



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



**APLICACIONES DE REDES DE SENSORES Y
ACTUADORES INALÁMBRICAS EN LOS SECTORES
MÉDICO, MEDIOAMBIENTAL, AGRÍCOLA E
INDUSTRIAL**

Tesina de Master

Presentada por: Diego Martínez Castro
Dirigida por: D. José Enrique Simó Ten
D. Alfons Crespo i Lorente

Posgrado en Automática e Informática Industrial

Universidad Politécnica de Valencia

Octubre de 2008

Índice

Resumen

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO	1
1.1 APLICACIONES DE REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS EN LOS SECTORES MÉDICO, MEDIOAMBIENTAL, AGRÍCOLA E INDUSTRIAL	2
1.1.1 Aplicaciones en el sector médico	3
1.1.2 Aplicaciones en el sector medioambiental	6
1.1.3 Aplicaciones en el sector agrícola	9
1.1.4 Aplicaciones en el sector industrial	11
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	14
1.3 CONTENIDO DEL DOCUMENTO	14
ESTADO DEL ARTE EN REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS	15
2.1 ARQUITECTURA DE LOS NODOS	17
2.2 PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES	19
2.2.1 Protocolos de control de acceso al medio (MAC)	19
2.2.2 Algoritmos de encaminamiento	22
2.3 DESAFÍOS DE INVESTIGACIÓN	24
ARQUITECTURA PROPUESTA PARA REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS	26
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS APLICACIONES	26
3.2 ARQUITECTURA PROPUESTA PARA LOS NODOS	28
3.3 ARQUITECTURA DE LA RED	29
3.4 CASO DE ESTUDIO PARA APLICACIONES MÉDICAS EN ESPACIOS CERRADOS	30
3.4.1 Algoritmo de detección de arritmias	31
3.4.2 Análisis de los requerimientos de cómputo	35
3.4.3 Análisis del desempeño de la red	36
3.5 CONCLUSIONES	39

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE CONTROL	40
4.1 ANÁLISIS DEL SDC	40
4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SDC	45
4.2.1 Implementación sobre CAN	45
4.2.2 Implementación sobre IEEE 802.15.4 en modo CSMA/CA	48
4.3 CONCLUSIONES	49
CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS	51
5.1 CONCLUSIONES	51
5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	52
BIBLIOGRAFÍA	53

Lista de figuras

Figura 1.1 Sistema de monitoreo continuo de pacientes	4
Figura 1.2 Imágenes del proyecto de monitorización de habitad <i>Great Duck Island</i> ..	8
Figura 1.3 Imagen de uno de los nodos utilizados en el proyecto LOFAR	11
Figura 1.4 Estructura genérica de un NCS	12
Figura 1.5 Arquitectura de una aplicación industrial utilizando <i>WirelessHART</i>	13
Figura 2.1 Diagrama comparativo del consumo de potencia en los diferentes modos de operación del TR1000, CC1000 y CC2420	21
Figura 3.1 Arquitectura de los nodos	28
Figura 3.2 Arquitectura de la red	29
Figura 3.3 Arquitectura del coordinador de sub-red	30
Figura 3.4 Espectro relativo de la señal de ECG, basado en un estudio desarrollado por Thakor	31
Figura 3.5 Diagrama de bloques del algoritmo de Pan y Tompkins	32
Figura 3.6 Vector ECG con ruido	32
Figura 3.7. Señal filtrada pasa bajo	32
Figura 3.8 Señal filtrada pasa alto	33
Figura 3.9 Señal salida del derivador	33
Figura 3.10 Señal salida del cuadrático	34
Figura 3.11 Señal salida ventana integradora	34
Figura 3.12 Puntos máximos	35
Figura 3.13 Distribución de nodos y su cobertura en el caso de estudio	37
Figura 3.14 Esquema completo de la red para el caso de estudio	37
Figura 4.1 Estructura genérica del SDC considerado	41
Figura 4.2 Región de estabilidad del sistema en lazo cerrado	42
Figura 4.3 Respuesta del sistema de control, en tiempo continuo y discreto, para diferentes valores de T_m y τ	43
Figura 4.4 Tráfico generado por los algoritmos MAC y respuesta del sistema de control	44
Figura 4.5 Tráfico en la red y respuesta del sistema de control cuando las redes están saturadas	45
Figura 4.6 Respuesta del SDC implementado sobre CAN con generación de ruido cada 50 ms	47
Figura 4.7 Respuesta del sistema sobre 802.15.4 en modo CSMA/CA y con generadores de ruido actuando cada 30 ms	49

Lista de tablas

Tabla. 2.1 Características de las plataformas de nodos sensores18

Tabla 3.1. Tiempo de cómputo para desarrollar el algoritmo de Pan y Tompkins36

Tabla 3.2. Indicador P_A*U 36

Tabla 3.3. Tabla de encaminamiento38

Tabla 3.4. Tiempos de envío de 2 Bytes de todos los pacientes al nodo principal (nodo 0)38

Lista de acrónimos

AES	Advanced Encryption Standard
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
ARP	Aseguradoras de Riesgos Profesionales
DSR	Dynamic Source Routing,
DVS	Dynamic Voltage Scaling
GTS	Guaranteed Time Slot (Ranuras de tiempo garantizado)
HPF	Filtro pasa alto
LPF	Filtro pasa bajo
MAC	Control de acceso al medio
OGC	OpenGIS Consortium
O&M	Observations and Measurements Schema
QoS	Calidad de Servicio
SDC	Sistemas Distribuidos de Control
SensorML	Sensor Model Language
SMAC	Sensor-MAC
SWE	Sensor Web Enablement
TML	Transducer Markup Language
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (vehículos aéreos no tripulados)
WiNCS	Wireless Networked Controlled Systems
WSAN	Wireless Sensors and Actuators Networks (redes de sensores y actuadores inalámbricas)
WSN	Wireless Sensors Networks (redes de sensores inalámbricas).

Resumen

La tendencia actual en el desarrollo de aplicaciones en sistemas de monitoreo, diagnóstico y control, es la distribución de la aplicación entre diferentes nodos que se integran a través de redes de comunicaciones inalámbricas, lo cual se ha denominado redes de sensores y actuadores inalámbricas (WSAN). Con ello se logra aumentar la flexibilidad y confiabilidad de estas aplicaciones, al mismo tiempo que se disminuyen los costos de implementación, y se posibilita el desarrollo de aplicaciones cuya naturaleza requiere de este tipo de tecnología.

Los actuales desafíos de investigación en esta área están principalmente ligados a la definición de nuevos indicadores de calidad de servicio (QoS), la proposición de estrategias de cooperación entre los niveles de la arquitectura del sistema, facilitar el diseño de las aplicaciones, el planteamiento de nuevas arquitecturas de nodos que contribuyan a la optimización de los parámetros de mayor relevancia en el sistema, y el desarrollo de métodos que permitan un adecuado análisis y diseño de estas aplicaciones.

Ante las condiciones anteriores y debido a la alta dependencia de estos desarrollos a las restricciones impuestas por la aplicación, en este trabajo se presenta una caracterización y clasificación de aplicaciones de WSNA en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial; a partir de lo cual se propone una arquitectura para la red y los nodos que conforman este tipo de aplicaciones.

Adicionalmente se presentan los resultados de simulación y experimentales de dos casos de estudio, el primero orientado a la detección de arritmias cardiovasculares en pacientes no críticos, durante una sesión de rehabilitación en espacios cerrados. En el segundo se realiza un análisis del efecto producido por la tecnología actual en el desempeño de un sistema distribuido de control, particularizando en los algoritmos de control de acceso al medio implementados en IEEE 802.15.4 y CAN.

Capítulo 1

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

Debido al aumento del tamaño y la complejidad de las aplicaciones de monitoreo, diagnóstico y control, gran parte de las actividades se deben distribuir entre diferentes plataformas, bien sea porque la naturaleza del sistema así lo requiere, o porque de esta forma es posible aumentar la potencialidad del sistema a unos costos relativamente menores que los presentados por soluciones centralizadas. Adicionalmente, se logra disminuir el impacto producido por las fallas en un componente, se alcanza una reducción en los costos de implementación y se facilitan las actividades de diagnóstico y mantenimiento.

Estos requerimientos han motivado el desarrollo de tecnologías en donde a través de redes de comunicaciones inalámbricas, se integran sistemas embebidos distribuidos geográficamente, denominados nodos, con el fin de cooperar para la solución de problemas específicos; estos poseen arquitecturas de bajo consumo de potencia, e interfaces para la captura y procesamiento de señales. Dichos sistemas se han denominado redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensors Networks* - WSN).

El desarrollo de las WSN fue originalmente motivado por el diseño de aplicaciones militares. Sin embargo, actualmente existe un gran interés por el desarrollo de aplicaciones de monitoreo, diagnóstico y control en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial, orientados principalmente a la investigación aplicada a mejorar las condiciones sociales y ambientales de la sociedad en general, e incrementar la calidad y productividad en los procesos industriales [1], [2], [3].

Actualmente los nodos han sido dotados de interfaces de actuación, con lo cual se han agregado nuevos requerimientos de calidad de servicio (QoS) en las aplicaciones, principalmente relacionados con los retrasos en la generación de acciones sobre los sistemas físicos. Las aplicaciones donde se integran nodos sensores y nodos con capacidades de actuación se han denominado redes de sensores y actuadores inalámbricas (*Wireless Sensors and Actuators Networks* - WSAN).

El desarrollo de nuevas aplicaciones sobre WSAN contribuirá significativamente a la solución de las actuales problemáticas presentes en aplicaciones médicas, medioambientales, agrícolas e industriales. Como también potenciará la creación de nuevas aplicaciones que debido a limitantes tecnológicos no se han desarrollado.

Dentro de las aplicaciones potenciales a desarrollar en el contexto de las WSAN se tienen:

- Sector médico: Sistemas económicos y portables, orientados al monitoreo, registro y análisis de variables fisiológicas, a partir de lo cual es posible detectar la presencia o el riesgo de desarrollar alguna enfermedad, e indicar el estado de los pacientes, en enfermedades tales como cardiovasculares, síndrome de túnel carpiano, y la detección y cuantificación de apnea durante el sueño, entre otras. Como también, el desarrollo de sistemas de detección y análisis de tendencias en el comportamiento diario de pacientes, que contribuyan a detectar oportunamente la presencia de un problema de salud, y ofrezcan una solución económicamente viable a la atención de pacientes en sociedades donde la población en edad avanzada es grande.
- Sector medioambiental: Sistemas de monitoreo continuo de especies en vía de extinción, sistemas de vigilancia en bosques para la detección de actividades ilícitas de la tala y caza, sistemas de detección y monitoreo de incendios forestales, sistemas de monitoreo continuo para la caracterización de cuencas hidrográficas, etc.
- Sector agrícola: Sistemas de detección, monitoreo y control de plagas en microclimas, para disminuir el uso de agroquímicos y realizar un control óptimo de plagas; sistemas de riego que realicen un uso óptimo del agua, etc.
- Sector industrial: Sistemas económicos y de fácil instalación, para el monitoreo, diagnóstico y control de plantas y procesos industriales.

Los desafíos presentes en ésta área han motivado la propuesta de un plan de investigación orientado a desarrollar un nuevo procedimiento de diseño, que permita el óptimo desarrollo de aplicaciones principalmente en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial. Este trabajo se enmarca en el Proyecto “*Diseño y Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Redes de Sensores – D2ARS*”, el cual está adscrito al Área 5 - Tecnologías de la Información y las Comunicaciones - del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo – CYTED, y en el que participan las siguientes instituciones: UPV (España), UCOLTEC(México), UFRGS (Brasil), UAO (Colombia), ITCR (Costa Rica), ICIMAF (Cuba), UNINORTE (Colombia), ISPJAE (Cuba), CICESE (México), UGR (España).

En la siguiente sección se presenta una caracterización de las aplicaciones en redes de sensores y actuadores inalámbricos orientadas a los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial. Posteriormente se presentan los objetivos del trabajo de investigación y el contenido del documento.

1.1 APLICACIONES DE REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS EN LOS SECTORES MÉDICO, MEDIOAMBIENTAL, AGRÍCOLA E INDUSTRIAL

Los desarrollos en esta área están determinados por el cumplimiento de fuertes restricciones impuestas por la aplicación, tales como restricciones de consumo de energía, limitado poder de cómputo, cobertura de grandes áreas, restricciones de

tiempo real, entre otras. Debido a ello en esta sección se realiza una caracterización de las aplicaciones en los sectores descritos.

1.1.1 Aplicaciones en el sector médico

En los últimos años se ha incrementado el interés por desarrollar dispositivos orientados a la detección y supervisión de enfermedades. Un desarrollo clave en esta área consiste en el implante de dispositivos que permitan la supervisión e intervención directa, en donde uno de los grandes desafíos actuales consiste en el problema de la bio-compatibilidad, sin embargo ya han empezado a surgir algunos prototipos clínicos. Tal es el caso de pacientes con diabetes aguda, en donde el nivel de la glucosa de la sangre puede ser supervisado continuamente y a partir de estas mediciones se controla el suministro de insulina desde un depósito implantado. De igual forma se han desarrollado estimuladores del cerebro para abordar el problema de la epilepsia [4]. También se han desarrollado prototipos para ayudar a prevenir muertes como consecuencia de problemas cardiovasculares [5].

Las WSN han abierto nuevas oportunidades en el desarrollo de sistemas para el cuidado de la salud. La tendencia es la integración de la tecnología médica existente con nuevas aplicaciones en WSN, las cuales aumentarán la cantidad de datos analizados y permitirán respuestas en tiempo real.

El gran interés en el desarrollo de dispositivos clínicos para la detección y supervisión continua se fundamenta en que actualmente estas actividades están bastante limitadas tanto por el tipo de información como por los instantes en que se captura, por lo que las anomalías transitorias no pueden siempre capturarse. Sin embargo, muchas enfermedades, tales como las asociadas a patologías cardiovasculares, se asocian más bien a episodios transitorios que a continuas anomalías, tales como oleadas transitorias en la presión arterial, arritmias, etc. La ocurrencia de estos estados no se puede predecir, por cuanto se descarta su análisis a través de una supervisión controlada.

La detección confiable y oportuna de estos episodios permite mejorar la calidad de vida de los pacientes y disminuir el costo en terapias. Con el desarrollo de aplicaciones de bajo costo soportadas en WSN será posible realizar estos análisis, al mismo tiempo que se logrará un uso masivo de estos dispositivos.

Algunas ideas concretas sobre problemáticas en este sector que pueden ser abordadas utilizando WSN son:

- Según la Organización Mundial de la Salud, la enfermedad coronaria es la principal causa de muerte en el mundo. En los Estados Unidos se calcula que unas 600 mil personas mueren anualmente por problemas coronarios. En Colombia, según datos del ISS en 1997, el costo promedio de atención por infarto es de 5.000 pesos por evento. Se estiman los costos de atención en 3.200.000 millones de pesos solo en el grupo entre 45 y 59 años [6]. Según Ascofame los costos por atención de este problema supera los 117 billones de dólares al año. Este porcentaje se atribuye fundamentalmente a malos hábitos de

vida, como sedentarismo, sobrepeso, consumo de cigarrillo, y de otro lado a la deficiencia de medidas continuas que permitan el diagnóstico y atención oportuna de pacientes de alto riesgo.

Los pacientes con factores de riesgo para enfermedad coronaria, como colesterol alto, hipertensión o diabetes, deben hacer un plan de rehabilitación cardíaca, que pasa necesariamente por un plan de ejercicio. El ejercicio debe ser monitoreado, inicialmente con supervisión, pero después puede hacerse en forma ambulatoria. Obviamente el paciente debe conocer los signos de alarma, para suspenderlo y solicitar atención médica. Adicionalmente, El sistema debe ofrecerle al usuario la posibilidad de enviar la señal al centro médico o a su cardiólogo para así ser evaluados en tiempo real.

En la figura 1.1 se presenta un prototipo de un desarrollo que se ha abordado en el proyecto UbiMon (Ubiquitous Monitoring Environment for Wearable and Implantable Sensors) [5], que permitirá contar con un sistema de monitoreo continuo no invasivo para la captura de eventos transitorios que amenacen la vida de las personas.



Figura 1.1 Sistema de monitoreo continuo de pacientes [5]

Por otro lado, en pacientes que laboran en áreas con condiciones medioambientales difíciles, tales como minas subterráneas, no es posible realizar un chequeo efectivo de su estado cardiopulmonar y saturación de hemoglobina durante su trabajo, debido a que casi todos los sistemas actuales se caracterizan por funcionar con distancias cortas o por no permitir registros durante el esfuerzo.

El desarrollo de dispositivos portátiles y de bajo costo, que permitan el monitoreo cardíaco continuo y la detección oportuna de enfermedades, permitirá a los pacientes de alto riesgo realizar sus labores y tener un registro que le permite a él y al médico tratante, hacer los ajustes respectivos para desarrollar la actividad sin

mayores riesgos. El sistema puede registrar cambios del ritmo o de la morfología que den orientación sobre la actividad del corazón y sus posibles problemas. Los datos pueden ser transmitidos en forma inmediata al centro de medicina, o almacenados para ulterior análisis.

El desarrollo de este tipo de aplicaciones por medio de WSN contribuirá significativamente a la calificación de las limitaciones laborales de los trabajadores, lo cual es de importancia prioritaria para los gobiernos y las empresas aseguradoras de riesgos profesionales (ARP). Una medición en tiempo real es mucho más ilustrativa que las mediciones en reposo. Hay elementos diagnósticos como la radiografía y la espirometría que son utilizados y de mucha utilidad para conocer las capacidades laborales del trabajador, pero siempre se hacen en reposo y muchas veces la compensación del organismo no permite ver las alteraciones.

El caso específico es la saturación de Oxígeno que en reposo, sin que el organismo haga demandas energéticas puede ser normal, mas de 95%, pero cuando se incrementa la demanda energética se puede evidenciar la deficiencia del sistema cardiorrespiratorio y se puede observar la desaturación del Oxígeno. Estos datos, adicional a las pruebas convencionales y un buen reconocimiento clínico, otorgan mejores elementos para la calificación de invalidez.

El objetivo es crear sistemas que permitan el monitoreo, por medio de medidas no invasivas, y detectar enfermedades cardiovasculares en pacientes de alto riesgo; como también la transmisión de datos de pacientes que realicen trabajo físico para detectar a tiempo riesgos cardiovasculares.

- El problema del túnel carpiano es una de las enfermedades que actualmente genera gran impacto en la sociedad. Un alto porcentaje de trabajadores desarrollan esta patología debido a que durante el desempeño de sus labores cotidianas realizan sobreesfuerzos, repetición de algunas actividades o emplean posturas inadecuadas de sus extremidades superiores.

Los síntomas causados por esta patología son dolor, adormecimiento, cosquilleo y pérdida de fuerza en las manos, síntomas que conllevan a la inhabilitación de ciertas funciones en las personas que la padecen. En un alto porcentaje de los casos la única forma de contrarrestar el problema es realizando una cirugía al paciente, cuyos resultados no siempre son los esperados por lo cual la recuperación de las funciones no es total.

El síndrome del túnel carpiano es un problema que obliga a las empresas y ARP a cubrir los gastos de la cirugía e incapacidad del empleado, ya que esta es una enfermedad que se adquiere generalmente en el medio laboral.

Por tales razones es importante desarrollar un dispositivo no invasivo que permita monitorear y medir algunas variables físicas y fisiológicas del empleado durante el desarrollo de sus prácticas laborales cotidianas, y a partir de ello estimar el riesgo que tiene el empleado de desarrollar esta enfermedad. De tal

forma que se prevenga el desarrollo de la enfermedad, y de esta forma se disminuya el impacto de la misma en la salud de las personas y en los gastos económicos de las empresas y ARP.

Actualmente se están llevando a cabo varios proyectos orientados al desarrollo de sistemas embebidos para la detección de problemas de salud, algunos de los cuales se listan a continuación:

- SAPHE (Smart and Aware Pervasive Healthcare Environments) [7]. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una plataforma inteligente, de supervisión no invasiva para el análisis de tendencias de datos a largo plazo.

Uno de los principales objetivos de SAPHE es asegurar que los pacientes con enfermedades crónicas sean tratados en un ámbito comunitario o con el apoyo del hogar, siempre que sea posible, lo que permite reducir la demanda de asistencia sanitaria y libera capacidad, al mismo tiempo que posibilita la atención de más pacientes y permite un uso más eficaz de los recursos, además de ofrecer una atención más personalizada y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

SAPHE busca abordar la necesidad de una nueva generación de sistemas de vigilancia de la salud, que permitan la detección temprana del deterioro de la salud mediante la identificación de cambios fisiológicos y metabólicos a lo largo del tiempo.

- UBIMON [8]. UbiMon tiene por objeto abordar tópicos generales relacionados con el uso de sensores portátiles para monitoreo distribuido y que además permitan la intervención. Como ejemplo, el proyecto desea ser utilizado en tratamiento de pacientes con enfermedades cardiovasculares.
- Otros proyectos relacionados son: HUMAN++, HealthService 24, WsHC - *Wireless Health and Care*, *Fraunhofer Body Area Network*, MobiHealth, Wealthy, HEARTS, MyHeart, CodeBlue: *Wireless Sensor Networks for Medical Care*, *Remote Arrhythmia Monitoring System Developed*.

1.1.2 Aplicaciones en el sector medioambiental

Las WSAN posibilitan el desarrollo de aplicaciones orientadas al monitoreo de variables medioambientales en aplicaciones como la caracterización de cuencas hidrográficas, el monitoreo de grandes extensiones de terrenos y el monitoreo de la calidad atmosférica. Lo cual facilita la detección de contaminantes, el análisis de condiciones microclimáticas, el estudio de factores de riesgo para especies en peligro, etc.

Algunas ideas concretas sobre problemáticas en este sector que pueden ser abordadas utilizando WSAN son:

- En los últimos años se ha desarrollado un gran interés por el desarrollo de técnicas y estrategias que permitan disminuir el impacto medioambiental. La

conservación de las fuentes de aguas o cuencas hidrográficas, la optimización del uso del agua, el control biológico de plagas, el manejo racional de los agroquímicos, el control de emisiones atmosféricas, etc., son temas de gran impacto en nuestra sociedad.

En Colombia, el porcentaje de ríos contaminados debido a la no existencia de sistemas de monitoreo continuo que permitan detectar y penalizar a quienes abusan, utilizan inadecuadamente o contaminan el agua, es un problema que crece con el tiempo. Adicionalmente, no existe la información suficiente, ni con la calidad requerida, para establecer normas claras que protejan el recurso hídrico. En países como Argentina, la legislación determina la cantidad de descargas contaminantes máxima por día a un río determinado, garantizando así unas condiciones máximas de contaminación. Actualmente en Colombia, el sistema tarifario existente para el cobro de las tasas retributivas (pagar por contaminar) no tiene límites de ningún tipo, por tanto quien contamina paga una tarifa por metro cúbico, sin importar cuantos metros cúbicos sean vertidos. Este aspecto en particular, plantea la necesidad de hacer estudios sobre los principales ríos y cuencas afectadas a nivel de capacidades de reaireación, de dispersión, de longitud de mezcla, de calidad y cantidad del agua en general, con miras a determinar las capacidades máxima que permite cada cauce, de tal manera que se garantice un mínimo de calidad del recurso.

Al realizar estudios sobre la capacidad dispersiva de los ríos, se pueden obtener índices sobre la capacidad que tiene el cauce de absorber una determinada contaminación. Esto está directamente ligado con el grado de impacto ambiental que puede tener un vertimiento contaminante en un río en particular. Dado que cada río tiene su propia capacidad dispersiva, la cual depende de características morfológicas, hidráulicas y de transporte del cauce; un vertimiento contaminante de idénticas características, tendría un impacto ambiental diferente según el lugar y el cauce en que se realice. Lo anterior señala la necesidad de clasificar los ríos según su capacidad dispersiva, y con base en esto orientar sobre los sitios óptimos para realizar vertimientos contaminantes. En su defecto podría diseñarse un sistema tarifario diferencial para el cobro de las tasas retributivas en donde se relacione el precio a pagar por contaminar, con la capacidad que tenga el río de dispersar dicha contaminación.

Para afrontar este problema se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo permanente de gran cubrimiento basado en WSAN, el cual permita tomar datos directamente del cauce, especialmente en los parámetros de calidad de agua.

- Los incendios forestales han formado parte de la historia natural de la tierra y de la civilización humana, desempeñando un rol fundamental en la evolución de especies biológicas y ecosistemas, lo mismo que en el avance cultural y tecnológico de la sociedad humana. Sin embargo, en la historia reciente del hombre se han venido intensificando a partir de la segunda mitad del siglo pasado, generando preocupación e importancia por su creciente frecuencia, escalamiento y repercusiones de distinta índole. En este contexto, una de las necesidades más apremiantes para los países tropicales, es la de generar

capacidades de anticipación ante la probabilidad del riesgo, para reducirlo a sus mínimos posibles.

En la actualidad este tipo de problemáticas han sido abordadas utilizando técnicas de procesamiento de imágenes orientadas a la prevención, monitoreo y control de incendios. La precisión de estos sistemas es afectada por condiciones climáticas, como neblina o nubes, reflexiones de luz o humo de zonas industriales. Para cubrir mayores extensiones boscosas esta tecnología se complementa con vigilancia por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV), sin embargo los rangos de cobertura permisibles para estos sistemas son aun limitados.

Por otro lado, la confiabilidad y precisión de los sistemas de vigilancia satelitales dependen también de condiciones climáticas, puesto que nubes y lluvia pueden absorber bandas espectrales y reducir la definición espectral de las imágenes, lo que tiene consecuencias en la precisión de la detección del fuego. Adicionalmente, el mayor problema de estos sistemas es la resolución temporal, que puede ascender hasta 2 días, lo que los hace inapropiados para detección inmediata del fenómeno.

La tecnología de redes de sensores contribuye a la solución de algunos de los inconvenientes presentes en los métodos basados en imágenes satelitales y dispositivos aéreos no tripulados, puesto que además de realizar una vigilancia continua, permiten obtener otro tipo de información complementaria a la obtenida por medio del análisis de imágenes, especialmente para la detección temprana de los incendios, y la detección preventiva de condiciones propiciadoras del fuego por medio de medición de variables ambientales, esto es debido a que las redes de sensores tienen mayores ventajas en satisfacer los dos principales requisitos en un sistema de alerta de fuego: mayor precisión espacial y respuesta inmediata.

Algunos de los proyectos medioambientales abordados con WSN son [9]:

- The *Great Duck Island Experiment*, figura 1.2. Esta red de sensores, compuesta por más de 150 nodos, fue diseñada para sensar, de forma no invasiva, la ocupación de los nidos de una especie de pato y la incidencia de los microclimas en su hábitat.



Figura 1.2 Imágenes del proyecto de monitorización de hábitat *Great Duck Island*

- *The Shared Wireless Infostation Model (SWIM)*. Por cuanto actualmente las ballenas y grandes mamíferos marinos se encuentran en peligro de extinción, éste proyecto fue desarrollado para estudiar el impacto de los cambios medioambientales naturales y aquellos provocados por el hombre, en el comportamiento y movilidad de estas especies.
- *The ZebraNet Wildlife Tracker*. Se desarrolló con el objetivo de reunir datos sobre una amplia gama de especies de animales terrestres, con el fin de comprender sus interacciones y la influencia de una sobre otras. El objetivo era también comprender los patrones de la migración de esos animales salvajes, y la forma en que pueden verse afectados por cambios en los patrones climáticos y otras influencias como el desarrollo humano. La arquitectura está siendo desplegada para estudiar el comportamiento de las cebras en la reserva Sweetwaters, en el centro de Kenia.

1.1.3 Aplicaciones en el sector agrícola

Se ha analizado como los métodos químicos para control de malezas y plagas en los cultivos afectan el proceso de la fotosíntesis en las plantas, produciendo clorosis y muerte de los tejidos. Además, este tipo de prácticas no controladas pueden ocasionar: a) El arrastre de contaminantes a las aguas subterráneas y superficiales; b) Afectación de la respiración del suelo; c) Disminución de la actividad biológica de organismos benéficos; d) Fototoxicidad en cultivos; e) Modificación de hábitat de especies; f) Afectación de cultivos vecinos; g) Contaminación del aire.

Las WSAN pueden contribuir a analizar el estado de salud de un cultivo por medio de la monitorización y el análisis regular en sitios específicos de las condiciones fisiológicas de las plantas, incluyendo entre otras su área foliar, niveles de clorofila, desarrollo de procesos de fotosíntesis y evapotranspiración, el crecimiento del cultivo y su rendimiento. Como también vigilar el estado del suelo obteniendo mediciones sobre propiedades químicas (cantidad de nutrientes, presencia de minerales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, hierro, cobre o aluminio, niveles de pH para medir acidez o basicidad, etc.), propiedades físicas (porosidad del suelo, densidad), o su capacidad de campo (disponibilidad de agua, pérdidas por escorrentía e infiltración, etc.). Por medio de medidas de WSAN se podría eventualmente analizar la biota, es decir, todo el conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos encontrados en el cultivo. Adicionalmente, la red de sensores puede recopilar información sobre diversas variables climáticas, como temperatura, precipitación, humedad, horas luz, niveles de radiación, viento y evaporación.

Esta información posibilita el desarrollo de pronósticos sobre plagas y sobre el rendimiento del cultivo. Es este tipo de disponibilidad de información para sitios particulares en momentos de tiempo específicos, lo que hace posible evaluar densidades óptimas de siembra, estimar cantidad óptima de fertilizante y predecir la producción en cada punto del cultivo. A esto se le conoce como *agricultura de precisión*, es decir, la posibilidad de observar, medir y controlar las prácticas agrícolas con diferenciación entre distintas partes de un mismo cultivo.

Algunas ideas concretas sobre problemáticas en este sector que pueden ser abordadas utilizando WSN son:

La producción bananera y platanera en el mundo se ha incrementado substancialmente, especialmente en Ecuador, Colombia, Costa Rica, Honduras, Nicaragua, entre otros países. Conjuntamente con este auge del cultivo, tanto en área como en rendimiento, se ha incrementado el costo del control de plagas y enfermedades, entre ellas la sigatoka negra (*Mycopharella fijiensis var. diformis Morelet*), que en Costa Rica representa anualmente a las empresas bananeras del país el equivalente al 27% del total de costos de producción de la fruta [10].

El principal problema que afecta la actividad productiva en Costa Rica y en general en el mundo, es la contaminación ambiental y el aumento de los costos de producción, especialmente por la incidencia de la sigatoka negra, la cual es provocada por un hongo del grupo de los *Ascomycetes* (hongo perfecto); esta enfermedad es muy persistente y con el tiempo se ha hecho resistente a los principales agroquímicos (funguicidas) que se utilizan mundialmente para su combate. Esto ha hecho que se tengan que aumentar las aplicaciones de funguicidas a más de 40 aplicaciones por año, y el uso de diferentes grupos o familias de químicos en mezclas o “cócteles”, con lo cual se aumentan los costos y en especial la contaminación ambiental [11]. La enfermedad produce manchas o necrosis en las hojas hasta abarcar toda el área foliar, afectando la calidad del fruto (racimo), provocando descenso en el peso, calibre y longitud del dedo; madurez prematura y una disminución en la vida útil de la plantación, además, un aumento en el porcentaje de frutos de desecho y pérdidas económicas en la producción.

Las aplicaciones se realizan con aviones de fumigación o helicópteros, los cuales dispersan los productos sobre las plantaciones de banano y plátano y sus alrededores, provocando la contaminación de ríos, acuíferos, ciudades y otras plantaciones de otros cultivos (pastos, forestales, granos básicos, hortalizas y otros) y sobre la población civil, ocasionando problemas respiratorios e intoxicaciones a la gente, en las ciudades y pueblos adyacentes.

Técnicamente existe un programa de monitoreo del avance de la enfermedad, llamado el “preaviso biológico”, que consiste en verificar en el campo la presencia de daño en las hojas de la planta, esta lectura es visual y es realizada por técnicos, los cuales van al campo y seleccionan 10 plantas al azar por hectárea y hacen el muestreo sugerido, la información es anotada en una plantilla para el caso. Esta plantilla muestra gráficamente la forma de la hoja y define 6 posibles grados de avance de la enfermedad, luego mediante una serie de cálculos matemáticos se llega a un dato final que define el avance de la enfermedad, éste define el momento de realizar las aplicaciones de químicos.

El problema se presenta por cuanto el muestreo manual es muy lento, el método requiere demasiada cantidad de información y un elevado volumen de análisis matemáticos, que no están permanentemente actualizados para ser tomados como punto de referencia. Según informaciones de los especialistas en esta

enfermedad, no pueden hacer uso del preaviso biológico por estar atrasado en un promedio de tres o cuatro meses de referencia, por lo cual, realizan las aplicaciones de agroquímicos en forma general, sin precisar si se amerita o no y si la enfermedad está avanzando o no. Este tipo de decisiones, es la causa de los altos costos por su control y la ineficiencia de los productos químicos utilizados y por consiguiente de la contaminación ambiental.

Una automatización y eficiencia en la toma de los datos a nivel de campo con la prontitud y rapidez en tener con antelación el grado de avance de la enfermedad, ayudaría a tomar las decisiones acertadas para definir los mecanismos de acción para su combate en forma económica y disminuyendo su impacto sobre el medioambiente. El objetivo es crear un sistema de monitoreo de enfermedades automatizado, eficiente y sostenible para plantaciones comerciales de banano y plátano.

En el proyecto LOFAR-agro se desarrolló una WSN de aproximadamente 100 nodos para una aplicación de agricultura de precisión. En el cual, por medio de la medición de humedad y temperatura, se pretendía detectar el momento propicio para combatir la fitóftoras en los cultivos de papa. Los resultados experimentales mostraron como el crecimiento del cultivo reduce drásticamente el radio de cobertura de la comunicación y afecta el desempeño de la aplicación [12].



Figura 1.3 Imagen de uno de los nodos utilizados en el proyecto LOFAR

1.1.4 Aplicaciones en el sector industrial

Debido al aumento en la complejidad de los sistemas de control gran parte de las actividades se deben distribuir entre diferentes nodos, donde los lazos de control son cerrados a través de una red de comunicaciones (Networked Control Systems - NCS). Adicionalmente, la implementación de sistemas de control distribuido permite disminuir el impacto producido por las fallas en un componente del sistema y facilita las actividades de diagnóstico y mantenimiento del mismo.

La estructura genérica de un NCS se presenta en la figura 1.4. Se puede apreciar que los sensores y actuadores están dotados de interfaces de red y son autónomos. Además, que tanto las mediciones como las acciones de control se transfieren a través de una red de comunicaciones.

Dado que la movilidad de los elementos que conforman los nodos en los sistemas industriales es muy baja, las aplicaciones en este sector no demandan un uso estricto de redes inalámbricas, por esta razón en la mayoría de los casos se utilizan redes

alambradas; esto también se debe en gran medida a la confiabilidad de las redes alambradas y la posibilidad de estas para soportar periodos de transmisión menores a los que permiten las redes inalámbricas. Sin embargo, el desarrollo de nuevas aplicaciones sobre WSN abre un nuevo panorama en el que se integran redes alambradas e inalámbricas para aumentar la flexibilidad y confiabilidad de las aplicaciones; además, su impacto en la reducción de costos de implementación es significativo.

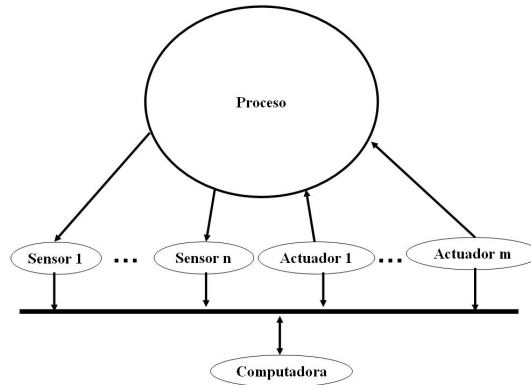


Figura 1.4 Estructura genérica de un NCS

Algunas ideas concretas sobre problemáticas en este sector que pueden ser abordadas utilizando WSN son:

- En un alto porcentaje de las pequeñas y medianas empresas en Latinoamérica, la inversión en automatización resulta ser precaria y en algunos casos inexistente. El alto costo de inversión inicial, la poca sostenibilidad, la falta de capacitación, son algunas de las causas de esta baja inversión.

La implementación de NCS utilizando redes alambradas aumenta los costos y complejidad de los sistemas automáticos de control. Por tal razón, en la actualidad el interés se centra en los sistemas de control interconectados a través de redes inalámbricas denominados *Wireless Networked Controlled Systems* (WiNCS). En el año 2007 surgió un nuevo estándar *WirelessHART* el cual se ha orientado a suplir las necesidades de la industria de procesos, en la figura 1.5 se presenta la arquitectura de una aplicación industrial utilizando este estándar.

Las ventajas que ofrecen estos sistemas repercuten en mejoras en la calidad de los productos y disminución de costos de producción y mantenimiento. Además, la utilización de redes inalámbricas facilita la instalación y adaptación del sistema y reduce considerablemente los costos de implementación.

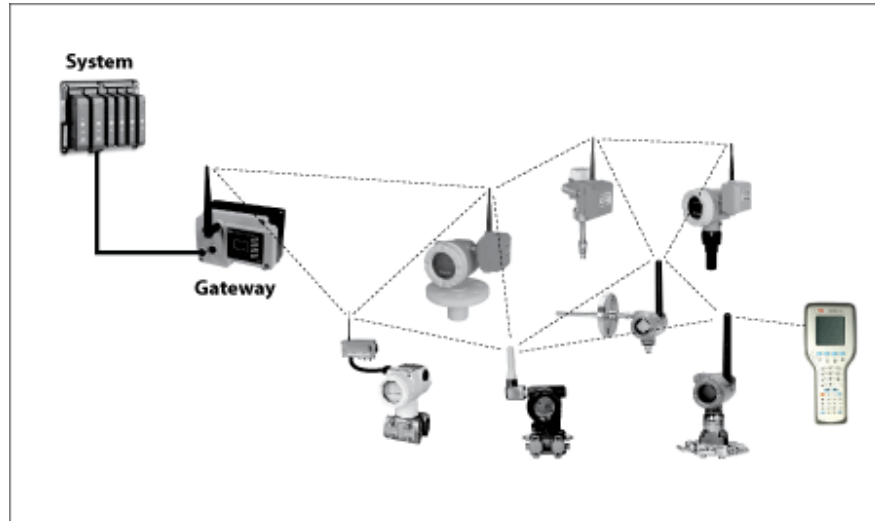


Figura 1.5 Arquitectura de una aplicación industrial utilizando *WirelessHART*

- En la actualidad las máquinas eléctricas de inducción se han constituido en ejes fundamentales de los procesos de producción en los ambientes industriales, por tal razón se requiere tener un continuo monitoreo para garantizar su mayor eficiencia.

La necesidad de garantizar la eficiencia de estas máquinas ha generado el desarrollo de métodos que en principio se basan en planes preventivos y la aplicación de pruebas fuera de línea que requieren el paro del proceso de producción para su realización; lo cual conlleva, en algunos casos, a grandes pérdidas. Por esta razón surgió el interés en desarrollar métodos y sistemas de diagnóstico que no requieran el paro de los procesos, lo cual se ha denominado *técnicas de diagnóstico en línea*.

Algunos de las técnicas de diagnóstico en línea desarrolladas para motores son análisis de vibraciones, análisis térmico, análisis de potencia, análisis espectral de corrientes, impedancia de secuencia inversa, medición del flujo axial de dispersión, par electromagnético.

La problemática se centra en el elevado costo de los sistemas existentes, lo cual los hace inasequibles para las pequeñas y medianas empresas. Así como también en los desafíos existentes desde el punto de vista de las técnicas de diagnóstico, que dificultan la detección de algunas fallas en presencia de variaciones de carga en el motor.

El objetivo general en éste sector es desarrollar una plataforma de cómputo de bajo costo, para la construcción de sistemas compuestos de diferentes nodos sensores, controladores, actuadores y de diagnóstico; los cuales se integren a través de redes inalámbricas, y permitan el monitoreo continuo y la detección de fallos en las plantas, además de cumplir con los requerimientos de los algoritmos de control.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Las actuales problemáticas en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial y los desafíos de investigación presentes en el diseño de WSN, han motivado el planteamiento de un plan de investigación, el cual se ha propuesto desarrollar durante la Tesina de Master y la Tesis de Doctorado, en el Programa de Posgrado en Automática e Informática Industrial.

El objetivo general de la Tesina de Master es concretar y profundizar en el proyecto de investigación en el marco del posgrado. En general se abordará el planteamiento de un estilo formal de diseño de redes de sensores y actuadores inalámbricos, enmarcado en un contexto aplicativo en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial.

En la Tesina de Master se busca analizar dichas aplicaciones y la tecnología existente para su desarrollo, a partir de lo cual se desarrollará una propuesta de la arquitectura de la red y los nodos que la conforman. Para lo cual se analizarán los resultados experimentales y de simulación del desempeño de dos casos de estudio, uno de análisis del estado de pacientes a partir de algoritmos de procesamiento digital de señales y otro en control, con lo cual se logrará detallar aspectos de la propuesta realizada y del desempeño de dichas aplicaciones.

Durante el trabajo se identificarán y analizarán los actuales desafíos científicos y tecnológicos en esta área, con el objeto de valorar las aportaciones que se hagan al respecto.

1.3 CONTENIDO DEL DOCUMENTO

El documento se encuentra dividido en 5 capítulos constituidos de la siguiente forma, en el capítulo 2 se presenta el estado del arte de las redes de sensores y actuadores inalámbricos. Una clasificación de las aplicaciones, y la propuesta de la arquitectura de la red y los nodos que la conforman, es presentada en el capítulo 3. En el capítulo 4 se evalúa el comportamiento temporal de un sistema distribuido de control, implementado sobre los protocolos IEEE 802.15.4 y CAN. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y se indican las líneas de investigación futuras en esta área, algunas de las cuales serán abordadas durante la tesis de doctorado.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE EN REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS

La arquitectura de los nodos y de la red que conforman una WSN está directamente influenciada por el tipo de aplicación para la cual se desarrolla. Los parámetros más relevantes en el diseño son [13]:

- **Tiempo de vida.** En aplicaciones médicas, agrícolas y medioambientales se espera que la aplicación funcione de forma autónoma por largos periodos de tiempo. El factor que más incide en el tiempo de vida es el consumo de potencia, y la actividad que más consume potencia es la comunicación, de allí el interés por la implementación de estrategias que disminuyan el consumo de potencia en dicha actividad.
- **Cobertura.** En aplicaciones, agrícolas y medioambientales se requiere cubrir grandes áreas en espacios abiertos. Para lo cual es importante contar con nodos móviles y estrategias adecuadas para la escalabilidad de la red y la transmisión de información en modo multi-salto.
- **Costo y fácil desarrollo.** En muchos casos los usuarios de esta tecnología no tienen conocimientos avanzados en computación, por lo cual se requiere contar con plataformas que faciliten la instalación y el desarrollo de dichas aplicaciones. Adicionalmente, en algunas aplicaciones, tales como las medioambientales, se distribuye un elevado número de nodos que al final no se pueden recuperar en su totalidad, de allí la importancia en disponer de nodos de bajo costo.
- **Tiempo de respuesta.** En aplicaciones industriales es importante acotar los tiempos de envío de información por cuanto este parámetro puede afectar el desempeño de las estrategias de control. De igual modo, en aplicaciones de vigilancia y seguridad, como por ejemplo en sistemas de detección de incendios, es importante minimizar el tiempo en que se transmite la información.
- **Sincronización.** Existen aplicaciones en donde es importante correlacionar temporalmente la información suministrada por diferentes nodos, para lo cual es importante dotar las muestras de una marca temporal.
- **Protección de la información.** Debido a que el medio de comunicaciones a través del cual se desarrolla la comunicación es inalámbrico, es importante establecer mecanismos que garanticen la autenticidad de información.

Uno de los grandes desafíos en el desarrollo de estas aplicaciones se centra en que la minimización de uno de los anteriores factores puede ocasionar el aumento de otro, con lo cual se debe lograr un compromiso entre los mismos.

En *The Great Duck Island Experiment* [9] se utilizaron nodos Mica2Dot, ejecutando el sistema operativo TinyOS. Los nodos fueron alimentados por baterías de litio, y el tiempo de vida esperado fue de 100 días aproximadamente, el cual se afectó considerablemente por la sobrecarga del protocolo de comunicaciones multi-salto; además la movilidad esperada de los nodos fue muy baja. La arquitectura de la red fue jerárquica multinivel y se emplearon técnicas único-salto y multi-salto; también se implementaron estrategias para disminuir el tiempo en que el dispositivo de comunicaciones permaneció activo con el propósito de aumentar el tiempo de vida en el nodo.

En el proyecto SWIM [9] se empleó un procesador MSP430. El transmisor de radio fue un Silicon Labs Si4112. El área cubierta fue bastante grande y la movilidad de los nodos fue muy alta. Por cuanto en este proyecto no hubo restricciones en cuanto al tiempo de envío de la información, los nodos conectados a las ballenas almacenaban información hasta detectar que se encontraban dentro del radio de cobertura de un nodo recolector de información, lo cual requirió dotar estos nodos de memoria suficiente para almacenar los datos. La comunicación implementó un único-salto para transmitir la información desde los nodos sensores hasta los nodos recolectores.

Otro aspecto de gran interés actualmente en esta área se relaciona con el acceso a información geográfica. Algunas de sus aplicaciones se centran en la evaluación de usos del suelo, recuperación de desastres naturales, restauraciones medioambientales, etc. En todas estas áreas, la información geográfica juega un papel vital junto con una infraestructura asociada a ella, denominada “Infraestructura de datos espaciales”. Estas infraestructuras son esenciales para poder hacer uso de los diferentes datos espaciales que actualmente se demandan, ya que, proporcionan la compatibilidad adecuada y facilitan el acceso y la adecuada utilización de la información.

El *SWE (Sensor Web Enablement)* es una iniciativa del OGC (OpenGIS Consortium) que pretende disponer de los datos de sensores vía Servicios Web, definiendo el marco de interoperabilidad para el acceso y utilización de los sensores o sistemas de sensores en un contexto vía Internet o protocolos Web.

Los componentes de SWE se pueden dividir en dos grupos: modelos de información y servicios. Los modelos de información son las especificaciones XML con las que trabaja el sistema, mientras que los servicios son los componentes encargados de trabajar con dichos modelos.

Los modelos de información de SWE emplean XML como lenguaje para la especificación. Los modelos que proporciona SWE son los tres siguientes:

- **O&M: *Observations and Measurements Schema*.** Pretende proporcionar los modelos de información y los esquemas XML necesarios para la descripción de medidas y las observaciones de los sensores.

- **SensorML: *Sensor Model Language*.** Proporciona la información necesaria acerca de los sensores. Esta información debe contener la localización de los mismos, la información necesaria para su análisis y procesamiento de las observaciones que se puedan dar y que permita caracterizar la fiabilidad y calidad de las mismas, lo cual está relacionado directamente con la QoS requerida en el nivel de aplicación.
- **TML: *Trasducer Markup Language*.** Es un lenguaje, basado en XML, para el intercambio de datos entre sensores y sistemas, el lenguaje comunica tanto los datos del sensor, como la meta-información asociada al mismo.

A continuación se realiza un análisis de los nodos y protocolos de comunicaciones mas empleados actualmente en aplicaciones de WSN.

2.1 ARQUITECTURA DE LOS NODOS

Las arquitecturas de los nodos dependen altamente de la aplicación a la cual están dirigidos. Los nodos actuales se caracterizan por estar dotados de coprocesadores, los cuales permiten acelerar el procesamiento de ciertas funciones, tales como comunicación y seguridad de la información, al mismo tiempo que se logra un mejor balance entre el consumo de potencia y la eficiencia del sistema.

En el mercado se encuentran nodos sensores con procesadores de 8, 16 y 32 bits, dotados de interfaces para intercambiar información con el medio en el que se encuentran utilizando una gran variedad de sensores y actuadores, entre ellos de temperatura, luz, relés, presión barométrica, GPS, micrófono, fotorresistencia, termistores, aceleración, etc. En la tabla 2.1 se presentan las características de los nodos sensores mas reportados en las aplicaciones.






El parámetro más relevante dentro de las características de las WSN es el consumo de potencia. Debido a esto, es necesario dentro de la selección de un procesador para este tipo de aplicaciones, considerar el consumo de potencia tanto por sus características físicas (voltajes y corrientes requeridos en operación y en espera), como de programación (modos de bajo consumo SLEEP/HALT/IDLE). Adicionalmente, la posibilidad de emplear técnicas como *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) contribuye significativamente al ahorro del consumo de potencia.

Los desarrollos realizados en los últimos años, se han orientado a la integración de núcleos de procesadores existentes junto con coprocesadores e interfaces especializadas. Logrando, además de un mejor balance en cuanto al consumo de potencia y el tiempo de procesamiento, la disminución del costo, tamaño y tiempo de desarrollo de las aplicaciones. Tal es el caso de los dispositivos CC2431 y CC2480 de Texas Instruments.

Con relación al sistema operativo, el sistema mas empleado ha sido el TinyOs [14], el cual está orientado para uso en sistemas de cómputo con grandes restricciones, tales como microcontroladores de 8 bits con pequeña cantidad de memoria; se basa en un modelo de programación basado en componentes y guiado por eventos, en el cual los

manejadores de eventos tienen mayor prioridad que las tareas, las cuales se ejecutan basadas en un planificador FCFS.

Tabla. 2.1 Características de las plataformas de nodos sensores

Características	Mica2	Micaz	MC13213	Telos	Imote 2
					
Tipo de CPU / [MHz]	8bit Atmel / 8	8bit Atmel / 8	8bit MC9S08/16	16bit TI / 8	32bit XS /13(104)
SRAM [kB]	4	4	4	10	256 - 32,000
FLASH [kB]	128 + 512	128 + 512	60	48 / 1024	32,000
Radio	300-900MHz	802.15.4	802.15.4	802.15.4	802.15.4 (Bluetooth/802.11)
Bandwidth [kb/s]	15	250	250	250	250 (720/11,000)
Potencia Consumo/Rx/Tx [mA]	8 / 10 / 27	8 / 20 / 18	8 / 42 / 35	1 / 20 / 18	40 / 20 / 18
Consumo en modo SLEEP [uA]	19	27	20-120	6	390
Sistema Operativo	TinyOS	TinyOS	No Utiliza	TinyOS	TinyOS
Interfaces	6 canales AD de 10 bits. Las interfaces en estos nodos son diseñadas en placas independientes	8 canales AD de 10 bits. Las interfaces en estos nodos son diseñadas en placas independientes	8 canales AD de 10 bits Sensor de temperatura e indicador de nivel de audio Interfaces RS-232 y USB	8 canales AD de 12 bits 2 canales DA de 12 bits Sensores de Luz, IR, Humedad Temperatura Interface USB	I ² S, AC97, Camera Chip Interface, GPIOs, SDIO, USB

En los productos de Chipcon y Texas Instruments se emplea un planificador de tareas basado en prioridades estáticas, y mecanismos de comunicación soportados en paso de mensajes.

La principal motivación para utilizar planificadores guiados por eventos en este tipo de aplicaciones, es porque aquellas plataformas donde se han implementado están orientadas a abordar sistemas reactivos, con lo cual el uso de estos esquemas de planificación posibilitan el envío del procesador a modos de bajo consumo de potencia por instantes de tiempo mas prolongados, sin embargo este tipo de planificadores no son adecuados para abordar problemas de tiempo real.

En [15] se presenta una comparación del consumo de potencia para diferentes planificadores de tareas realizando DVS del procesador. En los resultados presentados se puede apreciar como empleando un planificador EDF y técnicas de DVS, es posible alcanzar ahorros significativos de la potencia del procesador y

garantizar RT, para lo cual es necesario integrar en los nodos procesadores que faciliten la implementación de DVS.

En cuanto a aspectos de protección de información, las restricciones de estos dispositivos en cuanto a la limitada capacidad de cómputo, bajo consumo de potencia y poca capacidad de almacenamiento, así como la variabilidad en la infraestructura, restringen la implementación de algoritmos complejos de seguridad. En IEEE 802.15.4 se establece un mecanismo de cifrado soportado en claves simétricas, las cuales son provistas por los niveles superiores [16].

Actualmente ya se han incorporado módulos hardware en los procesadores que facilitan el desarrollo de dichas funciones. Tal es el caso del coprocesador para implementar el Advanced Encryption Standard (AES), integrado en los CC2420, CC2430 y CC2431 de Texas Instruments. De igual forma, en el en el CC2431 se ha incorporado un módulo especializado para abordar la problemática de la localización de nodos con base en algoritmos de triangulación.

Aunque existen algunas propuestas en cuanto a middleware en esta área, estas aún son incipientes debido a la heterogeneidad de la arquitectura de los nodos, en cuanto a hardware, sistema operativo y protocolo de comunicaciones, como consecuencia de la particularidad de las aplicaciones para las cuales han sido diseñados.

2.2 PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES

En esta sección se presentan los algoritmos empleados para el control de acceso al medio y para el encaminamiento de la información a través de la red.

2.2.1 Protocolos de control de acceso al medio (MAC)

Aunque las WSN comparten algunas características con las redes inalámbricas tradicionales, en general ellas se diferencian en que: a) Los nodos individuales en una red de sensores generalmente están en movimiento, por lo que la topología de la red puede cambiar dinámicamente; b) La conservación de energía es un parámetro de interés prioritario en las WSN; c) Los nodos sensores podrían no tener un único identificador; d) Las WSN utilizan técnicas multi-salto para comunicar la información de los sensores; e) Generalmente una WSN está compuesta de un elevado número de nodos; f) Los datos generados en los nodos generalmente están relacionados con los datos de los nodos vecinos, lo cual puede ser aprovechado como estrategia para disminuir el consumo de potencia en la red; la agregación de datos es un concepto en el que cada nodo busca eliminar la cantidad de mensajes enviados por medio del procesamiento de los mensajes que recibe con los datos obtenidos localmente, y transmite solo el resultado obtenido [17].

Los principales requerimientos de una WSN son la eficiencia energética, escalabilidad, y en algunas aplicaciones se requiere una latencia mínima y/o acotada. Estos se alcanzan en mayor o menor medida dependiendo el tipo de protocolo MAC seleccionado, los cuales se pueden clasificar en protocolos planificados, generalmente basados en TDMA, y protocolos basados en contención.

- Los protocolos que utilizan TDMA requieren de un maestro que distribuye el orden en que los nodos accederán al medio, lo cual se realiza al inicio de la aplicación, disminuyendo así el *overhead* en cuanto a paquetes de control. Además, este tipo de protocolos son libres de colisión y presentan un muy buen desempeño en redes único-salto. Sin embargo, requieren una sincronización estricta, y una vez se realiza la inicialización el orden de acceso al medio no puede ser modificado, lo cual dificulta el acceso de nuevos nodos a la red; aunque éste último inconveniente puede ser resuelto realizando inicializaciones frecuentes, lo cual fue implementado en el protocolo Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), intercambiando cada vez la función de nodo maestro entre los diferentes nodos de la red, logrando igualmente un gasto equitativo en el consumo de energía de los nodos. No obstante, en LEACH se presentan problemas de sincronismo debido a colisiones en el medio entre grupos de nodos vecinos.

La técnica que se emplee para sincronizar los nodos dependerá de la aplicación para la cual esté orientada la WSN. El objetivo de cualquier técnica de sincronización de tiempo es mantener un tiempo similar dentro de una cierta tolerancia entre los nodos que conforman la red. Efectos como tiempos de acceso para el envío de mensajes de sincronización y las derivas en los relojes locales de los nodos, pueden afectar de manera significativa la sincronización de toda la red. El protocolo NTP posee una carga computacional muy elevada y no tiene en cuenta estrategias de ahorro de energía, lo cual no lo hace adecuado para WSN. Además, su esquema de sincronización estableciendo una arquitectura jerárquica, puede ser afectada por la presencia de fallas en nodos servidores de tiempo intermedios dentro de la jerarquía y por el movimiento de los nodos.

En [18] se implementó en cada nodo, un módulo dedicado a la sincronización de tiempo por medio de un receptor de radio AM, con lo cual se logró una sincronización de tiempo global y robusta, pero de esta forma se incrementan los costos y el consumo de potencia de los nodos.

Otro protocolo de acceso planificado utilizado en aplicaciones de WSN es Bluetooth [19] el cual está muy restringido tanto por el rango de transmisión, aproximadamente 10 m, como por el número de nodos que se pueden conectar a una Piconet, un maestro y siete esclavos.

El protocolo IEEE 802.15.4 implementa un modo espacial de comunicaciones denominado supertrama, a través del cual se logra la sincronización de nodos por medio de tramas beacon, y es posible garantizar tiempos máximos de envío de información haciendo uso de ranuras de tiempo garantizado (GTS); adicionalmente existen primitivas por medio de las cuales el coordinador puede modificar el itinerario de envío de información en los GTS. Sin embargo, este modo de operación está restringido a comunicaciones en redes estrella.

Una gran ventaja de los protocolos TDMA es que facilitan la implementación de técnicas de ahorro de energía implementando periodos de apagado de los transceiver en los nodos. En [9] se presenta una comparación de la potencia consumida en los diferentes modos de operación entre el RFM TR1000, utilizado

en la plataforma MICA, el Chipcon CC1000, utilizado en la plataforma MICA2, y el Chipcon CC2420 utilizado en las plataformas MICAz y Telos, cuyos resultados se presentan en la figura 2.1. Se puede apreciar como el consumo de potencia en modo idle es comparable al consumo en los modos de transmisión y recepción, y que el mayor ahorro de potencia se logra cuando se apaga el transceiver.

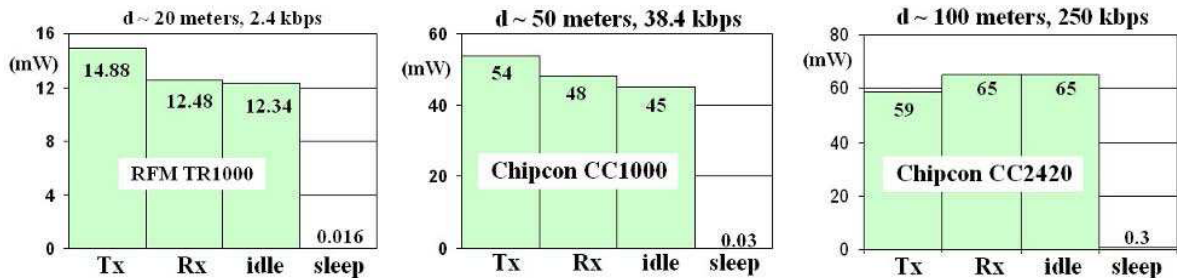


Figura 2.1 Diagrama comparativo del consumo de potencia en los diferentes modos de operación del TR1000, CC1000 y CC2420, [9]

- Los protocolos basados en contención empujan generalmente CSMA, en este tipo de protocolos se facilita el ingreso de nuevos nodos a la red, lo cual contribuye a la escalabilidad de las aplicaciones. Igualmente se facilita la implementación de técnicas multi-salto con relación a los protocolos TDMA. Algunos de los protocolos basados en contención más representativos son:
 - Sensor-MAC (SMAC). Considera la eficiencia energética como el factor más importante, para ello apaga el transceiver periódicamente, lo cual aumenta la latencia del sistema pero disminuye el *Duty cycle*, el cual se define como:

$$Duty_cycle = \frac{Tiempo_escuchar_medio}{Periodo} \quad (2.1)$$

SMAC introduce un tipo de paquete SYNC para realizar la tarea de sincronización. Durante el tiempo de escuchar el medio los nodos esperan recibir paquetes SYNC, los cuales indica los instantes en que los nodos accederán al medio, posteriormente apagan el transceiver hasta su instante de activación. Para garantizar la conexión entre clusters vecinos, los nodos que reciben múltiples itinerarios de activación deben adoptar un itinerario igual a la unión entre los diferentes planes recibidos. La desventaja radica en que el itinerario debe ser establecido previamente y no puede ser ajustado para diferentes cargas de tráfico.

- Timeout-MAC (TMAC). Este protocolo intenta mejorar el ahorro de energía en el SMAC reduciendo el tiempo de escuchar el medio. Sin embargo, al igual que SMAC, este protocolo gasta mucha energía en retransmisiones debidas a colisiones en el canal.

Existen otros tipos de protocolos que buscan mejorar el consumo de potencia de SMAC adaptando dinámicamente el tiempo de escuchar el medio, o planteando

arquitecturas de red jerárquicas y disminuyendo mensajes de control como CTS y RTS, lo cual solo presenta mejores desempeños que SMAC para casos específicos, tal es el caso de DMAC.

Los requerimientos de las aplicaciones en redes de sensores han motivado a los diseñadores a utilizar estándares como el IEEE 802.15.4 y IEEE 802.11.x. El desarrollo de aplicaciones con IEEE 802.11 y BLUETOOTH (802.15.1) presentan el inconveniente del alto consumo de potencia. Sin embargo, estos protocolos son adecuados para el envío de grandes cantidades de datos.

2.2.2 Algoritmos de encaminamiento

Con relación a los algoritmos de encaminamiento, estos pueden ser clasificados en [20]:

- **Proactivos.** Mantienen rutas continuamente para todos los nodos alcanzables, por lo que requieren diseminar periódicamente tablas de encaminamiento actualizadas.
- **Reactivos.** Establecen y mantienen una ruta solo si hay necesidad de comunicación.
- **De encaminamiento geográfico.** Utilizan la localización en decisiones de encaminamiento.

Dentro de los principales inconvenientes que se presentan en el desarrollo de estas aplicaciones se encuentra la gran dinámica con que se modifica la arquitectura de estas redes debido a la movilidad de los nodos, lo cual incrementa la pérdida de mensajes y limita el cumplimiento de las restricciones de tiempo real presentes en la aplicación. Adicionalmente, la limitación de recursos como la memoria restringe el uso de grandes tablas para el almacenamiento de rutas.

En aplicaciones donde los nodos se encuentran en posiciones geográficas fijas es posible utilizar algoritmos de encaminamiento basados en tablas fijas. Sin embargo, existen algunas aplicaciones donde la movilidad de los nodos modifica rápidamente la estructura de la red, en dichos casos se deben plantear estrategias que se adapten a los cambios que se presentan.

Algunas de las propuestas realizadas para abordar el problema de encaminamiento en WSN son las siguientes [17], [21], [22], [23]:

- **Flooding:** Éste envía una copia del mensaje a todos los dispositivos de la red. No es muy eficiente en grandes redes, además de que el consumo de potencia es elevado.
- **Bellman-ford algorithm.** Éste algoritmo se apoya en tablas de encaminamiento, para lo cual todos los nodos de la red deben mantener actualizadas unas tablas que indican el costo de las diferentes rutas, para ello intercambian y comparan dicha

información. Éste algoritmo presenta un desempeño bajo en presencia de enlaces dañados. Adicionalmente, no es adecuado para grandes redes debido al tamaño de las tablas.

- **Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV).** Es un protocolo para el encaminamiento de la información en redes móviles Ad-Hoc y es el algoritmo implementado en Zigbee, uno de los protocolos de red más utilizados en nodos comerciales de WSN. Es un protocolo reactivo, es decir, solamente se establece una ruta hacia el destino si llega una petición de envío de información, y como su propio nombre indica es un protocolo basado en vector de distancia.

Una de las características que define a AODV es el uso de tablas de encaminamiento en cada nodo para evitar transportar rutas en los paquetes. Cada destino de la tabla de encaminamiento lleva asociado un número de secuencia y un temporizador. Éste número permite distinguir entre información nueva e información antigua, de tal manera que se evita la formación de bucles y la transmisión de rutas antiguas o caducadas por la red. La función del temporizador es evitar usar enlaces de los que no se conoce su estado desde hace mucho tiempo.

- **Dynamic Source Routing (DSR).** Al igual que AODV es reactivo, sin embargo se diferencia de este en que no utiliza tablas para encaminar los datos. En DSR el nodo emisor conoce la ruta completa hasta el destino; estas rutas son almacenadas en una cache y son enviadas en la cabecera del paquete. Cuando un nodo requiere enviar un dato y desconoce la ruta hacia el destino, inicia un proceso de descubrimiento dinámico de ruta.

En [22], [23], se realiza una comparación de los protocolos de encaminamiento AODV y DSR, en el contexto de redes inalámbricas MANETs. Para alta movilidad en los nodos AODV presenta un mejor porcentaje de entrega de paquetes que DSR, lo que se invierte para una baja movilidad. Para un número pequeño de nodos fuentes de información, inferior a 20, el retardo en la entrega de paquetes es igual en ambos protocolos; sin embargo, al aumentar el número de nodos en la red y teniendo estos una alta movilidad, AODV presenta un menor retardo que DSR, lo cual nuevamente cambia para una baja movilidad en los nodos. Aunque para escenarios de WSN donde hay nodos con diferentes niveles de movilidad, los resultados presentados no permiten concluir cuál de estos protocolos es el más adecuado.

Desde el punto de vista de la escalabilidad, DSR presenta un mejor desempeño que AODV considerando como métrica el porcentaje de paquetes entregados, pero al considerar como parámetro de comparación el retardo extremo-extremo en la entrega de paquetes, AODV se comporta mejor frente a cambios en el número de nodos de la red.

También se observó como DSR presentó una mayor carga en la MAC que AODV, lo cual afecta el consumo de energía. Aunque ninguno de estos dos protocolos posee mecanismos para balance de carga, con lo cual algunos nodos de la red se pueden sobrecargar y de esta forma se afecta el tiempo de vida de la red.

2.3 DESAFÍOS DE INVESTIGACIÓN

Con base en el estado actual de la tecnología y de las aplicaciones, y considerando los desafíos presentes en el diseño de WSAAN, WSN y sistemas empujados presentados en [24], [25], [26], [27], [28], [29] los principales desafíos que deben ser abordados para lograr un buen desarrollo de aplicaciones de WSAAN en los sectores descritos son:

- Limitación de recursos y topología dinámica de la red. Los nodos generalmente están equipados con dispositivos pequeños con limitada capacidad de procesamiento de datos, tasa de transmisión, baterías de almacenamiento de energía, y memoria. En particular, la conservación de la energía es sumamente importante para ampliar la vida útil de la red, porque a menudo es inviable o indeseable recargar o sustituir las baterías de los nodos. Estas limitaciones pueden afectar la QoS de la aplicación.

Por otro lado, la movilidad de los nodos genera cambios dinámicos en la topología de la red, lo cual igualmente incide sobre la QoS de la aplicación, principalmente en parámetros relacionados con los retrasos en la transmisión de mensajes.

Por lo tanto, es muy importante el uso eficiente de los recursos disponibles en los nodos. Para lo cual se plantean los siguientes desafíos:

- Definición de indicadores de QoS, en función de parámetros como el cumplimiento de los requerimientos temporales de las aplicaciones y la limitación del consumo de energía.
 - Proponer estrategias de cooperación entre el protocolo de comunicaciones, el planificador de tareas y técnicas de DVS, para minimizar el consumo de potencia y garantizar el cumplimiento de los plazos de tiempo extremo – extremo en las aplicaciones.
 - Es importante considerar el planteamiento de una arquitectura que posibilite el codiseño hardware-software, con el propósito de optimizar el consumo de potencia, los tiempos de respuesta y la cantidad de memoria requerida por la aplicación; como también facilitar la adaptabilidad y escalabilidad del sistema, y limitar la intervención de tareas de comunicación sobre las tareas de procesamiento.
- Plataformas heterogéneas. Por cuanto cada nodo en la red cumple con objetivos específicos, y con el propósito de optimizar los diferentes parámetros que inciden en el diseño de estas aplicaciones, los nodos que conforman una WSAAN no siempre poseen el mismo tipo de recursos, como por ejemplo procesadores, dispositivos de almacenamiento, e interfaces y protocolos de red.

Estas diferencias en cuanto a las plataformas dificultan el diseño de estas aplicaciones y hacen que sea muy difícil de hacer uso pleno de los recursos

disponibles en el sistema integrado. En consecuencia, la eficiencia de los recursos no puede ser maximizada en muchas situaciones, y la QoS de la aplicación puede verse afectada. Con relación a lo anterior se proponen los siguientes desafíos:

- Desarrollo de un middleware que facilite el diseño de aplicaciones en arquitecturas heterogéneas y gestione parámetros de QoS.
- Se requiere el desarrollo de modelos detallados de los componentes del sistema (tareas hardware y software, planificador de tareas, protocolos de comunicaciones), en lenguajes que permitan la correcta especificación y el posterior análisis de procesamiento de información, alcanzabilidad, seguridad, y cumplimiento de plazos en la aplicación que posibiliten el análisis de planificabilidad extremo-extremo.
- Como un desafío adicional a los anteriores, desde el punto de vista de la aplicación, es importante desarrollar estrategias de análisis de desempeño y estabilidad de los algoritmos de procesamiento de señales y control, soportados en las arquitecturas de cómputo propuestas, lo que permitirá compensar, en tiempo de ejecución, cambios en el periodo de muestro y efectos de jitter. Esto con el fin de orientar la metodología hacia el Codiseño del algoritmo de procesamiento y la plataforma de implementación del mismo.

Capítulo 3

ARQUITECTURA PROPUESTA PARA REDES DE SENSORES Y ACTUADORES INALÁMBRICAS

Los capítulos anteriores muestran como los desarrollos en WSN están determinados por el cumplimiento de fuertes restricciones impuestas por la aplicación, tales como restricciones de consumo de energía, limitado poder de cómputo, cobertura de grandes áreas, restricciones de tiempo real, entre otras. Con base en ello, en este capítulo se presenta una clasificación de aplicaciones de WSNA en los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial; a partir de lo cual se propone una arquitectura para la red y los nodos que conforman este tipo de aplicaciones. Posteriormente se presenta un caso de estudio para la detección de arritmias cardiovasculares, en pacientes no críticos, durante una sesión de rehabilitación en espacios cerrados.

Como estrategia para aumentar la fiabilidad en presencia de fallos, y optimizar la QoS de las aplicaciones, en esta propuesta también se ha considerado la migración de componentes entre los nodos, lo cual se refleja en la arquitectura propuesta.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS APLICACIONES

En esta sección se realiza una clasificación de las aplicaciones de redes de sensores y actuadores inalámbricas en los sectores descritos. Durante el análisis se observó que las aplicaciones de los sectores considerados comparten características similares desde el punto de vista tecnológico, por tal razón la clasificación se realizó en dos tipos de aplicación y no por sectores.

Los parámetros considerados para la caracterización fueron el poder de cómputo, tamaño de memoria, ancho de banda, ubicación y movilidad de los nodos, restricciones de tiempo real, área de cobertura de la red, autonomía energética y sincronización.

Se observó que dependiendo de la aplicación algunos de los nodos pueden ser móviles, y será necesario conocer la ubicación de algunos de ellos. Además, dentro de una misma aplicación pueden existir nodos que demanden un mayor poder de cómputo y tamaño de memoria que otros; lo que llevó a plantear la posibilidad de contar con tres tipos de nodos, bajo desempeño, desempeño mediano y gran desempeño.

- Nodos de bajo desempeño. Pueden ser desarrollados con sistemas en chip que contengan los coprocesadores de comunicaciones, protección de información y localización, tales como el actual CC2431.
- Nodos de desempeño mediano. Requieren un procesador de más altas prestaciones que el anterior, pero de muy bajo consumo de potencia. Una buena alternativa tecnológica se presenta actualmente con la combinación de los procesadores MSP430 y el CC2480, éste último libera al procesador de las actividades relacionadas con la comunicación y facilita el desarrollo de la aplicación.
- Nodos de gran desempeño. Para su desarrollo se propone la utilización de procesadores de alto desempeño que faciliten la implementación de técnicas de escalado dinámico de frecuencia, como el Xscale, junto con coprocesadores como el CC2480.

En nuestra propuesta es importante que todos los nodos se encuentren sincronizados, por cuanto de esta forma es posible implementar técnicas para ahorrar energía y tener un mayor control sobre los retardos en el envío de los mensajes.

La sincronización también posibilita la implementación de técnicas de tiempo real, lo cual es fundamental en aplicaciones de control, en las cuales el efecto de los retardos puede degradar considerablemente la respuesta del lazo de control. Sin embargo, en aplicaciones de reporte de alarmas, como por ejemplo los sistemas de detección de incendios, más que acotar el retardo se requiere tener un retardo mínimo. Por ello en esta propuesta se ha considerado que las restricciones de tiempo real no son generales a toda una WSA, sino a un subconjunto de funciones dentro de la misma.

Adicionalmente hemos acotado nuestra propuesta a aplicaciones que demanden un ancho de banda inferior a 250 kbps, las cuales pueden ser abordadas con el protocolo IEEE 802.15.4.

Con base en lo anterior se plantean 2 tipos de aplicaciones:

- Aplicaciones tipo 1. Estas aplicaciones se desarrollan en espacios abiertos y deben cubrir grandes extensiones, por cuanto algunos de los nodos que constituyen estas aplicaciones pueden ser móviles, también demandan un tiempo de vida elevado y sus funciones requieren principalmente un retardo mínimo mas que acotado; de allí la importancia de contar con protocolos de comunicación escalables y dotar de técnicas de ahorro de energía a todos los nodos que conforman la red. Dentro de este tipo de aplicaciones se encuentran aplicaciones agrícolas de detección de plagas, y medioambientales de monitoreo de especies y hábitad, y de detección de incendios.
- Aplicaciones tipo 2. Los algoritmos empleados en estas aplicaciones se desarrollan en espacios cerrados. Al igual que en las aplicaciones tipo 1 algunas de las funciones requieren un retardo mínimo, sin embargo también surgen algunas en donde existen plazos estrictos de respuesta. Al tratarse de espacios

cerrados, las restricciones en cuanto al escalado de la red y el consumo de energía en algunos nodos son menores que en las aplicaciones tipo 1. Dentro de esta categoría se encuentran los sistemas de monitoreo de pacientes en espacios cerrados y los sistemas de control de procesos industriales. Los casos de estudio presentados en los capítulos 3 y 4 se enmarcan en esta categoría.

3.2 ARQUITECTURA PROPUESTA PARA LOS NODOS

La arquitectura genérica propuesta para los nodos de la red se presenta en la figura 3.1. En ella se aprecia el planteamiento de un esquema de cooperación entre los niveles de la arquitectura de la aplicación, con el fin de tomar las decisiones más adecuadas de reconfiguración del sistema en relación a la QoS de la aplicación. Sus características son:

- Poseen una arquitectura que posibilita el codiseño de componentes hardware y software. Esta característica permitirá optimizar el desarrollo de la aplicación distribuyendo los componentes requeridos para su implementación en tecnologías hardware y software, con lo cual se busca tener un buen balance entre costo, consumo de potencia y tiempo de procesamiento.
- Emplea un coprocesador para las actividades de comunicación y procesadores independientes para el desarrollo de la aplicación; evitando interferencias entre dichas funciones, y facilitando actividades como muestreos periódicos y sincronización entre los nodos.
- Existen nodos fijos y nodos móviles. Estos últimos se van vinculando a la sub-red que les garantice la mejor QoS (QoS_{sr}) durante su movimiento (sub-redes menos saturadas).

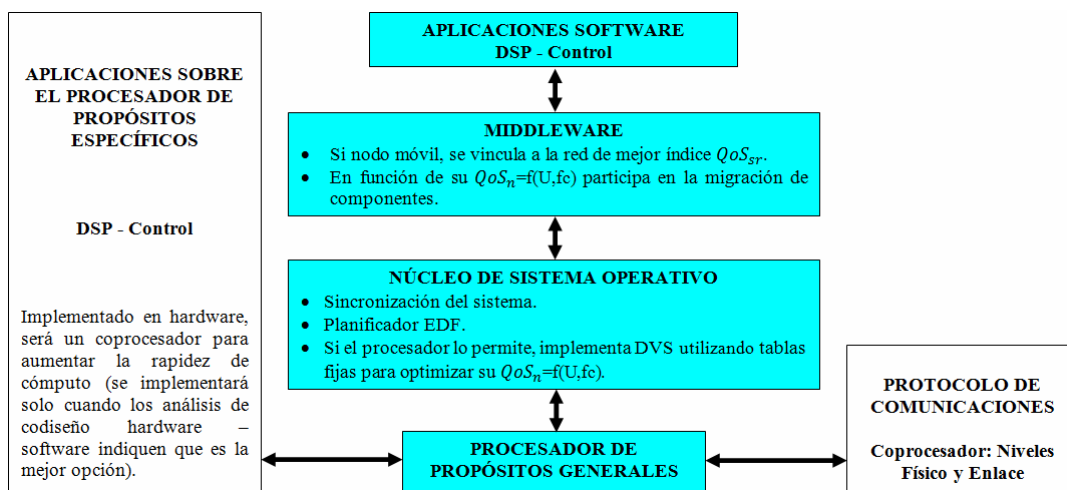


Figura 3.1 Arquitectura de los nodos

- Emplean un planificador EDF y técnicas de DVS para optimizar el consumo de potencia y garantizar el cumplimiento de plazos temporales [15]; lo cual está soportado en tablas estáticas de porcentaje de utilización por cada frecuencia de operación, y periodos de ejecución para cada tarea.
- Actualizan sus índices de QoS (QoS_n); en función de lo cual, y considerando el índice QoS_n de los demás nodos de la sub-red, solicitan a otro nodo dentro de su sub-red la migración, creación o destrucción de componentes (algunos de los cuales serán clones de otros).

3.3 ARQUITECTURA DE LA RED

En la figura 3.2 se propone una arquitectura genérica para la red, la cual es coherente con el modelo para fusión de datos JDL presentado en [30]. Se pueden apreciar diferentes tipos de nodos que componen la aplicación.

Los objetivos generales de la arquitectura son minimizar las latencias y optimizar el consumo de potencia.

El Coordinador principal. Tendrá una ubicación fija y se encargará de coordinar toda la aplicación. Envía señales de sincronismo a los coordinadores locales de las sub-redes.

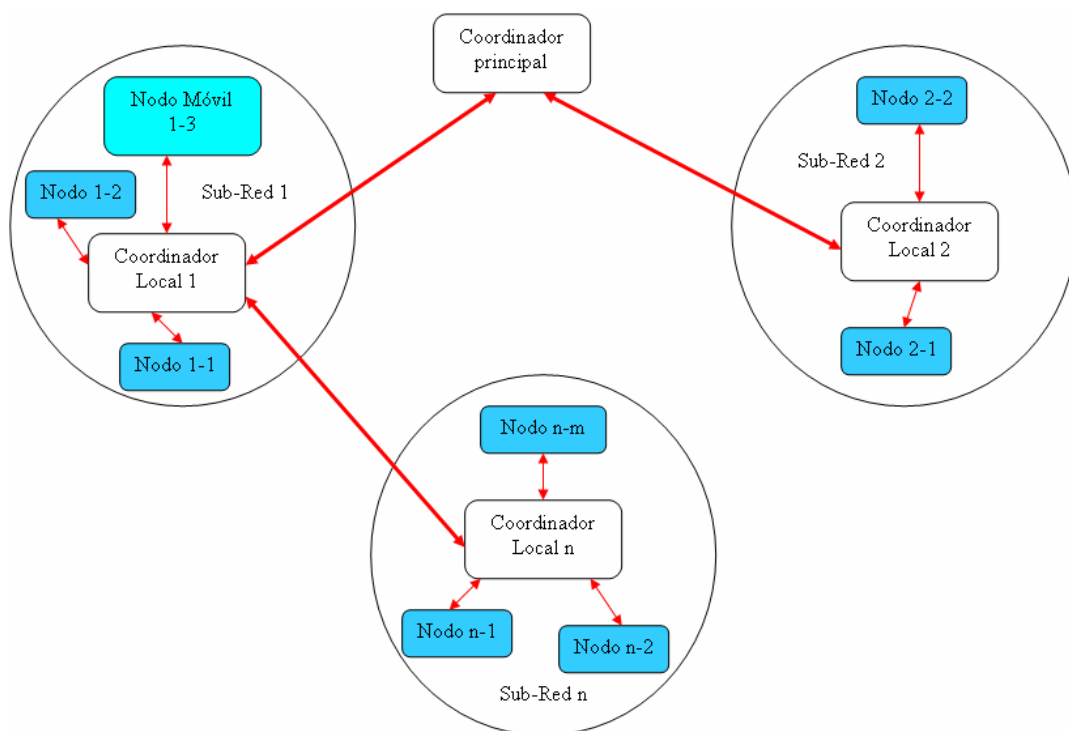


Figura 3.2 Arquitectura de la red

El Coordinador Local. Controla la actividad al interior de la sub-red y realiza algunas actividades de procesamiento de información, su arquitectura se presenta en la figura 3.3 y sus características son:

- Posee una ubicación fija.
- Envía señales de sincronismo a los nodos de su sub-red.
- Realiza el encaminamiento de paquetes entre subredes utilizando técnicas multi-salto.
- Dentro de la sub-red distribuye los índices de QoS de los nodos que la conforman (QoS_n).
- Calcula el índice de QoS de su subred ($QoS_{sr} = f(\text{cantidad de información a ser transmitida})$), y distribuye este valor y el de las sub-redes vecinas (aquellas que alcanza en un solo salto en la comunicación) entre los nodos de su sub-red. En función de lo cual:
 - Acepta la vinculación de nuevos nodos a la sub-red.
 - Actualiza las rutas óptimas en las tablas de encaminamiento de datos, las cuales serán función del número de saltos y del porcentaje de utilización (información que transmite) de cada nodo enrutador.

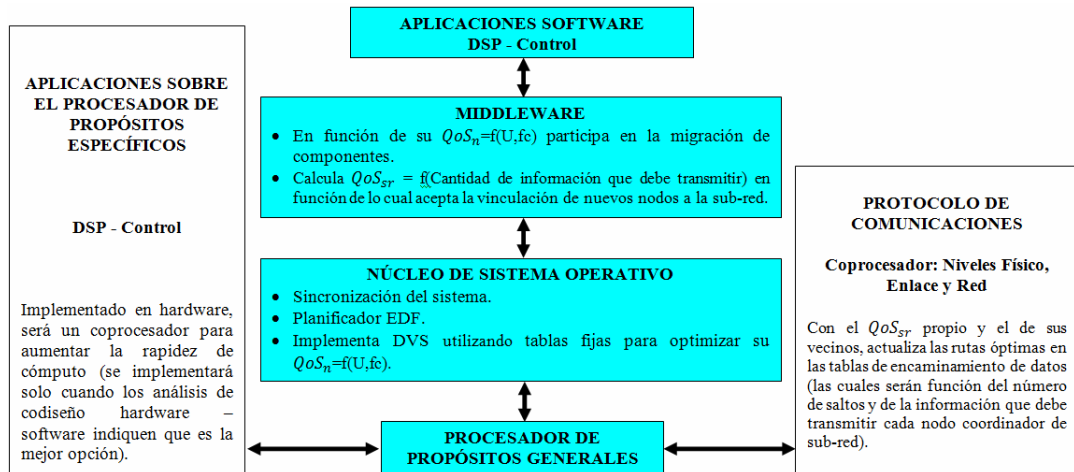


Figura 3.3 Arquitectura del coordinador de sub-red

3.4 CASO DE ESTUDIO PARA APLICACIONES MÉDICAS EN ESPACIOS CERRADOS

Actualmente los problemas cardiovasculares presentan el mayor índice de mortalidad por causas naturales en el mundo. El gran interés en el desarrollo de dispositivos clínicos para la detección y supervisión continua de este tipo de enfermedades, se

fundamenta en que actualmente estas actividades están bastante limitadas tanto por el tipo de información como por los instantes en que esta se captura, por lo que las anomalías transitorias no pueden siempre ser monitoreadas. Sin embargo, muchas de las enfermedades asociadas a enfermedades cardiovasculares se relacionan más bien a episodios transitorios que a continuas anomalías, tales como oleadas transitorias en la presión arterial, arritmias, etc. Estas anomalías no se pueden predecir, por cuanto se descarta su análisis a través de una supervisión controlada. La detección confiable y oportuna de estos episodios permite mejorar la calidad de vida de los pacientes y disminuir el costo en terapias.

3.4.1 Algoritmo de detección de arritmias

En el caso de estudio considerado se analizó la detección de arritmias a partir de la medida de ECG, en pacientes que se encuentran en movimiento durante una sesión de rehabilitación en un espacio cerrado de 100 m x 100 m, como los espacios dispuestos para tal fin en clínicas y centros de rehabilitación. La elección del periodo de muestreo se realiza basándose en el ancho de banda de la señal del electrocardiograma (ECG), la cual, según la American Heart Association, posee armónicos hasta 100Hz. La mayor cantidad de información relevante para el monitoreo y detección de arritmias se encuentra entre 0.5Hz y 50Hz.

Al analizar el espectro en frecuencia de la señal ECG, figura 3.4, se puede establecer que las componentes relevantes de la señal (complejo QRS, onda P y T) se encuentran hasta los 35Hz. Aplicando el teorema del muestreo se obtiene un periodo mínimo de muestreo de 14ms aproximadamente, sin embargo para efectos prácticos se seleccionó un periodo de 3ms.

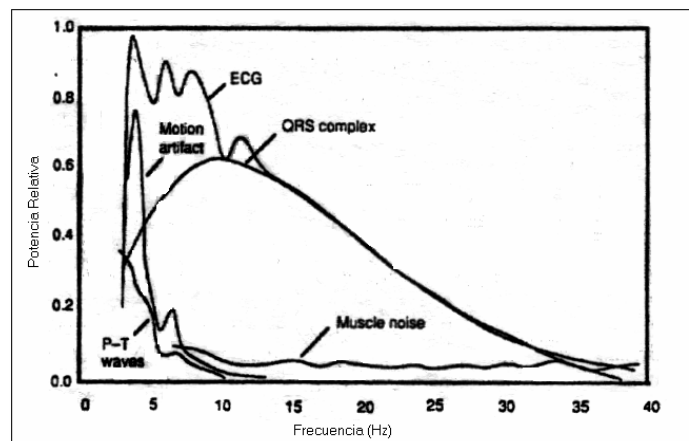


Figura 3.4 Espectro relativo de la señal de ECG, basado en un estudio desarrollado por Thakor [31]

Para la detección y análisis del ECG se seleccionó el Algoritmo de Pan y Tompkins, [32]. Este algoritmo implementa *un filtro pasa banda* por medio de la configuración de un filtro pasa bajo (LPF) y un filtro pasa alto (HPF), para reducir el ruido junto con las señales interferentes fuera de la banda de frecuencias en la que se encuentra el QRS. También, implementa *un derivador* que enfatiza las pendientes de la onda R.

Luego *eleva al cuadrado* la señal resultante del *derivador* para acentuar aún más las características de alta frecuencia del complejo QRS. Por último, se hace una estimación de la energía con una ventana móvil del tamaño del complejo QRS más largo.

En la Figura 3.5 se muestra un diagrama de bloques de este algoritmo, donde se observan las etapas involucradas en el análisis de la señal de ECG.

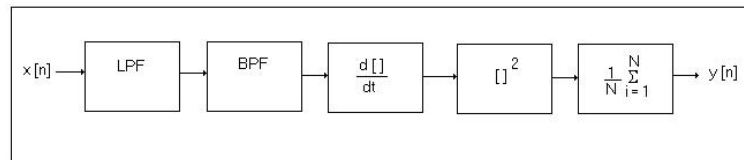


Figura 3.5 Diagrama de bloques del algoritmo de Pan y Tompkins

A continuación se presenta la forma en que actúa el algoritmo de de Pan y Tompkins. Inicialmente se presenta una onda ECG con ruido, figura 3.6.

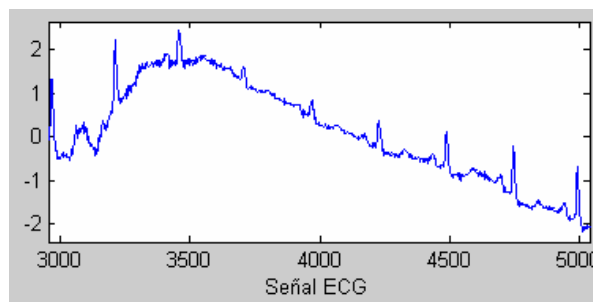


Figura 3.6 Vector ECG con ruido

La función de transferencia del filtro pasa-bajo es:

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-6})^2}{(1 - z^{-1})^2} \quad (3.1)$$

La señal de salida de este bloque se muestra en la figura 3.7

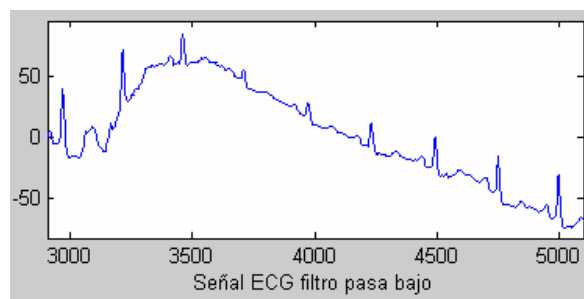


Figura 3.7. Señal filtrada pasa bajo

La función de transferencia del filtro pasa-alto es:

$$H_{hp}(z) = \frac{P(z)}{X(z)} = z^{-16} - \frac{H_p(z)}{32} \quad (3.2)$$

La señal de salida de este bloque se muestra en la figura 3.8.

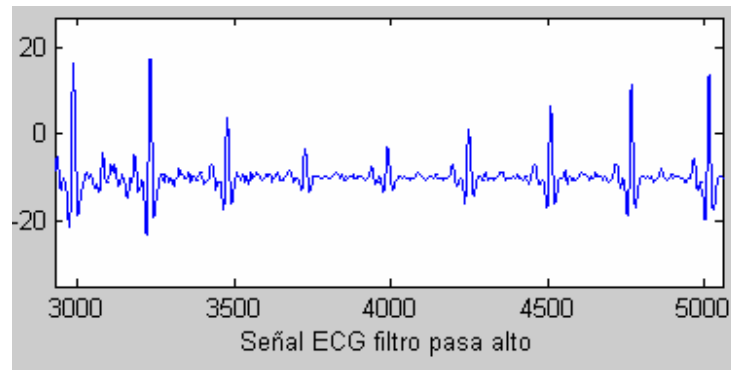


Figura 3.8 Señal filtrada pasa alto

Luego de que la señal es filtrada, la mayor energía de esta es la energía contenida en el complejo QRS. Al aplicar el derivador se acentúan las altas frecuencias y atenúan las bajas; por lo tanto, se resaltan las altas pendientes por las cuales generalmente se distinguen los QRS dentro de la señal de ECG.

La función de transferencia del derivador es:

$$H(z) = 0.1 (2 + z^{-1} - z^{-3} - 2z^{-4}) \quad (3.3)$$

La señal de salida de este bloque es presentada en la figura 3.9.

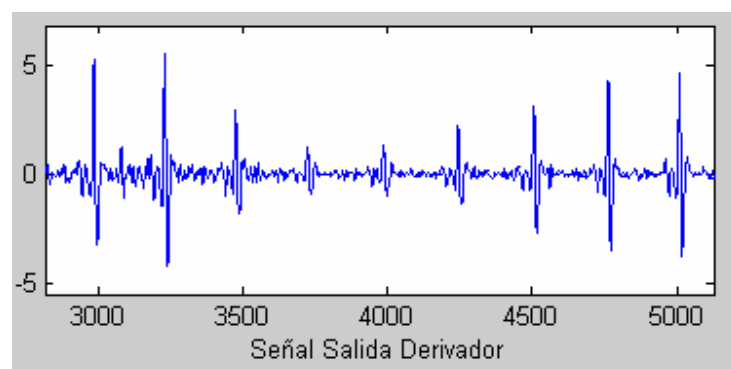


Figura 3.9 Señal salida del derivador

Antes de realizar el proceso de ventana integradora, la señal es elevada al cuadrado (figura 3.10) para que todos los puntos de la señal sean positivos, y enfatizar la señal de alta frecuencia, que es principalmente el complejo QRS.

La ecuación que implementa esta operación es:

$$y(nT) = [x(nT)]^2 \quad (3.4)$$

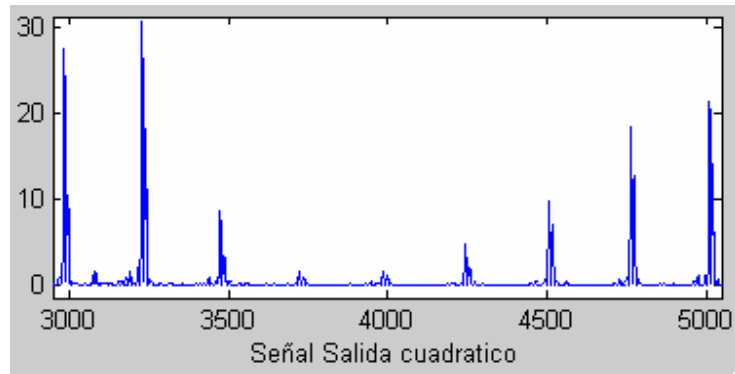


Figura 3.10 Señal salida del cuadrático

La utilización de la información de la pendiente de la onda R no es suficiente, pues muchos complejos anormales que tengan largas amplitudes y largas duraciones podrían no ser detectados solo utilizando esta información. Por lo tanto se implementa una ventana integradora, figura 3.11.

Esta es implementada con la siguiente ecuación en diferencias:

$$y(nT) = \frac{1}{N} [x(nT - (N-1)T) + x(nT - (N-2)T) + \dots + x(nT)] \quad (3.5)$$

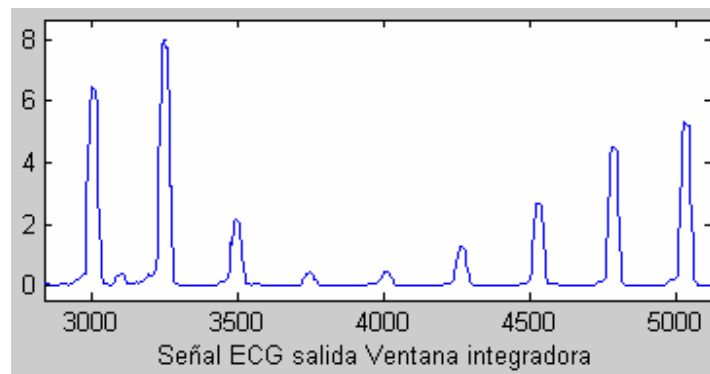


Figura 3.11 Señal salida ventana integradora

El tamaño de la ventana (N) debería ser siempre mayor o igual al QRS de mayor duración, pero si la ventana es muy larga la integración puede sumar la información de la onda T, y si es muy corta no se amplificará lo suficiente, además podría producir la detección de picos erróneos.

Los resultados del algoritmo de Pan y Tompkins son utilizados por un algoritmo de detección de picos, el cual identifica los instantes de tiempo en que se presentaron los

segmentos de la onda ECG, figura 3.12. Posteriormente se realiza un análisis del tiempo de separación entre dos segmentos R, la duración del complejo QRS y la altura de la onda R, con lo cual se detecta la presencia de arritmias [33]. Este algoritmo consta de las siguientes etapas:

- Búsqueda del primer punto de la señal filtrada que supere el umbral de detección.
- Búsqueda del máximo absoluto en una ventana de la señal filtrada.
- Determinación del punto R en la señal ECG.
- Actualización del salto.
- Actualización del umbral.

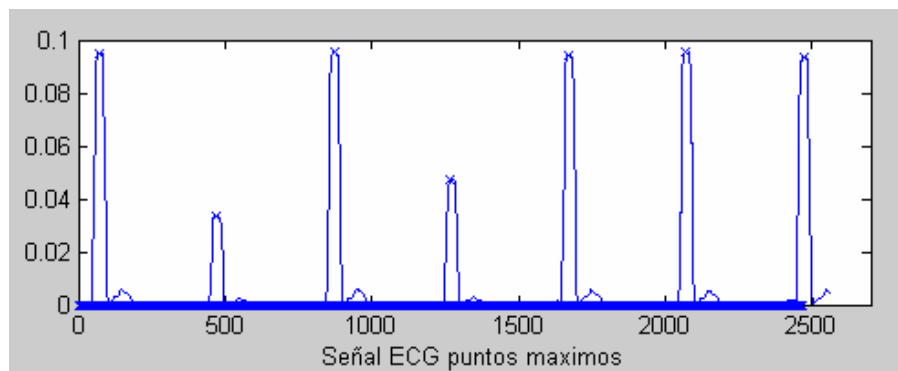


Figura 3.12 Puntos máximos

3.4.2 Análisis de los requerimientos de cómputo

Para seleccionar un conjunto de arquitecturas de procesadores que permitan un adecuado desempeño de estas aplicaciones, se comparó el desempeño del algoritmo de detección de arritmias, presentado en la sección anterior, sobre cuatro tipos de procesadores utilizados actualmente para implementar nodos en redes de sensores: ARM7TDMI, MSP430, PIC18, MC9S08GB60.

Para el análisis se utilizó la misma velocidad de operación para cada procesador, 8MIPS. El tiempo de cómputo total de la implementación del algoritmo de Pan y Tompkins se presenta en la tabla 3.1, el cual se estimó considerando la suma de los valores de las funciones individuales (Derivación, Elevación al cuadrado y Ventana integradora) en cada arquitectura. Los resultados muestran como la arquitectura ARM es la que requiere un menor porcentaje de utilización (U), mientras la arquitectura PIC es la que mayor U necesita.

El otro aspecto considerado fue el consumo de potencia en modo activo (P_A), realizado por cada arquitectura durante la ejecución del algoritmo de Pan y Tompkins. Para ello se relacionó la potencia consumida por cada arquitectura en

modo activo, con el respectivo porcentaje de utilización de la CPU durante la ejecución del algoritmo.

Tabla 3.1. Tiempo de cómputo para desarrollar el algoritmo de Pan y Tompkins

Procesador	Derivación	Elevación al Cuadrado	Ventana Integradora	Tiempo Total de Computo	Periodo [μs]	Porcentaje de Utilización (U)
LPC2124 – ARM	70.2 μs	142 μs	280.5 μs	492.7 μs	3000	16.4%
MSP430F1611	191.9 μs	162.5 μs	697.8 μs	1052.2 μs	3000	35%
PIC18F458	406.2 μs	209 μs	1083.7 μs	1698.9 μs	3000	56.6%
MC9S08GB60	497.2 μs	332 μs	707.35 μs	1536.55 μs	3000	51.3%

En la tabla 3.2 se presenta el indicador $P_A * U$. Se puede observar como la arquitectura ARM7 posee un valor muy cercano al de la arquitectura MC9S08GB60; luego estas dos arquitecturas son adecuadas para la implementación del caso de estudio. La arquitectura MSP430 presenta el menor valor, y por tanto mejor, de este indicador.

Tabla 3.2. Indicador $P_A * U$

	Porcentaje de Utilización (U)	Potencia Activa (P_A) [mVA]	$P_A * U$
LPC2124 – ARM	16.4%	180	29.52
MSP430F1611	35%	19.2	6.72
PIC18F458	56.6%	220	124.52
MC9S08GB60	51.3%	51.6	26.47

3.4.3 Análisis del desempeño de la red

Como primera aproximación a la arquitectura propuesta en la sección 3.3, se analizó el desempeño del caso de estudio sobre el protocolo 802.15.4. Las consideraciones para la solución propuesta al caso de estudio son:

- Transmisión del resultado del análisis, desde los nodos ubicados en cada paciente hacia un nodo principal, cada 3 s. La trama de datos consta de 2 Bytes, los cuales contienen los códigos del paciente y del tipo de arritmia detectada.
- Después de cada envío el nodo emisor queda en espera de un reconocimiento (ACK). Si no hay una respuesta antes de 100ms el nodo retransmite la información. Si después de 25 intentos no hay una respuesta este nodo pasara a modo de error.
- La distribución de los nodos se muestra en la figura 3.13, esta permite abarcar las posibles ubicaciones de los pacientes teniendo en cuenta las especificaciones del dispositivo seleccionado para la implementación de la capa física, CC2420, cuyas características son:
 - Radio de cobertura de 30 m con obstáculos y 100 m sin obstáculos.
 - Rango de frecuencias de 2.4 - 2.4835 GHz.
 - Soporta tasas de transmisión de datos de 250 kbps.

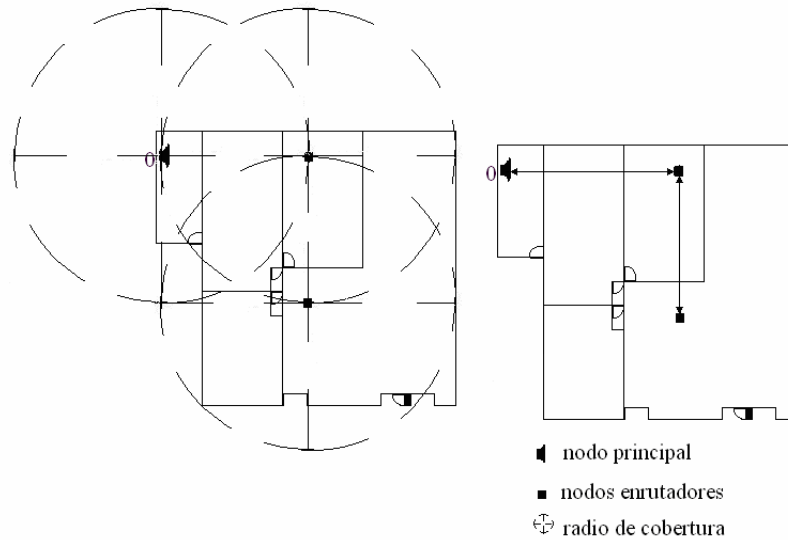


Figura 3.13 Distribución de nodos y su cobertura en el caso de estudio

Para el caso de estudio se propone implementar una red como la presentada en la figura 3.14, compuesta de 3 nodos fijos los cuales no tendrán restricciones de consumo de potencia, recibirán los informes de los cinco pacientes y encaminarán el mensaje al nodo principal. Los dispositivos fijos tienen los identificadores 0, 1 y 2, el nodo principal tiene el identificador 0, y los dispositivos de cada paciente tienen los identificadores del 3 al 7.

La red de encaminamiento está conformada por los nodos 1, 2 y nodo 0 (el coordinador de la red); cada uno de estos nodos forman una sub-red junto con los pacientes, figura 3.14. Los nodos, debido a su movilidad, salen y entran a las sub-redes continuamente, modificando la configuración y estructuras de la red.

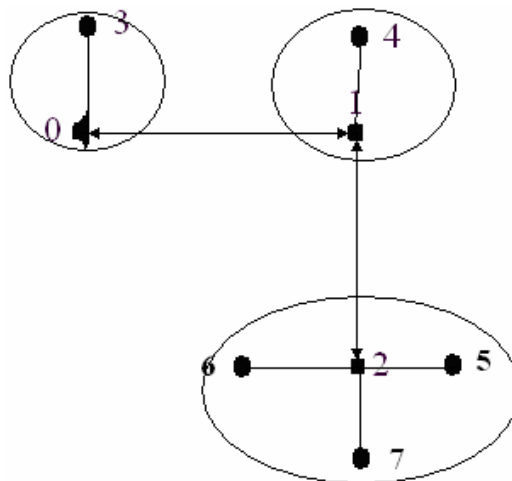


Figura 3.14 Esquema completo de la red para el caso de estudio

La simulación del caso de estudio se realizó en TOSSIM, para ello se seleccionó la plataforma TelosB la cual incluye el Transceiver CC2420. Dadas las características del caso de estudio, donde los nodos que conforman la red de encaminamiento se encuentran fijos, se implementó un algoritmo de encaminamiento utilizando una tabla fija, la cual se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Tabla de encaminamiento

Nodo origen	Nodo destino
2	1
1	0
0	

En la simulación se consideró el caso más crítico, en el que se tienen todos los nodos móviles conectados todo el tiempo a la subred más alejada del nodo principal. Los tiempos presentados en el envío de 2 Bytes de todos los pacientes al nodo principal (nodo 0), se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Tiempos de envío de 2 Bytes de todos los pacientes al nodo principal (nodo 0)

Nodo Emisor	Nodo Receptor	Tiempo (s)	Nodo Emisor	Nodo Receptor	Tiempo (s)
6	2	.78.309	0	1(ack) ₁ - 5 finaliza	.613
4	2	.320	7	2 Rtx ₂	.684
7	2	.333	3	2 Rtx ₂	.684
2	6(ack)	.344	2	1 Rtx moviendo 4 ₂	.684
5	2 Rtx ₂	.355	1	2 (ack)	.701
2	1 (moviendo trama desde 6)	.380	7	2 Rtx ₂	.714
3	2 Rtx ₂	.380	1	0 (moviendo trama desde 4)	.740
1	2(ack)	.397	2	7 (ack)	.746
1	0 (moviendo trama desde 6)	.421	0	1 (ack) ₁ - 4 finaliza	.764
5	2 Rtx ₂	.421	2	1 (moviendo trama desde 7)	.780
3	2 Rtx ₂	.463	3	2 Rtx ₂	.780
2	1 (moviendo trama desde 5)	.486	1	2 (ack)	.792
7	2 Rtx ₂	.486	3	2 Rtx ₂	.807
2	5(ack)	.488	2	3 (ack) ₂	.825
0	1(ack) ₁ - 6 finaliza	.488	2	1 (moviendo trama desde 3)	.860
1	2(ack)	.500	2	1 Rtx moviendo 3 ₂	.877
4	2 Rtx ₂	.513	1	0 (moviendo trama desde 7)	.877
3	2 Rtx ₂	.524	0	1 (ack) ₁ - 7 finaliza	.913
7	2 Rtx ₂	.535	2	1 Rtx moviendo 3 ₂	.929
2	4(ack)	.547	1	2 (ack)	.949
2	1 (moviendo trama desde 4)	.581	1	0 (moviendo trama desde 3)	.979
1	0 (moviendo trama desde 5)	.589	0	1 (ack) ₁ - 3 finaliza	79.013

Los **datos₁** indican que la transmisión del mensaje desde un nodo móvil al nodo principal ha terminado, los **datos₂** indican que el correspondiente nodo no ha recibido el reconocimiento.

3.5 CONCLUSIONES

La arquitectura propuesta considera las restricciones propias del campo de aplicación, la cooperación entre los niveles de la arquitectura del sistema permite una configuración dinámica de la red y de los nodos; de igual forma, la selección de los componentes de la arquitectura que facilita el diseño de las aplicaciones.

Los resultados de simulación del caso de estudio permiten concluir que:

- Los tiempos presentados en la tabla 3.4 muestran como el algoritmo de encaminamiento basado en tablas fijas, soportado sobre 802.15.4, permite cumplir con la restricción de 3 s impuesta para la transmisión del estado de los pacientes desde los nodos móviles al nodo principal.
- La arquitectura MSP430 presenta un buen rendimiento para la ejecución del caso de estudio considerado.

Capítulo 4

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE CONTROL

Debido al aumento en la complejidad de los sistemas de control gran parte de las actividades se deben distribuir entre diferentes nodos, donde los lazos de control son cerrados a través de una red de comunicaciones, estos sistemas se han denominado Sistemas Distribuidos de Control (SDC). La implementación de SDC también permite disminuir el impacto producido por las fallas en un componente del sistema y facilita las actividades de diagnóstico, mantenimiento y trazabilidad en los procesos.

Dado que la movilidad de los elementos que conforman los nodos en los procesos industriales es muy baja, las aplicaciones en este sector no demandan un uso estricto de redes inalámbricas, por esta razón en la mayoría de los casos se utilizan redes alambradas; esto también se debe en gran medida a la confiabilidad de las redes alambradas y la posibilidad de estas para soportar periodos de transmisión menores a los que permiten las redes inalámbricas. Sin embargo, el desarrollo de nuevas aplicaciones sobre WSN abre un nuevo panorama en el que se integran redes alambradas e inalámbricas para aumentar la flexibilidad y confiabilidad de las aplicaciones; además, su impacto en la reducción de costos de implementación es significativo.

En este capítulo se presenta el análisis del desempeño de un SDC. Para ello se han considerado los algoritmos de control de acceso al medio (MAC) CSMA/CA, implementado en el protocolo IEEE 802.15.4, CSMA/AMP, implementado en el protocolo CAN, y TDMA, implementado en el protocolo IEEE 802.15.4 a través de GTS.

En las secciones siguientes se presenta el análisis y los resultados de simulación y experimentales, del SDC considerado sobre cada uno de los algoritmos MAC seleccionados.

4.1 ANÁLISIS DEL SDC

La estructura genérica del SDC considerado en este trabajo se presenta en la figura 4.1, en el cual se regula la variable de salida en un sistema de orden 2 implementado con amplificadores operacionales. Se pueden apreciar tres tipos de nodos:

- Medidor, realiza la medición de la variable controlada y la envía a través de la red.

- Controlador – Actuador, recibe la medida de la variable controlada a través de la red, calcula la acción de control y actúa sobre la variable manipulada.
- Generador de ruido, genera tráfico en la red.

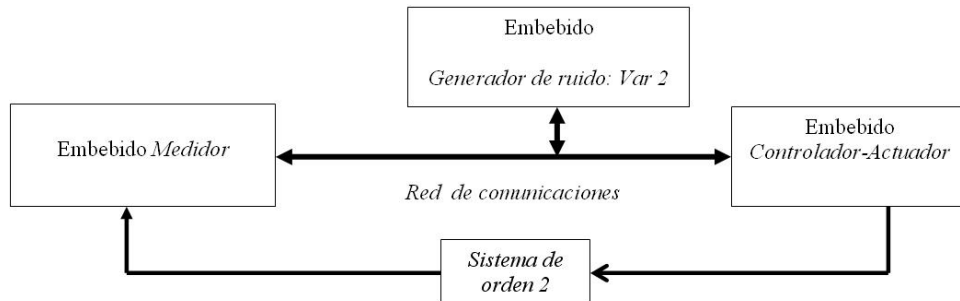


Figura 4.1 Estructura genérica del SDC considerado

Al diseñar un SDC con dinámicas muy exigentes no siempre se obtiene una buena correspondencia entre los resultados experimentales y los de simulación, esto es debido al uso de modelos imprecisos para analizar y diseñar estos sistemas, métodos de validación poco elaborados y plataformas que no soportan los modelos empleados.

Existen diversos autores que han analizado el desempeño y la estabilidad en SDC asumiendo protocolos de red con retardos constantes y variables, de igual forma se han realizado propuestas para alterar los algoritmos de control con el fin de contrarrestar dichos efectos, [34], [35], [36], [37]. Un análisis del desempeño de redes alambradas para control de procesos es presentado en [38]. En [19] se realiza un análisis sobre la utilización de 802.11b y Bluetooth como redes para control.

El periodo de transmisión en un SDC (se denota por $h_{(t)}$) se define como el intervalo de tiempo entre dos transmisiones consecutivas, y se mide en los instantes en que llega la transmisión. En el caso de SDC el tiempo de transmisión de muestras entre sensor y controlador puede ser o no periódico, lo cual depende principalmente de los protocolos MAC, errores de comunicación, jitters y los planificadores de tareas.

La dificultad presente en el análisis y diseño de un SDC se debe a que los retardos en los lazos de realimentación, debidos a la interacción entre sus componentes, pueden afectar el desempeño de los algoritmos de control. Dependiendo de la magnitud y variabilidad de los retardos los sistemas de control pueden alcanzar estados muy alejados de los deseados, llegando incluso a la inestabilidad.

En el caso de estudio considerado en este trabajo, figura 4.1, el controlador y el actuador se encuentran en el mismo nodo (Controlador-Actuador), por lo cual se asume un único retardo en el lazo de realimentación, τ , el cual contempla el tiempo de procesamiento en el Medidor, el tiempo de envío de información a través de la red y el tiempo de procesamiento del Controlador-Actuador.

El modelo del sistema de orden 2 es:

$$G_{p(s)} = \frac{20.3759}{s^2 + 3.497s + 21.73} \quad (4.1)$$

Como regulador se diseñó un algoritmo PID por el método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado, cuya función de transferencia es:

$$G_{c(s)} = \frac{0.8909s^2 + 3.2322s + 20.201}{s} \quad (4.2)$$

Como punto de partida al análisis del caso de estudio se consideró un τ constante. A partir de un polinomio de Pade de segundo orden, utilizado para modelar el retardo, se encontró la región de estabilidad aproximada del sistema en lazo cerrado [39], [40], figura 4.2; por medio de la cual es posible encontrar los valores de periodo de muestreo (T_m) y τ para los cuales el sistema es estable. Esta información puede ser utilizada para elegir los periodos y plazos de respuesta de las tareas que implementarán el sistema de control.

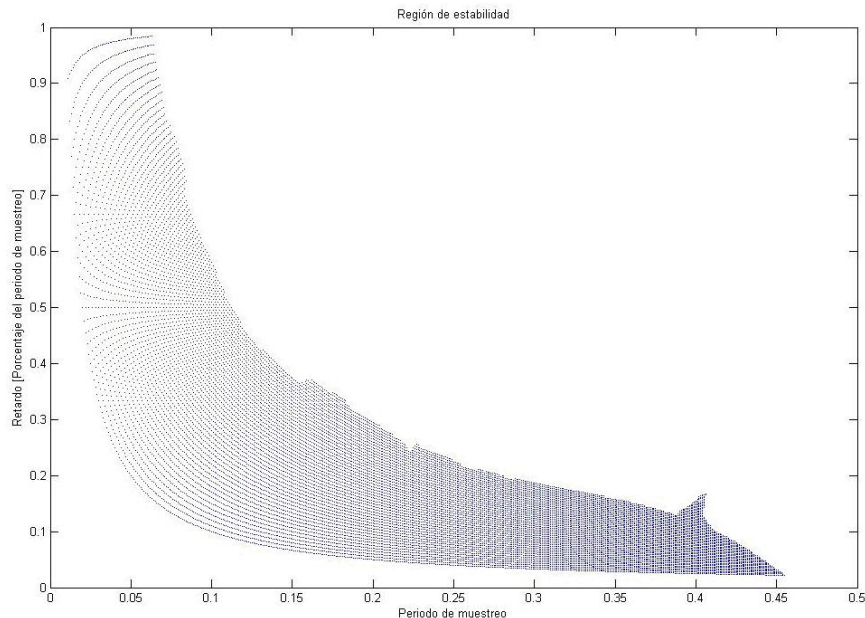


Figura 4.2 Región de estabilidad del sistema en lazo cerrado

En la figura 4.3 se presenta la respuesta del sistema de control para diferentes valores de T_m y τ . Se puede apreciar que al aumentar el periodo de muestreo el sistema se hace más sensible a los retardos, y que aunque para los valores considerados el sistema es estable, se observa una gran degradación en el desempeño del lazo de control, lo cual podría no garantizar el desempeño deseado en algunos casos. Además, en la figura 4.3.d, para la cual τ es variable pero acotado en 57 ms, se observa que la magnitud de las oscilaciones es menor que las presentes en la figura 4.3.c, donde el τ es constante a 57 ms; lo cual es muy importante por cuanto el protocolo CAN presenta un retardo variable en la transmisión de la información pero acotado.

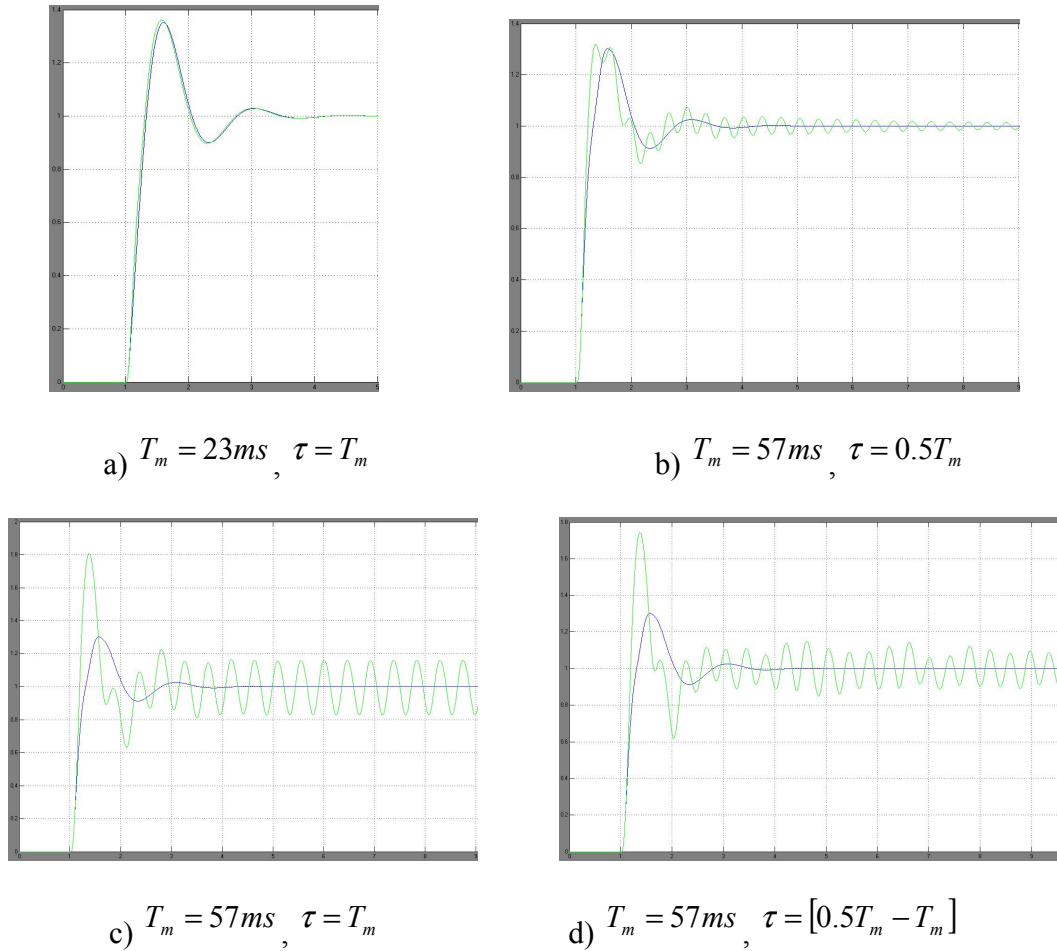


Figura 4.3 Respuesta del sistema de control, en tiempo continuo y discreto, para diferentes valores de T_m y τ

Para analizar el SDC se utilizó el simulador Truetime [41]. Inicialmente se implementó el SDC considerando solamente el efecto de los protocolos MAC y despreciando el tiempo de procesamiento en los nodos. Los parámetros de simulación fueron:

- Periodo de muestreo y envío de la variable controlada: 50ms.
- Sincronización por eventos entre los nodos Medidor y Controlador-Actuador.
- Velocidad de comunicación 250 kbps.
- Tamaño de tramas de 82 bits, suficiente para enviar la medida de una variable.
- Se implementaron dos nodos Generadores de ruido, con periodos de envío de información de 700 μs y 900 μs , y tamaño de trama de 82 bits para cada uno.

Los resultados de la simulación se presentan en la figura 4.4. Se puede apreciar que el tiempo de envío de la información a través de CSMA/CA y CSMA/AMP es variable, sin embargo en CSMA/AMP se encuentra acotado. Los retardos presentes en la realimentación no afectan significativamente el desempeño del sistema, obteniéndose la misma respuesta en los tres casos.

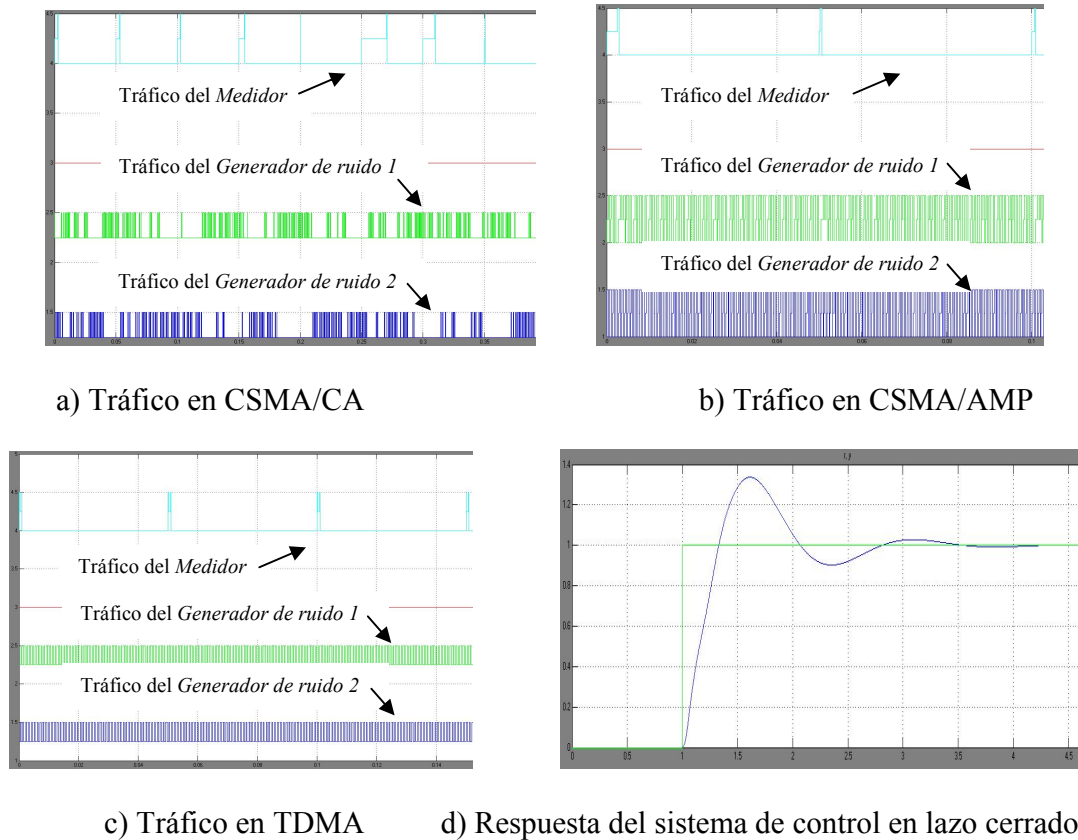


Figura 4.4 Tráfico generado por los algoritmos MAC y respuesta del sistema de control

Empleando periodos de envío de información en los generadores de ruido inferiores a los del caso anterior se alcanzó la saturación de las redes, figura 4.5, de lo cual se observó que:

- En CSMA/AMP, puesto que el identificador del mensaje con el que se transmite la medida de la variable controlada es de menor prioridad que el de las tramas de ruido, al saturarse la red este valor no se logra transmitir al controlador y por consiguiente el sistema se vuelve inestable.
- En CSMA/CA, a pesar de presentarse pérdidas de la información transmitida por los nodos generadores de ruido, debido a las colisiones en el medio de comunicación, el nodo medidor alcanza a transmitir antes de cumplir su siguiente periodo de transmisión, por cuanto el sistema no se vuelve inestable.

- Para TDMA se observó un periodo constante a pesar de que, debido a las altas tasas de información a transmitir consideradas, el envío de la misma se tuviese que realizar en más de un intervalo de transmisión, luego no se percibió ninguna degradación en el desempeño del sistema. Sin embargo, al realizar reserva de tiempos de uso del canal, éste método realiza un uso menos eficiente del medio de comunicaciones.

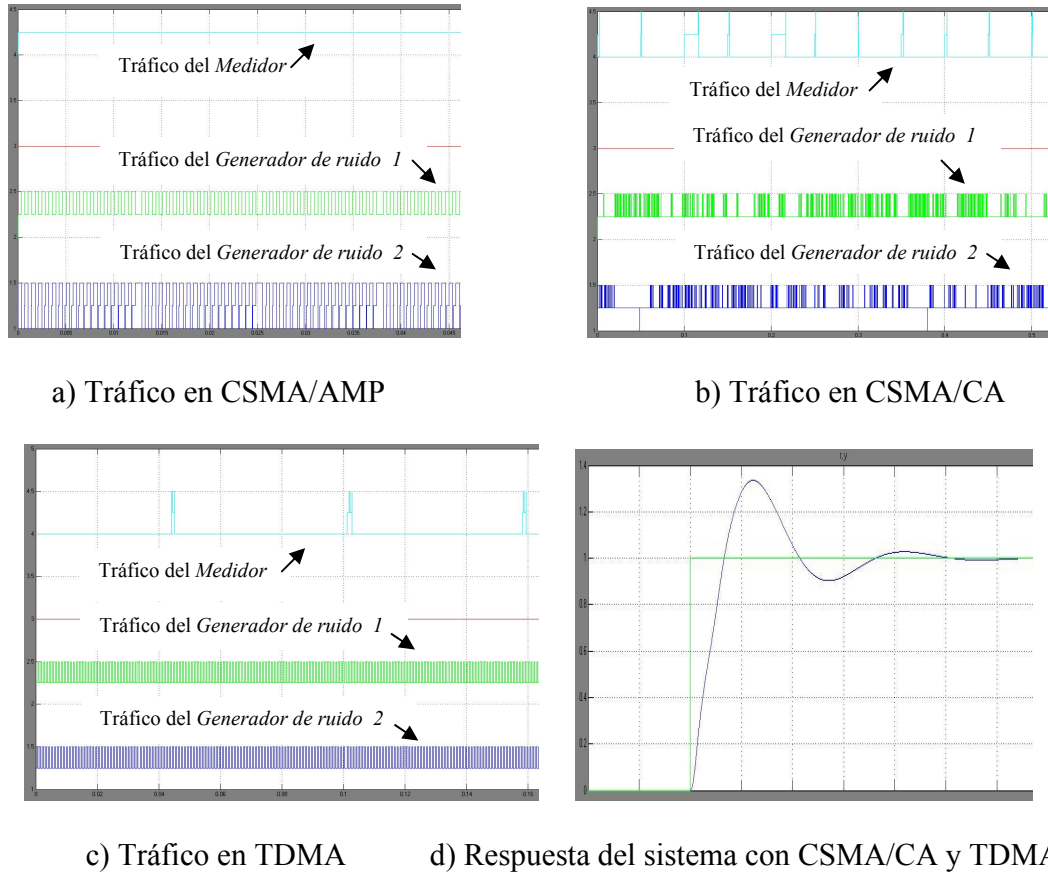


Figura 4.5 Tráfico en la red y respuesta del sistema de control cuando las redes están saturadas

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SDC

La implementación del SDC se realizó sobre CAN y sobre IEEE 802.15.4 en modo CSMA/CA.

4.2.1 Implementación sobre CAN

Para la implementación de los nodos Medidor y Controlador-Actuador se utilizaron dos sistemas de desarrollo, cada uno con un dsPIC30F4011. Además se utilizó un nodo implementado en una PC como Generador de ruido. La configuración fue la siguiente:

- El nodo Medidor envía un mensaje CAN cada 50 ms con identificador 1, el cual contiene dos bytes con la información de la variable controlada.
- En el nodo Controlador-Actuador se genera una interrupción por cada mensaje CAN recibido. Durante su atención se identifica si la trama es de medición, en cuyo caso calcula la acción de control y actúa sobre el sistema.
- El nodo Generador de ruido envía una trama con identificador 0 y dos bytes en el campo de datos. Se realizaron pruebas con varios periodos de transmisión de ruido entre 5 ms y 50 ms.

El cálculo teórico del tiempo máximo de transmisión de un mensaje CAN, considerando el caso menos restrictivo, se puede realizar de la siguiente forma [42]:

$$R_i^{n+1} = C_i + B_i + \sum_{\forall j < i} \left\lceil \frac{R_i^n}{T_j} \right\rceil C_j \quad (4.3)$$

Donde:

- C_i es el tiempo de transmisión del mensaje.
- B_i es el máximo tiempo de bloqueo que puede sufrir el mensaje como consecuencia de estar ocupado el bus por mensajes de menor prioridad, lo anterior dado que el bus no se puede expropiar.

$$B_i = \max_{j > i} C_j \quad (4.4)$$

- T_i es el periodo de envío del mensaje i .

- $R_i^{(0)} = B_i + \sum_{j < i} C_j$

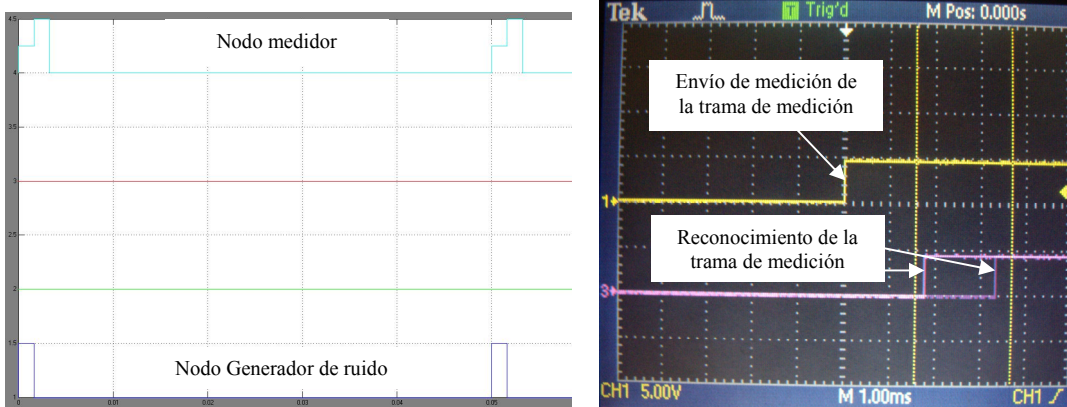
Para el caso propuesto se tiene:

- El periodo de envío de la medición es de 50ms.
- Cada trama envía 2 bytes de datos en un formato de trama extendida, por consiguiente el número de bits es 82.
- La velocidad de transmisión es 50 kbps; por lo tanto, el tiempo de envío de una trama es 1.64ms.
- Para realizar los cálculos de tiempos de envío de información se consideró el envío de una trama por parte del nodo Generador de ruido cada 50ms.

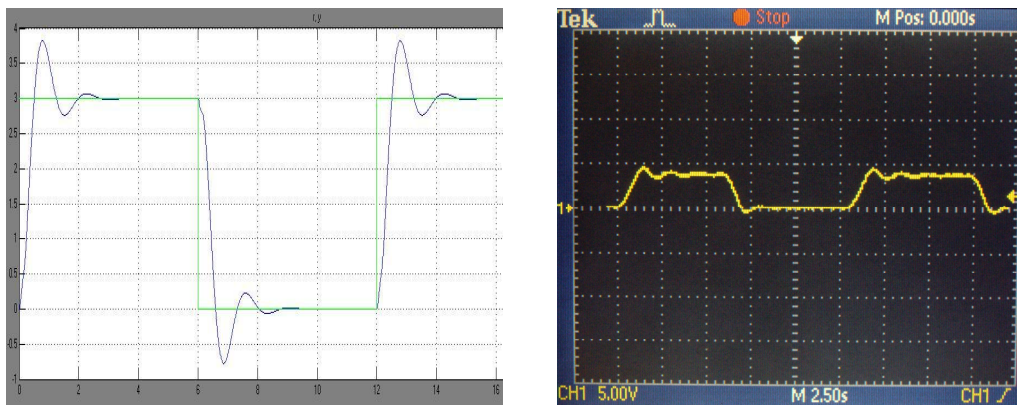
Los tiempos máximos de transmisión de las tramas son:

- $R_0^{(0)} = B_0 + 0 = 1.64ms$ $R_0^{(1)} = 1.64ms + 1.64ms + 0 = 3.28ms$
 - $R_1^{(0)} = 0 + C_1 = 1.64ms$ $R_1^{(1)} = 1.64ms + \left\lceil \frac{1.64ms}{50ms} \right\rceil 1.64ms = 3.28ms$
- $$R_1^{(2)} = 1.64ms + \left\lceil \frac{3.28ms}{50ms} \right\rceil 1.64ms = 3.28ms$$

Los resultados obtenidos permiten concluir que cada mensaje alcanza a enviarse antes de cumplirse un nuevo periodo de envío. Además, el retraso máximo que experimenta la medición ($R_1^{(2)}$) es de 3.28ms, lo cual está dentro del rango de retardos permitidos para garantizar la estabilidad del sistema. Las simulaciones en Truetime y los resultados experimentales se presentan en la figura 4.6.



a) Simulación de los tiempos de transmisión b) Tiempos de transmisión experimentales



c) Resultados de simulación del sistema de control d) Respuesta del sistema de control

Figura 4.6 Respuesta del SDC implementado sobre CAN con generación de ruido cada 50 ms

En la figura 4.6 b) se puede observar que el instante de actuación sobre el sistema es variable pero acotado, debido a que eventualmente el envío de la trama con la medida de la variable controlada es retrasada por el envío de la trama del nodo generador de ruido. Sin embargo el retardo en la realimentación es pequeño comparado con la dinámica del sistema, y por lo tanto este no se ve perturbado significativamente.

4.2.2 Implementación sobre IEEE 802.15.4 en modo CSMA/CA

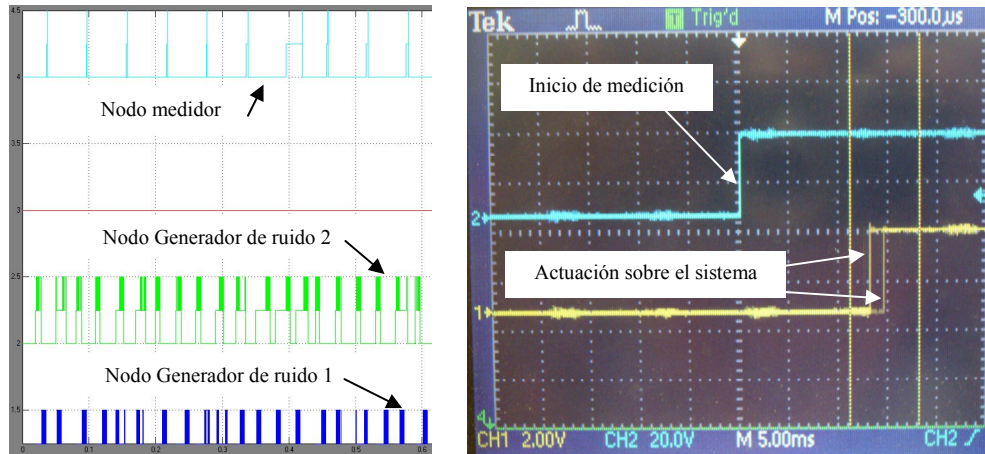
Para implementar los nodos Medidor y Controlador-Actuador se emplearon sistemas de desarrollo con el procesador CC2430; también se utilizaron los niveles de abstracción HAL y OSAL, suministrados por Texas Instruments, para acceder al hardware e implementar tareas. Se implementaron dos nodos Generadores de ruido por medio de dispositivos MACdongle. La configuración fue la siguiente:

- El nodo Medidor envía una trama cada 60 ms, la cual contiene la información de la variable controlada. Este periodo se seleccionó debido a que experimentalmente se observó que para valores inferiores el tiempo de transmisión no era estable.
- En el nodo Controlador-Actuador se genera un evento por cada mensaje recibido desde el nodo medidor. Durante su atención se calcula la acción de control y se actúa sobre el sistema. Experimentalmente se obtuvo un intervalo de tiempo entre 12 ms y 16 ms, desde el inicio de la medición de la variable controlada hasta que se actúa sobre la variable manipulada.
- Los nodos Generadores de ruido envían una trama cada 30ms.
- El tamaño de las tramas es de 256 bits y la velocidad de comunicación es 250 kbs. Luego el tiempo de envío de la trama es de 1.024 ms.
- Los cuatro nodos se distribuyeron en un área de 1 m².

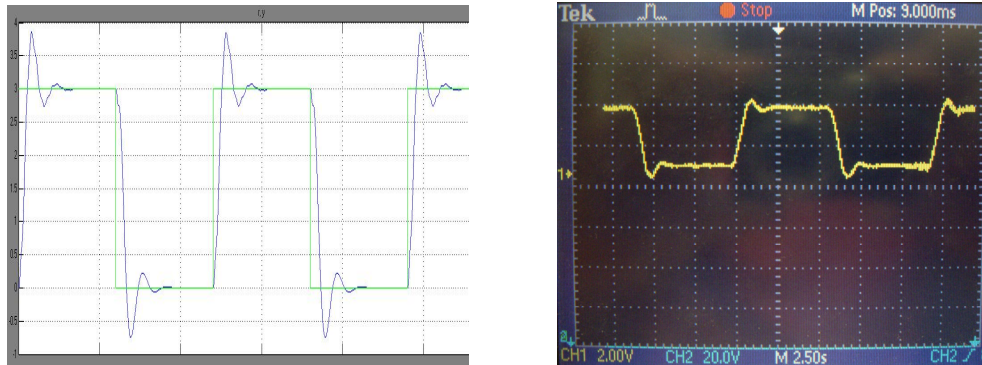
Las simulaciones en truetime y los resultados experimentales se presentan en la figura 4.7.

En la figura 4.7b se puede observar que el instante de actuación sobre el sistema es variable, debido a la colisión de mensajes en el medio de comunicaciones, pero que a diferencia de la implementación realizada en CAN este tiempo no está acotado. Por otro lado, al igual que en la implementación sobre CAN, el retardo en la realimentación es pequeño comparado con la dinámica del sistema y por tal razón el sistema no se ve perturbado significativamente.

Los resultados obtenidos en ambos casos permiten observar una gran correspondencia entre los resultados generados por el entorno de simulación, Truetime, y los obtenidos experimentalmente.



a) Simulación de los tiempos de transmisión b) Tiempos de transmisión experimentales



c) Resultados de simulación del sistema de control d) Respuesta del sistema de control

Figura 4.7 Respuesta del sistema sobre 802.15.4 en modo CSMA/CA y con generadores de ruido actuando cada 30 ms

4.3 CONCLUSIONES

La tecnología considerada en este trabajo permite abordar un amplio espectro de aplicaciones de control de procesos, donde los periodos de transmisión no sean muy exigentes, particularmente se propone abordar casos con periodos de transmisión superiores a 100 ms.

Los resultados de simulación y experimentales del sistema distribuido de control permiten concluir que:

- Existe una gran correspondencia entre los resultados utilizando métodos formales, simulaciones y la implementación física del sistema. De lo cual se concluye que Truetime permiten un análisis confiable y rápido de este tipo de aplicaciones, lo que facilita el proceso de diseño de las mismas.

- Para sistemas de control con periodos de transmisión inferiores a 100 ms es recomendable el uso de redes alambradas como CAN, con las cuales es posible lograr periodos de transmisión mas pequeños y estables que con IEEE 802.15.4 en modo CSMA/CA.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

Las problemáticas presentes actualmente en el desarrollo de aplicaciones de monitoreo, diagnóstico y control para los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial, entre otros, han motivado el desarrollo de las WSN.

El desempeño de estas aplicaciones está fuertemente determinado por las restricciones impuestas por la aplicación. Los trabajos realizados hasta el momento se han orientado principalmente al planteamiento de arquitecturas de nodos y protocolos de comunicaciones. Sin embargo aún continúan abiertos diversos problemas relacionados principalmente con la interoperabilidad, la dificultad en el diseño y la optimización de parámetros por medio de la cooperación entre los diferentes niveles de la arquitectura de todo el sistema.

En este trabajo se ha realizado un análisis y clasificación de estas aplicaciones para los sectores médico, medioambiental, agrícola e industrial. Igualmente se analizó el desempeño de dos casos de estudio sobre la tecnología actual, y se propuso una arquitectura para los nodos y la red que conforman este tipo de aplicaciones, con la cual será posible abordar problemas de optimización de parámetros como el consumo de potencia y la minimización de los retardos.

Los casos de estudio abordados para la detección de arritmias cardiovasculares en pacientes no críticos, durante una sesión de rehabilitación en espacios cerrados, y la implementación de SDC, permiten concluir que:

- La arquitectura propuesta considera las restricciones propias del campo de aplicación, lo que permitirá encontrar soluciones óptimas a los desafíos que se presentan en el diseño de la red y de los nodos, y se facilitará el desarrollo y validación de las aplicaciones. Además posibilita la cooperación entre los niveles de la arquitectura de la red, para elegir entre diferentes modos de operación en función de los índices de calidad de servicio.
- Se observa como el algoritmo de encaminamiento basado en tablas fijas soportado sobre 802.15.4, cumple con los requerimientos temporales de aplicaciones de diagnóstico de pacientes, como la presentada en el capítulo 3. También como la arquitectura MSP430 presenta un buen rendimiento para la ejecución del caso de estudio considerado.

- La tecnología considerada en este trabajo permite abordar aplicaciones de control de procesos donde los periodos de transmisión sean superiores a 100 ms.
- En el análisis y diseño del sistema distribuido de control, se encontró una gran similitud entre los resultados utilizando métodos formales, simulaciones y la implementación física del sistema. De lo cual es posible concluir que entornos de simulación como Truetime permiten un análisis confiable y rápido de este tipo de aplicaciones, lo que facilita el proceso de diseño de las mismas.
- Para abordar problemáticas de control que requieran periodos de transmisión muy exigentes (inferiores a 100 ms), es recomendable el uso de redes alambradas, como CAN, debido a que con ellas es posible lograr periodos de transmisión menores y más estables que con IEEE 802.15.4 en modo CSMA/CA.

Los resultados de la revisión bibliográfica, las simulaciones y los experimentos, obtenidos durante el desarrollo de la tesina de master han sido presentados en [43], [44] y [45].

5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

El trabajo realizado ha permitido observar que el área de investigación en WSN es bastante amplia. Ante las perspectivas de las aplicaciones, y considerando los desafíos de investigación presentados en el apartado 2.3, se pueden destacar cuatro líneas fundamentales de trabajo futuro:

- Proponer estrategias de cooperación entre los diferentes niveles de la arquitectura del sistema, con el propósito de cumplir con las restricciones impuestas por las aplicaciones. Particularmente se pretende integrar los algoritmos de DVS, planificación de tareas y de control de acceso al medio.
- Desarrollar un middleware que facilite el diseño de aplicaciones en arquitecturas heterogéneas y gestione parámetros de QoS en las aplicaciones.
- Desarrollar un estilo de diseño que integre modelos detallados de los componentes del sistema, en lenguajes que permitan el análisis completo de la aplicación.
- Desarrollar métodos de análisis y compensación de los efectos producidos por las arquitecturas del sistema, sobre los algoritmos de procesamiento de señales y control.

Bibliografía

- [1] <http://www.science.oas.org>
- [2] http://europa.eu/scadplus/scad_es.htm
- [3] <http://econ.worldbank.org>
- [4] <http://www.medtronic.com/your-health/dystonia/device/our-activa-dbs-products/soletra/>
- [5] Benny P L Lo and Guang-Zhong Yang. Key technical challenges and current implementations of body sensor networks. Department of Computing, Imperial College London, UK. <http://www.doc.ic.ac.uk/~benlo/ubimon/BSN.pdf>.
- [6] Onatra W. Informe estadístico IPS ISS, Santafé de Bogotá, 1999. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd26/fulltexts/0704.pdf>
- [7] SAPHE - <http://www.saphe.info/>
- [8] UBIMON - <http://www.ubimon.net>
- [9] Yingshu Li, My T. Thai, Weili Wu. Wireless Sensor Networks and Applications. Springer. 2008.
- [10] Muñoz C., Vargas E. Manejo de Sigatoka negra (*Mycosphaerella Fijiensis* var. *Difformis* Morelet) en plátano cv. “Curraré” en San Carlos, Zona Norte. Tecnología en Marcha 19-1, 2006.
- [11] Rivas G., Rosales F. Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de Musáceas en los trópicos. Actas del Taller “Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de Musáceas”, Guayaquil, Ecuador. 11- 13 de agosto, 2003.
- [12] Langendoen, K. Baggio, A. Visser, O. Murphy Loves Potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International. 2006. ISBN: 1-4244-0054-6.
- [13] Hill. J. System Architecture for Wireless Sensor Networks. Univerisy of California, Berkeley. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003.

- [14] <http://www.tinyos.net/>
- [15] Padmanabhan Pillai, Kang G. Shin. Real-Time Dynamic Voltage Scaling for Low-Power Embedded Operating Systems. Proceedings of the eighteenth ACM symposium on Operating systems principles. Banff, Alberta, Canada. Páginas: 89 – 102, 2001.
- [16] IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Std 802.15.4™-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003).
- [17] Swami A., Zhao Q., Hong Y. Tong L. Wireless Sensor Networks, Signal Processing and Communications Perspectives. Wiley, 2007.
- [18] Mangharam R., Rowe A., Rajkumar R. FireFly: a cross-layer platform for real-time embedded wireless networks. Real-Time Systems. Springer, 2007.
- [19] Dimitrios Hristu-Varsakelis, William S. Levine (Eds.): Handbook of Networked and Embedded Control Systems. Páginas: 677-720. Birkhäuser, 2005.
- [20] Real Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks. Jhon A. Stankovic, Terek Abdelzaher, Chenyang Lu, Lui Sha. Proceedings of the IEEE, 2003.
- [21] IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks. IEEE, 2003.
- [22] Broustis I., Jakllari G., Repantis T., Molle. M. A Comprehensive Comparison of Routing Protocols for Large-Scale Wireless MANETs. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society, 2006.
- [23] Perkins C., Royer E., Das S., Marina M. Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks. IEEE INFOCOM, 2000.
- [24] Feng Xia. QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks. Sensors 2008.
- [25] Marrón P., Minder D, Embedded WiSeNts Consortium, Embedded WiSeNts Research Roadmap, 2006.
- [26] Roadmap on Control of Real-Time Computing Systems: Control for Embedded Systems Cluster, ARTIST2, EU/IST

- [27] Roadmap on Real-Time Techniques in Control System Implementation, Control for Embedded Systems Cluster, ARTIST2,
- [28] Roadmap. Hard Real-Time Development Environments, ARTIST, 2003.
- [29] Roadmap. Adaptive Real-Time Systems for Quality of Service Management, ARTIST, 2003.
- [30] Hall David L., Llinas James. Handbook of multisensor data fusion. CRC Press LLC, 2001.
- [31] Tompkins W. J. Biomedical Digital Signal Processing: C Language Examples and Laboratory Experiments for the IBM PC. Prentice Hall, 1993.
- [32] Pan Jiapu, Tompkins Willis J., A Real-Time QRS Detection Algorithm, IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-32, Pages: 230-236, 1985
- [33] Tompkins W J; Webster J G. Desing of microcomputer-based medical instrumentation. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. Pages: 396-397
- [34] G.C. Walsh, H. Ye, and L. Bushnell. Stability analysis of networked control systems. submitted to American Control Conference, June 1999. <http://citeseer.ist.psu.edu/walsh99stability.html>.
- [35] W. Gregory C, B. Octavian, B. Linda. Asymptotic Behavior of Networked Control Systems. Submitted to Control Applications Conference, International Conference on Control Applications. Hawai'i, USA. August 22-21, 1999.
- [36] T.C. Yang. Networked control system: a brief survey. IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 153, No. 4, July 2006.
- [37] Joao P. Hespanha, Yonggang Xu. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. Proceedings of the IEEE | Vol. 95, No. 1, January 2007.
- [38] Feng-Li Lian, James R. Moyne, and Dawn M. Tilbury. Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. IEEE Control Systems Magazine February 2001
- [39] F. Gene, P. David, W. Michael. Digital Control of Dynamic Systems. Pag: 39-41. Ed Addison-Wesly, 1990
- [40] Wei Zhang. Stability Analysis of Networked Control Systems. PhD Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University. Pag: 99-103. August 2001.
<http://proquest.umi.com/pqdlink?vinst=PROD&attempt=1&fmt=6&startpage=-1&ver=1&vname=PQD&RQT=309&did=726147301&exp=07-16->

2013&scaling=FULL&vtype=PQD&rq=309&TS=1216277588&clientId=19665

- [41] <http://www.control.lth.se/truetime/>
- [42] Reinder J. Bril, Johan J. Lukkien, Rob I. Davis, Alan Burns. Message response time analysis for ideal controller area network (CAN) refuted. TU/e, CS-Report 06-19, May 2006. <http://alexandria.tue.nl/extra1/wskrap/publichtml/200619.pdf>
- [43] D. Martínez, F. Blanes, J. Simo, A. Crespo. Redes de Sensores y Actuadores Inalámbricas: Una Caracterización y Caso de Estudio para Aplicaciones Médicas en Espacios Cerrados. XXIX Jornadas de Automática. Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, España. Septiembre de 2008.
- [44] D. Martínez, F. Blanes, J. Simo, A. Crespo. Evaluación del Comportamiento Temporal de Sistemas Distribuidos de Control Sobre IEEE 802.15.4 y CAN. 21st Symposium on Integrated Circuits and Systems Design – Workshop on Sensor Networks and Applications. Gramado, Brasil. Septiembre de 2008.
- [45] D. Martínez, F. Blanes, J. Simo, A. Crespo. Wireless Sensor and Actuator Networks: Characterization and Case Study for Confined Spaces Healthcare Applications. International Workshop on Real Time Software (RTS'08). Wisla, Poland. Octubre de 2008.