



Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Red de sensores inalámbricos para monitorización de instalaciones eléctricas de baja tensión

autor José Antonio Tarifa Galisteo

tutor D. Juan Manuel Escaño González

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación

Sevilla, 2011

*Este Proyecto se realizó en el
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.*

A mis padres y hermana.

A Juan M. Escañó.

Al profesorado y compañeros de estos años.

Si te caes siete veces, levántate ocho.

Proverbio chino

Índice general

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Domótica e Inmótica.....	2
1.1.1 Ejemplos de construcciones inteligentes	4
Vivienda unifamiliar (Madrid)	
Delhi International Airport Ltd.	
1.2 Red de sensores inalámbrica (WSN)	6
1.2.1 Estándares WSN.....	7
1.2.2 Sistemas operativos.....	7
1.3 Armónicos en instalaciones eléctricas	8
1.3.1 Origen de los armónicos	9
1.3.2 Efectos de los armónicos.....	10
1.4 Propuestas y objetivos en el trabajo.....	11
1.5 Estructura del documento	12
 CAPÍTULO 2. PLATAFORMA HARDWARE.....	 15
2.1 Sensores inalámbricos.....	15
2.1.1 Microcontrolador MSP430F1611	17
2.1.2 Interfaz radio. IEEE 802.15.4.....	19
Topología en estrella	
Topología peer-to-peer	
Capa física (PHY)	
Subcapa de acceso al medio (MAC)	
2.1.3 Interfaz radio. ZigBee	25
Capa de red (NWK)	
Capa de aplicación (APL)	
2.1.4 Interfaz radio. DASH7.....	30
2.1.5 Radio CC2420	31
2.1.6 Interfaz USB FT232BM	33
2.2 Pasarela para sensores.....	33
2.3 Justificación del uso de sensores	35
 CAPÍTULO 3. TINYOS Y NESC	 37

3.1 Elementos básicos	38
3.1.1 Componente	38
3.1.2 Interfaz	39
3.1.3 Cableado.....	39
3.2 Componente. Signatura.....	39
3.3 Interfaces	40
3.3.1 Interfaz genérica	42
3.3.2 Interfaces. Instancias	43
3.3.3 Interfaz parametrizada.....	44
3.4 Componentes. Implementación.	45
3.4.1 Implementación de configuraciones.....	45
Componentes genéricos	
3.4.2 Implementación de módulos	48
Interfaces usadas	
Interfaces proporcionadas	
3.5 Archivos nesC	50
3.6 Ejemplo de código.....	51
3.7 Representación gráfica de componentes	55
3.8 Tareas	56
3.8.1 Llamadas split-phase y tareas.....	57
3.8.2 Gestión de tareas con prioridad	59
3.9 Mensajes en TinyOS 2.x.....	60
3.10 Comunicación del nodo	62
3.11 Comunicación radio. Protocolos de red.....	63
3.11.1 Colección	64
Collection Tree Protocol (CTP)	
Multihop LQI	
3.11.2 Diseminación.....	67
Drip	
DIP y DHV	
3.11.3 Deluge T2	69
Comandos tos-deluge	
Justificación de su no uso	
3.12 Comunicación serie	75
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DESARROLLADA.....	77

4.1 Identificación de los nodos	78
4.2 Bases de tiempo	78
4.3 Temporización	80
4.3.1 Watchdog.....	80
4.3.2 TimerMilliC	81
Interfaces proporcionadas	
4.4 Arranque del mote	82
4.4.1 MainC	82
Interfaces proporcionadas	
4.5 Operaciones iniciales.....	83
4.5.1 LedsC.....	83
Interfaces proporcionadas	
4.6 Gestión entradas/salidas digitales	85
4.6.1 HplMsp430GeneralIOC.....	85
Interfaces proporcionadas	
4.7 Conversión analógico-digital	86
4.7.1 Msp430Adc12ClientAutoRVGC.....	88
Interfaces proporcionadas	
Interfaces usadas	
4.7.2 Configuración del convertidor	89
4.7.3 Conversión de tensión e intensidad.....	92
4.7.4 Conversión de sensores auxiliares.....	94
4.8 Procesamiento sensores auxiliares	95
4.8.1 Temperatura interna	95
4.8.2 Tensión de alimentación	96
4.8.3 Otros sensores	97
4.9 Gestión memoria flash externa	97
4.9.1 ConfigStorageC	97
Interfaces proporcionadas	
4.10 Colección de datos	99
4.10.1 ActiveMessageC.....	99
Interfaces proporcionadas	
4.10.2 CollectionC.....	99
Interfaces proporcionadas	
4.10.3 CollectionSenderC	100
Interfaces proporcionadas	
4.10.4 Archivo Makefile	100
4.11 Diseminación de datos.....	101

4.11.1 DisseminationC.....	101
Interfaces proporcionadas	
4.11.2 DisseminatorC.....	101
Interfaces proporcionadas	
4.11.3 Archivo Makefile.....	102
4.12 Datos puerto serie	102
4.12.1 SerialActiveMessageC.....	103
Interfaces proporcionadas	
4.13 Variables y constantes globales	103
4.14 Función IsRoot	108
4.15 Función Arrancar	109
4.16 Función InicioMote	109
4.17 Función increase	110
4.18 Función decrease	110
4.19 Tarea ProcSensor	111
4.20 Tarea ActValores	114
4.21 Tarea EnvioDatos.....	115
4.22 Tarea Conversion	117
4.23 Tarea CalcPotencia.....	120
4.23.1 Potencia en señales discretas. Principio de tiempo de muestreo reducido	121
4.24 Tarea CalcDFT.....	127
4.24.1 Armónicos a estudiar	127
4.24.2 Planteamiento del problema	128
4.24.3 Preparación de datos.....	134
4.24.4 Algoritmo FFT	135
4.24.5 DFT de la secuencia original	136
4.24.6 Parámetros armónicos	138
4.24.7 Tasa de distorsión total armónica	138
4.25 Significado de los LED	140
4.26 Representación gráfica de la aplicación.....	140
4.27 Comunicación Ethernet	142
4.27.1 Tmote Connect.....	142
4.27.2 Operaciones básicas.....	144
Recuperar el estado del mote	

Reiniciar el servidor de control	
Reiniciar el dispositivo Tmote Connect	
Control del protocolo y de la velocidad	
Programación del mote	
4.27.3 Configuración del NSLU2	146
4.28 Comunicación TCP/IP. MATLAB.....	147
4.29 Monitorización y control en MATLAB.....	150
4.29.1 Arranque del programa	150
4.29.2 Recepción de datos. Gráficas. Servidor web de datos.....	152
4.29.3 Envío de datos	155
4.29.4 Cierre de conexión	156
CAPÍTULO 5. FASE DE PRUEBAS	157
5.1 Envío y recepción de información	158
5.1.1 Simulador TinyOS	158
5.1.2 Conexión JTAG.....	158
5.1.3 Biblioteca Printf	158
5.1.4 Envío de mensajes propios por puerto serie	160
5.2 Código de programa	161
5.2.1 Convertidor analógico-digital	161
5.2.2 Tarea de cálculo de potencias.....	162
5.2.3 Tarea de cálculo de armónicos	163
5.3 Mediciones con señales reales.....	164
5.3.1 Recogida y procesamiento de datos.....	164
5.3.2 Generación de señales	167
Montaje Laboratorio	
Montaje usando Audacity	
5.4 Comunicación inalámbrica mote-mote (PC). Recepción de datos.....	176
5.5 Comunicación inalámbrica mote-mote (pasarela). Recepción de datos.....	180
5.6 Comunicación inalámbrica mote-mote (PC). Envío de datos.....	183
5.7 Comunicación inalámbrica mote-mote (pasarela). Envío de datos	185
5.8 Monitorización y control con MATLAB	186
5.9 Prueba de conjunto.....	188
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	191
6.1 Tareas realizadas	192

6.2 Líneas futuras de desarrollo	194
ANEXO A. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.....	197
A.1 Transformada discreta de Fourier	197
A.2 Control de armónicos mediante DFT	198
A.2.1 Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.....	199
A.2.2 Ventanas más comunes	206
Rectangular	
Triangular / Bartlett	
Hanning	
Hamming	
Blackman	
A.3 Algoritmo FFT	211
A.3.1 Mejora del algoritmo FFT para secuencias reales.....	214
A.4 Indicadores de armónicos y distorsión.....	216
A.4.1 Distorsión armónica individual	216
A.4.2 Tasa de distorsión total armónica	216
Umbral crítico de THD en tensión	
Umbral crítico de THD en intensidad	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	219
ÍNDICE DE TABLAS	223
BIBLIOGRAFÍA.....	225

Nota: las marcas o marcas comerciales que puedan aparecer en el documento son propiedad de sus respectivos propietarios.