



**UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

TESIS DOCTORAL

**ARQUITECTURA DE NODO INTELIGENTE PARA REDES DE
SENSORES INALÁMBRICAS Y ESCALABLES: APLICACIONES EN
MONITORIZACIÓN AMBIENTAL**

Autor:

JEAN ANDRÉ GUEVARA ROSAS

Directores:

FEDERICO JOSÉ BARRERO GARCÍA

ENRIQUE VARGAS CABRAL

**Trabajo presentado como requisito para la obtención del grado de Doctor en Electrónica,
Tratamiento de Señal y Comunicaciones**

Sevilla, 2015

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profunda gratitud al Dr. Enrique Vargas, con quien he tenido la distinción de trabajar por varios años, al Dr. Federico Barrero, por su invaluable ayuda, sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo. Además de ser excelentes profesionales, sus guías como persona permitió que el desarrollo de este trabajo sea muy grato.

También, mi reconocimiento al Dr. Sergio Toral, de la Universidad de Sevilla, al Dr. Vicente González y a todo el plantel de profesores de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, por toda la formación profesional y de valores que he recibido durante mis años de estudiante. Y por haber hecho de nexo con las autoridades académicas de la Universidad de Sevilla.

Además un agradecimiento especial a la Universidad de Sevilla y a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), por el soporte económico proveído a través del Programa de Cooperación Interuniversitaria con Iberoamérica, bajo la referencia PCI-D/7596/07. Sin su ayuda económica, no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Asimismo, un recuerdo muy especial a mis amigos, quienes siempre estuvieron a mi lado. Y a mis compañeros y amigos del LED, con quienes compartí infinidad de anécdotas y que permiten que cada día sea más que ameno el ir a trabajar. A Christian y Edgar, que son como mi familia, creo que hemos llegado más lejos de lo que habíamos pensado. A mi querida Lili, quien estuvo conmigo durante todo el desarrollo de este trabajo. En las buenas y malas siempre estuviste a mi lado. Sepan que este logro es también de ustedes.

Finalmente, quiero agradecer al *Parque Tecnológico Industrial (PTI) Margen Derecha de Itaipú Binacional*, República del Paraguay.

DEDICADO A:

A mis Padres:

Jorge y Ana

A mi Hermano:

Jorge

A mi Amada:

Lili

Jean André Guevara

It's late - It's late - It's late

But not too late

Índice

Índice	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tablas	v
I Generalidades	1
1 Introducción	3
1.1 Consideraciones preliminares	3
1.2 Motivación	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Organización del documento	5
2 Nodos sensores en Redes Inalámbricas: Evolución y estado actual	9
2.1 Reseña de las plataformas de nodos en las Redes de Sensores Inalámbricas . . .	9
2.2 Arquitectura de los nodos sensoriales	14
2.2.1 Firmware e interfaces	18
2.3 Sensores inteligentes	20
2.3.1 La norma ISO/IEC/IEEE 21451x	21
2.3.2 Trabajos de investigación que implementan la norma ISO/IEC/IEEE 21451x	23
2.4 Nodos sensores reconfigurables en redes de sensores	28
2.5 Conclusiones	31

II	Análisis de Contenido	33
3	Discusión de las Aportaciones	35
3.1	Arquitectura del Framework para redes de sensores escalables	36
3.2	La norma ISO/IEC/IEEE 21451x como fundamento del Framework	40
3.2.1	Implementación del nodo en una arquitectura empotrada	40
3.2.2	Implementación del nodo basado en el Tiny OS	41
3.2.3	Aplicaciones del Framework propuesto en sistemas ITS	43
3.2.4	Aplicaciones del Framework propuesto para el monitoreo de reservas naturales	45
3.3	Reconfigurabilidad de los nodos sensores	48
3.3.1	La flexibilidad de la norma ISO/IEC/IEEE 21451.x	50
3.3.2	TEDS propuesto para gestionar la reconfiguración basado en el ISO/IEC/IEEE 21451x	51
3.3.3	Implementación del nodo sensor reconfigurable utilizando el PSOC 5	53
3.4	Conclusiones	56
4	Principales aportaciones y líneas futuras de investigación	59
4.1	Principales aportaciones	59
4.2	Líneas futuras de investigación	60
	Bibliografía	63
III	Publicaciones	75
1.	Environmental Wireless Sensor Network for Road Traffic Applications	77
2.	Open Architecture for WSN based on Runtime Reconfigurable Systems and the IEEE 1451	95
3.	Networked Smart Transducers in Intelligent Transportation Systems based on IEEE 1451 Standard	107
4.	Dynamically Reconfigurable WSN Node Based on IEEE 1451 TEDS	135

Lista de Figuras

2.1	Algunas aplicaciones de las WSN.	10
2.2	(a) Plataforma TelosB, (b) plataforma Mica Z.	11
2.3	Nodo sensor Imote2, desarrollado por Intel [20].	13
2.4	Vista del Wasp mote y de la placa de sensores para agricultura de precisión. . .	14
2.5	Subsistemas que componen un nodo sensor, Akylidiz [10].	15
2.6	Modelo en capas y prototipo propuesto por Portilla, en [25].	17
2.7	Plataforma de nodo reconfigurable propuesta, en [26].	18
2.8	Arquitectura básica de un sensor inteligente.	21
2.9	Arquitectura de la norma ISO/IEC/IEEE 21451x.	22
2.10	Controlador de protocolo implementado en FPGA, propuesto por [74].	28
2.11	Arquitectura parcialmente reconfigurable propuesta en [88].	29
2.12	Arquitectura FPGA + FPAA propuesta (Morales [86])	30
2.13	Diagrama en bloque de la arquitectura propuesta en [92].	31
2.14	Diagrama en bloques propuesto en Mattoli [93].	31
3.1	Representación de los objetivos del Framework como intersección de las variables involucradas.	38
3.2	Objetivos definidos en el TIM y NCAP.	39
3.3	Framework Implementado en arquitectura PSoC 1.	41
3.4	Implementación de la norma ISO/IEC/IEEE 21451.0 en el TinyOS.	42
3.5	Interfaces requeridas para comunicarse con el componente del protocolo de ruteo.	43
3.6	Red de sensores implementada en unidades del transporte público e implementada en la ciudad de Asunción.	44

3.7	WTIM implementado en un bus de transporte.	44
3.8	Medidas obtenidas en la ruta Mariscal López de la ciudad de Asunción.	46
3.9	Arquitectura de red implementada en el proyecto Flora.	46
3.10	Implementación de la red de sensores en el zoológico de Itaipu.	47
3.11	Diferentes circuitos acondicionadores y placas diseñadas para el proyecto denominado FLORA.	48
3.12	Interfaz web desarrollada en el proyecto FLORA.	49
3.13	Herramienta que permite la visualización de las variables obtenidas.	49
3.14	Estructura del TEDS utilizada para describir los bloques HW del PSoC.	54
3.15	Aplicacion desarrollada para configurar el nuevo TEDS.	56

Lista de Tablas

2.1	Plataformas de nodos sensores.	12
3.1	Medidas obtenidas en el recorrido por la Avda. Mariscal Lopez.	45
3.2	Formato Tipo/Longitud/Valor.	52
3.3	Estructura requerida para definir los bloques analógicos del PSoC 5.	54
3.4	Estructura de campos requeridos para definir las conexiones de los amplificadores operacionales en el PSoC 5.	55

Parte I

GENERALIDADES

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Las redes de sensores son actualmente una de las tecnologías emergentes de mayor progreso e interés, en particular aquellas que emplean sistemas de comunicación inalámbricas [1–3]. La integración de estas redes a las infraestructuras y a diversos entornos asociados a una red inalámbrica de comunicación ha transformado drásticamente la forma en que los datos del entorno son adquiridos y procesados [4,5]. Actualmente las redes de sensores son consideradas como uno de los pilares principales en una nueva forma de percibir e interactuar con el mundo que nos rodea, proporcionando beneficios a la sociedad y mejorando la productividad de las industrias.

El gran potencial de las redes de sensores inalámbricas (WSNs, por sus siglas en inglés) reside en la capacidad de despliegue en ambientes sin una infraestructura pre-establecida, lo cual reduce considerablemente el costo de implementación. El funcionamiento autónomo durante largos periodos de tiempo, y la capacidad de ser dinámicas (es decir, si se produce algún cambio en el entorno de la red o en la red misma, los nodos son capaces de adaptarse y continuar funcionando de forma normal) son otras características importantes en este tipo de redes. Además, la escalabilidad presente en este tipo de redes permite que nuevos nodos pueden unirse a una red pre-existente con tan solo cumplir determinados requisitos, de modo que la red pueda expandirse si es necesario. Considerando las características citadas anteriormente, podemos indicar que existe una gran variedad de potenciales campos de investigación en el área de las redes de sensores inalámbricas. Sin embargo, el enfoque de investigación predominante está orientado al diseño de protocolos de comunicación que tienen como objetivo la optimización de

diversos recursos tales como ancho de banda, consumo de energía, memoria y procesamiento distribuido [6]. Actualmente la integración de sensores heterogéneos en las redes inalámbricas presenta un nuevo desafío en el diseño de las futuras arquitecturas de nodos sensoriales. Estas arquitecturas, deben manejar la creciente diversidad de protocolos de comunicación e interfaces existentes, que se han convertido en una limitación para la implementación de las nuevas redes de sensores heterogéneos. Diversos grupos de investigación han planteado varios esquemas para el diseño de la arquitectura de los nodos sensoriales, siendo la optimización de la arquitectura del nodo para cada aplicación el esquema más utilizado. No obstante esta opción es adecuada para una solución concreta, la propia naturaleza cambiante de las redes de sensores inalámbricas y la diversidad en sus aplicaciones hace que este esquema no sea necesariamente el más válido. Por lo tanto, la implementación de una estandarización que permita la integración de sensores y actuadores heterogéneos en un mismo sistema surge como una necesidad en este campo.

El desarrollo de esta Tesis se orienta al diseño de una plataforma (Framework) que de soporte a las arquitecturas de nodos de sensores inalámbricos, permitiendo su integración en una red inalámbrica. El trabajo de investigación consta de dos partes principales. La primera parte se centra en la definición del Framework basado en el estándar internacional ISO/IEC/IEEE 21451-x y en su utilización en diversas aplicaciones. La segunda parte plantea la utilización de arquitecturas reconfigurables en nodos de sensores inalámbricos, planteándose como aporte la modificación del datasheet electrónico definido en el estándar ISO/IEC/IEEE 214510 como una herramienta novedosa que estandariza el proceso de reconfiguración en cualquier nodo nuevo en redes de sensores inalámbricas.

1.2 MOTIVACIÓN

El desafío planteado por la integración de nodos heterogéneos y diversas interfaces en una red de sensores, ha conducido al desarrollo de algunos estándares internacionales como el ISO/IEC/IEEE 21451-x entre otros. La característica principal que plantean estos estándares es la escalabilidad de la red desde el punto de vista de la heterogeneidad de los nodos y una capacidad “plug-and-play”. Con esto, se pretende abordar el problema de la gran diversidad de interfaces presentes en el mercado, a fin de determinar la mejor forma de interconexión entre redes de sensores heterogéneos. Sin embargo, la implementación del estándar ISO/IEC/IEEE 21451-x es complicada y no contempla las limitadas capacidades presentes en los nodos de

redes inalámbricas, como bajo consumo de energía, capacidad de memoria y capacidad de procesamiento.

Además, el estándar no contempla las arquitecturas reconfigurables, las cuales pueden ser muy útiles dada la diversidad de posibles aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas. Es necesario, por lo tanto, consolidar el uso de un Framework para las arquitecturas de nodos sensoriales inalámbricas que contemple la heterogeneidad de los transductores y la inclusión de arquitecturas reconfigurables en los nodos sensores. La principal motivación de esta Tesis es el desarrollo de ese Framework y su utilización en el área de las arquitecturas de nodos para redes de sensores inalámbricas.

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos generales en los que se centra la Tesis se pueden enumerar en los siguientes puntos:

- Efectuar una profunda revisión bibliográfica del estado del arte de la arquitectura de los nodos en redes de sensores inalámbricas, identificando sus ventajas e inconvenientes.
- Diseñar un Framework para el diseño de arquitecturas escalables de nodos para redes inalámbricas, e implementar dicho Framework.
- Proponer una estandarización en el diseño y manejo de nodos reconfigurables para redes de sensores inalámbricas. En concreto se propone la modificación del datasheet electrónico definido por el estándar ISO/IEC/IEEE 214510 para la administración de nodos sensores reconfigurables.
- Finalmente, comprobar experimentalmente el funcionamiento de la arquitectura propuesta a fin de obtener métricas de rendimiento.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento se ha organizado en tres partes, que responden a la estructura definida por la Normativa Reguladora del Régimen de Tesis Doctoral vigente de la Universidad de Sevilla, en cumplimiento con el Real Decreto 99/2011 (BOE 10 de febrero de 2011) que establece: “Podrán presentarse para su evaluación como Tesis doctoral un conjunto de trabajos publicados por el

doctorando (...) Además de las publicaciones, la Tesis doctoral deberá incluir necesariamente: introducción en la que se justifique la unidad temática de la Tesis, objetivos a alcanzar, un resumen global de los resultados, la discusión de estos resultados y las conclusiones finales...”

En la primera parte se detallan las generalidades del trabajo. Se realiza una presentación del mismo, sus motivaciones y los objetivos que se desean cumplir (Capítulo 1). Posteriormente se describe el estado del arte en el área de las redes de sensores inalámbricas. Se introduce el concepto de sensor inteligente definido en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-x y se realiza una revisión de las arquitecturas reconfigurables utilizadas en las redes de sensores inalámbricas (Capítulo 2).

En la segunda parte se discuten los resultados obtenidos durante este trabajo de investigación (Capítulo 3). En primer lugar se propone un Framework escalable que permita el manejo de sensores heterogéneos y de diversas interfaces, basado en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-x, como base para una arquitectura de nodo escalable. Se presenta la aplicación de esta arquitectura en sistemas ITS y su posterior adaptación para una red inalámbrica de monitorización de variables medio-ambientales. Posteriormente se describe la modificación de la arquitectura propuesta para el manejo de dispositivos reconfigurables, su aplicación en redes de sensores de monitorización ambiental y otros tipos de sensores inteligentes. Además, se presenta como aporte la utilización del datasheet electrónico (TEDS, por sus siglas en inglés) definido por el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-x como herramienta para estandarizar el proceso de reconfiguración en los nodos de las redes de sensores inalámbricas. Por último se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación a desarrollar a partir de esta Tesis (Capítulo 4).

La tercera y última parte del documento se compone de los principales trabajos de investigación publicados relacionados con la Tesis. Esta parte está conformada por cuatro artículos que presentan ideas originales y han sido publicados en revistas internacionales de reconocido prestigio (tres de ellos) y/o congresos internacionales de interés en el área (uno de los artículos presentados). Los dos primeros se centran en la definición del Framework basado en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-x (Artículo 1) y en su utilización en la monitorización de variables medioambientales (Artículo 2). Los dos siguientes plantean la utilización de arquitecturas reconfigurables en los nodos de redes inalámbricas de sensores. El primero (Artículo 3) plantea la utilización de una arquitectura basada en un sistema en chip para el acondicionamiento de los transductores. Finalmente, el cuarto artículo presenta una

modificación del datasheet electrónico definido por el estándar ISO/IEC/IEEE 214510 para que contemple el manejo de arquitecturas reconfigurables, y así poder estandarizar el proceso reconfiguración de nodos en las redes de sensores inalámbricas.

Capítulo 2

NODOS SENSORES EN REDES INALÁMBRICAS: EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL

La literatura examinada en este capítulo está orientada a presentar el estado actual del desarrollo de los nodos en redes de sensores, en especial de nodos de redes de sensores inalámbricas. Se analizan las tecnologías más recientes en el área de la investigación y de las aplicaciones industriales, con el fin de establecer un marco teórico que ratifique la relevancia de los aportes presentados en este trabajo. Más específicamente, se describen diversos trabajos que implementan nodos sensores inteligentes basados en la norma ISO/IEC/IEEE 21451x, así como arquitecturas de nodos con capacidades de reconfiguración.

2.1 RESEÑA DE LAS PLATAFORMAS DE NODOS EN LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

En los últimos 25 años, las redes de sensores han sido utilizadas en diversas áreas de aplicación tales como la industria, el monitoreo de estructuras, el cuidado de la salud, los sistemas de transporte inteligentes, entre otras (Figura 2.1) [7–9]. Considerando medio de comunicación, las redes de sensores pueden ser clasificadas en redes de sensores cableadas y redes de sensores inalámbricas (Wireless Sensor Network, WSN). Durante la última década, las redes de sensores inalámbricas han sido ampliamente utilizadas y su desarrollo es el centro de varias investigaciones [10]. Cabe señalar que en el campo de las WSN, se vienen

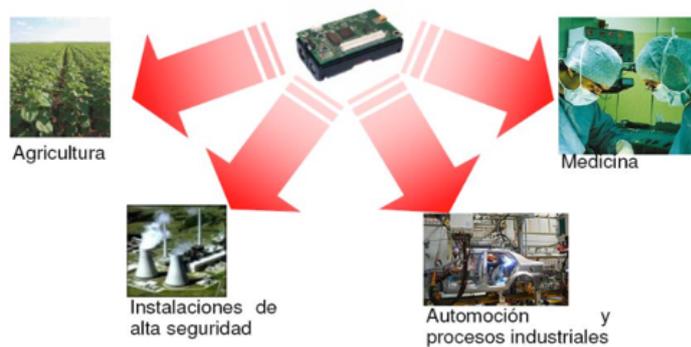


Fig. 2.1: Algunas aplicaciones de las WSN.

realizando trabajos de investigación principalmente en tres diferentes áreas: (1) topologías de red y protocolos de comunicación, (2) implementación de nuevas soluciones hardware (HW) y (3) propuesta de nuevas herramientas para el diseño de WSN. Aparentemente, estas líneas de investigación no tienen nada en común. Sin embargo, la meta principal que se persigue es que los nodos sensores (comúnmente llamados motes) tengan un bajo consumo de energía (con una elevada autonomía), un tamaño reducido y, bajo coste de implementación. Estas características requieren de optimizaciones en cada una de las áreas mencionadas anteriormente con un enfoque sistémico de manera a plantear soluciones tendientes a lograr el objetivo planteado.

A pesar de su rápido desarrollo, las redes de sensores siguen siendo una tecnología emergente. Prueba de ello, es que aún no se ha conseguido la ubicuidad de las mismas, ni que éstas cumplan con los objetivos de autonomía y bajo coste. Numerosas líneas de investigación acerca de las redes de sensores han sido llevadas a cabo durante la última década, mientras que algunas de estas investigaciones guardan similitudes con la plataforma de nodo presentada en este trabajo de Tesis, otras se centran en filosofías totalmente distintas. En este apartado solo haremos referencia a las que consideramos más significativas para el estado del arte.

En la actualidad, existe una gran diversidad de plataformas de nodos sensores que están específicamente diseñadas para las aplicaciones donde serán desplegadas. Estos nodos, comúnmente llamados motes (nombre que procede del inglés, cuyo significado es polvo). Esta denominación fue usada por primera vez en el proyecto Smartdust [11], concebido en 1998 con la intención de desarrollar nodos sensores de tamaño muy pequeño (en torno a 1mm³) que en conjunto formarían un polvo inteligente (smart dust), esto permitiría estudiar el entorno y monitorear las variables deseadas. Puede afirmarse, que este trabajo fue el que definió el concepto actual de las redes de sensores inalámbricas.



Fig. 2.2: (a) Plataforma TelosB, (b) plataforma Mica Z.

Las plataformas Mica [12] y sus variantes como el TelosB [13] (Figura 2.2), pueden ser consideradas como las plataformas de mayor impacto en la historia de las redes de sensores inalámbricas. Han sido utilizadas en cientos de investigaciones y en varias aplicaciones. La característica fundamental que convierte a este tipo de plataformas como el estándar de-facto en las WSNs, es su modularidad a nivel de sensores. Las diversas versiones de Mica, (Mica, Mica2, Micaz, TelosB), presentan similares circuitos de procesamiento y comunicaciones, además permiten el desarrollo de nuevos circuitos para nuevas aplicaciones con diferentes sensores. Las características citadas anteriormente, han logrado que estas plataformas sean utilizadas en diversos trabajos de investigación [14–16]. Las plataformas derivadas del Mica, están basadas en microcontroladores de muy bajo consumo como el Atmega 128, el cual se encarga de manejar los procesos de comunicación, medición y procesamiento de datos. Estos microcontroladores poseen recursos limitados de memoria y de interfaces de comunicación. Lo cual limita su utilización en aplicaciones que requieren de un nivel de procesamiento mayor. Sin embargo, estas plataformas poseen una autonomía considerable por lo que suelen ser implementadas en redes que requieren un bajo consumo de energía o que funcionen a base de fuentes de energía renovables. Dado que incluyen un procesador como centro del sistema, finalmente será un programa el que establecerá las tareas que cada nodo debe llevar a cabo, además de servir como la interfaz con el programador. Posiblemente el alto grado de aceptación de estas plataformas se deba a que además de plantear una arquitectura sencilla, puede ser manipulada a través de un sistema operativo llamado TinyOS, el cual permite un alto grado de abstracción del hardware [12]. Esta abstracción, facilita el desarrollo de las investigaciones en las cuales se quiere implementar nuevos protocolos o algoritmos. Esto evita que el programador deba tratar directamente con el hardware del nodo.

Normalmente, la programación de los microcontroladores en los nodos se realiza directamente a través de un cable. Sin embargo, estas plataformas permiten su reprogramación

a distancia aun estando en funcionamiento, por medio de un co-procesador [17]. Cabe mencionar, que incluso con el desarrollo de protocolos especialmente diseñados para realizar la reprogramación a distancia de los nodos, este procedimiento no es normalmente utilizado, ya que la transferencia del firmware del nodo a través de una red inalámbrica con baja tasa de transmisión presenta varios inconvenientes. Destacar además, que varias plataformas de nodos han sido desarrolladas a partir de la arquitectura del Mica como por ejemplo Iris, Lotus, Tmote Sky y el TelosB. La mayor diferencia entre estas plataformas, es el microcontrolador utilizado, además de aumentar en el caso de Lotus, las interfaces y la modularidad de la plataforma.

La empresa MEMSIC [18] actualmente comercializa cinco plataformas de nodos inalámbricos (Tabla 2.1), la mayoría de estas plataformas son utilizadas con fines educacionales, de investigación y desarrollo.

Tabla 2.1: Plataformas de nodos sensores.

Plataforma WSN	Aplicación	Radio Frecuencia	Tasa de Datos Kbps
MICA	Educacional	2.4 - 2.48 GHz	38.4 / 250 Kbits/s
LOTUS	Monitoreo Industrial	2.4GHZ ISM	250Kbits/s
TelosB	R & D	2.4 - 2.48 GHz ISM	250Kbits/s
IRIS	Edición OEM	2.4GHZ ISM	250Kbits/s

La plataforma Intel Mote [19] y su actualización la Intel Mote 2 [20], representan otra clase de plataformas de nodos sensores muy utilizados actualmente (Figura 2.3). A diferencia de las plataformas basadas en el Mica, están diseñadas para aplicaciones con una alta demanda de procesamiento, dejando de lado el bajo consumo de energía. Para ello, integran un dispositivo del tipo DSP, el cual puede realizar el procesamiento de las señales liberando al microcontrolador de esta tarea. Además, esta plataforma presenta una modularidad mayor a la de las plataformas Mica, permitiendo el diseño de capas de manera a ampliar sus recursos. Por ejemplo, sus interfaces permiten no solo la implementación de nuevas capas con sensores o actuadores, sino también la implementación de capas de fuentes de energía.

Esta filosofía de modularidad ha sido implementada con éxito en diversas plataformas de investigación y comerciales. Como ejemplo importante podemos citar la plataforma Waspote de la empresa Libelium [21]. Waspote es una plataforma desarrollada por la empresa española Libelium (Figura 2.4), esta plataforma comercial es actualmente utilizada en más de 50 diversas



Fig. 2.3: Nodo sensor Imote2, desarrollado por Intel [20].

aplicaciones, que van desde la agricultura de precisión, la domótica, ciudades inteligentes, monitoreo del agua, entre otras. El Wasp mote, consiste en una plataforma de nodo sensor que permite integrar distintos tipos de transductores para el monitoreo de diversas variables. Los datos adquiridos pueden ser enviados inalámbricamente a kilómetros de distancia usando el protocolo ZigBee, Wi-Fi o ser almacenados en el propio dispositivo.

Además, es posible intercambiar los transductores que utiliza mediante las diferentes placas de sensores que pueden ser conectadas al dispositivo. Como ejemplo de la variedad de medidas que es posible obtener a partir del Wasp mote, citamos la placa de sensores para agricultura de precisión. Con esta placa se pueden monitorear hasta catorce parámetros medioambientales: temperatura y humedad relativa del aire, temperatura de suelo, humedad de suelo, humectación de hoja, presión atmosférica, radiación solar, diámetro de tronco/tallo/fruto, velocidad de viento, dirección de viento y precipitación. Libelium es una de las empresas de mayor crecimiento en los últimos años en el área de redes de sensores inalámbricas.

La plataforma Wasp mote también permite la programación OTAP (Over the Air Programming) del nodo sensor, esta tecnología ha sido estudiada en diversas publicaciones [22, 23]. Sin embargo, su utilización no es muy extendida debido a los problemas inherentes de transmitir el código en una red con una baja tasa de transmisión de datos, como suele ser el caso en las WSNs. Empresas como Crossbow o Libelium son algunos ejemplos de empresas que venden nodos orientados a diversas aplicaciones, cada uno con un enfoque particular, tanto en lo relativo al software (SW) como al hardware (HW). Sin embargo, la tendencia actual es

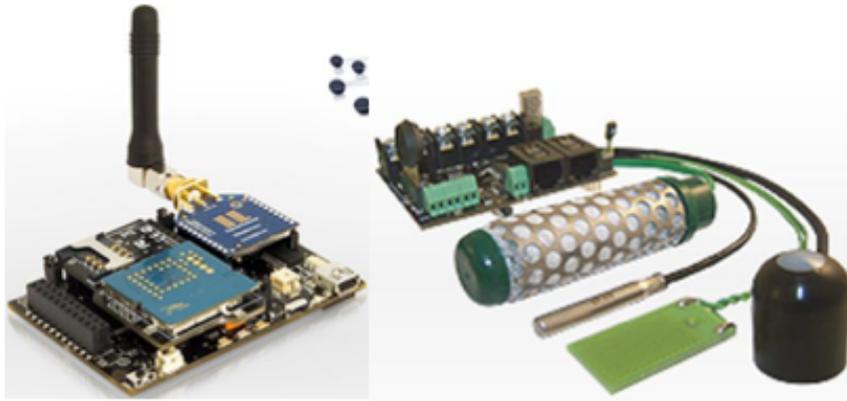


Fig. 2.4: Vista del Wasp mote y de la placa de sensores para agricultura de precisión.

que las arquitecturas de los nodos incorporen algún tipo de modularidad o flexibilidad ya sea HW o SW.

2.2 ARQUITECTURA DE LOS NODOS SENSORIALES

Como ha sido mencionado, los nodos sensores son la pieza básica de una WSN. Se trata de dispositivos capaces de realizar medidas sobre un determinado fenómeno y propagarlas vía radio. Disponen de capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica así como de expansión a través de puertos de entrada/salida de su microprocesador.

Usualmente un nodo sensor está conformado por los bloques hardware que se muestran en la Figura 2.5 [10]. Son cuatro los bloques que siempre se encuentran presentes en un nodo. El primero de ellos, la unidad de procesamiento, encargada de la coordinación con los otros subsistemas, dirigiendo las tareas de recogida de datos y comunicaciones con otros nodos, así como de procesar los datos. La unidad de sensorización adquiere los datos del entorno a través de sus transductores y transforma las medidas analógicas tomadas en medidas digitales que el microprocesador puede manejar. El transceptor se encarga de las comunicaciones con el resto de nodos. Por último, se encuentra la unidad de alimentación que suministra energía al resto de subsistemas. Considerando estos cuatro sub-sistemas fundamentales en la arquitectura de toda plataforma de nodo, y según la literatura existente, podemos clasificar los nodos según su arquitectura en tres distintos tipos.

La primera variedad, estaría compuesta por los nodos de primera generación, como los MicaZ, TelosB y sus variaciones. Como característica de este tipo de arquitectura podemos

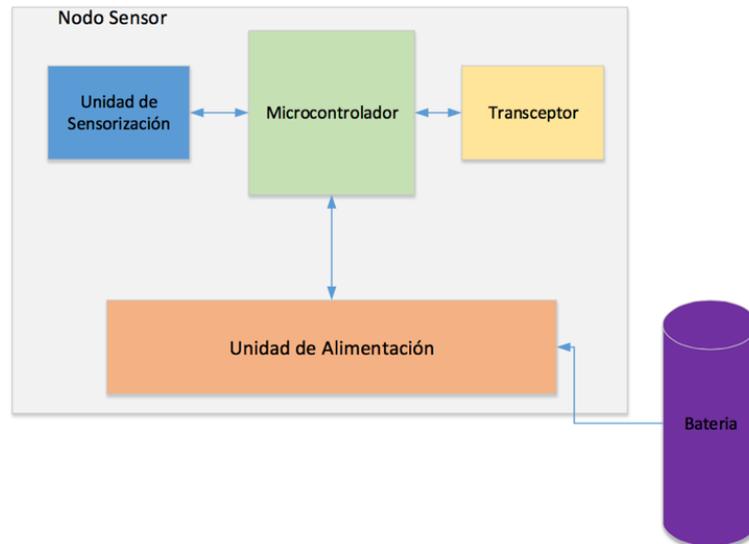


Fig. 2.5: Subsistemas que componen un nodo sensor, Akylidiz [10].

indicar que los cuatro subsistemas del nodo se encuentran empotrados en una misma placa, por lo tanto no son plausibles de modificación. Usualmente, este tipo de nodos posee un solo puerto de ampliación, el cual es generalmente destinado a la conexión de diversos tipos de transductores. La segunda, estaría integrada por los nodos basados en arquitecturas de capas. Esta filosofía está siendo implementada cada vez más, ya que permite una mayor modularidad del nodo. Mejorando su escalabilidad y flexibilidad, lo cual permite que estos nodos puedan ser utilizados en diversas aplicaciones. En comparación con la primera clase, estos nodos pueden modificar cualquiera de sus subsistemas básicos según sea la aplicación en la cual será utilizado. Como desventaja podemos decir que esta clase de nodos requieren de un mayor costo de implementación. La tercera, estaría integrada por los nodos, en cuya arquitectura se encuentran dispositivos reconfigurables.

La particularidad de este tipo de nodo sensor, es que los dispositivos reconfigurables le permiten adaptarse a diversas circunstancias, sin necesidad de rediseñar todo el hardware de la plataforma, sino adaptar el hardware que posee para enfrentar diversas circunstancias. Anteriormente, en esta clase de nodos, los dispositivos reconfigurables se encontraban en la capa de procesamiento, permitiendo modificar únicamente las interfaces con las cuales se comunicaban con los transductores. Sin embargo, actualmente estos dispositivos pueden ser encontrados en cualquiera de los otros sub-sistemas. Como ejemplo de esto, podemos indicar los nuevos microcontroladores inalámbricos (Wireless MCU) de TI, los SimpleLink [24]. Estos dispositivos, además de poseer un microcontrolador ARM, poseen la capacidad de modificar la tecnología de transmisión que usa. Su dispositivo de radio permite cambiar entre las tecnologías

Bluetooth, ZigBee y IEEE 802.15.4 (se espera próximamente la integración de la tecnología Wi-Fi) según la aplicación lo requiera. Con esto se podría modificar el tipo de interfaz de transmisión según la red de sensores con la cual se pretenda trabajar. A continuación, presentamos algunas de las características y ejemplos de cada una de las clases de arquitecturas de nodos.

- **Arquitectura de nodo tipo 1:**

Los nodos por lo general, son dispositivos limitados en cuanto a sus prestaciones. Su CPU funciona a baja frecuencia, disponen de poca memoria RAM y tienen una fuente de alimentación que deben conservar durante el mayor tiempo posible. Debido a esto, las funciones que realizan los nodos se limitan usualmente a la captura y envío de datos, con algunas tareas de procesamiento destinadas a disminuir la cantidad de información que se transmite, o a obtener nueva información, ya sea a partir de las distintas medidas que se almacenan en un nodo, o a partir de un procesamiento distribuido en varios nodos. El almacenamiento en memoria no volátil está menos restringido, ya que disponen de una memoria flash del orden de cientos de kBytes, lo que permite el almacenamiento de gran cantidad de datos, que no tienen porqué ser inmediatamente transmitidos por la radio. Además, los nodos cuentan con puertos de entrada/salida que permiten tanto el conexionado de subsistemas adicionales, como la comunicación con un PC o la programación del nodo. Como ejemplos de esta clase podemos citar al nodo más utilizado actualmente, el TelosB.

- **Arquitectura de nodo tipo 2:**

Las arquitecturas en este tipo de plataformas, son nodos modulares de modo que las mismas están compuesta por varias capas, cada una de las cuales está designada a cumplir una función específica dentro del nodo. Un ejemplo de este tipo arquitectura es la presentada por Portilla en [25]. Esta Tesis propone una plataforma modular e interfaces genéricas de transductores para redes de sensores inalámbricas. La arquitectura de la plataforma modular presentada en esta Tesis, está compuesta de cuatro capas que son:

- **Sensado/Actuación:** incluye los sensores y/o actuadores que se utilizan en la plataforma.
- **Procesamiento:** incluye un micro-controlador ADuC841 y un dispositivo FPGA.



Fig. 2.6: Modelo en capas y prototipo propuesto por Portilla, en [25].

- **Alimentación:** Esta capa se encarga de generar la alimentación necesaria para el resto de las capas que componen al sensor.
- **Comunicaciones:** Se encarga de enviar y recibir información hacia y desde la red de sensores. Utiliza la tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4, la cual tiene como características principales, el bajo consumo, la baja tasa de datos y posibilidad de crear redes tipo ad-hoc, con distintas topologías.

Por otra parte, estas capas están interconectadas a través de un bus, que es compartido por todas las capas. Esta distribución hace que la plataforma sea más flexible y el uso de un bus específico garantiza la compatibilidad de futuros elementos que sean introducidos en nuevos diseños (Figura 2.6).

Fundamentalmente, la idea que presenta esta Tesis es el diseño de una plataforma de nodo modular. La cual permite el intercambio de capas sin necesidad de rediseñar todo el hardware de la plataforma, de manera a que prime la flexibilidad del nodo. Esta flexibilidad permite que la adaptación a nuevas situaciones sea una tarea más sencilla. Esta misma filosofía ha sido implementada en varias plataformas comerciales, como ya ha sido comentado en el estado de la técnica, precisamente para hacerlas flexibles a cambios y así adaptarlas a nuevas aplicaciones.

- **Arquitectura de nodo tipo 3:**

Estos tipos de nodos implementan en su arquitectura un dispositivo reconfigurable. La filosofía que ha conducido al planteamiento de este tipo de arquitectura se fundamenta en el hecho de que existen una multitud de aplicaciones posibles para las redes de sensores, así como la infinidad de diferentes transductores existentes en el mercado actual. En

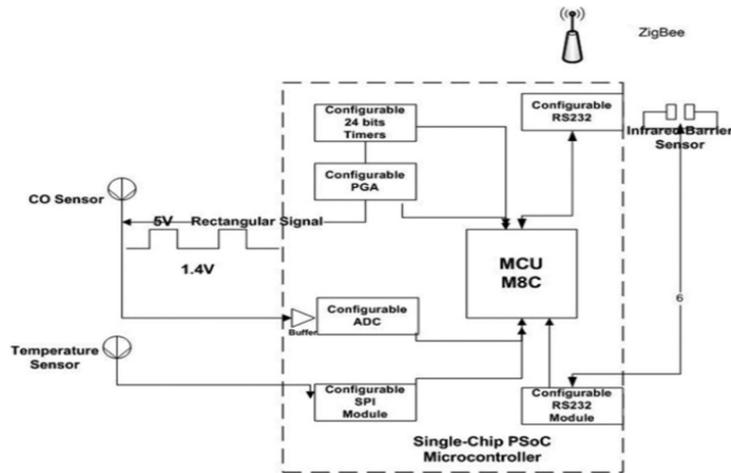


Fig. 2.7: Plataforma de nodo reconfigurable propuesta, en [26].

este contexto, la utilización de dispositivos reconfigurables como lo son las FPGA (Field Programmable Gate Array), las FPAAs (Field Programmable Analog Array), o los PSoC (Programmable System on Chip) y el estudio de las posibilidades que ofrecen, conducen a una nueva área de investigación dentro del campo de las redes de sensores inalámbricas. Como se podrá entrever más adelante en este capítulo. La utilización de dispositivos reconfigurables como la FPGA o la FPAAs en las redes WSN, tradicionalmente ha sido relegada debido al alto consumo de energía de dichos dispositivos. Sin embargo, los avances en la microelectrónica y en especial en la tecnología de las FPGA, han propiciado la aparición de estos dispositivos en las nuevas arquitecturas de nodos sensoriales (Figura 2.7) [26].

2.2.1 Firmware e interfaces

Debido a que usualmente las plataformas de nodos sensores para WSNs incluyen un microcontrolador como núcleo del sistema, es necesario contar con un software que sea el encargado de llevar a cabo las tareas que el nodo deba realizar. Actualmente, existe varios sistemas operativos desarrollados especialmente para su utilización en las WSNs [27]. Destacar que, cada sistema operativo ofrece algunas ventajas en relación a los otros, y todos intentan aprovechar al máximo los limitados recursos que usualmente presentan las arquitecturas de nodos sensores. Además, la mayoría de los sistemas operativos proveen un nivel de abstracción del Hardware, lo cual permite que el programador centre todos sus esfuerzos en el desarrollo del Software.

Entre los sistemas operativos más conocidos, el TinyOS surge como el estándar de-facto

para nodos de WSNs. Este es un sistema operativo orientado a eventos, de código abierto y diseñado para redes de sensores inalámbricas. Es utilizado en las plataformas TelosB y sus variaciones, aunque también ha sido portado a otras plataformas. Una de las mayores virtudes de este sistema operativo, es la forma en que administra las tareas que debe realizar el nodo. El sistema ha sido escrito en NesC (network embedded system C), que es un lenguaje de programación basado en C. El lenguaje NesC fue creado para el desarrollo de aplicaciones estructuradas basadas en componentes. Gracias a esto, es un lenguaje adecuado para soportar la concurrencia de tareas. Las aplicaciones escritas en NesC están organizadas en componentes, que a su vez poseen interfaces, que son bidireccionales. El modelo de concurrencia, a su vez, está basado en tareas y en los manipuladores de eventos HW.

El TinyOS provee una gran cantidad de APIs (Application Programming Interface) que facilitan la utilización de los periféricos del microcontrolador. Sin embargo, el TinyOS no centra su enfoque en las interfaces con los transductores ni en el acondicionamiento de señales. Solo brinda algunos APIs para transductores que se encuentran en algunas de las plataformas donde puede ser implementado (sensor de temperatura, humedad y luz, en el TelosB). Cabe señalar que, al ser un sistema abierto, es posible la implementación de nuevos APIs, para realizar la interfaz con diversos tipos de transductores. Aprovechando esta característica del TinyOS, en este trabajo de Tesis, se presenta la implementación del estándar ISO/IEC/IEEE 21451x en el TinyOS. Se propone un Framework basado en el estándar y que sigue la filosofía orientada a componentes. Con este Framework, se pretende facilitar la integración de sensores inteligentes a las WSNs.

Usualmente los transductores pueden ser clasificados según la interfaz de comunicación que presentan como transductores analógicos o transductores digitales. Los transductores analógicos, son los más tradicionales en el mercado y proporcionan una señal analógica que usualmente debe ser acondicionada antes de ser procesada. Por lo tanto al incluir sensores con salida analógica en un diseño concreto, se debe considerar el diseño e implementación de un circuito acondicionador, su costo, tamaño, consumo, entre otras variables. Gracias al avance de la tecnología MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) y al desarrollo de la microelectrónica durante los últimos años están apareciendo cada vez más sensores con interfaz digital. Estos sensores presentan características muy favorables para ser implementados en las WSNs, y no requieren de un circuito de acondicionamiento, con lo cual se reduce el costo final, el tamaño y el consumo de energía del nodo sensor. Sin embargo, aunque estos sensores presentan ventajas

a la hora de ser implementados en los nodos, también presentan el gran inconveniente de que existen una gran diversidad de interfaces digitales. La gran diversidad de protocolos e interfaces para sensores digitales existentes dificultan la implementación de estos en las WSNs. Incluso transductores que utilizan la misma tecnología digital de transmisión (PWM, SPI, I2C), pueden presentar distintos protocolos de comunicación, lo cual obliga a redefinir el modo en el que se interpreta la señal digital.

Además, algunos protocolos utilizados en transductores digitales requieren de una dedicación del procesador muy alta. En sistemas como las WSNs, esto puede llegar a plantear problemas en el consumo de energía y en el manejo de la red. La inclusión de muchos sensores con interfaces digitales puede llevar al colapso al procesador, más aun teniendo en cuenta el tipo de microcontroladores que usualmente son implementados en nodos de WSNs. Una posible solución a esto, es la inclusión de un coprocesador que libere al microcontrolador de tareas relacionadas con el procesamiento de señales digitales provenientes de los transductores.

Siguiendo con la línea anteriormente expuesta sobre la variedad de interfaces digitales que pueden presentar los sensores, cabe destacar que el IEEE ha considerado dicha cuestión tan relevante que se ha desarrollado una norma de estándares bajo el nombre ISO/IEC/IEEE 21451x. Los estándares incluidos en dicha familia pretenden establecer la forma en que los sensores y actuadores (llamados transductores en conjunto) comunican y reciben información hacia y desde una red. Se describirán más detalles sobre este estándar a lo largo del documento.

2.3 SENSORES INTELIGENTES

Es importante resaltar el concepto de sensor inteligente, como aquel sensor que realiza una tarea de procesamiento y comunicación además de la conversión de la variable medida a una magnitud eléctrica. Esta definición planteada por la norma ISO/IEC/IEEE 21451x [28–32] propone una nueva filosofía en el diseño de arquitecturas para nodos de redes inalámbricas. El sensor inteligente basado en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451x, presenta varias ventajas sobre las plataformas de nodos actuales, como el control en tiempo real del proceso de medición, una capacidad plug-and-play que facilita su integración a nuevas redes de sensores, una flexibilidad y escalabilidad que favorece la ubicuidad en el uso del nodo. Además, cabe resaltar que este nodo inteligente propuesto por el estándar, plantea las bases para una arquitectura de nodo

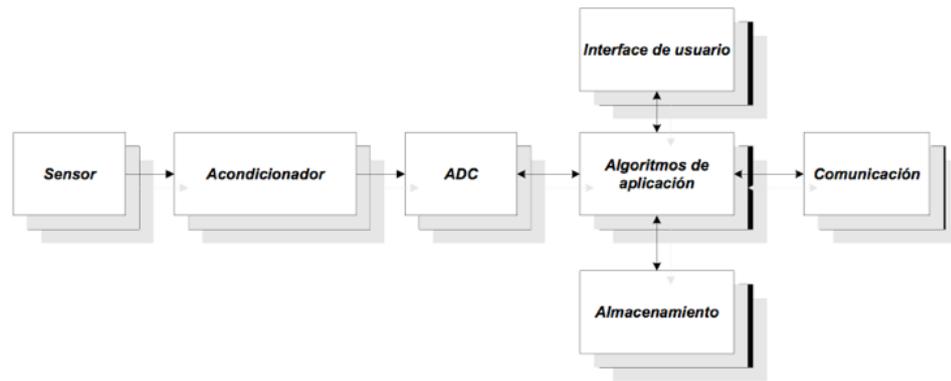


Fig. 2.8: Arquitectura básica de un sensor inteligente.

flexible y abre las puertas a la adaptabilidad o reconfiguración del mismo. En la Figura 2.8, se puede observar los sub-sistemas básicos que integran la arquitectura de un sensor inteligente.

La finalidad de los sensores inteligentes es simplificar la integración del transductor a las diversas aplicaciones del nodo [33–35]. La norma ISO/IEC/IEEE 21451x (antes conocida como norma IEEE 1451) especifica las bases para estandarizar diversos procesos tales como: el monitoreo en tiempo real, la capacidad plug-and-play de los nodos, y las interfaces de comunicación con los transductores. La norma ISO/IEC/IEEE 21451x define dos entidades principales el STIM (Standard Transducer Interface Module) y el NCAP (Network Capable Application Processor) ambas entidades se comunican a través de un TII (Transducer Independent Interface). Además, la norma define el TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) como una memoria no volátil empotrada en el sensor inteligente, y que contiene diversos parámetros sobre el sensor como: las variables medidas por el sensor, el rango de medición de las mismas, la curva de calibración del transductor, su identificador único, entre otras variables. Los campos del TEDS están definidos en cada uno de los estándares que integran la norma ISO/IEC/IEEE 21451x. Sin embargo, es posible agregar nuevos campos al TEDS de manera a especificar nuevas variables del sensor.

2.3.1 La norma ISO/IEC/IEEE 21451x

La norma ISO/IEC/IEEE 21451x está compuesta por varios estándares (que están en revisión), los cuales definen al NCAP, el STIM, el TEDS y las diversas interfaces entre el NCAP y el STIM (Figura 2.9). El Standard ISO/IEC/IEEE 214510 [28] intenta asentar las bases para que futuras familias del estándar ISO/IEC/IEEE 21451x sean compatibles las interfaces definidas en los estándares previos. Esta norma define un conjunto común de comandos,

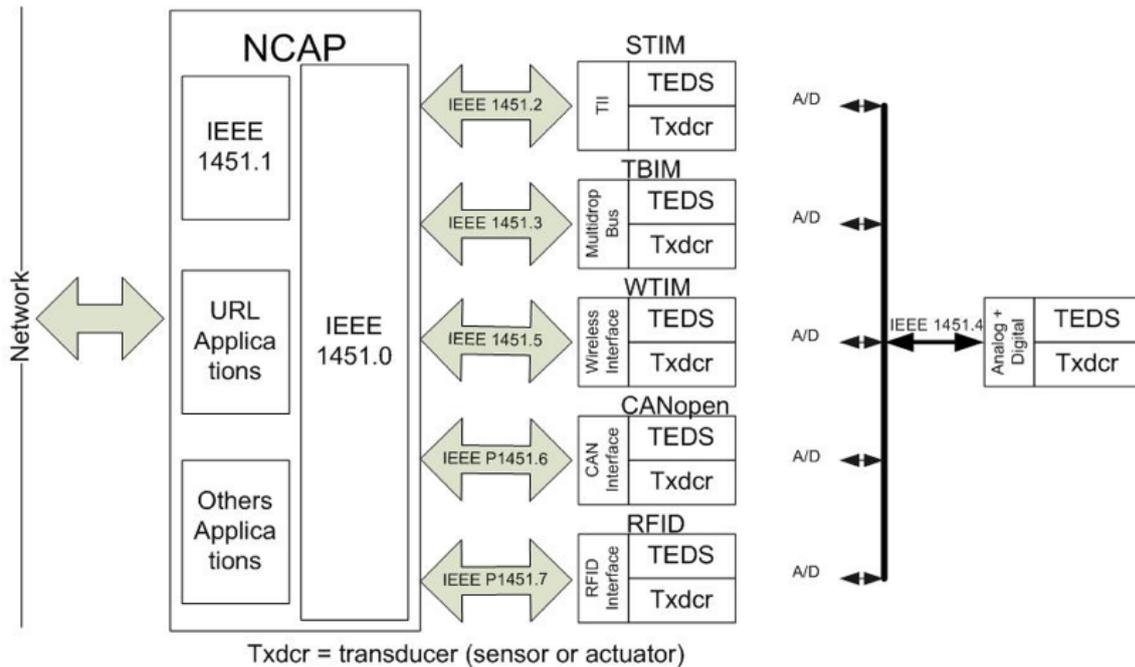


Fig. 2.9: Arquitectura de la norma ISO/IEC/IEEE 21451x.

funcionalidades y formatos de TEDS para todos los miembros de la norma que hacen uso de una interfaz digital, ayudando a alcanzar la interoperabilidad a nivel de datos entre sus distintos representantes. Las aplicaciones ISO/IEC/IEEE 21451x pueden acceder a los servicios ISO/IEC/IEEE 214510 a través de la interfaz de servicios de transductores existentes en el NCAP.

El estándar ISO/IEC/IEEE 21451-1 fue desarrollado para facilitar la creación de un software modular y portable para transductores. Define un modelo de información neutro, que se compone de un conjunto jerárquico de clases que representan los diferentes bloques de un NCAP. Este modelo es independiente de cualquier hardware, por tanto, debe ser portado a una plataforma específica para ser usado. El modelo comprende bloques, servicios, componentes, y especifica la interacción con sensores y actuadores. El principal problema de este modelo es su complejidad. A todas estas clases es necesario añadirles el código necesario para acceder a la red y procesar los datos. Como resultado, el código fuente para todo el sistema puede ser excesivamente grande, especialmente si se desea implementarlo en sistemas empujados.

El estándar ISO/IEC/IEEE 21451-2, originalmente definía una conexión patrón entre el TIM y el NCAP a través de un bus de 10 hilos que permitía intercambiar información entre ambas entidades [36]. Una razón clave para normalizar la interfaz a nivel de conexionado de hardware era la necesidad de acabar con los problemas que los fabricantes de transductores se encontraban a la hora de integrar sus productos en distintas redes. La revisión de este

estándar estudia la idea de incluir interfaces más sencillas y comunes como el RS232 o USB. El Standard ISO/IEC/IEEE 21451-4 propone una interfaz de comunicación normalizada para transductores analógicos. El objetivo es compatibilizar los transductores ya existentes en el mercado con el modelo ISO/IEC/IEEE 21451x, centrándose principalmente en añadir la capacidad de almacenar TEDS a estos antiguos sensores. Se define el concepto de transductor de modo mixto, el cual proporciona al mismo tiempo una interfaz analógico y una digital. El interfaz analógico proporciona una señal (tensión, corriente) que representa una magnitud física (temperatura, presión, fuerza, etc.). La interfaz digital se puede utilizar para leer el TEDS y configurar el transductor.

El estándar ISO/IEC/IEEE 21451-5 es un estándar que define un conjunto de especificaciones para la comunicación entre el Wireless Transducer Interface Module (WTIM), equivalente al TIM de ISO/IEC/IEEE 21450, y el NCAP. Soporta tecnologías como IEEE 802.15.4, Bluetooth, ZigBee y Wi-Fi, aunque podría adoptar otras tecnologías de ser necesario. Proporciona una descripción de las funciones y protocolos que debe soportar el módulo de comunicación entre WTIM y NCAP. El estándar ISO/IEC/IEEE 21451-7 define una interfaz y un protocolo de comunicación entre transductores y sistemas RFID. Al proporcionar informaciones como la identificación de productos o el seguimiento de su estado, abre nuevas oportunidades tanto para fabricantes de sensores como de sistemas RFID.

Luego de haber presentado los estándares que componen la norma ISO/IEC/IEEE 21451x, a continuación, presentaremos diversos trabajos que representan el arte de la norma. Dada la gran variedad de posibles aplicaciones para las redes de sensores, diversas son las áreas donde se ha implementado la norma, tales como la medición de variables medio-ambientales, el control industrial, automatización, transporte inteligente, entre otras [37–40].

2.3.2 Trabajos de investigación que implementan la norma ISO/IEC/IEEE 21451x

En sus inicios el estándar surge de la necesidad de normalizar la comunicación de sensores en diversas aplicaciones, algunas de las investigaciones que dieron inicio al estándar son las siguientes. Una plataforma plug-and-play para redes de sensores inalámbricas se propone en [41]. La plataforma denominada CrossNet, utilizaba la tecnología Bluetooth y el estándar IEEE 1451 para implementar un nodo que podía conectarse a varios sensores y transmitir luego la información adquirida a un dispositivo HUB que estaba conectado a Internet. En

[42] se describe el estándar IEEE 1451.4 , especificándose la interfaz de modo mixto (MMI, mixed-mode interface), así como un TEDS rediseñado que contiene datos necesarios para describir un transductor o actuador analógico. La necesidad de un módulo de interfaz estándar para aplicaciones aero-espaciales es presentada en [43]. Se propone el IEEE 1451, como una potencial solución al uso de tecnologías propietarias de alto costo de implementación y mantenimiento.

En [44] se presenta una revisión del STIM propuesto en el IEEE 1451.2 y el TEDS definido en ese estándar. En este trabajo se discuten características claves del TEDS, como la representación de unidades físicas, de la señal de disparo de los sensores y actuadores, el modelo de calibración de los mismos, y el manejo de transductores multi-variables y la característica plug-and-play de los sensores. La importancia del uso de recursos abiertos y estándares para la interfaz con transductores o actuadores se presenta en [45]. Este trabajo presenta la implementación del estándar IEEE 1451 utilizando lenguajes de programación como Python y Java. Además, se utilizaron dispositivos programables de bajo costo, e interfaces Ethernet para la comunicación entre la red de sensores y el usuario final. En [46], se presenta un Framework para redes de sensores basado en el estándar IEEE 1451.2. Este modelo orientado a objetos es complementado con una arquitectura de interfaz virtual (VIA) e implementada para la medición en tiempo real de una red de sensores de presión.

a- Trabajos en el área de aplicaciones medio-ambientales

En relación con las aplicaciones medio-ambientales podemos citar varios trabajos de investigación. El desarrollo de un sistema de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire es presentado en [47]. Este sistema basado en el estándar IEEE 1451.2, es capaz de medir la concentración de gases peligrosos como el SO₂, NO₂, CO y CO₂. La implementación del STIM se realizó en un microcontrolador ADuC 812, mientras que el NCAP se implementó en un ordenador utilizando el lenguaje de programación Visual Basic. La comunicación entre el STIM y el NCAP se realizó a través de una modificación del puerto paralelo del ordenador.

La ausencia de interfaces estándares para transductores, en sistemas de monitoreo químico y la dificultad que esto conlleva en la tarea de calibración de los transductores es tratada en [48]. El estándar IEEE 1451.4 se presenta como una posible solución al problema planteado con anterioridad. En el diseño de sistemas de narices electrónicas, existen ciertos problemas los cuales son presentados en [49]. Debido a la gran variedad de transductores, utilizables en la

implementación de narices electrónicas, se plantea que el estándar IEEE 1451 puede ser una herramienta útil en la integración de diversos transductores al sistema.

Diversas implementaciones para el monitoreo de la calidad del aire en interiores, se presentan en [2,50,51], estos trabajos plantean la utilización de diversos estándares de la norma ISO/IEC/IEEE 21451x para aplicación de monitoreo de gases. Las arquitecturas presentadas en estos trabajos comparten ciertas características tales como el bajo consumo de energía, bajo coste de implementación y su portabilidad. En [52] y [53], se describen la estructura de un sistema de control con multi-procesadores, para una matriz de sensores de gas, basados en el estándar IEEE 1451. En este trabajo se implementa un STIM cuya interfaz de comunicación TII está basada en un sistema de tres cables RS232 asincrónico.

En [54], se presenta el diseño e implementación, de una red de sensores inalámbricas que utiliza el estándar ISO/IEC/IEEE 21451, para el monitoreo de variables medio-ambientales. Una de estas redes es implementada en el zoológico de la hidroeléctrica Itaipu y la otra en el refugio natural Tati-Yupi. En [26] se presenta el diseño de una plataforma móvil para el monitoreo de la calidad del aire utilizando el transporte público. Esta red de sensores inteligentes basada en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451, definía a cada unidad del transporte público como un WTIM (Wireless TIM), permitiendo así el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire en la ciudad de Asunción – Paraguay. Estos trabajos permitieron validar parte del trabajo presentado en esta Tesis.

b- Trabajos en el área de aplicaciones de control.

Entre los trabajos de control y domótica podemos citar algunos como los presentados en [55]. En el cual se presenta una revisión de buses de comunicación de bajo costo y alta confiabilidad. Varios buses de comunicación existentes como el I2C (comúnmente llamado como “two wire interface”), el SPI (serial peripheral interface) y el TII definido en el estándar IEEE 1451.2 son estudiados en diferentes aplicaciones. En [56], es presentado un módulo STIM de interfaces múltiples (I2M, Multi Interface Module) basados en el estándar para la automatización de procesos industriales. La comunicación del módulo se realiza a través de interfaces alámbricas e inalámbricas por medio de las tecnologías ZigBee y RS232.

En [57] se presenta un sistema de control para luces. La implementación de luces inteligentes basadas en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451 y utilizando tecnología ZigBee logran un ahorro de energía del 43% en comparación con los sistemas de luces fluorescentes existentes actualmente. Un trabajo similar es presentado en [58]. Este trabajo propone el desarrollo de

una infraestructura de oficinas eficiente energéticamente para el Centro Tecnológico de Energía en Polonia. Presenta un complejo sistema domótico el cual es manejado a través del estándar ISO/IEC/IEEE 21451-1.

Doyle y otros presentan en [59], una interfaz en tiempo real utilizando el bus CAN (TTCAN, time-triggered controller área network). Esta interfaz se plantea para permitir que la norma IEEE 1451 pueda procesar mensajes en tiempo real. En [60] desarrollan un sistema en tiempo real para el monitoreo y control de aparatos eléctricos de uso doméstico, con el fin de ahorrar energía al consumidor. En [61] se presenta un diseño de plataforma HW y SW basado en la norma IEEE 1451, para ser aplicada en procesos de automatización. El objeto de esta plataforma es la de facilitar la implementación de los estándares de la norma IEEE 1451. El HW es implementado en un dispositivo FPGA NIOS II, lo cual facilita su adaptabilidad según sea la aplicación donde será implementada.

c-Implementaciones de la norma en otras áreas de aplicación.

La implementación de un módulo basado en el estándar IEEE 1451 para aplicaciones de redes en vehículos (IVN, In Vehicule Networks) es presentada en [62]. Este trabajo implementa una interfaz CAN (Controller Area Network) para la comunicación entre el STIM y en el NCAP. El módulo propuesto es puesto a prueba mediante la implementación de un sistema que monitorea la velocidad del motor de un vehículo de prueba. En [63] se presenta otra implementación del estándar en el área de aplicaciones IVN. En este trabajo se utiliza la arquitectura propuesta por el estándar para la integración de diversos sensores que son utilizados en un vehículo.

En [64], se presenta un prototipo de instalación de pruebas para cohetes inteligentes. La inteligencia distribuida de los componentes basados en el estándar IEEE 1451, en especial el STIM, cumplen un papel fundamental en el análisis de todo el funcionamiento de la instalación. Un chip basado en la arquitectura del STIM propuesto por el estándar IEEE 1451, es presentada en [65]. Este chip esta integrado por un ADC de ocho canales y 12 bits de resolución, además de un microcontrolador de 8 bits, y una memoria EEPROM para la implementación del TEDS.

Un prototipo de arquitectura de un sensor orientado a servicios basado en el STIM definido por el estándar IEEE 1451, para aplicaciones geo-espaciales es presentado en [66]. En [67], se propone un conjunto de instrumentos virtuales desarrollados en LabVIEW con el fin de poder realizar pruebas a módulos NCAP y STIM. En [68], se presenta una aplicación

basado en el estándar IEEE 1451 con fines a la observación del océano a través del SOS-OGC (open Geospatial consortium-sensor observation services).

En [69–71], se plantean trabajos relacionados al del estándar ISO/IEC/IEEE 21451-7 y a la tecnología RFID (Radio frequency identification). La idea de estos trabajos es la de mejorar la eficiencia de esta clase de sensores, y de facilitar el análisis de los datos adquiridos por medio de un Framework propuesto. En [72] se propone el uso del estándar ISO/IEC/IEEE 21451.0 en redes de comunicación PLC (Power Line Communications). Cabe destacar que actualmente la norma no contempla el uso de este tipo de redes, sin embargo debido a su perfil flexible y abierto a modificaciones, fácilmente se pueden adaptar nuevos tipos de redes o medios de comunicación.

d-Trabajos orientados al desarrollo del NCAP

La mayoría de los trabajos presentados hasta ahora, enfocan sus esfuerzos en la implementación del STIM. Resultando el NCAP, la otra entidad definida por la norma ISO/IEC/IEEE 21451x, en segundo plano. El NCAP, es la encargada de actuar como medio de comunicación entre la red de sensores y el usuario final. Por lo general el NCAP posee una conexión a internet para transmitir sus datos. En la literatura no existen muchos trabajos referentes exclusivamente al NCAP, la mayoría de los trabajos realizados implementan el NCAP, como parte necesaria por el estándar pero no se enfocan en su desarrollo . Entre los que se pueden encontrar en la literatura esta [73], en el cual se implementa un controlador de protocolo para el NCAP, utilizando el lenguaje VHDL. Este trabajo propone implementar el NCAP en un FPGA de bajo coste. Con esto se pretende facilitar la implementación del TII definido por el estándar IEEE 1451.2 en un ordenador (Figura 2.10).

Sin embargo, esta implementación resulta difícil de modificar ya que requiere un conocimiento profundo sobre la arquitectura HW que fue implementada. En [75], una implementación de un NCAP en un microcontrolador de bajo coste es también presentada. En [76], se propone implementar el NCAP a los módulos de mamografía digital. Se propone el uso de filtros no lineales y el estándar para la realización de mamografías móviles. En este trabajo el estándar proporciona un modelo de aplicación que garantiza la interoperabilidad de diversos tipos de sensores. Todos estos trabajos citados y otros más [74, 77–87], demuestran la diversidad de aplicaciones en las cuales puede ser implementada la norma ISO/IEC/IEEE 21451x .

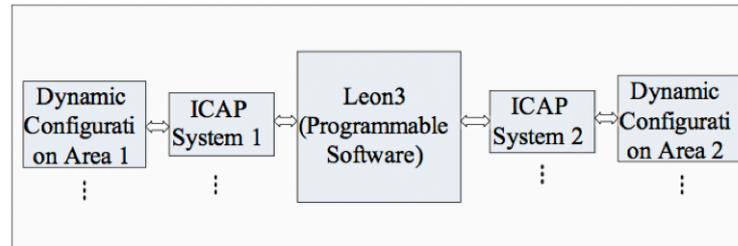


Fig. 2.11: Arquitectura parcialmente reconfigurable propuesta en [88].

hacen que esta metodología no sea la más adecuada. Teniendo en cuenta las características fundamentales de este tipo de redes, se puede inferir que el hardware de las mismas deba ser flexible y adaptable según la aplicación.

Como se ha presentado anteriormente, usualmente las plataformas actuales en las WSNs, basan su estructura en micro-controlador ASIC de bajo coste, el cual está encargado del proceso de sensado, del procesamiento posterior de las medidas, y de la comunicación de las mismas [13]. Sin embargo, varios trabajos han sido realizados a fin de incrementar la flexibilidad de las plataformas de nodos, como resultado la utilización de dispositivos reconfigurables como las FPGA, FPAA y PSoC en nodos de WSNs son cada vez más usuales.

En [88–90] se presenta una estrategia de reconfiguración que optimiza el consumo de energía en nodos con hardware dinámicamente reconfigurable y que utilizan fuentes de energía renovable. Su plataforma de prueba es un nodo sensor implementado en una FPGA de bajo consumo, un procesador basado en el modelo SPARC V8 (Leon 3) y un puerto de comunicación ICAP (Internal configuration Access port) para la comunicación entre el procesador y la FPGA (Figura 2.11). Este trabajo plantea la reconfiguración HW a partir del nivel de energía disponible por el nodo. Sus resultados indican una mejora considerable en el ahorro de energía, al aplicar técnicas de reconfiguración parcial en su nodo. Para validar su estrategia se implementaron en la FPGA distintos algoritmos de procesamiento, como filtros FIR, códigos de encriptación AES o Transformadas de Fourier FFT, en la plataforma y se compararon los consumo de estas implementaciones contra implementaciones SW de los mismos algoritmos.

En el trabajo de Tesis presentado por Morales en [91], se proponen diversas arquitecturas que están compuestas por dispositivos reconfigurables. Se plantea la utilización de diversos dispositivos como FPGA (Spartan-3A de Xilinx) combinado con un FPAA (dpASP AN221E04 de Analog Devices) y un microcontrolador, como se muestra en la Figura 2.12. De esta forma, el FPAA implementa la interfaz analógica adecuada a cada tipo de sensor, realizando además las tareas de conversión analógica a digital. Al mismo tiempo, el FPGA implementa los bloques

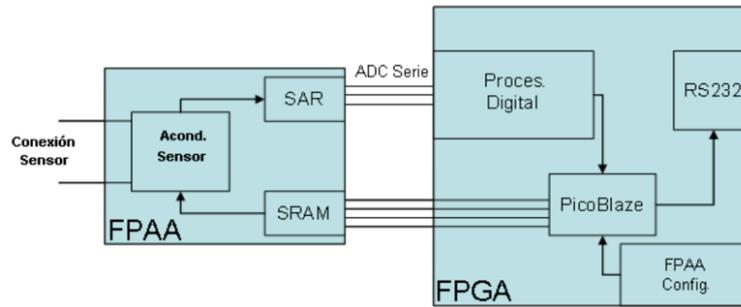


Fig. 2.12: Arquitectura FPGA + FPAA propuesta (Morales [86])

digitales más adecuados al tipo de sensor y proporciona la interfaz adecuada para los buses de comunicación. El uso de estos dos dispositivos en conjunto proporciona una mayor flexibilidad de la plataforma lo que permite la integración rápida de diversos sensores, interfaces analógicas múltiples y flexibles, así como arquitecturas digitales de alta complejidad. La idea fundamental en este trabajo es aprovechar las sinergias que se crean cuando se utilizan estos dos dispositivos reconfigurables. Pero no solo puede utilizarse éste sistema como plataforma de prototipado, sino que también se posibilita las capacidades de acondicionamiento auto-reconfigurables, los cuales permiten modificar las estructuras de procesamiento implementadas en el hardware de manera dinámica, beneficiando esto al rendimiento del sistema. La arquitectura propuesta en éste trabajo fue probada y aplicada tanto al monitoreo de variables ambientales, como a la medición de variables fisiológicas.

En [92] se plantea una plataforma de nodo reconfigurable para redes de sensores inalámbricas con aplicación a redes industriales utilizando la tecnologías IoT (Internet of Things). Su sistema utiliza un dispositivo CPLD, el cual simplifica el diseño de circuitos que hacen de interfaz con los diversos transductores que utiliza. Además, la plataforma utiliza el estándar ISO/IEC/IEEE 21451.2 lo cual permite la estandarización de su plataforma a otras redes de sensores inteligentes. En la Figura 2.13 se puede observar el diagrama en bloques del sistema propuesto en este trabajo. El dispositivo CPLD es el encargado de implementar las diversas interfaces necesarias en el nodo sensor.

En [93] se presenta una plataforma reconfigurable que utiliza un PSoC para desarrollar una interfaz denominada UISI (Universal Intelligent System on Chip Sensor Interface), orientada a sensores inteligentes y siguiendo la metodología IEEE 1451 [6]. Éste trabajo propone una plataforma con una etapa de adquisición de datos flexible tanto para sensores analógicos como digitales. Además, permite implementar ciertos circuitos de acondicionamiento según se el tipo de transductor que se desee utilizar. (sensores con interfaces

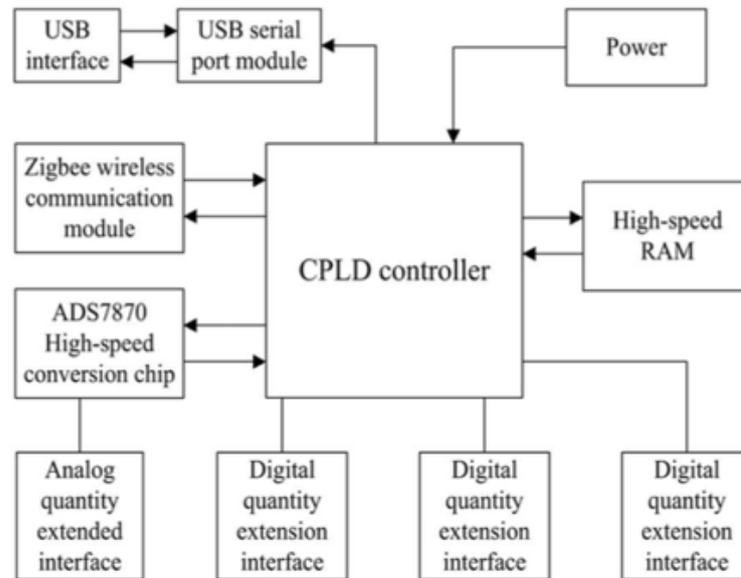


Fig. 2.13: Diagrama en bloque de la arquitectura propuesta en [92].

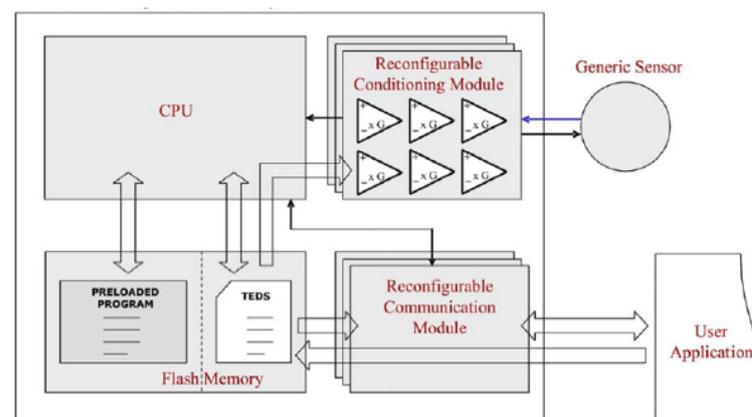


Fig. 2.14: Diagrama en bloques propuesto en Mattoli [93].

analógicos o digitales). El trabajo propone también, utilizar el TEDS del IEEE 1451 para almacenar cierta información a cerca de los circuitos de acondicionamiento de los transductores utilizados. Sin embargo, no se presenta algún esquema de cómo se implementaron este TEDS. El diagrama de bloques de la arquitectura de éste trabajo se muestra en la Figura 2.14.

2.5 CONCLUSIONES

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta cuando se pretende implementar una red de sensores inalámbricos, es el tipo de nodo que se implementará en dicha red. Numerosas líneas de investigación acerca de la redes de sensores han sido llevadas a cabo durante la última década. Mientras que algunas de estas investigaciones guardan similitudes

con la arquitectura propuesta en este trabajo de Tesis, otras se centran en filosofías totalmente distintas. Teniendo en cuenta que una de las aportaciones de esta Tesis es una arquitectura de nodo inteligente reconfigurable, cabe destacar que en este capítulo el estado del arte se ha enfocado precisamente a este tipo de arquitecturas que incluyen HW reconfigurable y en arquitecturas de sensores inteligentes basadas en la norma ISO/IEC/IEEE 21451x.

La gran diversidad de arquitecturas existentes de nodos para WSNs presenta un gran desafío, el cual consiste en mantener la ubicuidad y heterogeneidad de las WSNs, garantizando la escalabilidad, flexibilidad y la capacidad plug-and-play, características fundamentales de este tipo de redes de sensores. Por eso, es importante el uso de estándares internacionales que garanticen la interoperabilidad de las redes. Siguiendo este contexto la norma ISO/IEC/IEEE 21451x se presenta como una solución viable ante la dispersión de arquitecturas para nodos sensores. Esta norma propone un conjunto de interfaces que trata de separar el diseño de los transductores de la elección de las redes de comunicación, estandarizando las interfaces de los sensores y permitiendo la heterogeneidad de las redes. Sin embargo, la norma ISO/IEC/IEEE 21451x presenta ciertas características que hace dificultosa su implementación en redes de sensores inalámbricas. Características que intentan ser simplificadas en el Framework propuesto en este trabajo. Además, la norma ISO/IEC/IEEE 21451x, no contempla la utilización de dispositivos reconfigurables en los nodos sensores. Las plataformas presentadas con anterioridad, utilizan interfaces propietarias para manejar el proceso de reconfiguración del HW. Lo cual imposibilita que estos nodos puedan ser implementados en otras redes de sensores. Por esta razón en esta Tesis también se propone ampliar la norma ISO/IEC/IEEE 21451x para que esta pueda estandarizar el proceso de reconfiguración de nodos en redes de sensores inalámbricas.

Parte II

ANÁLISIS DE CONTENIDO

Capítulo 3

DISCUSIÓN DE LAS APORTACIONES

A partir de la revisión del estado de arte y del análisis del estado actual de las redes de sensores inalámbricas, podemos concluir que las WSNs se constituyen en una de las tecnologías de mucha relevancia en la actualidad y con un amplio campo de posibles aplicaciones [3]. A pesar de esto, las WSNs pueden ser consideradas aún como una tecnología emergente y desde nuestro punto de vista, requieren de maduración. Un ejemplo es el bajo nivel de heterogeneidad de los nodos en una misma red. Una de las razones, por las cuales las WSNs no han podido desarrollarse con mayor celeridad, es la utilización de protocolos o interfaces propietarias. Esta situación ha permanecido sin cambios significativos por más de una década, entendemos que aspectos económicos y de mercado podrían explicar la razón de esta realidad. Actualmente, las empresas no ven la necesidad de compartir sus protocolos o estandarizar las interfaces de sus dispositivos, ya que implementarlo, probablemente representaría compartir un espacio de su mercado con el consecuente aumento de la competencia a su producto.

No obstante, varias iniciativas han sido realizadas a fin de lograr la heterogeneidad en las WSNs. A ese respecto, cabe destacar el trabajo realizado por la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), y posteriormente por la ISO y el IEC, en el diseño e implementación de la norma IEEE/ISO/IEC 21451x. Esta norma ha planteado una forma de estandarizar la comunicación en las redes, en especial de las redes industriales; lo cual ha logrado un entorno donde se pueden implementar redes heterogéneas que se gestionan de manera homogénea. Como ha sido mencionado en el capítulo anterior, varios trabajos han sido llevados a cabo utilizando esta novel norma. Sin embargo, si consideramos el mercado actual de las redes de sensores, resulta fácil advertir que la norma aún no ha sido ampliamente acogida. En nuestra opinión, la complejidad relativa para la implementación de la norma representa una de sus mayores barreras. Cabe destacar, que el marco que define la norma es resultado de varios años

de investigación y que posee varios aspectos muy positivos. Por lo expuesto, esta Tesis propone la simplificación de determinados aspectos de la norma, proponiendo además como aporte incluir nuevas funcionalidades requeridas para el manejo eficiente de la reconfigurabilidad de los nodos.

En este capítulo, se describe el diseño y la implementación de un Framework que sigue los lineamientos de la norma manteniendo sus características elementales. Este Framework fue implementado utilizando dos metodologías. La primera plantea utilizar los periféricos de un SoC (Sistema en el chip) como módulos de implementación del Framework, haciendo uso de un firmware basado en librerías que permite la re-utilización del código implementado. En segundo lugar, se presenta la implementación del Framework basada en componentes siguiendo la filosofía definida por el sistema operativo TinyOS. Ambas implementaciones son puestas a prueba en dos proyectos experimentales orientados a la medición de variables medio-ambientales. El primer proyecto propone el transporte público como una red de monitoreo ambiental, para este proyecto el Framework se implementa en una red para aplicaciones del tipo ITS (Intelligent transportation System). El segundo campo de prueba fue el proyecto denominado FLORA, en el cual fue implementada una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de variables medio-ambientales en reservas naturales.

A partir de la presentación del Framework propuesto y, de la discusión de los resultados obtenidos en los proyectos experimentales mencionados previamente, se propone un método novedoso para la estandarización del proceso de reconfiguración de los nodos en redes de sensores inalámbricos inteligentes. El método está basado en la norma IEEE/ISO/IEC 21451x y, para lograr la gestión del proceso de reconfiguración se propone una nueva estructura para el TEDS definido en la norma. Cabe destacar que la propuesta fue presentada a miembros del grupo de trabajo encargado de la definición de la norma IEEE/ISO/IEC 21451x y la misma ha sido publicada en una edición especial del IEEE Sensor Journal.

3.1 ARQUITECTURA DEL FRAMEWORK PARA REDES DE SENSORES ESCALABLES

El planteamiento de soluciones para la gestión de redes de sensores heterogéneas basadas en protocolos, que permitan la interoperabilidad y la homogeneidad, es un problema emergente que presenta varios desafíos. El beneficio que puede lograrse gracias a la estandarización

de interfaces y de protocolos para el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas es fundamental con vistas a la ubicuidad de las redes de sensores, en este contexto, la norma ISO/IEC/IEEE 21451x surge como una solución a esta problemática. Sin embargo, la misma presenta algunas características que dificultan su integración en aplicaciones de redes de sensores inalámbricas.

Aunque el estándar ISO/IEC/IEEE 21451x define varias formas de unificar la comunicación entre sensores y la red de datos, aún siguen vigentes una serie de inconvenientes a resolver por ejemplo, el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-1 es relativamente complejo y por lo tanto resulta inadecuado para ser implementado en nodos con capacidad limitada de procesamiento. El Transducer Independent Interface (TII) definido por el estándar IEEE ISO/IEC/IEEE 21451-2 es inviable en una red de sensores de bajo costo, ya que requiere de un conector con diez pines para la comunicación entre el Transducer Interface Module (TIM) y el Network Capable Application Processor (NCAP). El conjunto de estándares ISO/IEC/IEEE 21451-3 y el ISO/IEC/IEEE 21451-4 no tuvieron mucho éxito en su implementación debido a su complejidad y en la actualidad ambos se encuentran en proceso de revisión. El estándar definido para las comunicaciones inalámbricas el ISO/IEC/IEEE 21451-5 especifica únicamente cinco protocolos de comunicación, aunque su implementación sigue siendo compleja considerando que no existen transceptores que implementen el estándar en su firmware.

No obstante, el modelo orientado a objetos planteado por el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-1 resulta muy interesante y su filosofía es utilizada en la definición del Framework propuesto en este trabajo. Es importante destacar que el estándar ISO/IEC/IEEE 21451.0 ha simplificado significativamente el planteamiento de la propuesta. Sin embargo, aun con las simplificaciones presentadas en la revisión de la norma, la misma resulta aún compleja y su implementación en sistemas con recursos limitados como las redes de sensores inalámbricas es intrincada. La idea que ha inspirado el planteamiento del Framework propuesto se fundamenta en el hecho que en principio, existe una gran cantidad de aplicaciones en las cuales las redes de sensores inalámbricas resultan de interés. Por lo tanto, se propone una plataforma capaz de adaptarse a una gran variedad de aplicaciones emergentes.

La propuesta de utilizar un Framework en el diseño de redes de sensores tiene como objeto solventar los problemas de compatibilidad derivados de protocolos y formatos de comunicación propietarios. Además, proporcionar un nivel adicional de homogeneización para el diseño y la gestión de los nodos sensores. En definitiva, la propuesta de esta Tesis plantea no únicamente

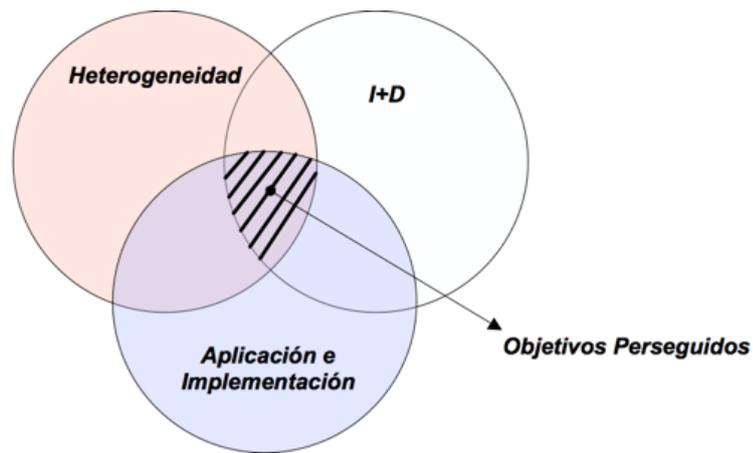


Fig. 3.1: Representación de los objetivos del Framework como intersección de las variables involucradas.

solucionar los problemas de compatibilidad entre los sensores, sino también proporcionar un Framework que permita el desarrollo unificado de los nodos para las redes de sensores inalámbricas.

Antes de definir el Framework propuesto, se presentará tres objetivos principales sobre los cuales se fundamenta la propuesta:

- El Framework está basado en la norma ISO/IEC/IEEE 21451x lo cual garantiza la heterogeneidad y la escalabilidad de los nodos y de la red de sensores.
- El Framework es relativamente sencillo de implementar y se basa en la filosofía de la programación orientada a objetos lo que permite su fácil implementación.
- El Framework es capaz de operar arquitecturas con nodos re-configurables a fin de incluir el mayor número posible de tipos de interfaces utilizadas en los transductores.

Considerando los objetivos mencionados es posible delimitar la intersección entre las variables involucradas, correspondientes a la heterogeneidad, el área de la investigación y desarrollo y el área de las aplicaciones, la que se corresponde con los objetivos del Framework propuesto (Figura 3.1).

Para asegurar la compatibilidad, el Framework adopta los criterios establecidos por la norma ISO/IEC/IEEE 21451x, utilizando el mismo formato de datos e interfaces para asegurar la compatibilidad con la norma. El Framework también proporciona los servicios básicos a los usuarios locales y remotos como está definido en el estándar.

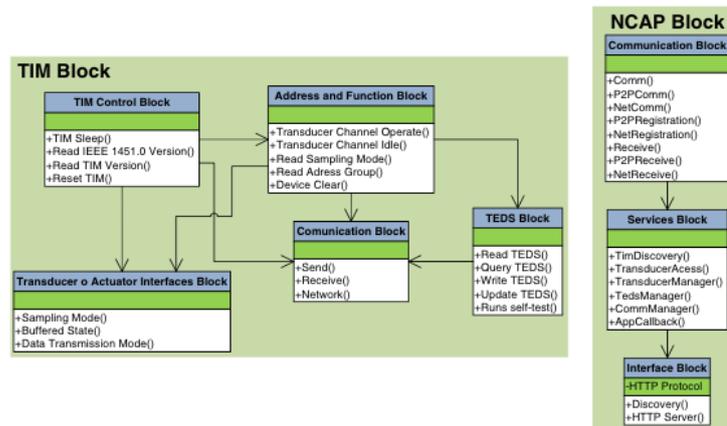


Fig. 3.2: Objetivos definidos en el TIM y NCAP.

Los objetos definidos por el Framework están basados en las dos entidades principales establecidas por la ISO/IEC/IEEE 21451x. Estas dos entidades son también adoptadas como objetos (TIM y NCAP). Los objetos NCAP y TIM son componentes de alto nivel en nuestra definición. Cada entidad puede ser separada en objetos más pequeños, haciendo posible la reutilización de estos componentes para diferentes tipos de sensores, todo ello sin depender de la capa física o de la red de datos utilizada para el transporte de la información. La Figura 3.2 muestra la estructura implementada en la entidad TIM y NCAP respectivamente.

Como puede observarse en el diagrama de la Fig.2, pueden ser definidos cinco bloques en el TIM: El bloque encargado de las comunicaciones, el bloque que gestiona y contiene los TEDS, el bloque donde están definidas las funciones básicas del TIM, el bloque que maneja las interfaces con los transductores o actuadores y el bloque de control del TIM que maneja los bloques de datos de cada canal. El bloque de comunicaciones debe implementar todas las interfaces definidas en la familia estándar ISO/IEC/IEEE 21451-5, además de simplificar la utilización de nuevas tecnologías y protocolos. Especialmente debe permitir la integración fácil de protocolos desarrollados en el área de investigación.

El bloque de TEDS contiene toda la información sobre el transductor, tales como parámetros de calibración, intervalos de medición, el número de identificación del sensor entre otros. El bloque transductor o actuador se compone de varias bibliotecas, permitiendo la gestión de los sensores analógicos o digitales. El bloque de dirección y función gestiona el control de cada transductor. Este bloque contiene una variedad de funciones que pueden leer o escribir cualquier sensor o actuador. La norma define un límite de 255 canales de transductor para cada TIM, por consiguiente, se han definido varios comandos para permitir la manipulación de todos

los canales disponibles. El bloque de TIM decodifica los comandos recibidos del NCAP u otro TIM.

El NCAP es la segunda entidad definida por el Framework basado en la norma ISO/IEC/IEEE 21451x. Esta entidad hace posible el acceso a la red de sensores inteligentes a través de Internet u otro tipo de red . En el NCAP, se definen los siguientes bloques: bloque de interfaz, bloque comunicación y bloque de servicio. El bloque de interfaz gestiona el enlace de comunicación con Internet, posibilitando el uso de diversos protocolos como el HTTP. El bloque de comunicación implementa todas las API's de comunicación definidas por el estándar ISO/IEC/IEEE 21451.0. El bloque de servicios contiene las funciones básicas definidas por la norma.

3.2 LA NORMA ISO/IEC/IEEE 21451X COMO FUNDAMENTO DEL FRAMEWORK

Una vez definido los objetos y bloques que conforman el Framework propuesto, es necesario considerar que el Framework será utilizado para la implementación de arquitecturas de nodos de redes de sensores inalámbricas, por lo tanto es necesario considerar las limitaciones de éstas arquitecturas. En el capítulo 2 de la Memoria se han detallado algunas de las limitaciones. En este contexto, resulta de interés la implementación del Framework en una plataforma reconfigurable ya que permitiría la adaptación del nodo ante determinados eventos, característica que abre posibilidades para nuevas aplicaciones , así como la posibilidad de probar nuevos conceptos los que podrían ser introducidos en diseños posteriores del nodo.

3.2.1 Implementación del nodo en una arquitectura empotrada

La elección de una arquitectura para la implementación del Framework propuesto es necesaria a fin de plasmar las características de escalabilidad y heterogeneidad deseadas. Por lo expuesto, consideramos que una arquitectura empotrada constituye una alternativa válida para implementar el Framework. Las arquitecturas para sistemas empotrados son las más utilizadas en la actualidad, presentando un bajo costo de implementación y por lo general un bajo consumo de energía. Aunque normalmente este tipo de plataformas poseen ciertas limitaciones HW, comparadas con arquitecturas modulares. Además, el desarrollo en el área de la microelectrónica ha posibilitado el desarrollo de dispositivos denominados SoC (System on

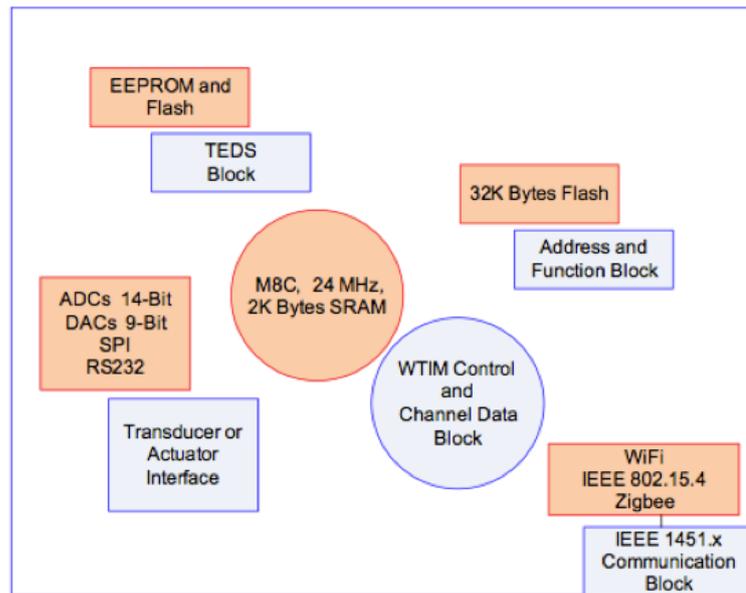


Fig. 3.3: Framework Implementado en arquitectura PSoC 1.

Chip). Estos dispositivos empotrados cuentan con una gran variedad de periféricos en un solo chip, lo cual amplía sus recursos HW y por ende su flexibilidad.

En este trabajo, se ha seleccionado el dispositivo PSoC (Programmable System on Chip), de la empresa Cypress [94]. Este dispositivo cuenta con un microcontrolador, un módulo de memoria no volátil, un sistema analógico programable y un sistema digital programable. En la Figura 3.3, se puede observar el mapeamiento de cada uno de los bloques del Framework utilizando los periféricos disponibles en la arquitectura PSoC.

Como puede apreciarse en el diagrama de la Figura 3.3, cada periférico del PSoC es capaz de desempeñar las tareas establecidas en los bloques del Framework. La integración se complementa con el desarrollo de unas librerías que contienen las definiciones establecidas por la norma ISO/IEC/IEEE 21451.0.

3.2.2 Implementación del nodo basado en el Tiny OS

El TinyOS es considerado como el sistema operativo estándar de-facto en las WSNs. Principalmente es utilizado en el área de la investigación, ya que facilita el diseño y la implementación de nuevos protocolos de comunicación y aplicaciones específicas. Como ha sido expuesto en el capítulo anterior, el TinyOS es un sistema operativo basado en eventos, que consta de una pila de tareas especialmente diseñado para su utilización en la implementación de protocolos de redes de sensores inalámbricas. Esta basado en el lenguaje NesC, un dialecto del C, el cual permite el desarrollo de componentes. Todas las aplicaciones escritas en NesC están

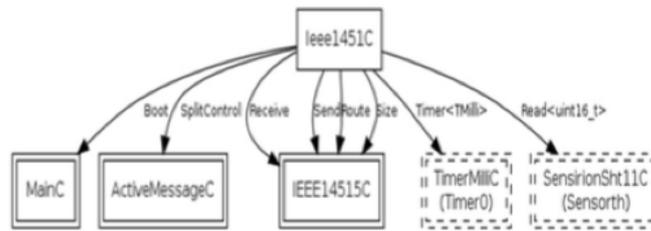


Fig. 3.4: Implementación de la norma ISO/IEC/IEEE 21451.0 en el TinyOS.

organizadas en componentes, que a su vez poseen interfaces que son bidireccionales. El TinyOS proporciona un alto nivel de abstracción de Hardware, lo cual incrementa la portabilidad y simplifica el desarrollo del Software [95]. Sin embargo, el TinyOS solo puede ser utilizado en algunas plataformas existentes y su portabilidad resulta relativamente complicada [96].

La integración de la norma ISO/IEC/IEEE 21451x utilizando el TinyOS requirió la implementación de las dos entidades definidas en la norma. El WTIM es implementado en cada uno de los nodos de la red (Plataformas TelosB en este trabajo) y el NCAP se implementa parcialmente en el nodo Sink. El WTIM utiliza las interfaces nativas del TinyOS para la comunicación y control de varios componentes de la plataforma TelosB. Estas interfaces permiten por ejemplo, la comunicación y el control del dispositivo de radio CC2420. El NCAP implementado parcialmente en el nodo Sink de la red, utiliza una interfaz serial para transferir los datos a un ordenador.

En la Figura 3.4 puede observarse el diagrama de componentes requeridos para la implementación de la norma en el TinyOS. Cada recuadro representa un componente, los recuadros con líneas punteadas son componentes genéricos implementados por el TinyOS, los demás son componentes de configuración. El componente Ieee1451C es el componente que contiene toda la norma.

La comunicación con el protocolo de ruteo se hace a través de simples interfaces (Figura 3.5). Se necesitan solo cuatro interfaces entre el componente de la norma y el del protocolo de ruteo. El diseño por componentes definido por el TinyOS hace posible la integración de la norma con diversos protocolos de ruteo de una manera sencilla. La implementación de la norma se realizó utilizando el TelosB y el CM3300 sin necesidad de modificar el componente que define la norma.

Con estas dos implementaciones hemos probado las características de flexibilidad y portabilidad del Framework propuesto. Tanto en la implementación basada en periféricos Hardware, como en la implementación basada en componentes Software, la implementación

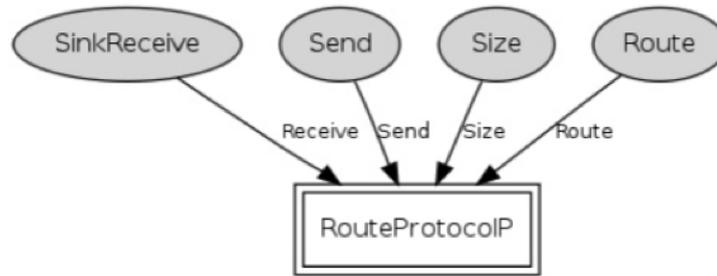


Fig. 3.5: Interfaces requeridas para comunicarse con el componente del protocolo de ruteo.

del Framework ha resultado relativamente sencilla. Una vez definidas las implementaciones, el Framework es puesto a prueba en dos proyectos orientados al monitoreo de variables medio ambientales. A continuación se presentan mayores detalles de la implementación y se discuten los resultados.

3.2.3 Aplicaciones del Framework propuesto en sistemas ITS

Los Sistemas de transporte Inteligente (ITS, por sus siglas en ingles) están constituidos por un amplio conjunto de tecnologías aplicadas e integradas a sistemas de transporte para otorgar seguridad, ahorrar tiempo y recursos a los usuarios. Además, permiten la gestión de las vías utilizadas, postergando la necesidad de inversión en su mantenimiento [97]. Los ITS corresponden a sistemas en los cuales se ha aplicado e integrado tecnologías de información y control para mejorar sus operaciones. Esta amplia definición, permite recoger la enorme diversidad de aplicaciones existentes, en investigación y desarrollo, que pretenden otorgar seguridad, ahorrar tiempo y/o recursos a los usuarios.

En el primer y segundo artículo presentado en este libro [97], [98] se propone la utilización del sistemas del transporte público de la ciudad de Asunción-Paraguay, como nodos de una red inalámbrica, el objetivo es el monitoreo de variables medio-ambientales. Como puede observarse en la Figura 3.6, cada bus del transporte público cuenta con unos transductores de gas, de temperatura, GPS, entre otros.

En cada nodo de la red (bus de transporte público), el Framework propuesto fue implementado siguiendo la filosofía que utiliza los recursos HW de un sistema empotrado. En la Figura 3.7 puede observarse la implementación del WTIM de la red de sensores. La implementación del Framework se realizó en un dispositivo PSOC 1, lo cual facilitó la implementación del mismo, ya que estos dispositivos cuentan con varios periféricos HW.

Esta red permitió el monitoreo de variables tales como la temperatura, humedad y CO .

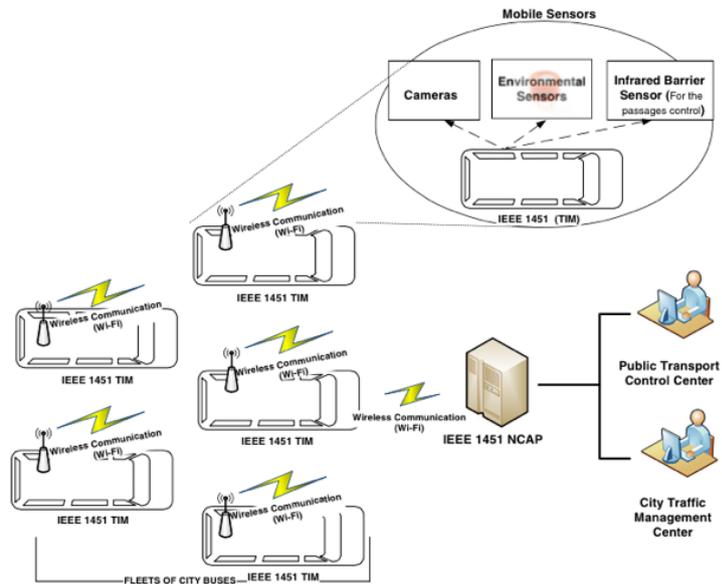


Fig. 3.6: Red de sensores implementada en unidades del transporte público e implementada en la ciudad de Asunción.

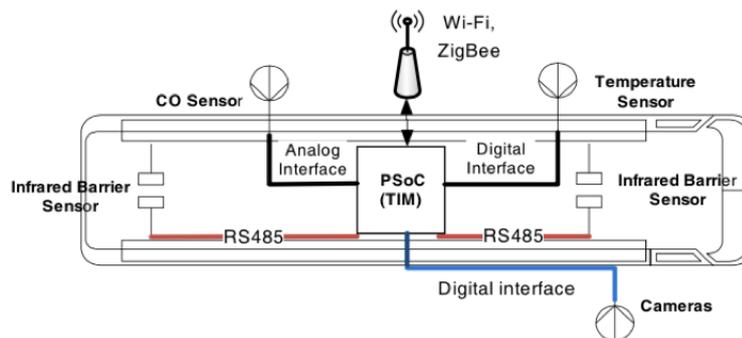


Fig. 3.7: WTIM implementado en un bus de transporte.

Tabla 3.1: Medidas obtenidas en el recorrido por la Avda. Mariscal Lopez.

Puntos	Hora de la medida	Coordenada Longitud	Coordenada Latitud	Temperatura (°C)	Monóxido de Carbono (ppm)
Punto de Inicio	12:00 pm	25° 17.709'S	57° 34.632'O	33	36,7
Punto 1	12:07 pm	25° 17.691'S	57° 34.686'O	32,5	38,9
Punto 2	12:11 pm	25° 17.618'S	57° 34.839'O	32,6	40
Punto 3	12:17 pm	25° 17.552'S	57° 35.001'O	33,8	38,9
Punto 4	12:20 pm	25° 17.476'S	57° 35.170'O	32,5	42
Punto Final	12:27 pm	25° 17.391'S	57° 35.355'O	35,4	36,8

Para desplegar los resultados se desarrolló un software que permitía ver las variables obtenidas por medio de la red de sensores dispuestos en el bus de transporte. En la Tabla III y la Figura 3.8 se pueden observar algunas medidas adquiridas por la red de sensores.

Para la implementación del Framework se utilizó el 52% de la memoria no volátil del PSoC1 (de 32 Kbytes) y el 11 % de su memoria RAM (de 2kBytes). Esta implementación fue compilada con una versión libre del compilador y podría ser reducida en tamaño si se hubiera utilizado una versión con licencia del compilador.

3.2.4 Aplicaciones del Framework propuesto para el monitoreo de reservas naturales

La segunda utilización del Framework fue para el desarrollo de un sistema de medición en el marco del proyecto de monitoreo de variables medio ambientales en refugios naturales. El proyecto denominado FLORA, fue desarrollado conjuntamente por la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción y el Parque Tecnológico de Itaipu. Los objetivos del proyecto fueron el diseño y la implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de la reserva natural denominada Tati-Yupi y del Zoológico de la Itaipu margen derecha. La Figura 3.9 muestra la arquitectura de red implementada en este proyecto.

Para la implementación de los diferentes nodos, se utilizó la plataforma TelosB y su variante el CM3300 como nodos sensores y repetidores para la red. El sistema operativo TinyOS fue utilizado para el desarrollo de un nuevo protocolo de ruteo [54] y el Framework

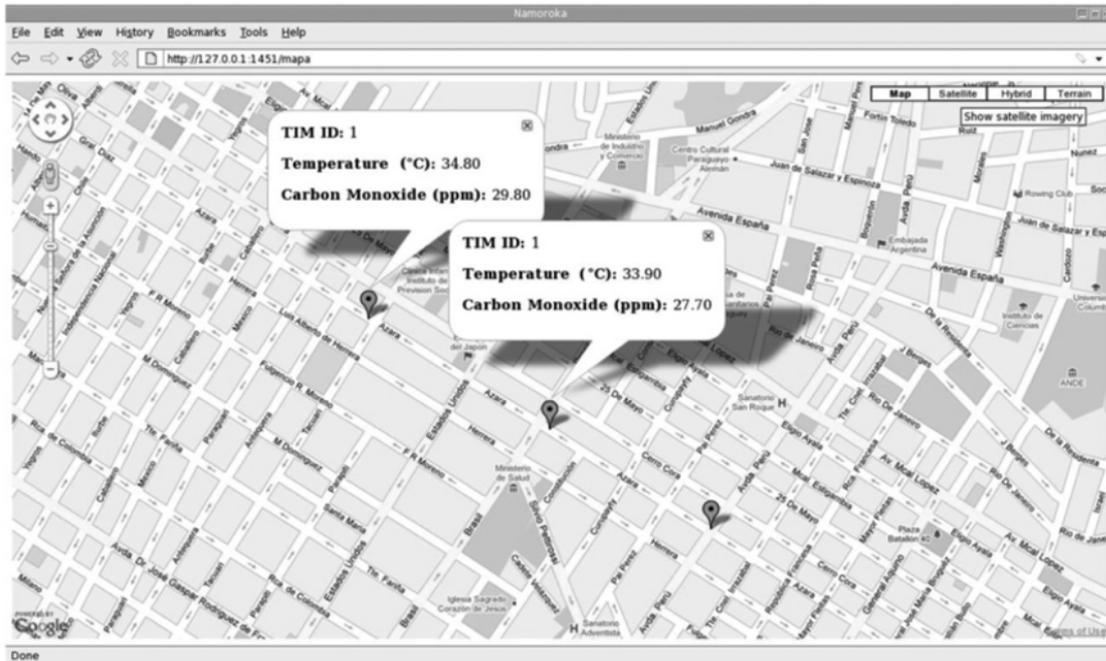


Fig. 3.8: Medidas obtenidas en la ruta Mariscal López de la ciudad de Asunción.

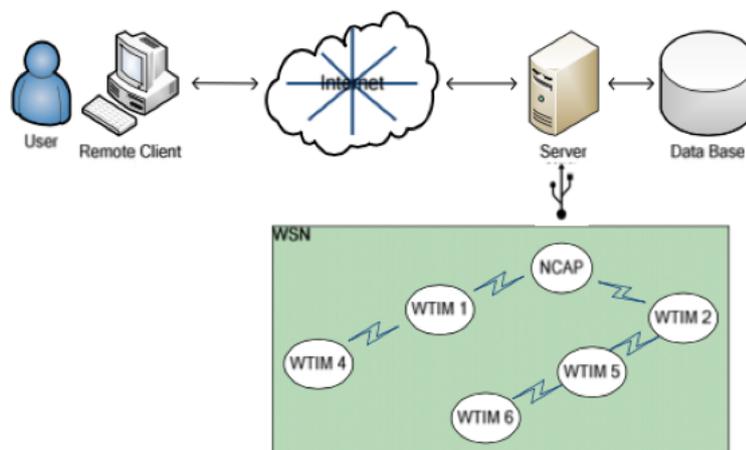


Fig. 3.9: Arquitectura de red implementada en el proyecto Flora.



Fig. 3.10: Implementación de la red de sensores en el zoológico de Itaipu.

propuesto fue utilizado para estandarizar los nodos de las redes. Como ha sido descrito en la sección 3.1.1.1, el Framework fue implementado en el TinyOS mediante el diseño de módulos escritos en NesC. La implementación del Framework requirió solo del 29% de la memoria RAM y del 56% (incluyendo el protocolo de ruteo) de la memoria ROM del TelosB.

Fueron desplegados más de 50 nodos en las dos localizaciones mencionadas previamente, los nodos fueron dotados con transductores de distintos tipos según su localización siendo alimentados por baterías recargables tipo A. La 3.10 presenta la disposición de los nodos que conforman la red desplegada en el zoológico de la hidroeléctrica de Itaipu situada en margen derecha.

Para la medición de las variables medioambientales, fueron diseñadas tres circuitos acondicionadores y sus respectivas placas fueron diseñados y montados (Figura 3.11). En cada una de las placas, fueron montados transductores de intensidad de luz, monóxido y bióxido de carbono, temperatura y humedad. Las placas sensoriales fabricadas podían ser conectadas a cualquier nodo, esto gracias a que los componentes del Framework permiten el reconocimiento automático del tipo de placa conectada dotando al sistema de la característica de plug and play.

El NCAP permite visualizar las medidas de los diversos sensores on-line a través de una interfaz web, la cual ha sido diseñada siguiendo una metodología hierárquica y de informaciones desplegadas. En la Figura 3.12 al seleccionar un nodo en la página web se despliegan los valores medidos de las diferentes variables del sensor. En la Figura 3.13, puede observarse otra

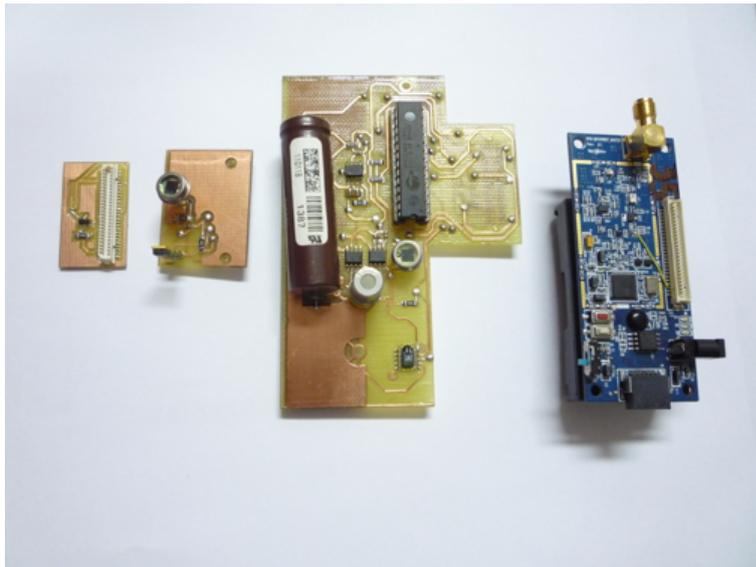


Fig. 3.11: Diferentes circuitos acondicionadores y placas diseñadas para el proyecto denominado FLORA.

interfaz de las variables medidas, en este caso puede apreciarse la variación temporal, así como los datos de configuración y localización del nodo. El diseño de la red esta basada en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451.0 lo que posibilitó la rápida y sencilla integración de nuevos nodos sin tener que preocuparnos del tipo de placa de transductores.

3.3 RECONFIGURABILIDAD DE LOS NODOS

SENSORES

Quizás uno de los objetivos más relevantes a alcanzar por las redes de sensores sea su ubicuidad. Para lograrlo, se requiere que los nodos sean suficientemente flexibles de manera que puedan ser utilizados en diversos ambientes y en distintas aplicaciones sin tener que modificar significativamente la estructura del nodo. Por lo tanto, resulta de interés considerar determinados aspectos para el diseño de las estructuras de los nodos. En ese sentido, dos de los aspectos más importantes lo constituyen la escalabilidad y la flexibilidad de los nodos, ya que ambas son requeridas para lograr la ubicuidad de los nodos sensores.

La ubicuidad representa un desafío y ha sido tema de investigación de varios grupos de investigación [26, 99, 100]. Algunas de las investigaciones realizadas tienen el mismo enfoque de la plataforma presentada en este trabajo de Tesis, otras se centran en conceptos relativamente diferentes. Sin embargo, a partir del estudio detallado de las plataformas de nodos

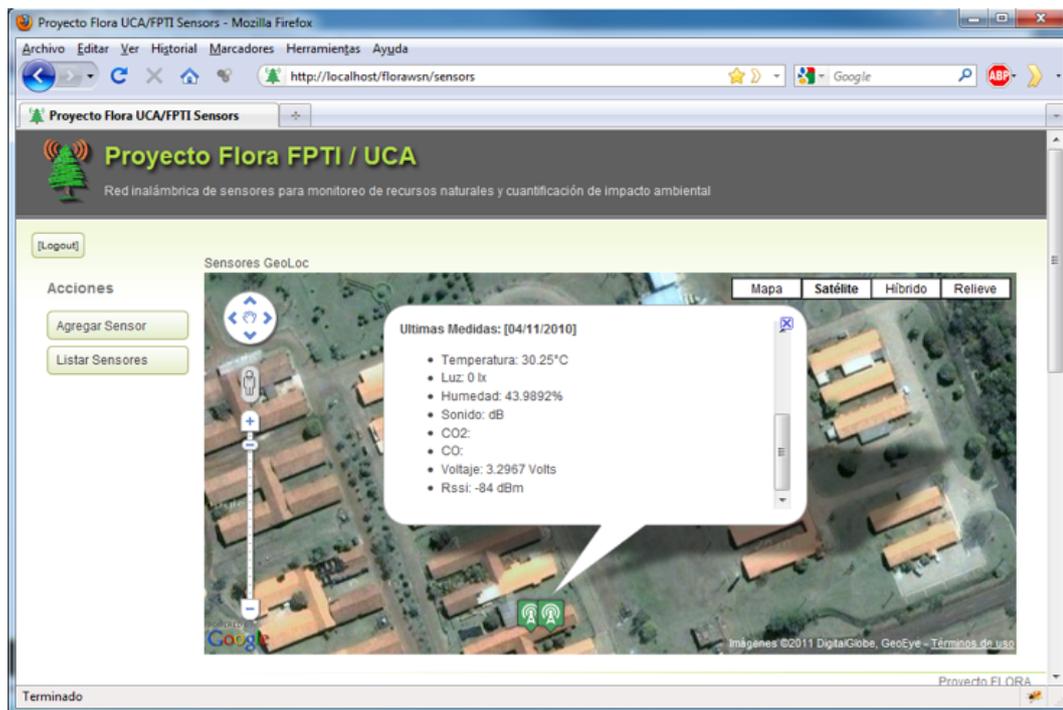


Fig. 3.12: Interfaz web desarrollada en el proyecto FLORA.

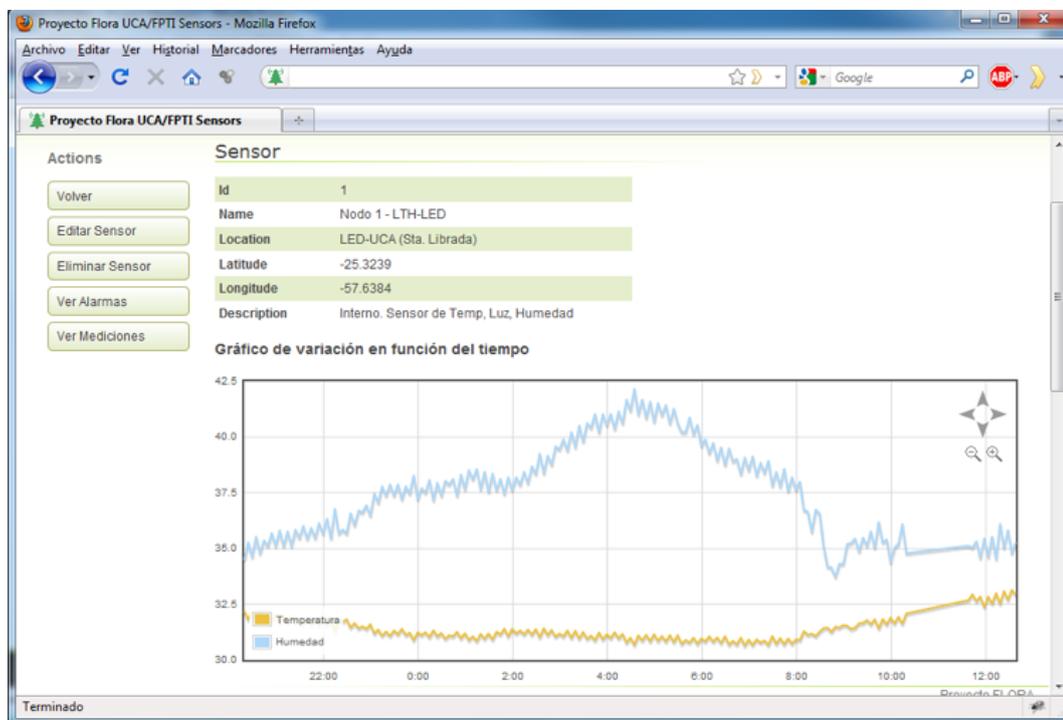


Fig. 3.13: Herramienta que permite la visualización de las variables obtenidas.

actuales, podemos afirmar que las plataformas con capacidades de reconfiguración pueden ser consideradas como una solución viable al desafío que plantea la ubicuidad de las redes de sensores. La capacidad de reconfiguración del nodo incrementaría la flexibilidad de los mismos, la robustez, facilitando la gestión y, por ende motivar la ubicuidad de los sensores.

De la revisión bibliográfica, se han identificado varias plataformas que presentan capacidades de reconfiguración en diferentes niveles. Sin embargo, en todas las plataformas los procesos de reconfiguración utilizan procedimientos propietarios [101], lo cual presenta una característica no deseable para el logro del objetivo. No se ha encontrado en la literatura especializada, un procedimiento basado en estándares que gestione la capacidad de reconfiguración de los nodos sensores en las redes. Por lo expuesto, consideramos como una de las aportaciones más relevantes de este trabajo, el desarrollo de un Framework que pueda gestionar nodos con capacidades de reconfiguración basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 21451x con vistas a facilitar la escalabilidad de los nodos.

Por lo expuesto, en este trabajo de Tesis se propone un método de estandarización basado en el TEDS de la norma ISO/IEC/IEEE 21451x para la gestión de la reconfigurabilidad del nodo. El método de estandarización propuesto es una variante del Framework propuesto y permite que en el proceso de reconfiguración se utilicen los procedimientos establecidos en la norma, sustentada en la arquitectura ISO/IEC/IEEE 21451x. Cabe destacar, que la gestión de la reconfigurabilidad de los nodos no está prevista en la norma ISO/IEC/IEEE 214510, no obstante, la flexibilidad de la misma nos permite efectuar la propuesta en el marco de este trabajo.

3.3.1 La flexibilidad de la norma ISO/IEC/IEEE 21451.x

De la revisión de la literatura se ha encontrado varios trabajos que plantean nuevas aplicaciones para el TEDS descrito en la norma ISO/IEC/IEEE 21451.x. En principio, el TEDS fue concebido como una memoria no volátil, la cual era predefinida por el fabricante del sensor y no podía ser alterada por el usuario. Sin embargo, la filosofía de código abierto planteada por el estándar ha posibilitado definir nuevos usos para el TEDS. A continuación presentaremos algunos de los trabajos más relevantes que proponen usos novedosos para el TEDS.

Giorgi et al. [102], plantean utilizar el estándar ISO/IEC/IEEE 21451-0 para la gestión inteligente del sistema de alimentación de los nodos sensores inalámbricos. Para el efecto, el trabajo propone un nuevo TEDS, a fin de realizar una estimación de los niveles de energía

críticos del nodo inalámbrico. Los autores realizan un mapa del nivel de energía de los nodos sensores de la red, distinguiendo si los nodos operan con fuentes de energía fija o baterías recargables. A partir del mapa de energía, la red puede modificar su topología evitando la sobrecarga de mensajes de un nodo con bajo nivel de batería, ya que de lo contrario el nodo dejaría de operar. El mapa también indica el estado de la batería de cada nodo y si la misma requiere ser cambiada. La información requerida para el mapeamiento de la energía se encuentra codificada en el nuevo TEDS, siguiendo los lineamientos definidos por la norma.

Zangl et al. presentan un similar [103] donde también se plantea un TEDS para el manejo de la energía en las redes WSNs. Sin embargo, este trabajo utiliza una filosofía diferente, en vez de describir el tipo de fuente de energía y su estado, se realiza un modelado matemático del nodo considerando el nivel de excitación y la resolución de la medida obtenida con el sensor. Utilizando el modelo, se plantea modificar la precisión de la medida como una relación de compromiso con el consumo del nodo. Con este mecanismo, se conseguiría extender el tiempo de operación del nodo relajando la precisión de la medida.

Morello en [104] propone mejorar el rendimiento de los sensores biomédicos inteligentes con una modificación del TEDS. Este trabajo innovador, propone utilizar patrones estandarizados de señales biomédicas, para determinar si la medida obtenida por el sensor se ajusta a ellas, y así evitar el envío de medidas incorrectas o no validas a través de la red. Este trabajo abre las puertas a un gran número de aplicaciones para el TEDS en el área del procesamiento de señales. Es importante destacar, que todos estos trabajos proponen la utilización del TEDS definido en el estándar orientado a nuevas tareas que no habían sido consideradas en el momento de su definición. Estos trabajos representan algunas de las nuevas funcionalidades que están siendo planteadas para el TEDS definido en la norma.

3.3.2 TEDS propuesto para gestionar la reconfiguración basado en el ISO/IEC/IEEE 21451x

Si consideramos la idea en la cual se basa el TEDS, podemos afirmar que su estructura describe las características fundamentales del sensor al cual está asociado. Esta estructura es utilizada en los trabajos citados anteriormente para describir otras características de la red o de la señal medida. En este trabajo se propone que la estructura del TEDS pueda ser utilizada para describir el esquema del nodo sensor y no únicamente las características del transductor. Esto implica que la la modificación propuesta para el TEDS, respeta lo definido por el estándar

pero mantiene su estructura y la misma filosofía, con lo cual es posible describir los circuitos de acondicionamiento implementados en el nodo sensor. A continuación se describe la propuesta con mayor detalle.

Los TEDS obligatoriamente requeridos por el estándar son cuatro, siendo los demás opcionales. Los TEDS obligatorios son:

- **Meta-TEDS:** Define parámetros de tiempo y que son validados para su utilización por el NCAP para poner los valores de ‘time-out’.
- **‘TransducerChannel’ TEDS:** Proporciona los parámetros físicos utilizados son utilizados para la medida y control, también determina el rango de operación del transductor.
- **User’s Transducer Name TEDS:** : Está planificado para proporcionar un campo para el usuario del transductor y almacenar el nombre con el que el sistema denominará al transductor.
- **PHY TEDS:** Es independiente al medio físico de comunicación utilizado para conectar el TIM al NCAP y no se encuentra definido en el estándar, aunque el método de acceso si está definido.

Estos TEDS como los demás opcionales siguen la misma estructura para su implementación. El primer campo del TEDS indica la longitud, seguidamente están los campos definidos para contener la información del TEDS y, finalmente se reserva un campo para de Checksum que sirve para verificar la integridad del TEDS. En la tabla 3.2 puede observarse la estructura de cada campo del TEDS utilizando el formato Tipo/Longitud/Valor (TLV).

Tabla 3.2: Formato Tipo/Longitud/Valor.

Campo	Descripción
Tipo	Este código identifica el campo contenido en el TEDS con el valor de este campo
Longitud	Este número indica la cantidad de octetos del campo
Valor	Este campo contiene la información del TEDS

Denominaremos al TEDS propuesto como Reconfigurable TEDS o TEDS de reconfiguración, el TEDS propuesto contiene toda la información necesaria para realizar la

reconfiguración del nodo. Para llevar a cabo esta tarea, es necesario primeramente mapear los recursos reconfigurables de los dispositivos que integran el nodo. Desde el punto de vista de la implementación, esta tarea es la más complicada en el proceso de definición del nuevo TEDS. Sin embargo, una vez realizado el mapeo de los recursos reconfigurables, la reconfiguración resulta una tarea sencilla resultando además ser compatible con todos los dispositivos de la misma clase. Por lo expuesto, se requiere estructurar un único TEDS por cada clase de dispositivo.

3.3.3 Implementación del nodo sensor reconfigurable utilizando el PSoC

5

Para la implementación del TEDS propuesto es necesario contar con dispositivos con capacidad de reconfiguración. En principio, podemos considerar tres tipos distintos de dispositivos reconfigurables, los cuales son usualmente utilizados en las WSNs. Los FPGAs que comúnmente son utilizados para implementar interfaces digitales o algoritmos de procesamiento, los FPAA que se utilizan para realizar circuitos de acondicionamiento analógicos y los PSoC, que por sus características permiten realizar tanto circuitos digitales como analógicos. Es importante considerar que no todos los modelos de estos dispositivos permiten una reconfiguración dinámica en el HW. Sin embargo, en este trabajo nos hemos centrado en los dispositivos que permiten este tipo de reconfiguración.

Como plataforma de prueba se ha seleccionado el dispositivo PSoC 5 de la empresa Cypress [94], este dispositivo integra módulos de circuitos digitales y analógicos, lo cual brinda bastante flexibilidad para su utilización en redes de sensores. Los dispositivos mencionados permiten la reconfiguración de su HW a través de la modificación de registros. En particular, los PSoC y los FPAA utilizan registros específicos que permiten configurar su HW. Por lo tanto, se requiere realizar un mapeo de los registros de cada dispositivo, a fin de poder modificarlos externamente. La propuesta de estructura definida en el TEDS permite efectuar este mapeamiento de una manera ordenada y simple, ver (Figura 3.14). En la Tabla 3.3 se detallan los bloques analógicos del dispositivo PSoC 5 clasificados según su función, la cantidad de bytes requeridos para describir cada uno de estos bloques y, las funcionalidades que soportan.

Para la descripción del mapeamiento nos hemos enfocado en los componentes analógicos del PSoC 5, considerando que los transductores utilizados para el monitoreo de gases

Tabla 3.3: Estructura requerida para definir los bloques analógicos del PSoC 5.

Bloques	Tamaño (bytes)	Descripción
SC/CT	32	Configuración del amplificador (PGA, TIA, Inv-PGA), ganancia, potencia, ruteo.
OP-amp	20	Configuración del amplificador (PGA, TIA, Inv-PGA), ganancia, potencia, ruteo.
SAR ADC	16	Resolución, Ruteo
Delta Sigma ADC	8	Resolución, Ruteo, Tiempo de muestro
DAC	20	Rango de operación, Valor de conversión
GPIO	5	Información de ruteo
Otros	6	Reservado

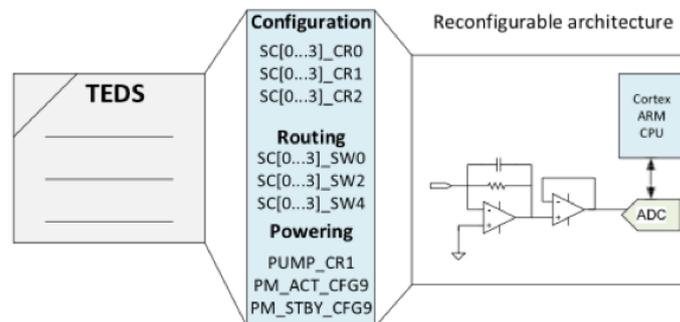


Fig. 3.14: Estructura del TEDS utilizada para describir los bloques HW del PSoC.

normalmente poseen interfaz analógica. En la literatura consultada, la reconfiguración de los nodos sensores de las WSN se centran en dispositivos digitales. Sin embargo, existe una gran variedad de transductores analógicos que resultan imprescindibles para determinadas aplicaciones. Por lo expuesto, en este trabajo se plantea una arquitectura reconfigurable optimizada para el acondicionamiento de señales provenientes de transductores analógicos.

La Tabla 3.4 describe con mayor detalle los campos definidos para la descripción de los amplificadores operacionales del PSoC 5. Estos campos pueden modificar el modo de operación del amplificador, su consumo y como están conectadas sus entradas y sus salidas.

Tabla 3.4: Estructura de campos requeridos para definir las conexiones de los amplificadores operacionales en el PSoC 5.

Campo	Valor	Descripción
On/Off	–	Indica si el operacional está habilitado o no
Modo	0x00 Amplificador sin configuración	Este campo indica la configuración del operacional
	0x01 Amplificador Seguidor	
	0x02 Amplificador Inversor	
	0x03 Amplificador No inversor	
Potencia	0x00 Mínima	Este campo indica la potencia del operacional
	0x01 Baja	
	0x02 Medio	
	0x03 Máxima	
Vn	0x00 No conectado	Este campo indica donde está conectada la terminal negativa del operacional
	0x01 Bus	
	0x02 Bus	
Vp	0x00 No conectado	Este campo indica donde está conectada la terminal positiva del operacional
	0x01 VREF	
	0x02 Bus 1	
	0x03 Bus 2	
	
	0x07 Bus 7	

Para realizar la reconfiguración de una manera sencilla, se desarrolló un interfaz gráfica (GUI) la cual permite generar el TEDS de manera automática, ver Figura 3.15. El GUI permite la modificación de cada uno de los parámetros de los distintos componentes analógicos del dispositivo. También permite modificar el ruteamiento interno entre los componentes, el microcontrolador integrado y, con los pines de entrada y salida. Una vez realizada las

conexiones, el usuario puede generar el TEDS y enviarlo de forma inalámbrica al nodo que desea modificar. En el nodo (WTIM), el TEDS es recibido y procesado para iniciar el proceso de reconfiguración. Seguidamente, el TEDS es registrado tanto en el WTIM como en la base de datos del NCAP. Para la gestión de los nodos de la red, es fundamental que ambos TEDS contengan la misma información, de manera a evitar posibles fallas en la lectura de los transductores.

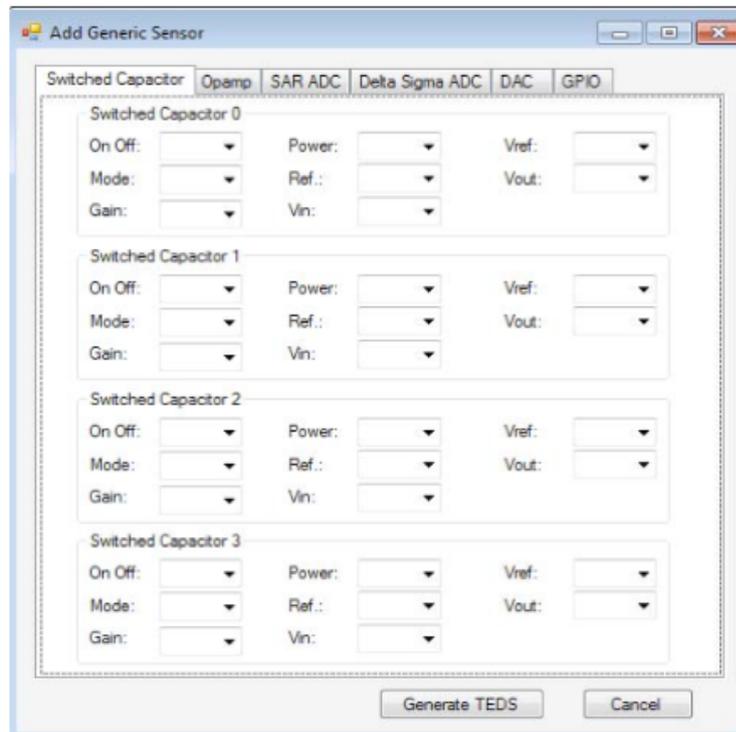


Fig. 3.15: Aplicación desarrollada para configurar el nuevo TEDS.

3.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se han expuesto y discutido el Framework propuesto y el TEDS diseñado en los Artículos 1 y 4 respectivamente. La flexibilidad que ofrece el Framework propuesto fue validado en dos proyectos debidamente descritos, en los cuales se ha implementado el Framework en distintos tipos de plataformas para redes inalámbricas. El primer proyecto implementa el Framework en un dispositivo empotrado y es implementado en una red de sensores con el fin de monitorear la temperatura, humedad, y concentración de gases nocivos en la ciudad de Asunción-Paraguay. El segundo proyecto denominado proyecto FLORA, permitió el despliegue de más de 50 nodos inalámbricos para el monitoreo de la reserva

natural Tati-Yupi y el zoológico de la Itaipu binacional. En este proyecto la implementación del Framework se realizó utilizando el sistema operativo TinyOS. El nuevo TEDS propuesto, permite la estandarización del proceso de reconfiguración de nodos sensores. El TEDS fue implementado en diversas pruebas de laboratorio, las cuales dieron como resultado diversas publicaciones [105–109]. En estas publicaciones se detallan las características del TEDS y las modificaciones que se tuvieron que implementar en la norma ISO/IEC/IEEE 21451.x.

Chapter 4

PRINCIPALES APORTACIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En este último apartado, se presenta un resumen de las principales aportaciones sobre los trabajos realizados en esta tesis en relación al diseño, implementación y despliegue de redes de sensores inalámbricas. El objetivo de este trabajo de investigación ha sido el desarrollo de un Framework para el diseño de arquitecturas escalables de nodos para redes inalámbricas que permita la integración de sensores heterogéneos y plataformas reconfigurables en este tipo de redes.

4.1 PRINCIPALES APORTACIONES

Las principales aportaciones de este trabajo ya han sido destacadas en los capítulos previos. No obstante, son presentadas a continuación las que se consideran de especial relevancia:

- Se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de las redes de sensores inalámbricas, las arquitecturas de los nodos sensores y las plataformas disponibles para el diseño de este tipo de redes. A partir de este análisis, considerando los requerimientos de las redes de sensores actuales, se ha propuesto una arquitectura de red inalámbrica para el monitoreo de variables medio-ambientales en aplicaciones de sistemas de transporte

inteligentes (ITS, por su siglas en inglés), la cual está basada en la familia de estándares ISO/IEC/IEEE 21451-x.

- Adicionalmente, y basado en la aportación previa, se propone una modificación al Framework de forma a incluir la gestión de arquitecturas escalables de nodos en redes inalámbricas. Este nuevo Framework plantea la integración del sensor inteligente, definido por la norma ISO/IEC/IEEE 21451-x con el sistema operativo para redes de sensores inalámbricas denominado TinyOS. El objetivo de la propuesta es fortalecer las características de escalabilidad y ubicuidad de los nodos, permitiendo el uso de sensores heterogéneos en la red. El funcionamiento adecuado y la flexibilidad de este Framework ha sido verificado en el monitoreo y registro de variables medio-ambientales para la vigilancia y preservación de reservas naturales en el marco del proyecto FLORA.
- Asimismo, se ha propuesto un procedimiento para la estandarización del proceso de reconfiguración de nodos sensores asociados a redes inalámbricas. Para el efecto, se ha definido un nuevo datasheet electrónico (TEDS) asociado al estándar ISO/IEC/IEEE 21450, para posibilitar la reconfiguración del hardware de acondicionamiento de señales del nodo sensor. Este nuevo TEDS ha sido implementado y probado en una red de monitoreo de variables medio-ambientales, demostrando su utilidad para aplicaciones reales. Consideramos que este aporte abre un amplio espectro de posibilidades para la gestión inteligente de los nodos sensores en cuanto a su adaptabilidad al entorno de operación y al consumo de los mismos.

4.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como previamente mencionado, el objetivo de este trabajo de investigación ha sido el desarrollo de un Framework para el diseño de arquitecturas escalables de nodos para redes inalámbricas que permita la integración de sensores heterogéneos y plataformas reconfigurables. Consideramos que se han cumplido con los objetivos propuestos en la Tesis, aunque somos conscientes de que aún queda mucho camino por recorrer. En ese sentido, podrían mejorarse varios aspectos del Framework, algunos de los cuales son citados a continuación:

- Puede resultar de interés la integración del Framework con el protocolo IPv6, esto

permitiría la combinación de las redes implementadas con el concepto de Internet de las cosas (Internet of Things o IoT, por sus siglas en inglés). De esta manera sería posible la interconexión digital de cualquier red de sensores a Internet, como un objeto más de la red.

- El trabajo se ha centrado en el estudio de las redes de sensores inalámbricas. Sin embargo, existen en la actualidad una gran cantidad de redes conectadas de forma física a través de cableado físico, como sería el caso de las redes que utilizan el protocolo de comunicación CAN (Controller Area Network) presente en los automóviles. Por lo tanto, el Framework propuesto podría ser extendido de manera a considerar este tipo de arquitecturas de redes.
- El Framework diseñado propone un método para estandarizar el proceso de reconfiguración de nodos sensores en redes inalámbricas. Sin embargo, sólo se ha podido demostrar su correcto funcionamiento en sistemas en chip (SoC, por sus siglas en inglés). Por lo expuesto, se podría extender el funcionamiento del Framework utilizando otras arquitecturas programables tales como las FPAA (Field Programmable Analog Array) o las FPGA (Field Programmable Gate Array). En el caso de las FPGA, esto podría ser un gran desafío tecnológico, ya que hay que analizar la diferencia semántica entre la descripción del Framework y su implementación en la arquitectura y ver si los mecanismos disponibles actualmente en las FPGA permiten la configuración on the fly de los diferentes componentes.

Entendemos que el proceso de estandarización de los nodos sensores de una red posee en la actualidad un interés evidente, a fin de posibilitar una gestión más ágil y eficiente en distintos aspectos de las mismas. No desconocemos las barreras existentes, pero creemos que es el camino indicado para que esta área de la tecnología pueda tener un mayor impacto en la mejora de la calidad de vida de las personas, quisiéramos haber contribuido en ese sentido.

Bibliografía

- [1] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, y A. Massa, “Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications: Concepts and real implementation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2381–2396, 2013.
- [2] A. Kumar, H. Kim, y G. P. Hancke, “Environmental Monitoring Systems: A Review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 1329–1339, 2013.
- [3] Aqeel-Ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, y Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks applications in agriculture,” pp. 263–270, 2014.
- [4] P. Bellavista, G. Cardone, A. Corradi, y L. Foschini, “Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 3558–3567, 2013.
- [5] Jeong Y.S , Song E.H., Chae G.B , Hong M. y P. D.S, “Large-Scale Middleware for Ubiquitous Sensor Networks,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 48–59, 2010.
- [6] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, y N. Xi, “The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, 2013.
- [7] M. Zhan, J. Wu, Z. Z. Zhang, H. Wen, y J. J. Wu, “Low-Complexity Error Correction for ISO / IEC / IEEE 21451-5 Sensor,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 2622–2630, 2015.
- [8] M. G. W. Shen, T. Zhang, F. Barac, “PriorityMAC: A priority-enhanced MAC protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 824–835, 2014.
- [9] S. V. M. Bocca, O. Kaltiokallio, N. Patwari, “Multiple target tracking with RF sensor networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 8, pp. 1787–1800, 2014.

- [10] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, y E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, 2002.
- [11] K. P. B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, “Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer,” *IEEE Computer*, vol. 34, pp. 44–51, 2001.
- [12] J. Hill, “System Architecture for Wireless Sensor Networks,” Ph.D. dissertation, University of California at Berkeley, 2003.
- [13] D. C. J. Polastre, S. Szewczyk, “Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research,” in *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2005, pp. 364–369.
- [14] Y. L. B. Cao, Y. Ge, C.W. Kim, G. Feng, H.P Tan, “An experimental study for inter-user interference mitigation in wireless body sensor networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 3585–3595, 2013.
- [15] S. K. Yoa-Tsung Tsou, C. Lu, “MoteSec-Aware: A Practical Secure Mechanism for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2817–2829, 2013.
- [16] Y. Yuan, J. Zhao, C. Qiu, y W. Xi, “Estimating crowd density in an RF-based dynamic environment,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 3837–3845, 2013.
- [17] “Protocolo Deluge (última actualización Agosto del 2015).” [Online]. Available: http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Deluge_T2
- [18] “Memsic, inc (última actualización julio 2015).” [Online]. Available: <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/>
- [19] L. Nachman, R. Kling, R. Adler, J. Huang, y V. Hummel, “The Intel mote platform: A Bluetooth based sensor network for industrial monitoring,” in *2005 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005*, vol. 2005, 2005, pp. 437–442.
- [20] M. Y. R. Adler, M. Flanigan, J. Huang, R. King, N. Kishalnagar, L. Nachman, C. Wan, “Intel mote2, An Advanced Platform for Demanding Sensor Network Applications,”

- in *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2005, pp. 288–298.
- [21] “Libelium (última actualización Julio 2015).” [Online]. Available: http://www.libelium.com/es/top_50_iot_sensor_applications_ranking/
- [22] W. Xiao, S. Agarwal, D. Starobinski, y A. N. items selected Trachtenberg, “Reliable Rateless Wireless Broadcasting With Near-Zero Feedback,” 2012.
- [23] R. S. J. Neuzil, O. Kreibich, “A Distributed Fault Detection System Based on IWSN for Machine Condition Monitoring,” *IEEE transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1118–1123, 2014.
- [24] “Texas Instrument, SimpleLink multi-standard 2.4 GHz ultra low power Wireless MCU (última actualización Agosto 2015).” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CC2650/datasheet>
- [25] J. Portilla, “Plataforma modular e interfaces genéricas de transductores para redes de sensores inalámbricas,” Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [26] J. Guevara, E. Vargas, F. Barrero, y S. Toral, “Ubiquitous architecture for environmental sensor networks in road traffic applications,” in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2010, pp. 1227–1232.
- [27] G. S. Ramachandran, S. Michiels, W. Joosen, D. Hughes, y B. Porter, “Analysis of Sensor Network Operating System Performance Throughout the Software Life Cycle,” in *2013 IEEE 12th International Symposium on Network Computing and Applications*, 2013, pp. 211–218. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6623665>
- [28] ISO/IEC/IEEE Standard 214510, “Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet,” 2010.
- [29] ISO/IEC/IEEE Standard 214511-1, “Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Part 1: Network Capable Application Processor (NCAP),” 2010.

- [30] ISO/IEC/IEEE Standard 214511-4, “Information Technology—Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Part 4: Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats,” 2010.
- [31] ISO/IEC/IEEE Standard 214511-7, “Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators—Part 7: Transducer to Radio Frequency Identification (RFID) Systems Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats,” 2011.
- [32] ISO/IEC/IEEE Standard y 214511-2, “Information Technology Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Part 2: Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats,,” 2010.
- [33] Y. E. Krasteva, J. Portilla, E. De La Torre, y T. Riesgo, “Embedded runtime reconfigurable nodes for wireless sensor networks applications,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, pp. 1800–1810, 2011.
- [34] J. Zhou y A. Mason, “Communication Buses and Protocols for Sensor Networks,” pp. 244–257, 2002.
- [35] D. Wang, T. Abdelzaher, B. Priyantha, J. Liu, y F. Zhao, “Energy-optimal Batching periods for asynchronous multistage data processing on sensor nodes: Foundations and an mPlatform case study,” *Real-Time Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 135–165, 2012.
- [36] D. Wobschall, “Networked sensor monitoring using the universal IEEE 1451 standard,” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 18–22, 2008.
- [37] K. B. Lee y R. D. Schneeman, “Distributed measurement and control based on the IEEE 1451 smart transducer interface standards,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 3, pp. 621–627, 2000.
- [38] C. Y. Chong y S. P. Kumar, “Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, 2003, pp. 1247–1256.
- [39] K. B. Lee y M. E. Reichardt, “Open standards for homeland security sensor networks - Sensor interconnection and integration trough Web access,” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 14–21, 2005.

- [40] E. Y. Song y K. Lee, “Understanding IEEE 1451 - Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer?” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 11, pp. 11–17, 2008.
- [41] M. Dunbar, “Plug-and-play sensors in wireless networks,” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 19–23, 2001.
- [42] T. R. Licht, “The IEEE 1451.4 proposed standard,” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 12–18, 2001.
- [43] L. H. Eccles, “The need for smart transducers: An aerospace test and evaluation perspective,” *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 23–28, 2008.
- [44] L. Cámara, O. Ruiz, A. Herms, J. Samitier, y J. Bosch, “Automatic generation of intelligent instruments for IEEE 1451,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 35, no. 1, pp. 3–9, 2004.
- [45] S. R. Rossi, A. A. de Carvalho, A. C. R. da Silva, E. A. Batista, C. Kitano, T. A. Santos Filho, y T. A. Prado, “Open and standardized resources for smart transducer networking,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 10, pp. 3754–3761, 2009.
- [46] M. Sveda y R. Vrba, “Integrated smart sensor networking framework for sensor-based appliances,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 579–586, 2003.
- [47] N. Kularatna y B. Sudantha, “An Environmental Air Pollution Monitoring System Based on the IEEE 1451 Standard for Low Cost Requirements,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 415–422, 2008.
- [48] N. Ulivieri, C. Distanto, T. Luca, S. Rocchi, y P. Siciliano, “IEEE1451.4: A way to standardize gas sensor,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 114, pp. 141–151, 2006.
- [49] A. Pardo, L. Cámara, J. Cabré, A. Perera, X. Cano, S. Marco, y J. Bosch, “Gas measurement systems based on IEEE1451.2 standard,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 116, no. 1-2, pp. 11–16, 2006.

- [50] A. Kumar, I. P. Singh, y S. K. Sud, “Energy efficient and low-cost indoor environment monitoring system based on the IEEE 1451 standard,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 2598–2610, 2011.
- [51] A. Kumar y G. P. Hancke, “Energy efficient environment monitoring system based on the IEEE 802.15.4 standard for low cost requirements,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 8, pp. 2557–2566, 2014.
- [52] L. Bissi, “A smart gas sensor for environmental monitoring, compliant with the IEEE 1451 standard and featuring a simplified transducer interface,” *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, vol. 3, pp. 63–79, 2007.
- [53] L. Bissi, P. Placidi, A. Scorzoni, I. Elmi, y S. Zampolli, “Environmental monitoring system compliant with the IEEE 1451 standard and featuring a simplified transducer interface,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 137, no. 1, pp. 175–184, 2007.
- [54] F. Resquín, J. Guevara, C. Cardozo, C. Santacruz, y F. Brunetti, “A low power routing and topology control protocol for cluster-based environmental wireless sensor networks: The FLORA project case,” in *Proceedings - 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, MASS 2011*, 2011, pp. 132–134.
- [55] J. B. S. P. Woods, K. Lee, “An overview of the IEEE-P1451.2 smart transducer interface module,” *Analog Integrated Circuits Signal Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 165–177, 1997.
- [56] E. Batista, A. Silva, L. Gonda, M. Pereira, I. da Silva, W. Ferreira, y F. D’Elia, “IEEE1451-based multi-interface module (I2M) for industrial processes automation,” *2008 IEEE Sensors Applications Symposium*, 2008.
- [57] M. P. J. Higuera, W. Hertog, “Smart Lighting System ISO/IEC/IEEE 21451 Compatible,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2595–2602, 2015.
- [58] I. Jab, “Smart Transducer Interface — From Networked On-Site Optimization of Energy Balance in Research-Demonstrative Office Building to Smart City Conception,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2468–2478, 2015.

- [59] P. Doyle, D. Heffernan, y D. Duma, “A time-triggered transducer network based on an enhanced IEEE 1451 model,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 28, no. 1, pp. 1–12, 2004.
- [60] S. P. S. G. N. K. Suryadevara, S. C. Mukhopadhyay, S. D. T. Kelly, “WSN-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings,” *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 564 – 571, 2014.
- [61] E. Batista, L. Gonda, a.C.R. da Silva, S. Rossi, M. Pereira, a.a. de Carvalho, y C. Cugnasca, “HW/SW for an intelligent transducer network based on IEEE 1451 standard,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 34, no. 1, pp. 1–13, Ene. 2012.
- [62] K. C. Lee, M. H. Kim, S. Lee, y H. H. Lee, “IEEE-1451-based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 1150–1158, 2004.
- [63] F. Cortés, F. Barrero, S. Toral, J. Prieto, y J. Guevara, “Multi-sensor integration in the vehicular system using the IEEE1451 Std.: A case study,” in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2009*, pp. 255–260.
- [64] J. Schmalzel, F. Figueroa, J. Morris, S. Mandayam, y R. Polikar, “An architecture for intelligent systems based on smart sensors,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 4, pp. 1612–1616, 2005.
- [65] T. Cummins, E. Byrne, D. Brannick, y D. A. Dempsey, “An IEEE 1451 standard transducer interface chip with 12-b ADC, two 12-b DAC’s, 10-kB flash EEPROM, and 8-b microcontroller,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 12, pp. 2112–2120, 1998.
- [66] E. Y. Song y K. B. Lee, “Service-oriented sensor data interoperability for IEEE 1451 smart transducers,” in *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2009, 2009*, pp. 1049–1054.
- [67] H. M. G. Ramos, J. M. D. Pereira, V. Viegas, O. Postolache, y P. M. B. S. Girao, “A virtual instrument to test smart transducer interface modules (STIMs),” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 4, pp. 1232–1239, 2004.

- [68] L. Bermudez, E. Delory, T. O'Reilly, y J. del Rio Fernandez, "Ocean observing systems demystified," in *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 2009, pp. 1–7.
- [69] H. Han, L. Fu, M. Li, y J. Wang, "A configurable RFID sensor tag baseband conforming to IEEE 1451.7 standard," in *Proceedings of 2012 International Conference on the Internet of Things, IOT 2012*, 2012, pp. 63–67.
- [70] C. W. Tseng, C. M. Chang, y C. H. Huang, "Complex sensing event process of IoT application based on EPCglobal architecture and IEEE 1451," in *Proceedings of 2012 International Conference on the Internet of Things, IOT 2012*, 2012, pp. 92–98.
- [71] K. L. J. Wang, L. Fu, H. Han, H. Min, "A low-cost configurable ISO/IEC/IEEE 21451-7-compatible sensor tag," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2451–2459, 2015.
- [72] G. C. A. Cataliotti, "A Prototypal Architecture of a IEEE 21451 Network for Smart Grid Applications Based on Power Line Communications," *Ieee Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2460–2467, 2015.
- [73] S. R. Rossi, E. D. Moreno, A. A. de Carvalho, A. C. R. da Silva, E. A. Batista, T. A. Prado, y T. A. Santos Filho, "A VHDL-based protocol controller for NCAP processors," *Computer Standards and Interfaces*, vol. 31, no. 2, pp. 515–522, 2009.
- [74] V. Viegas, J. M. Dias Pereira, y P. M. B. Silva Girão, ".NET framework and web services: A profit combination to implement and enhance the IEEE 1451.1 standard," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 6, pp. 2739–2747, 2007.
- [75] R. Kochan, K. Lee, V. Kochan, y A. Sachenko, "Development of a dynamically reprogrammable NCAP," in *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 2, 2004, pp. 1188–1192.
- [76] M. M. V. Bhateja, S. Urooj, S. Member, "Technical Advancements to Mobile Mammography Using Nonlinear Polynomial Filters," *Ieee Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2559–2566, 2015.

- [77] D. Karatzas, A. Chorti, N. M. White, y C. J. Harris, “Teaching old sensors new tricks: Archetypes of intelligence,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 868–880, 2007.
- [78] A. R. Nieves, N. M. Madrid, R. Seepold, J. M. Larrauri, y B. n. A. Larrinaga, “A UPnP service to control and manage IEEE 1451 transducers in control networks,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 3, pp. 791–800, 2012.
- [79] Y. Wang, M. Nishikawa, R. Maeda, M. Fukunaga, y K. Watanabe, “A smart thermal environment monitor based on IEEE 1451.2 standard for global networking,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, pp. 1321–1326, 2005.
- [80] G. B. E. J. Manders, L. A. Barford, “An approach for fault detection and isolation in dynamic systems from distributed measurements,” *Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol. 51, no. 2, pp. 235–240, 2002.
- [81] R. Seng, K. B. Lee, y E. Y. Song, “An implementation of a wireless sensor network based on IEEE 1451.0 and 1451.5–6LoWPAN standards,” *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1–6, 2011.
- [82] L. Camara, J. Gomez, J. Samitier, y J. Bosch, “Smart transducer systems working in communication networks within the IEEE-1451 standard,” *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, vol. 4, pp. 2898–2902, 2002.
- [83] A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, y A. Taroni, “A VHDL model of a IEEE1451.2 smart sensor: Characterization and applications,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 619–625, 2007.
- [84] K. B. Lee y E. Y. Song, “Object-oriented application framework for IEEE 1451.1 standard,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, pp. 1527–1533, 2005.
- [85] S. Gumudavelli, D. Gurkan, y R. Wang, “Emulated network of IEEE 1451 application with multiple smart Sensor reports,” in *SAS 2009 - IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 2009, pp. 304–308.
- [86] P. S. G. V. Viegas, J. M. D. Pereira, “Next generation application processor based on the IEEE 1451.1 standard and web services,” in *Proceedings IEEE Intrumentation & Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 405–410.

- [87] V. S. A. Kumar, “Current Status of the IEEE 1451 Standard-Based Sensor Applications. Sensors Journal,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2541–2548, 2015.
- [88] Y. Li, Z. Jia, S. Xie, y F. Liu, “Dynamically reconfigurable hardware with a novel scheduling strategy in energy-harvesting sensor networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 2032–2038, 2013.
- [89] Y. Li, Z. Jia, F. Liu, y S. Xie, “Hardware reconfigurable wireless sensor network node with power and area efficiency,” p. 247, 2012.
- [90] S. X. Z. Jia, Y. Li, “Energy-prediction scheduler for reconfigurable systems in energy-harvesting environment,” *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 80–85, 2014.
- [91] D. M. Santos, “Aplicación de Tecnologías Reconfigurables Analógica y Digital para Instrumentación Inteligente,” Ph.D. dissertation, Universidad de Granada, 2011.
- [92] Z. P. Q. Chi, H. Yan, C. Zhang y L. XU, “A reconfigurable smart sensor interface for industrial WSN in IoT environment,” *Informatics, IEEE Transactions Industrial*, vol. 10, no. 2, pp. 1417–1425, 2014.
- [93] V. Mattoli, A. Mondini, B. Mazzolai, G. Ferri, y P. Dario, “A universal intelligent system-on-chip based sensor interface,” *Sensors*, vol. 10, pp. 7716–7747, 2010.
- [94] C. Semiconductor, “Cypress Semiconductor (última actualización Setiembre 2015).” [Online]. Available: <http://www.cypress.com>
- [95] J. P. V. Handziski, “TEP2 Hardware Abstraction Architecture. TinyOS Core Working Group,” Tech. Rep., 2007.
- [96] S. T. A. Clemotte, E. Vargas, “Zigbee target system running TinyOS,” in *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2012.
- [97] j. B. J. Guevara, F. Barrero, E. Vargas y S. Toral, “Environmental wireless sensor network for road traffic applications,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 177–186, 2011.

- [98] F. Barrero, J. A. Guevara, E. Vargas, S. Toral, y M. Vargas, “Networked transducers in intelligent transportation systems based on the IEEE 1451 standard,” *Computer Standards and Interfaces*, vol. 36, pp. 300–311, 2014.
- [99] Y. Zhang, L. Sun, H. Song, y X. Cao, “Ubiquitous WSN for Healthcare: Recent Advances and Future Prospects,” *Internet of Things Journal, IEEE*, vol. PP, p. 1, 2014.
- [100] A. Z. Abbasi, N. Islam, y Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, Feb. 2014.
- [101] A. Brokalakis, G. G. Mplemenos, K. Papadopoulos, y I. Papaefstathiou, “RESENSE: An innovative, reconfigurable, powerful and energy efficient WSN node,” in *IEEE International Conference on Communications*, 2011.
- [102] G. Giorgi, “ISO/IEC/IEEE 21451 Compliant Sensor Nodes for Energy-Aware Wireless Sensor Networks,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 2488–2496, 2015.
- [103] H. Zangl, “TEDS Extensions Toward Energy Management of Wireless Transducers,” *Sensors Journal*, . . . , vol. 15, no. 5, pp. 2587–2594, 2015. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7009985
- [104] R. Morello, “Use of TEDS to Improve Performances of Smart Biomedical Sensors and Instrumentation,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 2497–2504, 2015. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6899594
- [105] J. Guevara, E. Vargas, F. Brunetti, F. Barrero, y L. Aranda, “A framework for WSN using TinyOS and the IEEE1451 standard,” *2011 IEEE Third Latin-American Conference on Communications*, pp. 1–5, Oct. 2011.
- [106] E. V. A. Fatecha J. Guevara, “Reconfigurable Architecture for Smart Sensor Node Based on IEEE 1451 Standard,” in *IEEE Sensors 2013*, 2013.
- [107] F. B. J. Guevara, E. Vargas, F. Barrero, “Open Architecture for WSN Motes Based on Runtime Reconfigurable Systems and the IEEE 1451 Family of Standards,” in *IEEE Sensors 2013*, 2013.

- [108] F. B. J. Guevara, A. Fatecha, E. Vargas, “A Reconfigurable WSN Node based on ISO/IEEE 21451 Standard,” in *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2014.
- [109] A. F. J. Guevara, E. Vargas, F. Barrero, “Dynamically Reconfigurable WSN Node Based on ISO/IEC/IEEE 21451 TEDS,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2567–2576, 2015.

Parte III

PUBLICACIONES
