiento. Primero se describen algunos sistemas de

depuración de código disponibles. Después, se detallan diversas pruebas para verificar el código fuente.

A continuación, pruebas con señales que emulan las que se recibirían por una red eléctrica: se generan diversos tipos de señales y mediante LabVIEW se comprueba que los datos procesados por los sensores son acordes a los que calcula LabVIEW.

El último bloque trata el sistema de comunicación radio (diversas configuraciones), al que se le añade la pasarela de datos Tmote Connect.

- **Capítulo 6.** Aspectos a destacar durante la elaboración del trabajo. Se incluye una descripción de las principales tareas realizadas y problemas encontrados. Al final se dan indicaciones para posteriores modificaciones o ampliaciones.

- **Anexo A.** Análisis de armónicos. El hecho de que se estudien los armónicos de una onda sinusoidal hace necesario emplear técnicas de análisis en el dominio frecuencial. Se centra en la definición de la Transformada Discreta de Fourier, así como de aspectos a tener en cuenta a la hora de la implementación en un mote. También se estudian tipos de ventanas discretas y sus características.

Para finalizar se revisan los indicadores más usados para medir distorsión en una señal.

- Como documento adicional, se aporta el listado con los códigos fuente, tanto de la aplicación como del sistema de monitorización desarrollado. Asimismo, se dan instrucciones básicas para la compilación e instalación del sistema en los motes inalámbricos.